

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Construção Civil

Rafaela Fernanda Gomes Alves

**PRODUÇÃO DE ESPUMA DE POLIURETANO A PARTIR DE RESÍDUOS
AGROINDUSTRIAIS: adsorção de contaminante em meio aquoso e desempenho como
retardante de chama**

Belo Horizonte

2025

Rafaela Fernanda Gomes Alves

**PRODUÇÃO DE ESPUMA DE POLIURETANO A PARTIR DE RESÍDUOS
AGROINDUSTRIAIS: adsorção de contaminante em meio aquoso e desempenho como
retardante de chama**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a Dra. Marys Lene Braga Almeida

Coorientadora: Prof.^a Dra. Carmen Couto Ribeiro

Belo Horizonte

2025

A474p

Alves, Rafaela Fernanda Gomes.

Produção de espuma de poliuretano a partir de resíduos agroindustriais [recurso eletrônico]: adsorção de contaminante em meio aquoso e desempenho como retardante de chama / Rafaela Fernanda Gomes Alves. – 2025.

1 recurso online (118 f.: il., color.): pdf.

Orientadora: Marys Lene Braga Almeida.

Coorientadora: Carmen Couto Ribeiro.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Inclui bibliografia.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Construção civil - Teses. 2. Sustentabilidade - Teses. 3. Aveia - Teses. 4. Arroz - Teses. I. Almeida, Marys Lene Braga. II. Ribeiro, Carmen Couto. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 691(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO RAFAELA FERNANDA GOMES ALVES

Realizou-se no dia 25 de setembro de 2025 às 15:00 horas, na Sala 3401 do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção/DEMC, a defesa de dissertação intitulada PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE ESPUMAS DE POLIURETANO SUSTENTÁVEIS A PARTIR DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS: EFICIÊNCIA DE ADSORÇÃO EM MEIO AQUOSO E DESEMPENHO COMO RETARDANTE DE CHAMA, apresentada por RAFAELA FERNANDA GOMES ALVES, número de registro 2023672206, como requisito para a obtenção do grau de Mestre junto ao Programa de Pós-graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, à seguinte Comissão Examinadora: Dr^a. Marys Lene Braga Almeida (Orientadora), Dr^a. Maria Carmen Couto Ribeiro, Dr^a. Jacqueline Maria Flor e Dr^a. Eliane Ayres.

A Comissão considerou a dissertação:

(X) Aprovada

() Reprovada

Finalizados os trabalhos, foi lavrada a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada eletronicamente pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 25 de setembro de 2025.

Documento assinado digitalmente
gov.br MARYS LENE BRAGA ALMEIDA
Data: 26/09/2025 05:30:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Marys Lene Braga Almeida (Orientadora) – PPGCC/UFMG

Documento assinado digitalmente
gov.br MARIA CARMEN COUTO RIBEIRO
Data: 26/09/2025 08:47:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Maria Carmen Couto Ribeiro (Coorientadora) – PPGCC/UFMG

Documento assinado digitalmente
gov.br JACQUELINE MARIA FLOR
Data: 26/09/2025 09:20:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Jacqueline Maria Flor – DEES/UFMG

Documento assinado digitalmente
gov.br ELIANE AYRES
Data: 26/09/2025 20:36:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Eliane Ayres – REDEMAT/UEMG

Documento assinado digitalmente
gov.br MARIA TERESA PAULINO AGUILAR
Data: 14/10/2025 15:39:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura da Coordenação do PPG



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

FOLHA DE MODIFICAÇÕES

As modificações exigidas na dissertação de RAFAELA FERNANDA GOMES ALVES, número de registro 2023672206, ocorrida em 25 de setembro de 2025, são relacionadas a seguir:

Relacionar resultados obtidos (caracterização e retardância de chama); inserir item – trabalhos futuros.

Obs: as modificações a serem realizadas foram devidamente anotadas pela estudante e por sua orientadora.

O prazo para entrega da versão final do trabalho com as modificações exigidas acima é de:

() 7 (sete) dias

(X) 30 (trinta) dias

() 60 (sessenta) dias

ficando responsável pela verificação destas o professor: Marys Lene Braga Almeida

Documento assinado digitalmente
gov.br RAFAELA FERNANDA GOMES ALVES
Data: 28/09/2025 15:19:15-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Assinatura do Aluno

Documento assinado digitalmente
gov.br MARYS LENE BRAGA ALMEIDA
Data: 26/09/2025 05:26:55-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Assinatura do Professor Responsável

Atesto que as modificações exigidas _____ integralmente cumpridas.

Belo Horizonte, ____ de ____ de 2025.

Documento assinado digitalmente
gov.br MARYS LENE BRAGA ALMEIDA
Data: 04/11/2025 10:25:20-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Assinatura do Professor Responsável

*Este trabalho é dedicado à minha mãe Maria,
meu marido Carlos Eduardo e meu pai
Antônio (in memorian).*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pela vida, pela minha família.

Agradeço especialmente à minha mãe Maria Gomes e ao meu marido Carlos Eduardo, pelo apoio contínuo, por terem caminhado comigo nesta empreitada e me concederem a oportunidade de evoluir por meio da ciência.

À minha orientadora, Prof.^a Marys Lene Braga Almeida, dedico meu sincero agradecimento. Sou grata por seu exemplo de dedicação, pela confiança depositada neste projeto e pela sua constante disponibilidade em proporcionar o melhor desenvolvimento possível.

À Prof.^a Carmen Couto Ribeiro, que demonstrou zelo na coorientação e contribuições relevantes para o desenvolvimento do trabalho.

Ao Prof. Rodrigo Oréfice, pela oportunidade de utilizar o laboratório sob sua coordenação e à Prof.^a Eliane Ayres da UEMG pelo auxílio na qualificação.

À empresa SL Alimentos, pela concessão do resíduo de cinza da casca de aveia, e à empresa Silcca Nobre®, Indiana, por gentilmente conceder o resíduo de cinza da casca de arroz.

Aos representantes do LEPCoM, Laboratório de Engenharia de Polímeros e Compósitos da UFMG pela disponibilização dos equipamentos necessários para execução de ensaios importantes para a pesquisa desenvolvida. Um agradecimento especial aos técnicos do laboratório, que realizaram os ensaios e ofereceram suporte essencial à pesquisa desenvolvida.

Aos professores do Programa de Mestrado em Construção Civil da Escola de Engenharia da UFMG, pela contribuição científica e acadêmica que me proporcionaram por meio do ensino de suas disciplinas.

Ao DER-MG e aos amigos servidores, pelo apoio e por proporcionarem o momento para a capacitação.

“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende.” (Leonardo da Vinci)

RESUMO

A pesquisa teve como objetivo desenvolver materiais inovadores por meio da incorporação de cinza da casca de aveia (CA) e cinza da casca de arroz (CCA) em matriz polimérica de espuma de poliuretano (PU) com poliol de origem vegetal. O trabalho concentrou-se na capacidade de sorção de azul de metileno e na avaliação da resistência à propagação de chama. As imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostraram que a CA apresenta partículas alongadas e porosas, enquanto a CCA possui formato irregular com aglomeração das partículas e poros. A difratometria de raios X (DRX) indicou estrutura predominantemente cristalina em ambas as cinzas, com presença predominante de cristobalita (picos em $2\theta = 21,21^\circ$ e $21,87^\circ$). Foram sintetizadas uma amostra de poliuretano (PU Controle) e seis formulações de compósitos poliméricos: três contendo 5%, 15% e 25% de CA (PUCA5, PUCA15 e PUCA25) e três contendo 2,5%, 7,5% e 12,5% de uma combinação de CA e CCA (PUMIX5, PUMIX15 e PUMIX25). A incorporação das cinzas à matriz PU pouco alterou a estrutura amorfa da PU Controle, pois os compósitos exibem o pico de difração amplo próximo a $2\theta = 20^\circ$. A PU Controle apresentou uma estrutura altamente porosa, composta por poros abertos interligados de dimensões distintas. As imagens de MEV dos compósitos, evidenciaram que as partículas dos resíduos foram depositadas nas paredes das células dos materiais, contribuindo para o aumento aparente da espessura média dessas paredes. Os espectros de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) dos materiais revelaram as bandas características do poliuretano, incluindo a banda em 3311 cm^{-1} (estiramento N–H). Observou-se que a PU Controle apresentou maior intensidade nessa região em comparação aos compósitos, sugerindo que a incorporação das cinzas modificou o padrão de interações por ligações de hidrogênio, resultando em menor quantidade de grupos N–H livres nos compósitos. As vibrações de grupos (Si–O–Si) foram observadas nos compósitos de poliuretano. A estabilidade térmica, evidenciada pela termogravimetria, aumentou até 6% com a incorporação de CA. A PU controle teve um ângulo de contato de $109,01^\circ$. A PUCA25 teve um ângulo de contato de $80,23^\circ$ e a PUMIX25 teve a sua hidrofobicidade praticamente inalterada, com um ângulo de contato de $109,64^\circ$. O estudo de sorção do corante azul de metileno (MB) em meio aquoso foi realizado nas concentrações de 10; 20 e $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ dos materiais desenvolvidos. A PU Controle exibiu eficiência de sorção satisfatória na concentração de $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (38%), com capacidade de remoção de $15\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. A PUCA25 apresentou desempenho superior sob as mesmas condições, atingindo capacidade adsorptiva de $19\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (45%). Na concentração inicial de $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de azul de metileno, a PUMIX25 demonstrou o melhor desempenho, chegando a uma eficiência de remoção de 41% ($5\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$), superando a PU Controle (22,45%). Entre as formulações avaliadas, o PUMIX15 apresentou a maior resistência ao avanço da chama, destacando-se como o mais eficaz entre as amostras testadas.

Palavras-chave: espuma de poliuretano; cinza da casca de aveia; cinza da casca de arroz; sorção; azul de metileno; retardante de chama; sustentabilidade.

ABSTRACT

This research aimed to develop innovative materials by incorporating oat husk ash (OHA) and rice husk ash (RHA) into a polyurethane (PU) foam polymer matrix with a plant-based polyol. The work focused on methylene blue sorption capacity and flame propagation resistance. Scanning electron microscopy (SEM) images showed that OHA has elongated and porous particles, while RHA has an irregular shape with particle agglomeration and pores. X-ray diffractometry (XRD) indicated a predominantly crystalline structure in both ashes, with a predominant presence of cristobalite (peaks at $2\theta = 21.21^\circ$ and 21.87°). A polyurethane sample (Control PU) and six polymer composite formulations were synthesized: three containing 5%, 15%, and 25% CA (PUCA5, PUCA15, and PUCA25) and three containing 2.5%, 7.5%, and 12.5% of a combination of CA and CCA (PUMIX5, PUMIX15, and PUMIX25). The incorporation of ash into the PU matrix did little to alter the amorphous structure of the Control PU, as the composites exhibit a broad diffraction peak near $2\theta = 20^\circ$. The Control PU presented a highly porous structure, composed of interconnected open pores of different dimensions. SEM images of the composites showed that the residue particles were deposited on the cell walls of the materials, contributing to the apparent increase in the average thickness of these walls. Fourier transform infrared (FTIR) spectra of the materials revealed the characteristic bands of polyurethane, including the band at 3311 cm^{-1} (N–H stretching). The control PU showed greater intensity in this region compared to the composites, suggesting that the incorporation of ash modified the pattern of hydrogen bonding interactions, resulting in a smaller quantity of free N–H groups in the composites. Group vibrations (Si–O–Si) were observed in the polyurethane composites. Thermal stability, evidenced by thermogravimetry, increased by up to 6% with the incorporation of CA. The control PU had a contact angle of 109.01° . PUCA25 had a contact angle of 80.23° , and PUMIX25 had its hydrophobicity practically unchanged, with a contact angle of 109.64° . The sorption study of methylene blue (MB) dye in aqueous medium was carried out at concentrations of 10, 20, and $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ of the developed materials. The Control PU exhibited satisfactory sorption efficiency at a concentration of $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (38%), with a removal capacity of $15\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. PUCA25 showed superior performance under the same conditions, reaching an adsorptive capacity of $19\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (45%). At an initial concentration of $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ of methylene blue, PUMIX25 demonstrated the best performance, reaching a removal efficiency of 41% ($5\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$), surpassing the Control PU (22.45%). Among the formulations evaluated, PUMIX15 showed the highest resistance to flame advance, standing out as the most effective among the samples tested.

Keywords: polyurethane foam; oat husk ash; rice husk ash; sorption; methylene blue; flame retardant; sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Levantamento no Google Acadêmico sobre a utilização de espumas de poliuretano com resíduos agroindustriais como retardantes de chama.....	23
Figura 2 - Levantamento no Google Acadêmico sobre a utilização de espuma de poliuretano com incorporação de resíduos agroindustriais na sorção de azul de metileno em meio aquoso.	23
Figura 3- Produção de aveia por região.	25
Figura 4- Composição química parcial da casca de aveia.	26
Figura 5- Aproveitamento da casca de aveia.	27
Figura 6 - Difração de raios X de cinza da casca de aveia.	29
Figura 7 - Produção de combustíveis para geração de energia, a partir de leitos gaseificadores.	30
Figura 8-Termogravimetria de cinza da casca de aveia calcinada a 500°C, 650°C, 800 °C.....	31
Figura 9 - Casca de arroz.	32
Figura 10 - Produção de arroz por região.	33
Figura 11 - Aproveitamento do resíduo da casca de arroz.	33
Figura 12 - Difração de raios X de cinza da casca de arroz e sílica ativa.	34
Figura 13- Espectroscopia na região do infravermelho para amostra de CCA e da sílica comercial.	34
Figura 14- Curvas de TG e DTG da CCA	35
Figura 15- Fatores que afetam os recursos hídricos.	36
Figura 16- Tipos de poluentes em águas superficiais e subterrâneas.....	36
Figura 17 - Estrutura molecular do azul de metileno.	38
Figura 18-Efeitos de toxicidade e estratégias de remoção de azul de metileno.	39
Figura 19- Isoterma de Adsorção.	41
Figura 20 - Representação do Uretano.	50
Figura 21 - Reações entre o isocianato com grupos uretano e ureia, dimerização e trimerização.	51
Figura 22 - Estruturas químicas de poliéter poliol.	52
Figura 23 - Representação do ângulo de contato.....	53
Figura 24 - Termogravimetria da PUF, PUF15, PUF25, PUF50, PUF80 e PUF90 (incorporado o resíduo de catalisador da indústria de petróleo) sob atmosfera de N ₂ , razão de aquecimento de 10°C min ⁻¹ até 700°C e vazão de gás 30 ml/min ⁻¹	54
Figura 25 – Exemplo dos mecanismos de ação dos FRs.	56
Figura 26 - Etapas do processo de queima em polímeros.	58
Figura 27 - Resíduos usados no estudo: (a) cinza da casca da aveia; (b) cinza da casca de arroz.	60
Figura 28- Produção das amostras: (a) Espuma PU Controle; (b) Espumas de PU incorporadas com a CA; (c) Espumas de PU incorporadas com CA e CCA.	62
Figura 29- Esquema do processo de adsorção de azul de metileno em espumas de PU.....	66
Figura 30 - Ensaio de inflamabilidade para materiais de espuma de baixa densidade.....	67
Figura 31 – Espuma controle e compósitos sintetizados: (a) PU Controle; (b) compósito PUCA5; (c) compósito PUCA15; (d) compósito PUCA25; (e) compósito PUMIX5; (f) compósito PUMIX15; (g) compósito PUMIX25.	68
Figura 32- Microscopia eletrônica de varredura na CA com ampliações de: (a) 30x, (b) 100x, (c) 150x, (d) 1000x.	70
Figura 33- Microscopia eletrônica de varredura na CA com ampliações de: (a) 1000x, (b) 2500x.	71

Figura 34 - Microscopia eletrônica de varredura da PU Controle com ampliações de: (a) 30x, (b) 150x.	72
Figura 35 - Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos: PUCA5 com ampliações de: (a) 30x, (b) 150x.	72
Figura 36 - Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos: PUCA15 com ampliações de: (a)30x, (b)150x, (c)1000x.....	73
Figura 37 - Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos: PUCA25 com ampliações de: (a) 30x, (b) 150x.	74
Figura 38- Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos: PUMIX5 com ampliações de: (a) 30 e (b) 150x	75
Figura 39- Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos: PUMIX15 com ampliações de: (a) 30x, (b) 150x, (c) 500x.....	76
Figura 40- Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos: PUMIX25 com ampliações de: (a) 30x, (b)150x.	77
Figura 41- Difractogramas de raio X do resíduo da CA, CCA e seus compósitos.	78
Figura 42 - Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR): (a) resíduo CA, espuma e dos compósitos de CA; (b) resíduo de CCA e dos compósitos de CA com o CCA.	80
Figura 43 - Análise de termogravimetria (TG) e termogravimetria derivada (DTG) da espuma de poliuretano e dos compósitos de PUCA.	83
Figura 44-Análise de termogravimetria (TG) e termogravimetria derivada (DTG) dos compósitos de PUMIX.	84
Figura 45- Ângulo de contato: (a) PU Controle, (b) PUCA5, (c) PUCA15, (d) PUCA25, (e) PUMIX5, (f) PUMIX15, (g) PUMIX25.....	88
Figura 46- Curva de calibração para o azul de metileno.	89
Figura 47- Amostras de PU Controle e os compósitos em cubos (a) e imersos no azul de metileno na concentração de 50 mg/L (b).	90
Figura 48- Influência da concentração inicial na remoção do azul de metileno, à temperatura ambiente e pH natural: (a) PU Controle e compósitos PUCA; (b) Compósitos PUMIX.....	96
Figura 49- Amostras das espumas analisadas: (a) PU Controle; (b) PUCA5; (c) PUCA15; (d) PUCA25, (e) PUMIX5, (f) PUMIX15, (g) PUMIX25.....	98
Figura 50- Equipamento utilizado para o Ensaio de Flamabilidade das amostras.	98
Figura 51-Fragmentos Incandescentes das Amostras após o Ensaio de Flamabilidade.....	99
Figura 52- Fragmentos das Amostras Coletados no Algodão, abaixo do suporte.....	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção da aveia.....	25
Tabela 2 - Composição química de cinza da casca de aveia e casca de arroz resultantes do ensaio de fluorescência de raio X.	28
Tabela 3-Composição da casca de arroz.....	32
Tabela 4- Produção do arroz.....	32
Tabela 5- Algumas propriedades físico-químicas do MB	38
Tabela 6- Características da sorção química (quimissorção) e sorção física (fisissorção).....	40
Tabela 7- Modelos dos estudos de cinética de adsorção.	45
Tabela 8- Função que considera o resíduo para validação dos modelos adotados de sorção ..	46
Tabela 9- Parâmetros da análise de variância (ANOVA) com um fator.	47
Tabela 10- Parâmetros da análise de variância (ANOVA) fator duplo sem repetição.....	47
Tabela 11 - Matriz polimérica de PU com preenchimentos de origem natural.....	49
Tabela 12- Faixas de números de onda por grupos funcionais na região de radiação infravermelho.....	81
Tabela 13 - Informações obtidas a partir da termogravimetria dos materiais estudados.	85
Tabela 14 - Resultados do espectro de absorção para determinar a curva de calibração.	89
Tabela 15- Capacidade de sorção de azul de metileno pela espuma PU Controle e os compósitos na concentração de 10 mg/L.	91
Tabela 16- Capacidade de sorção de azul de metileno pela espuma PU Controle e os compósitos na concentração de 20 mg/L.	92
Tabela 17- Capacidade de sorção de azul de metileno pela espuma PU Controle e os compósitos na concentração de 50 mg/L.	93
Tabela 18- Resultado da análise de variância (ANOVA) com o teor de CA para a concentração de 50 mg/L.....	94
Tabela 19-Resultado da análise de variância (ANOVA) com o teor de CA e CCA para a concentração de 50 mg/L.....	94
Tabela 20- Resultado da análise de variância (ANOVA) com concentrações de 10 mg/L, 20mg/L e 50 mg/L.	95
Tabela 21- Resultado da análise de Tukey de comparações entre as variâncias.	95
Tabela 22 - Resultados da UL-94(HB) para as amostras PU Controle, PUCA5, PUCA15 e PUCA25.	99
Tabela 23 - Informações obtidas a partir do ensaio de flamabilidade dos materiais estudados (HBF, HF-1, HF-2).....	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CA	Cinza da casca de aveia
CCA	Cinza da casca de arroz
CGE-MG	Controladoria-Geral do Estado de Minas Gerais
DRX	Difratometria de raios X
DTG	Termogravimetria derivada
EDS	Espectroscopia de raios X por dispersão de energia
ESG	Environmental, Social and Governance
FRX	Fluorescência de raios X
FTIR	Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier
Gt	Gigatonelada
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PU	Poliuretano
Seinfra-MG	Secretaria de Estado de Infraestrutura e Mobilidade de Minas Gerais
TG	Termogravimetria
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
UL	Underwriter's Laboratories

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	<u>17</u>
2 OBJETIVOS	<u>21</u>
2.1 Objetivo geral	<u>21</u>
2.2 Objetivos específicos.....	<u>21</u>
2.2.1 Realizar uma revisão sistemática da literatura sobre a incorporação de cinza da casca de aveia e cinza da casca de arroz em espumas de poliuretano;	<u>21</u>
2.2.2 Caracterizar o resíduo de cinza da casca de aveia e de cinza da casca de arroz por meio das análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV), difratometria de raios X (DRX), espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR);.....	<u>21</u>
2.2.3 Sintetizar a PU Controle e compósitos de resíduos de cinza da casca de aveia com teores de 5%, 15% e 25% em relação aos polióis, incorporado ao poliuretano;	<u>21</u>
2.2.4 Sintetizar compósitos da combinação dos resíduos de cinza da casca de aveia com resíduo de cinza da casca de arroz, com teores de 2,5%, 7,5% e 12,5% de cada resíduo em relação aos polióis, incorporados ao poliuretano;	<u>21</u>
2.2.5 Caracterizar a espuma de poliuretano (PU Controle) e os compósitos produzidos de CA (PUCA5, PUCA15 e PUCA25) e da combinação de CA com o CCA (PUMIX5, PUMIX15 e PUMIX25) utilizando diferentes técnicas (microscopia eletrônica de varredura, difratometria de raios X, espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier, termogravimetria e ângulo de contato) para determinar suas propriedades estruturais e químicas;.....	<u>21</u>
2.2.6 Avaliar os processos de sorção de azul de metileno em meio aquoso utilizando espuma de poliuretano (PU Controle) e compósitos sintetizados;	<u>21</u>
2.2.7 Investigar a inflamabilidade da espuma de poliuretano e dos compósitos sintetizados por meio da norma UL-94 para determinar sua resistência à propagação da chama nas edificações.	<u>21</u>
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	<u>22</u>
3.1 Relevância científica do tema.....	<u>22</u>
3.2 O resíduo de cinza da casca de aveia (CA)	<u>25</u>
3.3 O resíduo de cinza da casca de arroz (CCA).....	<u>31</u>
3.4 Contaminação dos recursos hídricos	<u>35</u>
3.5 Origens e consequências da contaminação pelo corante azul de metileno (AM)	<u>37</u>
3.6 Comportamento de sorção.....	<u>39</u>
3.6.1 Processos de equilíbrio, modelos de isoterma e cinética de sorção	<u>41</u>
3.7 Parâmetros de validação	<u>45</u>

3.8 Materiais compósitos.....	48
3.8.1 Materiais compósitos voltados para a sustentabilidade.....	48
3.8.2 Espumas de Poliuretano	49
3.8.3 Ângulo de contato nos compósitos de poliuretano.....	53
3.8.4 Desempenho térmico de compósitos à base de poliuretano	53
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	60
4.1 Materiais.....	60
4.2 Métodos.....	61
4.3 Preparação das amostras.....	62
4.4 Caracterização das amostras produzidas	63
4.4.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS)	63
4.4.2 Difratomia de raios X (DRX).....	64
4.4.3 Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).....	64
4.4.4 Termogravimetria (TG).....	65
4.4.5 Ângulo de Contato	65
4.4.6 Ensaios de sorção do Azul de Metileno.....	65
4.4.7 Ensaios de inflamabilidade.....	67
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
5.1 Caracterização dos Materiais.....	68
5.1.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva de Raios-X (EDS)	69
5.1.2 Difratomia de raios X (DRX).....	77
5.1.3 Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).....	78
5.1.4 Termogravimetria (TG) e Termogravimetria derivada (DTG)	81
5.1.5 Ângulo de contato	86
5.2 Curva de Calibração	88
5.3 Resultados de desempenho.....	89
5.3.1 Capacidade de sorção	89
5.3.2 Inflamabilidade.....	97
5.3.2.1 Ensaio da norma UL94 HB	99
5.3.2.2 Ensaio da norma UL94 HB, HF1, HF-2.....	99

6 CONCLUSÕES	<u>104</u>
REFERÊNCIAS	<u>106</u>

INTRODUÇÃO

Em 2015, a ONU estabeleceu 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), com o objetivo de promover a industrialização, a inovação e infraestruturas sustentáveis até 2030. No Brasil, para incentivar esses objetivos, a Rede Brasil do Pacto Global foi criada em 2003 (CGE-MG, 2022).

No estado de Minas Gerais, a Secretaria de Estado de Infraestrutura (Seinfra, 2024), também está comprometida com o desenvolvimento sustentável. A secretaria estrutura projetos como o Rodoanel de Belo Horizonte, utilizando as melhores práticas de *Environmental, Social and Governance (ESG)*, ou Governança Ambiental e Social

A agricultura está sendo incentivada a tornar-se cada vez mais produtiva e sustentável, no intuito de minimizar os impactos negativos ao meio ambiente e maximizar os impactos positivos na economia e na sociedade. A partir disso, surgem desafios e oportunidades para o desenvolvimento de novos sistemas e produção. O volume mundial de resíduos secos de biomassa vegetal equivale a 140 Gt. A tecnologia e a estratégia, aplicadas adequadamente, previnem possíveis passivos ambientais advindos do não aproveitamento dos resíduos (VAZ JR., 2020)

Por um lado, o setor de agronegócios é responsável pelo aumento na geração desses resíduos oriundos das atividades agroindustriais, acarretando preocupação com o meio ambiente; por outro lado, criam-se oportunidades de negócios com produtos que detêm valor energético ou econômico. Assim, os benefícios sociais da retirada de destinações incorretas dos resíduos agroindustriais contribuem para a melhoria na saúde pública e no controle da poluição (Ipea, 2013).

Nesse contexto, é oportuno observar que, em 2022, a produção mundial de aveia foi de aproximadamente 26,3 milhões de toneladas, com cerca de 54,2% dessa produção concentrada na Europa. No Brasil, foi produzido 1,3 milhão de toneladas de aveia (FAO, 2024), sendo que, em média, de 25% a 35% da massa do grão é a casca (MC. MULLEN, 2000). O processamento de aveia gera aproximadamente de 2% a 5% de resíduos secundários, provenientes não somente do descarte que é feito por seleção da qualidade do padrão de produtos, mas também da limpeza dos equipamentos, do resíduo do polimento do grão de aveia e do pó obtido no processamento do produto (DEANE; COMMERS, 1986).

Varanda *et al.* (2018) relatam alternativas de incorporação de resíduos da casca de aveia (*Avena sativa*) e madeira de *Pinus elliotti* na produção de painéis aglomerados de densidade homogênea, que estão sujeitos à pressão com adesivos de poliuretano à base de óleo de mamona

e de melamina formaldeído. Ruviaro *et al.* (2023) acrescentam opções para a adequada destinação da casca de aveia com o potencial uso da cinza da sua biomassa como material cimentício suplementar em pastas de cimento Portland.

Já Al-Naiema *et al.* (2015) citam vantagens ambientais com a coqueima de 50% de cascas de aveia com carvão, por reduzir a emissão de poluentes atmosféricos, sendo um novo combustível potencial para geração de energia.

A produção mundial de arroz em 2023 correspondeu a cerca de 800 milhões de toneladas, com cerca de 90% dessa produção concentrada na Ásia. No Brasil, foram produzidos 10 milhões de toneladas de arroz (FAO, 2025), sendo que, em média, 22% da massa do grão é a casca (ICTA-UFRGS, 2025), que é composta de 11% de cinza (LOPES *et al.* 2017). Encontram-se relatos na literatura de Phan *et al.* (2019), Son *et al.* (2020) e Pereira *et al.* (2024) sobre alternativas de incorporação de resíduos da casca de arroz em espumas de poliuretano.

Sabe-se que as práticas agrícolas constituem uma fonte considerável de contaminação dos aquíferos. Isso ocorre porque o uso de fertilizantes e de águas residuais tratadas na irrigação contribui, em certa medida, para a degradação da qualidade tanto das águas subterrâneas quanto das superficiais (ABDELWAHEB *et al.* 2019). Zhang *et al.* (2015) também informam que a poluição das águas é intensificada pelo despejo de corantes, e Zanoni *et al.* (2016) estimam que bilhões de toneladas de águas residuais contendo corantes entram nos sistemas de água todos os anos.

Os resíduos agrícolas podem ser usados como combustível em fornos na produção do cimento, e as cinzas resultantes do processo têm potencial na síntese do cimento misturado, podendo ser adicionadas ao clínquer e representando, assim, alternativa sustentável para obtenção do concreto. A aplicação da casca de aveia também foi observada em estudos, como de Varanda *et al.* (2018), para produzir painéis de partículas constituídos de *Eucalyptus grandis* e casca de aveia, e de Rosa *et al.* (2018), como compósito para revestimento de paredes de alvenaria.

Já a casca de arroz foi relatada em estudos, como o de Santos *et al.* (2019), em que se observa o potencial uso da cinza como material cimentício suplementar, e de Almeida *et al.* (2024), que desenvolveram espumas e compósitos de poliuretano incorporando resíduos de cinzas de casca de arroz e de catalizador petróleo para adsorver o pesticida Mancozeb da água. Zhang *et al.* (2015) realizaram a remoção do azul de metileno de solução aquosa por adsorção em pirofilita, e Quansah *et al.* (2020) utilizaram a casca de arroz para a remoção desse corante. Asweisi e Algheryani (2021) relataram o mecanismo e os estudos cinéticos da adsorção de metileno azul em espuma comercial de poliuretano.

Em 2023, a espuma de poliuretano movimentou o mercado global em US\$ 49,5 bilhões e, para 2028, há projeções de que atinja o valor de US\$ 67,8 bilhões. Uma das principais razões para esse crescimento se deve à demanda do polímero como solução energeticamente eficiente, pois é um excelente isolante térmico usado na construção civil (MARKED RESEARCH FIRM, 2024). Nessa área, são promissoras as possibilidades de emprego de compósitos tanto na síntese de espumas de poliuretano, por meio da produção de polióis de óleos vegetais de soja, palma e linhaça, conforme estudos de Vieira *et al.* (2023), quanto na interação de partículas de sílica na matriz de poliuretano, de acordo com estudos desenvolvidos por Behnam *et al.* (2018).

A aplicação desses compósitos também pode ser recomendada para atuarem como sistemas de filtração de impurezas e contaminantes em infraestruturas em geral ou como filtros de poluentes presentes na água potável. Além disso, destaca-se que eles permitem a remoção de compostos orgânicos e inorgânicos indesejados em fontes de água, conforme apontado por pesquisas realizadas por Almeida *et al.* (2024), Adesemuyi *et al.* (2020), Abdelwaheb *et al.* (2019), Hoang *et al.* (2018), Almeida (2017) e Kumari *et al.* (2016). Portanto, a incorporação de cinza da casca de aveia e de cinza da casca de arroz, no poliuretano, ao seguir essa tendência, mostra-se igualmente auspiciosa.

A *World Fire Statistics* (2024) constatou que 23,1% dos incêndios ocorreram em prédios residenciais no ano de 2022. Com efeito, o risco de incêndio em edificações é crescente nas últimas décadas, e os custos associados a esses eventos impulsionam o uso de compósitos ambiental e economicamente sustentáveis na proteção térmica de edificações. O potencial da utilização da casca de aveia como material isolante térmico nas edificações foi citado por Varanda *et al.* (2018) na fabricação de painéis de madeira.

Em seus trabalhos, Behnam *et al.* (2018) apresentaram soluções de compósitos com materiais ricos em sílica como retardante de chama; Jahn *et al.* (2020) separaram a hemicelulose da casca de aveia e usaram também como retardante de chama; e Pereira (2023) e Son *et al.* (2020) investigaram a propriedade de retardância à propagação de chama de compósitos de poliuretano incorporados com a cinza da casca de arroz.

Embora o uso de cinza da casca de aveia já tenha sido objeto de estudos, a revisão da literatura realizada neste trabalho não identificou registros de sua aplicação em espumas de poliuretano. A cinza da casca de aveia é rica em sílica, conforme relatado por Bellaver (2019) e Queiroz (2020), tal como a cinza de casca de arroz. Tipachan *et al.* (2020) relataram que a incorporação sílica em polímeros melhora sua estabilidade térmica e resistência ao fogo, pois forma uma camada protetora de gel vítreo na superfície durante a combustão.

Os estudos de Assi *et al.* (2020) mostraram que a cinza da casca de arroz possui ótimas

propriedades absorventes e isolantes, podendo ser aplicada em siderúrgicas, na absorção de óleo em superfícies duras, e em residências, como isolantes. Elgarahy *et al.* (2025) relataram a utilização de espuma de poliuretano modificada para remediação do azul de metileno e proteção acústica.

Nesse contexto, o aproveitamento desses resíduos, visando ao desenvolvimento de técnicas sustentáveis aplicáveis a compósitos de espumas de poliuretano, representa uma abordagem inovadora, em consonância com as diretrizes de inovação tecnológica voltadas à engenharia.

OBJETIVOS

1.1 Objetivo geral

O objetivo desta pesquisa é sintetizar espumas sustentáveis de poliuretano e seus compósitos, por meio da incorporação de resíduos agroindustriais — cinza da casca de aveia e cinza da casca de arroz —, visando avaliar o desempenho desses materiais tanto na proteção térmica de edificações quanto na remoção de contaminante orgânico presente em água.

1.2 Objetivos específicos

1.2.1 Realizar uma revisão sistemática da literatura sobre a incorporação de cinza da casca de aveia e cinza da casca de arroz em espumas de poliuretano;

1.2.2 Caracterizar o resíduo de cinza da casca de aveia e de cinza da casca de arroz por meio das análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV), difratometria de raios X (DRX), espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR);

1.2.3 Sintetizar a PU Controle e compósitos de resíduos de cinza da casca de aveia com teores de 5%, 15% e 25% em relação aos polióis, incorporado ao poliuretano;

1.2.4 Sintetizar compósitos da combinação dos resíduos de cinza da casca de aveia com resíduo de cinza da casca de arroz, com teores de 2,5%, 7,5% e 12,5% de cada resíduo em relação aos polióis, incorporados ao poliuretano;

1.2.5 Caracterizar a espuma de poliuretano (PU Controle) e os compósitos produzidos de CA (PUCA5, PUCA15 e PUCA25) e da combinação de CA com o CCA (PUMIX5, PUMIX15 e PUMIX25) utilizando diferentes técnicas (microscopia eletrônica de varredura, difratometria de raios X, espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier, termogravimetria e ângulo de contato) para determinar suas propriedades estruturais e químicas;

1.2.6 Avaliar os processos de sorção de azul de metileno em meio aquoso utilizando espuma de poliuretano (PU Controle) e compósitos sintetizados;

1.2.7 Investigar a inflamabilidade da espuma de poliuretano e dos compósitos sintetizados por meio da norma UL-94 para determinar sua resistência à propagação da chama nas edificações.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.3 Relevância científica do tema

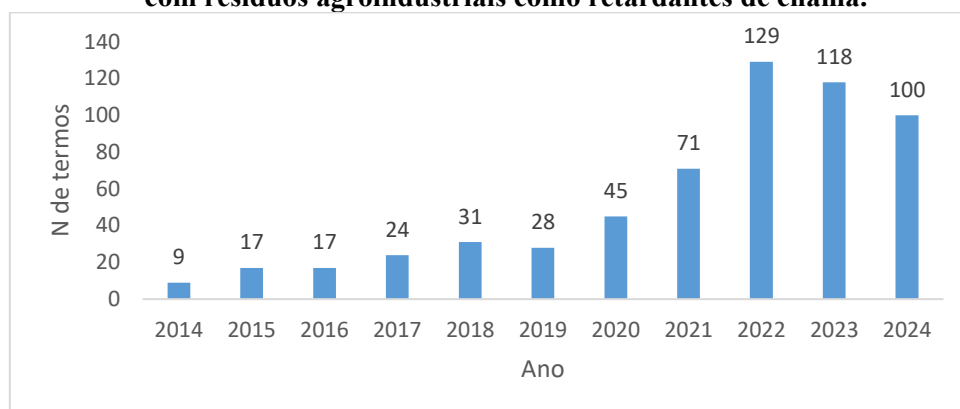
Esta revisão bibliográfica tem como fundamento explorar a contextualização de cinza da casca de aveia e cinza da casca de arroz, dos materiais compósitos; a produção de espumas de poliuretano; as propriedades térmicas dos PUs e compósitos; os processos de sorção dos compósitos; e os métodos de caracterização pertinentes ao estudo.

No próximo decênio, o agronegócio mostra-se promissor e deverá representar uma taxa de expansão anual de 2,4% no Brasil (MAPA, 2023). A previsão da produção de aveia e arroz para os anos de 2023/2024 é estimada em 1.145,5 e 10.791,0 toneladas, respectivamente, de acordo com o Conab (2024), portanto grande quantidade de resíduos industriais serão descartados, ocasionando grande impacto ambiental. O aproveitamento de resíduos agroindustriais diminui esses impactos acarretados pelo descarte incorreto, haja vista que eles são interessantes matérias-primas para o desenvolvimento de produtos com potencial valor agregado.

A utilização de espuma de poliuretano com a incorporação de resíduos agroindustriais como retardante de chama está ilustrada na Figura 1, que evidencia o crescimento desse tema nos últimos 10 anos. Observa-se que, em 2022 e 2023, houve um aumento significativo no número de pesquisas. O desenvolvimento de compósitos de poliuretano tem crescido tanto em relação ao tempo __ 90 anos¹ decorridos desde a primeira síntese do polímero de PU __ quanto à versatilidade de seu uso.

¹ Otto Bayer professor alemão desenvolveu a primeira fibra de poliuretano em 1937 (SZYCHER, 2012)

Figura 1- Levantamento no Google Acadêmico sobre a utilização de espumas de poliuretano com resíduos agroindustriais como retardantes de chama.



Fonte: Autora, 2024.

Na Figura 2, a seguir, está ilustrada a utilização de espuma de poliuretano com a incorporação de resíduos agroindustriais na sorção azul de metileno em meio aquoso.

Figura 2 - Levantamento no Google Acadêmico sobre a utilização de espuma de poliuretano com incorporação de resíduos agroindustriais na sorção azul de metileno em meio aquoso.



Fonte: Autora, 2024.

A realização de pesquisas científicas acerca desses temas é impulsionada pelos apelos da Unesco (2022), que visam a abordagens de construções inteligentes das edificações, a fim de minimizar os eventos negativos ao meio ambiente, sobretudo aos corpos hídricos, que culminaram em prejuízos ao Brasil nos últimos anos. O cuidado com a preservação ambiental, de fato, é evidente. A Seinfra (2024), por exemplo, está mapeando os impactos ambientais, de governança e sociais dos projetos do Rodoanel Metropolitano e do Programa de Concessões Rodoviárias, e adicionando cláusulas nos contratos que exigem o cumprimento de padrões ESG.

Desse modo, a futura concessionária deverá se comprometer com os Objetivos de

Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela ONU, visando alcançar melhores práticas de sustentabilidade. A CGE-MG (2022) destaca o desenvolvimento de iniciativas relacionadas à sustentabilidade ambiental, governança e responsabilidade social, como a orientação de servidores do órgão, de forma a incentivar que instituições, órgãos e entidades aumentem sua responsabilidade social em suas rotinas.

Nesse contexto, é importante considerar os estudos de Varanda *et al.* (2018), Bellaver (2019) e Rosa *et al.* (2018), que citam a aplicação da casca de aveia na produção de painéis de partículas constituídos de *Eucalyptus grandis*, além de seu uso como material cimentício suplementar e como compósito para revestimento de paredes de alvenaria, respectivamente.

Já os estudos de Tipachan *et al.* (2020) relatam as propriedades retardantes de chama e estabilidade térmica do ácido polilático preenchido com hidróxido duplo em camadas e sílica de cinza da casca de arroz. Son *et al.* (2020) investigaram a inserção de retardantes de chama fosfóricos em compósitos de poliuretano incorporados com cinza da casca de arroz, e Jahn *et al.* (2020) utilizaram hemiceluloses como exemplo para recuperação holística de resíduos agrícolas, as quais foram testadas como aditivos de papel, retardantes de chama e agentes de flotação. Attia *et al.* (2015) analisaram a inflamabilidade e as propriedades térmicas do uso da casca de arroz *in natura* adicionada ao poliestireno.

Ferraz e Yuan (2020) recuperaram as cascas de aveia como carvão ativado, utilizando o adsorvente produzido para remoção da matéria orgânica do chorume de aterro sanitário, e Vafakish *et al.* (2025) avaliaram a eficácia do biochar de casca de aveia e o biochar de casca de ervilha, fabricados em diferentes temperaturas, na remoção de azul de metileno da água. O estudo da aplicação de CA em espuma de poliuretano e, principalmente, como retardante de chama ainda não foi relatado.

Diante do cenário que envolve as questões ambientais globais, Hao *et al.* (2023) revelam que uma área importante de estudo na engenharia de construção é o desenvolvimento de materiais sustentáveis, uma vez que visam reduzir as emissões de dióxido de carbono, por meio do uso de ingredientes mais ecológicos e da reciclagem de resíduos. Os autores ainda afirmam que a economia circular é uma abordagem interessante para obter esses objetivos, já que preconiza a reutilização, o reaproveitamento e a reciclagem de materiais existentes pelo maior tempo possível. Tal modelo de produção e consumo tenciona diminuir o desperdício e promover a sustentabilidade ambiental na indústria da construção.

1.4 O resíduo de cinza da casca de aveia (CA)

A aveia (*Avena sp.*) é um cereal pertencente à família das gramíneas. Comparada ao trigo, seu cultivo é considerado recente, remontando a cerca de 1000 a.C. A planta é cultivada principalmente em climas frios e úmidos, o que explica a predominância de seu cultivo em regiões como Rússia, Canadá, Estados Unidos, Austrália e Finlândia, onde essas condições são favoráveis. No Brasil, o estado de Santa Catarina e o Paraná são os principais cultivadores da aveia (TAKEITI, 2024).

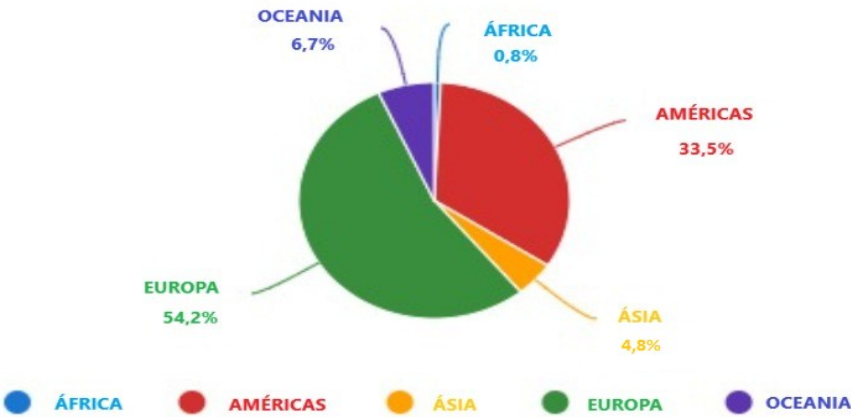
Em 2022, a produção mundial de aveia foi aproximadamente de 26,3 milhões de toneladas, em uma área de aproximadamente 9,5 milhões de hectares. Na Europa, na América do Sul e no Brasil, foram produzidos cerca de 14,3 milhões de toneladas em uma área de cerca de 5,07 milhões de hectares; 2,6 milhões de toneladas em uma área de 1,07 milhão de hectares; e 1,3 milhão de toneladas em uma área de cerca de 552 mil hectares, respectivamente, conforme se verifica na Tabela 1 e Figura 3 (FAO, 2024), a seguir. Em 2023, no Brasil, foram produzidas 984,1 mil toneladas em uma área de 520 mil hectares (CONAB, 2024).

Tabela 1 - Produção da aveia.

Região/Pais	Área (milhões hectares)	Produção (milhões – toneladas métricas)
	2022	2022
Brasil	0,552	1,296
América do Sul	1,070	2,675
Europa	5,069	14,312
Mundial	9,508	26,385

Fonte: Adaptado, FAO, 2024.

Figura 3- Produção de aveia por região.



Fonte: Adaptado, FAO, 2024.

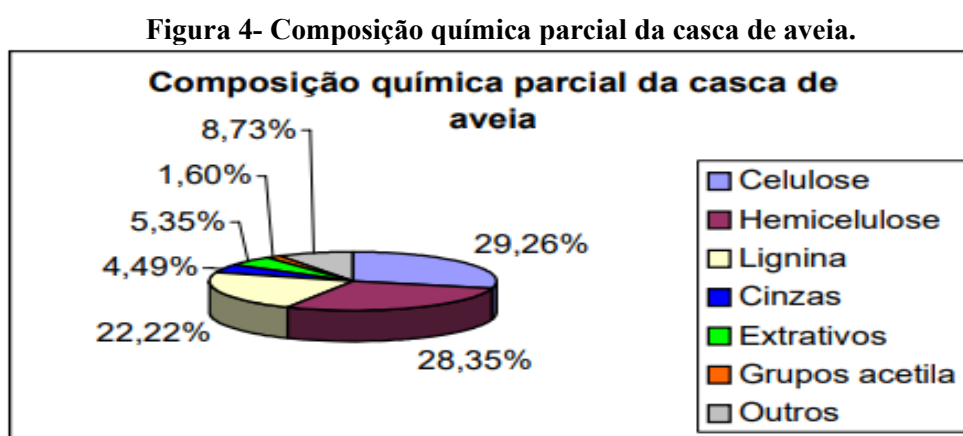
Takeiti (2024) informa que, das várias espécies existentes da aveia, a mais conhecida é

a aveia branca, pois é usada na alimentação humana, na produção de ração animal e nos produtos de higiene. A aveia possui forma cilíndrica, com os extremos pontiagudos na porção do gérmen, e casca forte e fibrosa, que não é comestível, portanto, necessita ser descascada. Essa casca é um subproduto do processamento de moagem da aveia e possui baixo preço.

Segundo Mc. Mullen (2000), o grão de aveia pode ser dividido em germe, endosperma, farelo e casca. A casca da aveia representa cerca de 25% a 35% do grão, e a cariopse representa o restante: de 65% a 75%. É válido dizer que os celulósicos — produzidos a partir de fontes vegetais — eram a classe de termoplásticos mais importantes antes da Segunda Guerra Mundial. Acrescente-se que foi possível produzir plásticos de furano a partir do resíduo da casca de aveia (GONÇALVES, 2019).

Os resíduos (cascas que desprendem de parte do endosperma e dos grãos) são elementos advindos do processamento da aveia para consumo e atingem até 50% do peso da planta. Apesar de terem uso na alimentação animal, não é possível consumir todos os resíduos gerados nessa alternativa de reaproveitamento. Assim, não é suficiente para a diminuição da poluição ambiental (APUD FURLAN et al. 2012).

Tamanini (2004) explica que a casca de aveia é composta de celulose (29,26%), hemicelulose, (28,35%), lignina (22,22%), cinzas (4,49%) e outras composições, conforme se vê na Figura 4.



Fonte: ICTR, 2004.

A utilização da casca de aveia como insumo de reaproveitamento em compostos viáveis economicamente foi apontada nos estudos de Furlan *et al.* (2012) pela síntese de compósitos de polipropileno reforçados com teores diferentes desse resíduo e posterior avaliação de suas propriedades mecânicas. Similarmente, os estudos de Varanda *et al.* (2018) destinaram-se ao uso da casca de aveia na produção de painéis de partículas constituídos de *Eucalyptus grandis*

e casca de aveia. Ferraz e Yuan (2020) relatam que as cascas de aveia transformadas em carvão ativado têm êxito em remoções de corante e arsênico de soluções aquosas. As investigações de Giese *et al.* (2017) e Bellaver (2019) citam a cinza da casca de aveia como material cimentício suplementar.

Na Figura 5, mostra-se o aproveitamento da casca da aveia, em que se concedem a esse resíduo outros destinos em vez do descarte inadequado.

Figura 5- Aproveitamento da casca de aveia.



Fonte: Adaptado de Furlan (2012), Varanda *et al* (2018), Giese *et al* (2017), Bellaver (2019) e Queiroz (2020).

Durante o processamento da casca de aveia, a cinza mostrou-se um material muito friável quando submetida a moagem em moinho de bolas, não demandando elevado consumo energético. As partículas resultantes apresentaram diâmetro médio de 11,17 μm , ou seja, estão entre a faixa granulométrica considerada como adequada, dado que, para isso, os valores têm de ser iguais aos das partículas de diâmetro médio do cimento ou menores que elas — entre 10 e 15 μm . Essa é uma característica desejável aos resíduos usados em matrizes cimentícias, pois os processos englobados no seu beneficiamento não podem envolver grandes impactos ambientais associados a elevados consumos de energia e liberação de CO_2 (GIESE *et al.*, 2017).

Ao comparar com a cinza da casca de arroz (CA), Pereira *et al.* (2024) evidenciaram, por meio do resultado da análise semiquantitativa dos compostos químicos presentes no resíduo, o predomínio de silício na composição, para a qual não houve a determinação do teor de carbono presente na amostra, pois os percentuais foram obtidos somente à fração inorgânica.

A Tabela 2, a seguir, demonstra os resultados da análise química dos estudos de Giese *et al.* (2017) e Bellaver (2019) sobre a cinza da casca de aveia, e de Pereira (2023), acerca de cinza da casca de arroz, em que a sílica é o componente predominante na composição química.

Tabela 2 - Composição química de cinza da casca de aveia e casca de arroz resultantes do ensaio de fluorescência de raio X.

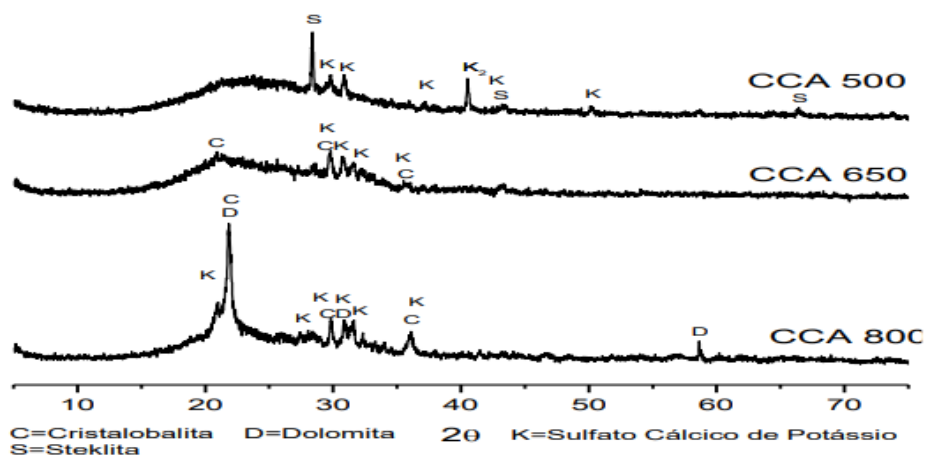
Referência	Giese <i>et al.</i> (2017) – cinza da casca de aveia %	Bellaver (2019) – cinza da casca de aveia %			Pereira (2023) – cinza da casca de arroz %
Óxidos/componentes		CA500	CA650	CA800	
SiO ₂	25,084	48,843	49,764	53,607	94
P ₂ O ₅	7,143	8,829	15,349	14,194	2
K ₂ O	5,006	16,005	15,392	16,274	2
CaO	1,809	5,028	4,976	5,576	0,8
MgO	1,376	0,916	1,150	1,121	0,5
Al ₂ O ₃	0,255	0,541	0,776	0,997	1,0 x 10 ²
Fe ₂ O ₃	0,244	0,346	0,395	0,465	1,0 x 10 ²
SO ₃	0,213	3,323	2,809	2,097	1,0 x 10 ²
MnO	0,100	0,232	0,252	0,280	0,4
ZnO	0,016	0,062	0,0074	0,085	
CO ₂	58,754	14,160	8,80	5,304	
Na ₂ O					
TiO ₂					
Cl					0,2
Orgânicos					

Fonte: Adaptado Giese *et al.* (2017), Bellaver (2019) e Pereira (2023).

Na Tabela 2, pôde-se constatar a queima ineficiente do resíduo devido ao alto teor de CO₂ (obtido através de um ensaio de perda ao fogo) presente na amostra. Ademais, foram observadas menores proporções dos óxidos de fósforo e potássio. O elevado teor de CO₂ sugeriu que o processo de queima não foi controlado adequadamente, o que foi corroborado pela coloração escura do resíduo proveniente da queima. Observou-se também que o teor de matéria orgânica de 58,754% aponta que a calcinação do material não foi satisfatória para produção de material com a qualidade necessária para utilização na construção civil, de acordo com Giese *et al.* (2017).

Em relação à quantidade de matéria orgânica presente nas cinzas, Bellaver (2019) concluiu que é coerente uma quantidade menor de CO₂ na amostra com temperaturas mais elevadas de calcinação. Analogamente, Giese *et al.* (2017) verificaram que o ensaio de perda ao fogo relaciona-se com o processo de calcinação, pois a remoção de matéria orgânica não foi total devido ao tempo de queima ou modelo de forno. Isso pode, ainda, estar relacionado com a volatilização dos demais compostos a temperaturas maiores. O difratograma das cinzas mostrou a presença de um halo amorfo entre 20° e 40°, com a identificação de fases cristalinas de cristobalita (SiO₂), conforme consta na Figura 6.

Figura 6 - Difração de raios X de cinza da casca de aveia.



Fonte: Bellaver (2019).

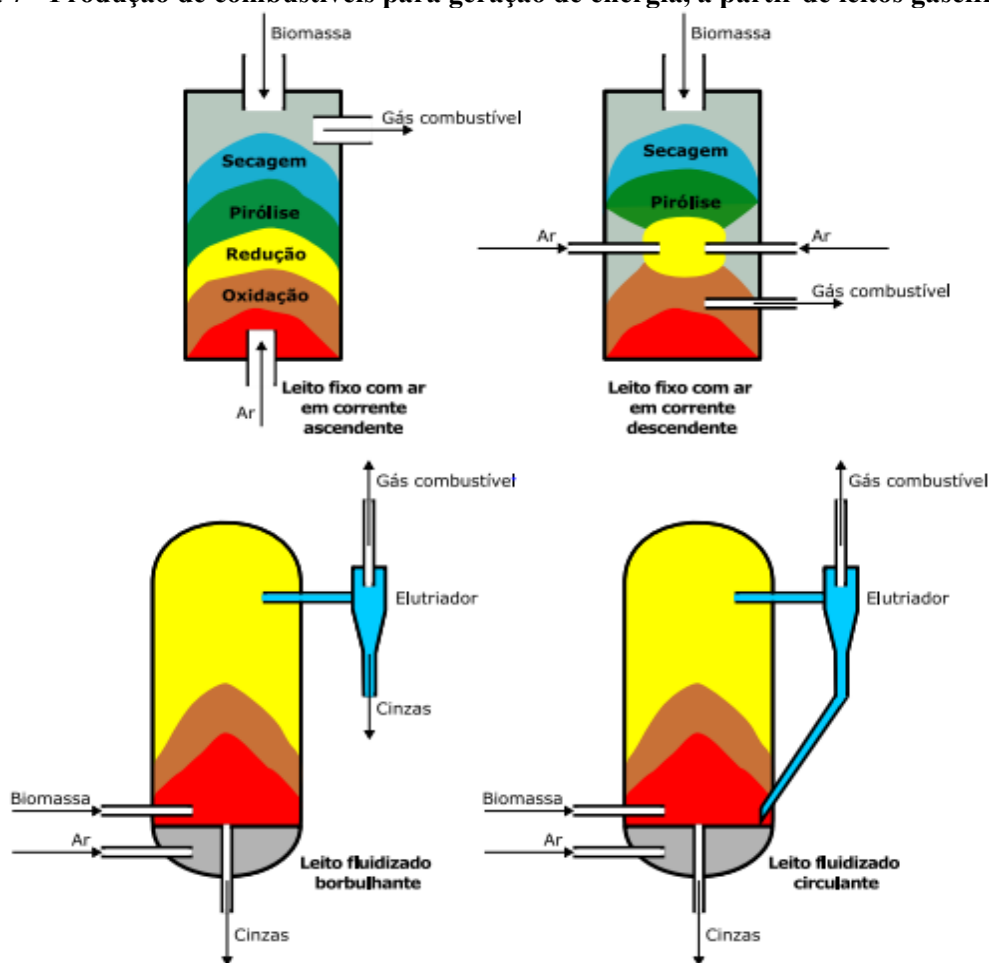
A caracterização química revelou que a cinza possui uma estrutura predominantemente amorfa, o que indica potencial reativo do material, segundo Giese *et al.* (2017). Bellaver (2019) verificou que a temperatura da calcinação está relacionada com o índice de amorfismo da amostra, quando calcinada a 800 °C, a qual possui uma estrutura mais cristalina, com mais picos e halo amorfo menos pronunciado em relação às outras amostras. Dessa forma, possui menor reatividade em relação às demais. Dal Molin (2011) relata que a cinza volante, proveniente de queima sem controle, contém minerais de sílica não reativos, cristalinos e com baixo valor pozolânico.

As cinzas advêm da queima do carvão mineral em usinas termoeletricas, da queima do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz e de resíduos sólidos urbanos das usinas incineradoras de diversos materiais, e encontram-se em grande escala entre os resíduos gerados (SANTOS, 2015). O processamento de aveia gera aproximadamente de 2% a 5% de resíduos secundários, provenientes do descarte fora do padrão de produtos, da limpeza dos equipamentos, do resíduo do polimento do grão de aveia e do pó obtido no processamento do produto (DEANE; COMMERS, 1986).

De acordo com Queiroz (2020), adaptado de Simabesp (2013), em 2013, a fábrica de Porto Alegre da PepsiCo recebeu o Prêmio ECO pela Amcham Brasil (Câmara Americana de Comércio), por utilizar o resíduo da casca de aveia do seu processo produtivo como fonte de energia na caldeira de vapor, em substituição ao gás natural que abastecia suas linhas de produção. Esse projeto pioneiro e em atividade desde 2011 possibilitou a diminuição de 38% no consumo de energia por quilo de aveia gerado no local e de 1.042 toneladas nas emissões de gases de efeito estufa.

A combustão do resíduo pode ser realizada em gaseificadores, que são reatores químicos. Há uma expectativa de que esses reatores tenham desempenho fundamental na área da tecnologia sustentável, visto que proporcionam a conversão de biomassa em combustíveis líquidos e gasosos por meio de gaseificação ou pirólise (PISTERS *et al.*, 2011). Alguns dos principais modelos que produzem combustíveis voláteis, por meio da degradação térmica de biomassas, estão apresentados na Figura 7.

Figura 7 - Produção de combustíveis para geração de energia, a partir de leitos gaseificadores.



Fonte: Pereira (2023), adaptado de Lian *et al.* (2021).

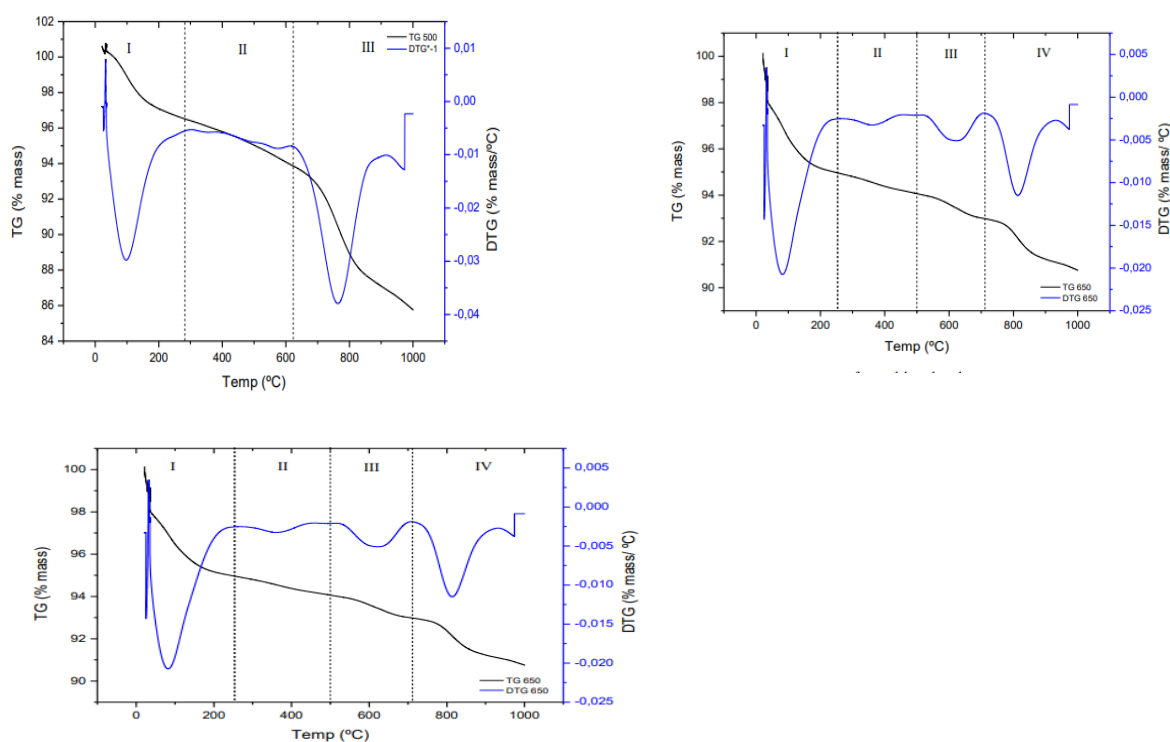
O processo de gaseificação realizado em leitos fluidizados são endotérmicos, com uma sequência de reações, como a gaseificação, a pirólise, a combustão do resíduo carbonizado, o craqueamento e a separação de alcatrão. A reação que ocorre é expressa a seguir (LIAN *et al.* 2021): $\text{Biomassa} + \text{Ar} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO} + \text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{CH}_4 + \text{Carvão} + \text{Alcatrão} + \text{Hidrocarbonetos}$.

Silva *et al.* (2015) relatam que a cinza da biomassa do cacau coletada de dentro da fornalha (cinza fornalha) e dos filtros dos gases (cinza ciclone), a qual é armazenada em tambores metálicos, possuem 4,9% e 10,2% de sílica, respectivamente. Cordeiro *et al.* (2019)

descrevem a cinza de caroço de açaí residual com teores de sílica de 35,33%. Faria *et al.* (2012), Almeida *et al.* (2015) e Fungaro e Rovani (2019) informam que em amostras de cinza do resíduo da cana-de-açúcar coletadas em usinas brasileiras, os níveis de sílica variaram de 52% a 81%. Bellaver (2019) verificou que os tratamentos térmicos na cinza da casca de aveia geram produtos com elevado grau de sílica amorfa, conforme apresentado na Tabela 2.

Na Figura 8, a seguir, observa-se o resultado da termografia das cinzas da casca de aveia tratadas termicamente em três faixas de temperatura e tempo de calcinação, evidenciando uma estrutura mais cristalina, com mais picos e halo amorfo menos pronunciado em relação às outras amostras, possuindo, assim, menor reatividade em relação às demais.

Figura 8-Termogravimetria de cinza da casca de aveia calcinada a 500°C, 650°C, 800 °C



Fonte: Bellaver (2019).

1.5 O resíduo de cinza da casca de arroz (CCA)

A casca de arroz, mostrada na Figura 9, apresenta o maior volume entre os resíduos gerados durante o beneficiamento do arroz, correspondendo em média a 22%. Sua aplicação é muito diversificada, com destaque para a geração de energia. Como atinge temperaturas até 1000°C, é usada no abastecimento de fornalhas de secadores e autoclaves na indústria arrozeira. A composição da casca de arroz está exposta na Tabela 3 (ICTA-UFRGS, 2025).

Figura 9 - Casca de arroz.

Fonte: Adaptado de Azat (2018).

Tabela 3-Composição da casca de arroz.

Composição	%
Proteína	2,0 - 2,8
Gordura	0,3 - 0,8
Fibras	24,5 – 45,9
Cinzas	13,2 – 21,0
Carboidratos	22,0 – 34,0

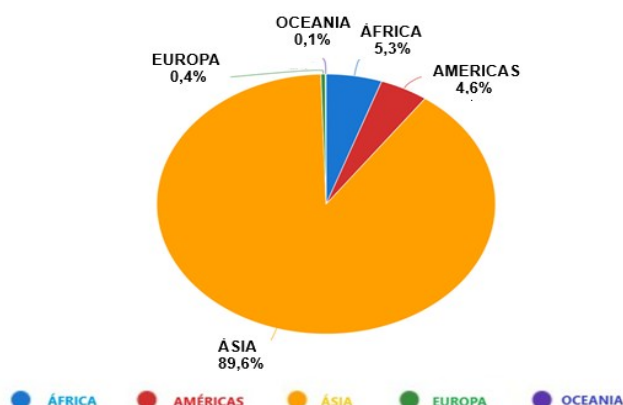
Fonte: ICTA-UFRGS, 2025.

Em 2023, a produção mundial de arroz foi de aproximadamente 800 milhões de toneladas, em uma área estimada em 168 milhões de hectares, conforme se verifica na Tabela 4 e na Figura 10. Nesse mesmo ano, no Brasil, foram produzidos cerca de 10 milhões de toneladas em uma área de 1,5 milhão de hectares. (FAO, 2025)

Tabela 4- Produção do arroz.

Região/Pais	Área (milhões hectares)	Produção (milhões – toneladas métricas)
	2023	2023
Brasil	1,482	10,285
Américas	5,738	36,711
Europa	0,539	3,331
Ásia	143,575	716,775
África	18,446	42,672
Mundial	168,356	779,976

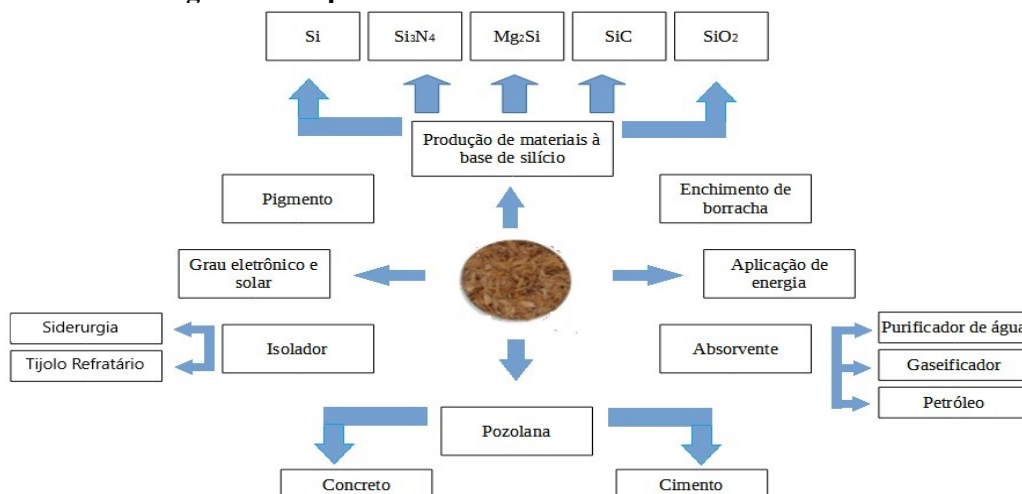
Fonte: Adaptado, FAO, 2025.

Figura 10 - Produção de arroz por região.

Fonte: Adaptado de FAO, 2024.

Rêgo (2001) informa que, no processo de combustão da casca de arroz, a celulose e a lignina, ou seja, a matéria orgânica, são perdidas e aproximadamente 20% da casca são convertidos em cinza. Lopes *et al.* (2017) relatam que a casca de arroz é composta principalmente de celulose (43,5%), hemicelulose, (22%) e lignina (17,2%), e que cerca de 11% são compostos de cinza. Esta cinza é rica em sílica, em torno de 80-90%, e sua composição química está apresentada na Tabela 2, apresentada anteriormente.

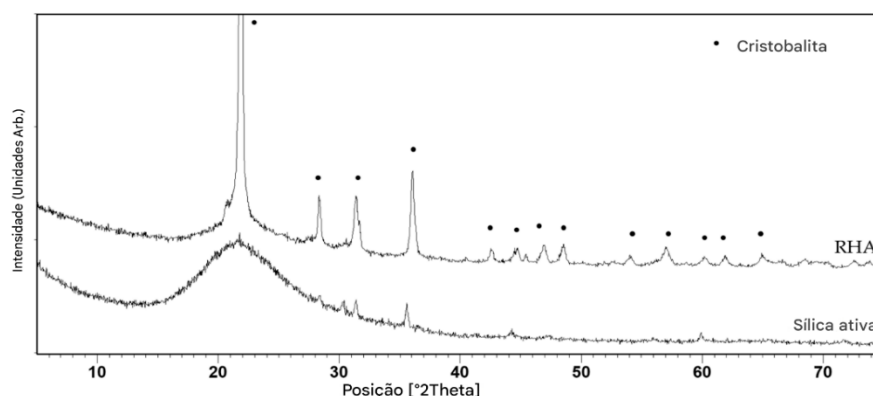
A utilização da casca de arroz como insumo de reaproveitamento em compostos viáveis economicamente foi apontada por Phan *et al.* (2019) com a incorporação de CCA em espumas de poliuretano. Chun e Lee *et al.* (2020) estudaram o desenvolvimento de partículas de sílica derivadas da casca de arroz. As investigações de Santos *et al.* (2019) citam a CCA como material cimentício suplementar. Na Figura 11, mostra-se o aproveitamento do resíduo da casca de arroz.

Figura 11 - Aproveitamento do resíduo da casca de arroz.

Fonte: Adaptado de Azat (2018).

Um dos padrões difratométricos observados nos resíduos das cinzas da casca de arroz está exposto na Figura 12, em que se constatou a presença de cristobalita (SiO_2), sendo a única fase cristalina.

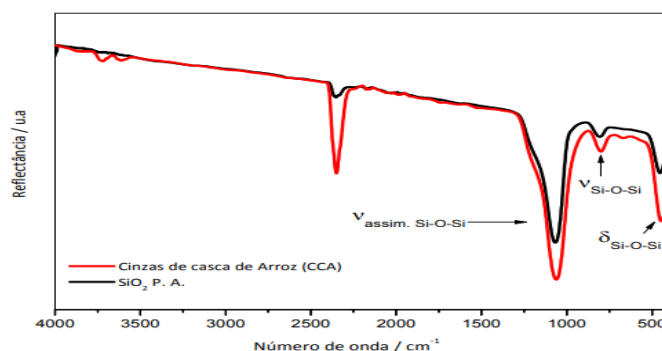
Figura 12 - Difração de raios X de cinza da casca de arroz e sílica ativa.



Fonte: Adaptado de Assi *et al.* (2020).

Silva (2013) *apud* Nassar *et al.* (2002) e Chaves (2008) relatam que a análise por FTIR das cinzas provenientes das cascas de arroz, mostrada na Figura 13, quando comparada ao espectro de SiO_2 P. A., apresenta os modos vibracionais típicos da sílica. A banda localizada em 460 cm^{-1} está associada à deformação Si-O-Si. As bandas em 790 e 1089 cm^{-1} estão relacionadas, respectivamente, aos estiramentos simétricos e assimétricos do grupo Si-O-Si. Bandas de intensidade pequena, na região de 3500 cm^{-1} , podem ser atribuídas aos sinais de OH de água, devido à quantidade menor de umidade absorvida. Ainda segundo Silva (2013), a banda em 940 cm^{-1} refere-se ao modo vibracional correspondente a silanóis (Si-OH-Si), indicando a ausência do grupo hidroxila.

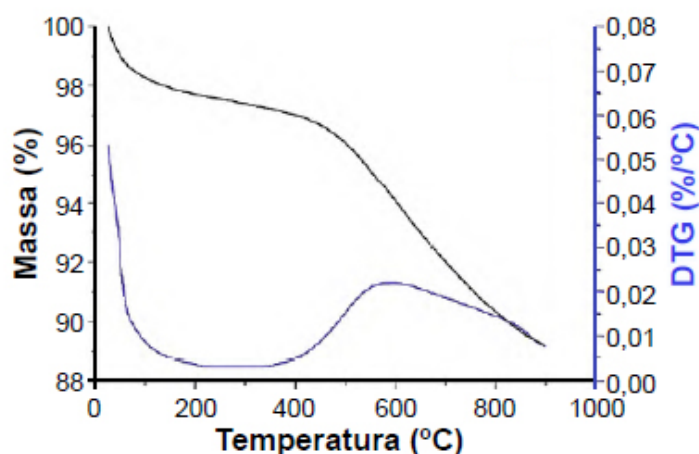
Figura 13- Espectroscopia na região do infravermelho para amostra de CCA e da sílica comercial.



Fonte: Silva (2013).

Apolonio *et al.* (2020) relatam a termogravimetria da CCA, mostrada na Figura 14, em que a análise da decomposição térmica revelou uma perda de massa de cerca de 3% até 100°C, associada à perda de água fisicamente adsorvida. Entre 102°C e 600°C, verificou-se a decomposição da celulose e lignina. Constatou-se a ocorrência de uma série de eventos entre 350°C e 900 °C, que resultaram na perda total de cerca de 8%. Embora não tenha sido possível distinguir os processos individuais nas condições do experimento, as etapas até 600 °C provavelmente se combinaram com outros processos de pirólise da matéria orgânica remanescente. Em qualquer caso, o material orgânico correspondeu a menos de 10% da amostra, indicando que a cinza recebeu um tratamento térmico adequado.

Figura 14- Curvas de TG e DTG da CCA



Fonte: Adaptado de Apolonio *et al.* (2020).

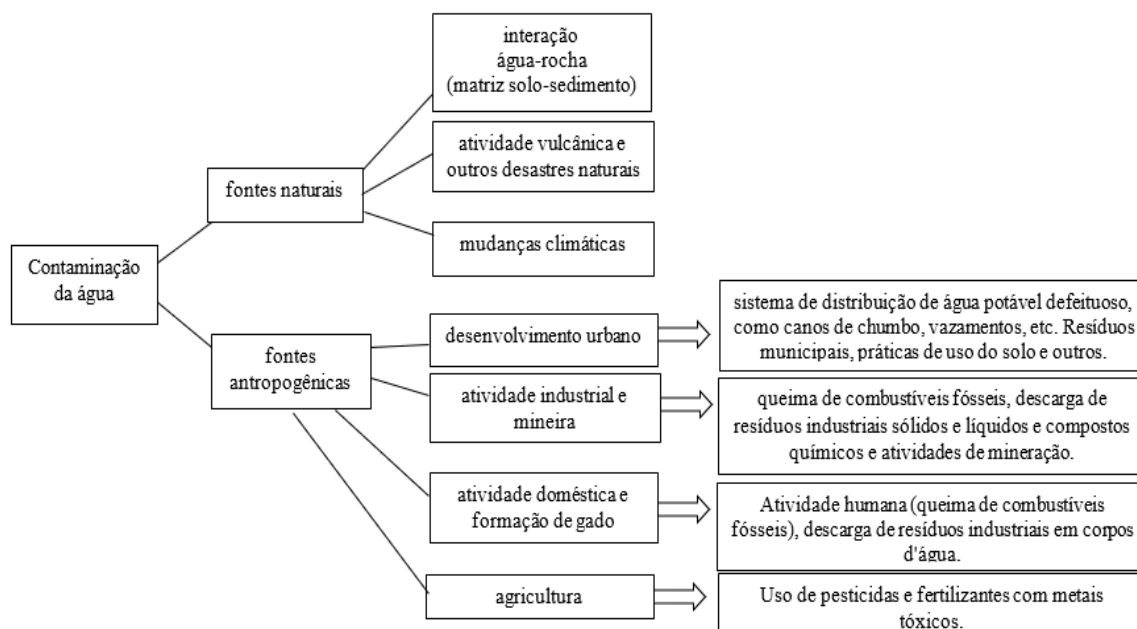
1.6 Contaminação dos recursos hídricos

A água é fundamental para a existência da vida no planeta, e a água subterrânea costuma ser escolhida para o consumo humano por estar mais protegida da contaminação. A presença de diferentes elementos na água subterrânea ou de superfície é determinada principalmente por fenômenos naturais, como a decomposição das rochas e as interações com biológicas e atmosféricas (KHATRI e TYAGI, 2015). Ademais, é importante mencionar que a água é um solvente altamente eficiente, o que faz com que se contamine com facilidade. (ZANELLA, 2022).

Balaram *et al.* (2023) relatam diversos fatores que influenciam os recursos hídricos, incluindo as mudanças climáticas em andamento e as diferentes fontes de poluição da água, como o despejo de resíduos domésticos, as atividades industriais, as práticas agrícolas e a

aquicultura e a mineração, como se vê esquematicamente na Figura 15.

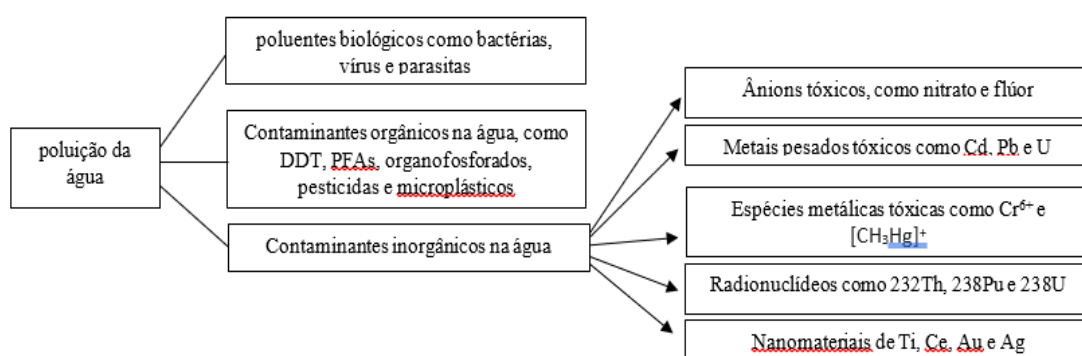
Figura 15- Fatores que afetam os recursos hídricos.



Fonte: Adaptado de Balaram *et al.* (2023).

Balaram (2016) informa que os poluentes da água podem ser divididos em três categorias: inorgânicos, orgânicos e biológicos, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16- Tipos de poluentes em águas superficiais e subterrâneas



Fonte: Adaptado de Balaram *et al.* (2023).

Zhang *et al.* (2015) relatam que o rápido crescimento industrial tem tornado a poluição dos corpos d'água pelas indústrias uma preocupação crescente. De fato, Eltaweil *et al.* (2020) informam que os diversos setores industriais — incluindo os de couro, têxtil, plástico, refino,

impressão, petróleo e farmacêutico — utilizam uma ampla variedade de corantes. A liberação desses compostos em corpos d'água próximos altera significativamente suas características naturais de maneira perigosa, representando uma séria ameaça tanto à saúde humana quanto à vida aquática, mesmo quando presentes em concentrações muito baixas.

Com o objetivo de reduzir os impactos ambientais causados pela poluição por corantes, pesquisadores têm investigado diversas estratégias ao longo das últimas décadas. Entre os métodos utilizados, destacam-se a adsorção, a fotocatalise, a coagulação/floculação química, a degradação por microrganismos e a filtração por membranas. A adsorção tem sobressaído como uma técnica eficaz e promissora para o tratamento de efluentes contaminados por corantes (Vafakish *et al.* 2025). Com efeito, vários materiais sólidos vêm sendo utilizados nos últimos anos para a adsorção de corantes básicos (catiônicos), incluindo o azul de metileno (Baldez *et al.* 2008).

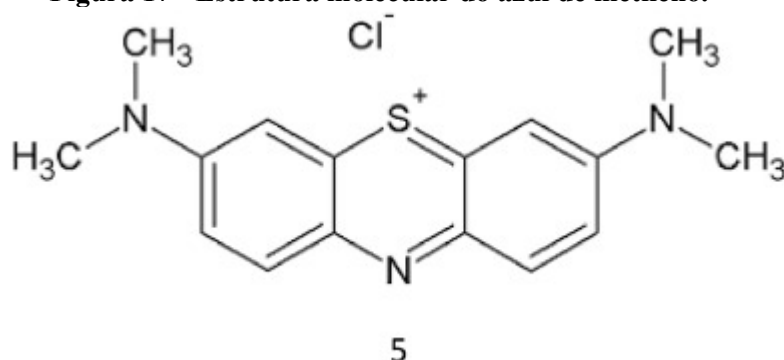
1.7 Origens e consequências da contaminação pelo corante azul de metileno (AM)

Sardar *et al.* (2021) informam que o uso de corantes sintéticos tem aumentado consideravelmente nas últimas décadas. Estima-se que a produção anual de corantes no mundo seja superior a 7×10^5 toneladas, com variedade de mais de cem mil tipos diferentes disponíveis comercialmente.

Oladoye *et al.* (2022) citam que o azul de metileno é um corante sintético catiônico amplamente utilizado na indústria têxtil, de vestuário, de couro e de papel; também é empregado na medicina para diagnóstico e terapias diversas. Ocorre que esse corante é persistente no meio ambiente, cancerígeno, tóxico e mutagênico. A *National Library of Medicine* (2025) ressalta que o azul de metileno é um sal de cloreto orgânico com 3,7-bis(dimetilano)fenotiazin-5-io como contraíon, cuja fórmula é $C_{16}H_{18}ClN_3S$, e peso molecular 319,9g/mol. Sua estrutura planar, com 14 elétrons distribuídos de forma deslocalizada, facilita a formação de aglomerados e a dissolução em água. Essa alta solubilidade faz com que o corante MB seja nocivo aos ecossistemas aquáticos (Eltaweil *et al.* 2020).

A Figura 17 representa a sua estrutura molecular e a Tabela 5 demonstra os detalhes de outras propriedades físico-químicas desse corante.

Figura 17 - Estrutura molecular do azul de metileno.



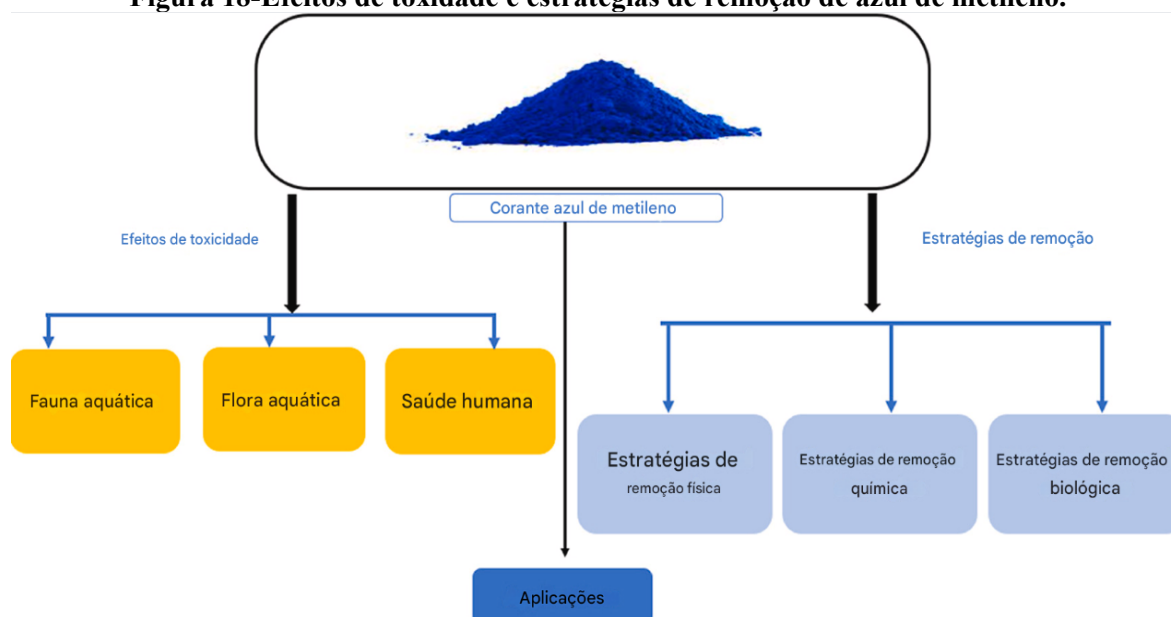
Fonte: Oladoye *et al.* (2022).

Tabela 5- Algumas propriedades físico-químicas do MB

Parâmetros	Valores/nomes
Comprimento de onda máximo de absorção ($\lambda_{\text{máx.}}$)	664 nm
Outro nome	Azul suíço
Ionização	Básico
Grau de solubilidade	3,55%
Nome do índice de cores	Azul básico 9
Número de índice de cor	52015
pH aquoso	Fortemente ácido entre pH 2,0–3,5

Fonte: Oladoye *et al.* (2022).

Grande volume desse corante é descartado em águas superficiais e subterrâneas, causando risco à saúde humana e à vida aquática, especialmente em doses superiores a 5 mg/kg. A remoção desse corante dos efluentes é fundamental, e diversas técnicas têm sido estudadas na literatura (Oladoye *et al.* 2022). Muitos estudos têm investigado o potencial de materiais vegetais de baixo custo, geralmente considerados resíduos, como sementes de bambu, casca de cevada, talos de girassol, casca de pepino (*Cucumis sativa*), casca de laranja e casca de limão, como fontes carbonáceas para a remoção de corantes de águas e efluentes (Ezeugo, 2018). A Figura 18 ilustra os efeitos de toxicidade e estratégias de remoção do azul de metileno em águas residuais.

Figura 18-Efeitos de toxicidade e estratégias de remoção de azul de metileno.

Fonte: Adaptado de Oladoye *et al.* (2022).

1.8 Comportamento de sorção

Sorção é um termo genérico que abrange os processos de adsorção e absorção. Na adsorção, a concentração do sorvato ocorre na superfície do sorvente, enquanto na absorção, o sorvato penetra no interior do sorvente (Zanella, 2012). Esse mesmo autor informa que, esse processo pode ocorrer nas interfaces entre líquidos, entre gás e líquido, entre gás e sólido ou entre sólido e líquido. A fase que retém é denominada sorvente, e a substância retida recebe o nome de sorvato. A sorção pode acontecer em razão da atuação de forças hidrofóbicas, interações eletrostáticas entre o soluto e o sorvente, forças de Van der Waals ou, ainda, por meio de uma reação química.

Basso *et al.* (2022) informam que há duas modalidades principais de adsorção em sólidos: a física e a química. A adsorção física é rápida, reversível e não específica. Nela, o adsorvato se prende à superfície do adsorvente apenas por meio das forças de Van der Waals, podendo formar múltiplas camadas. Já a adsorção química é específica e envolve uma ligação química entre o adsorvente e o adsorvato, que é mais forte do que na adsorção física. Além disso, a entalpia de adsorção (ΔH_{ads}) na adsorção química é maior do que na adsorção física. A Tabela 6 representa os aspectos dos dois tipos principais de sorção.

Tabela 6- Características da sorção química (quimissorção) e sorção física (fisissorção)

Propriedade	Quimissorção	Fisissorção
Temperatura	Bem acima do ponto de ebulição	Abaixo ou perto do ponto de ebulição
Pressão para monocamada	$P/P_0 \ll 0.1$	$P/P_0 \approx 0.1$
Camadas de sorção	Monocamada	Mono ou multicamadas
Taxa de sorção	Devagar e necessita de energia de ativação	Rápida e ausente de energia de ativação
Reversibilidade	Irreversível	Reversível
Seletividade	Sim	Não
Calor de sorção	Semelhante às reações químicas	Semelhante à liquefação
Força de sorção	Ligações químicas fortes	Forças de Van der Waals

Fonte: Adaptado de Chang (2016).

Moawed *et al.* (2015) observaram que a espuma de poliuretano (PU) possui características químicas e físicas favoráveis à absorção de poluentes orgânicos e inorgânicos. Vinhal *et al.* (2015) verificaram que essas espumas demonstraram alta eficiência na sorção, além de resistência a agentes químicos e ao calor, sendo capaz de reter diversos contaminantes — incluindo o herbicida Paraquat — em razão da presença de grupos polares e apolares em sua composição estrutural. Almeida *et al.* (2024) relataram que essas espumas sintetizadas com uma grande quantidade de resíduos de catalisadores de petróleo e cinza de casca de arroz incorporados tiveram uma maior capacidade de adsorção do pesticida Mancozeb da água.

Elgarahy *et al.* (2025) informam que a espuma de poliuretano é um material amplamente utilizado em processos de adsorção em razão de sua alta porosidade, grande área superficial e estabilidade química. O azul de metileno é um corante catiônico frequentemente utilizado em indústrias têxteis, laboratoriais e de tratamento de água, cuja remoção é importante para minimizar impactos ambientais.

A adsorção de azul de metileno em espumas de poliuretano ocorre devido à interação entre o corante e os grupos funcionais presentes na superfície do material, podendo ser aprimorada por modificações químicas ou físicas na espuma. Estudos demonstram que a eficiência de remoção depende de fatores, como pH, temperatura, tempo de contato e porosidade do suporte (Elgarahy *et al.* 2025).

Segundo Ren *et al.* (2021), a modificação da espuma de poliuretano com grupos funcionais aumenta significativamente sua capacidade de adsorção de azul de metileno, atingindo até 97% de remoção. Goes *et al.* (2016) discutem a modificação de espumas de poliuretano para melhorar sua capacidade de adsorção de diferentes corantes, incluindo o azul

de metileno. Elgarahy *et al.* (2025) abordam o uso espumas de poliuretano com a incorporação do bioenchimento de goma gelana, com remoção de 84,7% de corante azul de metileno.

Meng *et al.* (2015) desenvolveram um material poroso de silício-nitrogênio-carbono capaz de adsorver corantes orgânicos em água. Porém, o processo de produção por pirólise requer altas temperaturas ($\sim 600^{\circ}\text{C}$), o que consome muita energia e pode dificultar seu uso em grandes volumes de água contaminada.

1.8.1 Processos de equilíbrio, modelos de isoterma e cinética de sorção

Isoterma de adsorção, segundo Basso *et al.* (2022), é a relação entre a quantidade adsorvida por grama de adsorvente e a concentração do adsorvato. Em temperatura constante, a quantidade de substância adsorvida aumenta conforme a concentração do adsorvato, seja na fase gasosa, seja em solução. A Figura 19 ilustra um modelo dessa isoterma.

Figura 19- Isoterma de Adsorção.



Fonte: Basso *et al.* (2022).

Essas isotermas mostram a relação entre as concentrações de sorvato retiradas da solução líquida até que o equilíbrio seja alcançado, em uma determinada temperatura. Para construí-las, utiliza-se o parâmetro da Equação 3.5.1, que representa a concentração do sorvato em função da massa do sorvente, como descrito por Vafakish e Wilson (2019a, b).

$$Q_e = \frac{(C_o - C_e)V}{m} \quad (3.1)$$

$$\text{Remoção eficiência(\%)} = \frac{(C_o - C_e)}{C_o} \times 100 \quad (3.2)$$

Onde:

Q_e (mg g^{-1}): representa a quantidade de sorvato da massa de adsorvente;

V (L): significa o volume da solução líquida;

m (g): denota a massa do sorvente;

C_o (mg L^{-1}): concentração inicial do sorvato;

C_e (mg L^{-1}): concentração de equilíbrio do sorvato;

Remoção eficiência (%): percentual de remoção do sorvato da solução líquida.

Entre os diversos modelos que explicam o processo de adsorção, os mais utilizados para soluções são: Freundlich, que é empírico, e Langmuir, que é teórico e um dos mais simples, tendo sido criado para explicar a adsorção de gases em sólidos, porém aplicado em soluções. Esse modelo considera que a superfície do sólido possui muitos sítios aos quais as moléculas podem se ligar, sendo que cada sítio ocupa apenas uma molécula adsorvida. Todos os sítios são iguais, e assume-se que as moléculas não interagem entre si nem se deslocam entre os sítios. A adsorção atinge o máximo quando todos os sítios estão preenchidos, formando uma única camada de moléculas adsorvidas (Basso *et al.*, 2022).

Nascimento *et al.* (2014) também informam que os modelos de Langmuir e Freundlich, apresentados nas Equações 3.3 e 3.4, respectivamente, são os mais frequentemente utilizados em estudos de sorção e que, para facilitar, essas equações descrevem as isotermas — indicando a capacidade máxima de sorção do material e representando o fenômeno com o menor número possível de variáveis.

$$q_e = \frac{q_{\max} \times K_L \times C_e}{1 + K_L \times C_e} \quad (\text{Langmuir}) \quad (3.3)$$

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (\text{Freundlich}) \quad (3.4)$$

Onde:

q_e (mg g^{-1}): quantidade de soluto sorvido;

C_e (mg L^{-1}): concentração de equilíbrio em solução;

$q_{\max}$ (mg g^{-1}): capacidade máxima de sorção;

$1/n$: constante relacionada à heterogeneidade da superfície;

K_L (L mg^{-1}): constante de capacidade de sorção de Langmuir;

$K_F (mg\ g^{-1}) (mg\ L^{-1})^{-1/n_F}$: constante de capacidade de sorção de Freundlich.

Ainda de acordo com Nascimento *et al.* (2014), é possível encontrar os valores de K_L e q_{max} ajustando os dados de ensaio pelo método dos mínimos quadrados, o que resulta em uma inclinação e em um intercepto da linearização realizada pela Equação 3.5.

$$\frac{C_e}{q_{max}} = \frac{1}{K_L \times q_{max}} + \frac{C_e}{q_{max}} \quad (3.5)$$

Para Marco (2015), a partir da isoterma de Langmuir, pode ser determinado o fator de separação R_L (constante adimensional de adsorção), expresso pela equação 3.6.

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (3.6)$$

Onde:

C_0 ($mg\ L^{-1}$): concentração inicial de soluto em solução.

Esse mesmo autor informa que, quando o fator de separação está no intervalo $0 < R_L < 1$, o processo é classificado como favorável, porém, quando este parâmetro apresenta $R_L > 1$, diz-se que há preferência do soluto a permanecer na fase líquida. Já quando o $R_L = 0$, a isoterma é irreversível e $R_L = 1$, admitindo-se uma situação de linearidade de sorção. Baltrenas e Baltrenaite (2020) indicam a possibilidade de linearizar a equação de Freundlich utilizando uma escala logarítmica, conforme a seguinte expressão:

$$\log Q = \log K_F + \frac{1}{n \cdot \log C_e} \quad (3.7)$$

Onde:

Q ($mg\ g^{-1}$): representa quantidade de sorvato por massa de sorvente;

C_e ($mg\ L^{-1}$): concentração do sorvato em equilíbrio;

K_F ($mg\ g^{-1}) (mg\ L^{-1})^{-1/n_F}$: constante de capacidade de sorção de Freundlich;

$1/n$: constante relacionada à heterogeneidade da superfície do adsorvente.

De acordo com Marco (2015), o modelo isotérmico de adsorção de Freundlich considera

que a superfície do adsorvente é heterogênea, ou seja, composta por sítios com diferentes níveis de energia para adsorção. Trata-se de uma equação de natureza empírica, adequada para descrever sistemas com essa heterogeneidade, nos quais a adsorção varia conforme a cobertura da superfície e as interações entre as moléculas adsorvidas. O parâmetro n , conhecido como fator de heterogeneidade, está relacionado tanto à diversidade energética dos sítios de adsorção quanto à intensidade com que o processo ocorre.

Quando $n = 1$, a adsorção é considerada linear, implicando que todos os sítios possuem a mesma energia de adsorção. Valores de $n > 1$ indicam que o processo envolve interações químicas, enquanto valores de $n < 1$ sugerem que a adsorção física é favorecida; e, quanto maior for o valor de n , maior será a heterogeneidade da superfície do material.

Chen *et al.* (2011) informa que o modelo de Dubinin-Radushkevich (D-R) estima a porosidade do material e a energia envolvida no processo. Essa isoterma é particularmente útil para sistemas onde a adsorção ocorre em microporos, ou seja, em cavidades muito pequenas na estrutura do material. A base teórica do modelo D-R é a Teoria de Adsorção de Polanyi, que descreve o potencial de adsorção. Esse potencial (ϵ) representa o trabalho necessário para remover uma molécula adsorvida de volta para a solução, e é independente da temperatura. O modelo pressupõe que a adsorção ocorre em uma superfície heterogênea, onde a energia dos sítios de adsorção varia. A isoterma de D-R é descrita pela seguinte equação:

$$\ln C_{ads} = \ln(X_m) - \beta \epsilon^2 \quad 3.8$$

Onde:

C_{ads} (mg/g): quantidade de adsorvato adsorvida no equilíbrio;

X_m (mg/g): capacidade máxima de adsorção do sorvente;

β : constante que se relaciona com a energia média de adsorção.

ϵ : o potencial de adsorção de Polanyi, calculado como:

$$\epsilon = RT \ln \left(1 + \frac{1}{C_e} \right) \quad 3.9$$

Onde:

R (kJ mol⁻¹ K⁻¹): constante dos gases;

T (Kelvin): temperatura em Kelvin;

C_e (mg/L): concentração de equilíbrio de sorbato na solução.

Os estudos da cinética de adsorção são fundamentais porque permitem entender a rapidez com que o adsorvato é adsorvido, o que influencia diretamente o tempo que ele permanece na interface entre a solução e o adsorvente. A Tabela 7 apresenta um resumo dos principais modelos cinéticos aplicados na adsorção de corantes (Marco, 2015).

Tabela 7- Modelos dos estudos de cinética de adsorção.

Modelo cinético	Equação não linear	Equação linearizada	Gráfico
Pseudoprimeira ordem	$q_t = q_e (1 - \exp^{-k_1 t})$	$\ln (q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$	$\ln (q_e - q_t)$ versus t onde $k_1 =$ inclinação t/q_t versus t
Pseudossegunda ordem	$q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t}$	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$	onde $q_e = \frac{1}{\text{inclinação}}$ e $k_2 = \frac{\text{inclinação}^2}{\text{interseção}}$

Nota: q_e = quantidade de adsorvato retida no adsorvente no equilíbrio (mg g^{-1});

q_t = quantidade de adsorvato retida no adsorvente em qualquer tempo t (mg g^{-1});

k_1 = constante de velocidade de pseudoprimeira ordem (min^{-1}),

k_2 = constante de velocidade de pseudossegunda ordem ($\text{g min}^{-1} \text{mg}^{-1}$).

Fonte: Marco (2015).

A equação de pseudoprimeira ordem, segundo Plazinski *et al.* (2009), também conhecida como equação de Lagergren, é provavelmente o modelo mais antigo utilizado para descrever a taxa da sorção em sistemas de fase líquida, sendo uma das equações cinéticas mais utilizadas até hoje. O parâmetro k_1 representa o fator que escala o tempo, definindo a rapidez com que o sistema alcança o equilíbrio. As explicações teóricas para essa equação geralmente partem do princípio de que o processo global de sorção é controlado pela velocidade das reações químicas de adsorção e dessorção que ocorrem na superfície do adsorvente.

A cinética de pseudossegunda ordem está normalmente associada a situações em que a velocidade do processo direto de adsorção/dessorção é o fator limitante para a sorção. Uma vantagem importante da equação de pseudossegunda ordem é a sua capacidade de fornecer estimativas precisas da quantidade de adsorvato retida no adsorvente no estado de equilíbrio (q_e), tendo em vista que esse valor é pouco afetado por erros experimentais aleatórios. Além disso, a constante cinética de pseudossegunda ordem (k_2) depende da concentração inicial do soluto e tende a diminuir à medida que essa concentração aumenta (Plazinski *et al.* 2009).

1.9 Parâmetros de validação

Tien *et al.* (2019) destacam que, na maioria das pesquisas sobre cinéticas de sorção, o

coeficiente de correlação R^2 é frequentemente utilizado como um dos principais critérios para validar os resultados da análise. A Tabela 8 apresenta os parâmetros estatísticos utilizados para validar o erro entre o modelo e os dados experimentais de sorção.

Tabela 8- Função que considera o resíduo para validação dos modelos adotados de sorção

Função	Abreviação	Mecanismo
Coeficiente de determinação	R^2	$1 - \frac{\sum(q_{exp} - q_{mod})^2}{\sum(q_{exp} - \bar{q}_{exp})^2}$

Onde:

q_{exp} : valor experimental da sorção em um dado momento;

q_{mod} : valor teórico de sorção previsto pelo mecanismo (equação) escolhido para esse mesmo momento;

$\bar{q}_{exp}$: média dos valores experimentais de sorção, calculada como $\bar{q}_{exp} = (1/n) \times \sum_i q_{exp}$, onde n é o número total de observações experimentais.

Fonte: Adaptado de Tien (2019).

Silva *et al.* (2022) relatam que a ANOVA, criada por Sir. Ronald Fisher, é um método estatístico usado para comparar médias de duas ou mais populações e verificar se uma variável independente influencia uma variável dependente. O tipo mais simples é a ANOVA de fator único (*one-way*). Antes de aplicar a ANOVA, define-se a hipótese nula (H_0), que assume ausência de efeito, e a hipótese alternativa (H_1), que assume a existência de efeito. Há dois tipos de erros: erro tipo I (rejeitar H_0 quando ela é verdadeira) e erro tipo II (aceitar H_0 quando ela é falsa). A ANOVA usa a estatística F, que compara variâncias para testar a igualdade entre médias.

Se o valor F observado for maior que o valor tabelado, rejeita-se H_0 , o que indica diferenças significativas entre os grupos. Quando há diferenças, é necessário aplicar testes adicionais para identificar quais médias divergem. Para calcular a estatística do teste, que envolve o parâmetro F de Fisher, é necessário completar os dados da Tabela 9 e a Tabela 10.

Tabela 9- Parâmetros da análise de variância (ANOVA) com um fator

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F
Dentro	$SS_W = \sum (ni - 1) s_i^2$	$g.l.D = N - k$	$MS_W = \frac{SS_W}{g.l.D}$	$\frac{MSB}{MS_W}$
Entre	$SSB = \sum (\bar{x}_i - \bar{\bar{x}})^2$	$g.l.N = k - 1$	$MSB = \frac{SSB}{g.l.N}$	

Onde:

Média geral ($\bar{\bar{x}}$ Geral): é a média de todos os dados do seu experimento, sem separá-los em grupos;

Soma dos Quadrados Entre os Grupos (SSB);

Soma dos Quadrados Dentro dos Grupos (SSW);

Variância Entre os Grupos (MSB); Variância Dentro dos Grupos (MSW);

Desvio Padrão do Grupo (s_i);

Tamanho do Grupo (ni); ($N-k$): é a soma total de todas as observações menos o número de grupos existentes.

Fonte: Adaptado de Larson e Farber (2015).

Tabela 10- Parâmetros da análise de variância (ANOVA) fator duplo sem repetição

Fonte	SS	df	EM	F
Entre Tratamentos (b/t)	$SS_A + SS_B + SS_{A*B}$	$(k_A - 1) + (k_B - 1)$	$SS_{b/t} / df_{b/t}$	
Fator A	(identificar a partir da informação fornecida)	$(k_A - 1)$	SS_A / df_A	$MS_A / MS_{c/i}$
Fator B	(identificar a partir da informação fornecida)	$(k_B - 1)$	SS_B / df_B	$MS_B / MS_{c/i}$
Interação	(identificar a partir da informação fornecida)	$(k_A)(k_B - 1)$	SS_{A*B} / df_{A*B}	$MS_{A*B} / MS_{com/i}$
Dentro do Tratamento (c/i)	Total SS – SS b/t	$df_{total} - df_{b/t}$ ou $N - df_{b/t}$	$SS_{com/i} / df_{com/i}$	
Total	$SS_{Entre} + SS_{dentro}$	$N - 1$		

Nota:

Alfa (α)

graus de liberdade Fator A = $df_A = (k_A - 1)$ onde k_A é o número de níveis

graus de liberdade Fator B = $df_B = (k_B - 1)$ onde k_B é o número de níveis

graus de liberdade Interação (A x B) = $df_{A*B} = k_A * k_B$

graus de liberdade para dentro do tratamento = $df_{total} - (df_A + df_B + df_{A*B})$ [dentro do tratamento também é chamado de erro]

graus de liberdade total = $df_{total} = N - 1$ onde N é o número total de pontuações

Fonte: Beyer, 2025.

Um valor de F consideravelmente superior a 1 sugere que a variabilidade entre as médias dos grupos é significativamente maior do que a variabilidade interna de cada grupo. Esse resultado leva à rejeição da hipótese nula de que não há diferenças significativas entre as médias, permitindo-nos concluir que, ao menos, um dos grupos difere dos demais em um nível de significância predeterminado.

Para identificar quais grupos específicos apresentam diferenças significativas, é necessário realizar uma análise *post-hoc*. O teste de Tukey, por exemplo, é um método robusto para esse fim. Ele se baseia no cálculo da Diferença Mínima Significativa (D.M.S.), que serve como um limiar. As diferenças entre as médias dos grupos que excederem essa D.M.S. são

consideradas estatisticamente relevantes, confirmando, assim, quais tratamentos ou abordagens se destacam dos demais. O teste de Tukey é definido pela Equação 3.10.

$$HSD = q_{\alpha(k, N - K)} \sqrt{\frac{MQ_{dentro}}{n}} \quad 3.10$$

Onde:

$q_{\alpha(k, N-k)}$: representa o valor da amplitude total studentizada, que pode ser encontrado em tabelas estatísticas específicas, dependendo do número de tratamentos (k) e dos graus de liberdade do erro ($N-k$);

n : indica a quantidade de repetições realizadas em cada nível de tratamento;

MQ_{dentro} : corresponde ao quadrado médio do erro (ou resíduo), que é obtido a partir da tabela ANOVA gerada pelo Excel.

1.10 Materiais compósitos

Os compósitos são desenvolvidos em função de cada aplicabilidade particular, segundo as características pretendidas. Eles surgem da necessidade de combinar propriedades dos materiais existentes no intuito de obter novo material (BARRETO *et al.*, 2016).

Assim, Nascimento *et al.* (2019) esclarecem que, entre os muitos fatores relacionados às propriedades mecânicas dos compósitos, têm-se a escolha da fibra e da matriz polimérica, o comprimento e a orientação da fibra, e o tratamento superficial. Portanto, faz-se necessário analisar as configurações ideais para o reforço, que é responsável pelas propriedades mecânicas, como rigidez e tenacidade do material.

1.10.1 Materiais compósitos voltados para a sustentabilidade

As possibilidades de emprego de materiais compósitos na construção civil são promissoras, como citam Vieira *et al.* (2023), na produção de espumas de poliuretano, com a substituição total de polióis de origem petroquímica por polióis de base vegetal.

A Tabela 11 apresenta estudos que mostram a versatilidade da matriz polimérica de PU, que pode receber vários preenchimentos de origem natural.

Tabela 11 - Matriz polimérica de PU com preenchimentos de origem natural

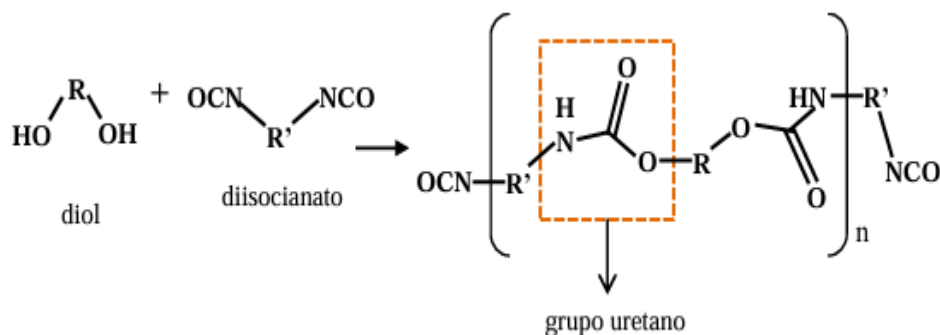
Tipo de PU	Carga utilizada	Propriedades analisadas	Referência
Espumas de poliuretano	Fibra de madeira	Propriedades mecânicas e térmicas	Gu <i>et al.</i> (2013)
Espumas rígidas de poliuretano	Óleo de linhaça hidroxilado	Propriedades físicas e mecânicas	Calvo-Correias <i>et al.</i> (2015)
Espuma de poliuretano	Celulose extraída de agulhas de pinheiro	Absorção de corante (azul metileno)	Kumari <i>et al.</i> (2016)
Espumas poliméricas	Resíduo de catalisador de indústria de petróleo	Absorção de derivados do petróleo (diesel)	Almeida (2017)
Espuma rígida com reagentes comerciais	Casca de arroz sem tratamento	Absorção de derivados do petróleo (diesel)	Hoang <i>et al.</i> , 2018
Painéis de partículas constituídos de <i>Eucalyptus grandis</i> e casca de aveia	Resíduos de madeira Pinus. Resíduos da casca de aveia. Poliuretano à base de óleo de mamona. Formaldeído de melamina.	Inchamento da espessura. Absorção de água. Densidade e razão de compactação. NBR 14810 Análise de variância (ANOVA)	Varanda <i>et al.</i> (2018)
Espumas de poliuretano	Resíduo de cinza da casca de arroz	Propriedades físico-mecânicas, estabilidades térmicas, retardantes de chama	Phan <i>et al.</i> (2019)
Espumas de poliuretano	Resíduo de cinza da casca de arroz	Retardância à propagação de chama	Son <i>et al.</i> (2020)
Espumas de poliuretano	Resíduo de cinza da casca de arroz	Retardância à propagação de chama	Pereira (2023)
Espumas de poliuretano	Óleos de palma, soja e linhaça	Propriedades físicas e mecânicas e as propriedades morfológicas	Vieira <i>et al.</i> (2023)
Espumas de poliuretano	Resíduo de catalisador de indústria de petróleo e de cinza da casca de arroz	Absorção do pesticida Mancoceb	Almeida <i>et al.</i> (2024)
Espuma de poliuretano	Casca de arroz	Absorção de diversos óleos	Mukherjee <i>et al.</i> (2024)

1.10.2 Espumas de Poliuretano

Os PUs pertencem à classe dos polímeros e são produzidos por meio da reação entre isocianatos e polióis, com incremento de aditivos como extensores de cadeia e surfactantes. O poliuretano é gerado a partir da reação de di/poliisocianato e de um poliol ou diol, formando ligações repetidas de uretano, quando na presença de outros aditivos e extensor de cadeia (DAS; MAHANWAR, 2020).

Descoberta por Wurtz, em 1848, a reação entre uma hidroxila e o grupo isocianato para compor o uretano está representada e pode ser vista na Figura 20, a seguir (ALMEIDA, 2017).

Figura 20 - Representação do Uretano.

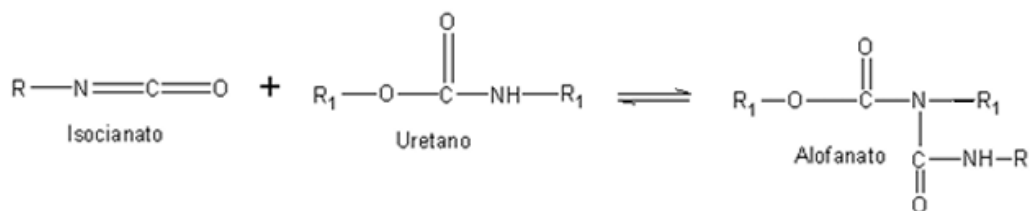


Fonte: Almeida (2017).

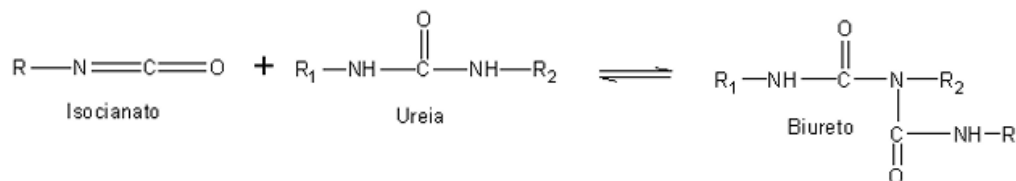
Vilar (2004) explica que os PUs de cadeia linear são obtidos utilizando reagentes difuncionais (com 2 grupos OH por molécula de álcool ou 2 grupos NCO por molécula de isocianato). Já os PUs com estruturas de cadeias ramificadas são produzidos a partir de componentes com funcionalidade ≤ 3 .

Os isocianatos pertencem a um grupo de compostos aromáticos e alifáticos muito reativos e de peso molecular relativamente baixo, associados a diversos efeitos negativos à saúde após a exposição, como sensibilização respiratória (BENGTSTRÖM *et al.* 2016). Urich (1967) descreve que o grupo de isocianatos aromáticos se destaca por sua maior reatividade, devido à transferência de carga negativa em direção à estrutura do anel aromático, o que resulta no aumento da carga positiva no átomo de carbono do grupo isocianato nos compostos aromáticos.

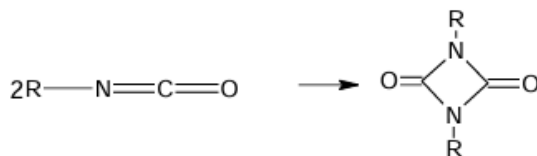
A Figura 21 mostra a formação de grupos alofanato e biureto por reações secundárias e a dimerização e trimerização dos isocianatos, que afetam o grau de reticulação do polímero, provocando aumento da viscosidade e, em alguns casos, em melhorias na resistência mecânica e térmica.

Figura 21 - Reações entre o isocianato com grupos uretano e ureia, dimerização e trimerização.

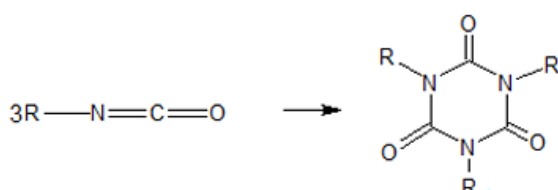
(a)



(b)



(c) dimerização



(d) trimerização

Fonte: Vilar (2004).

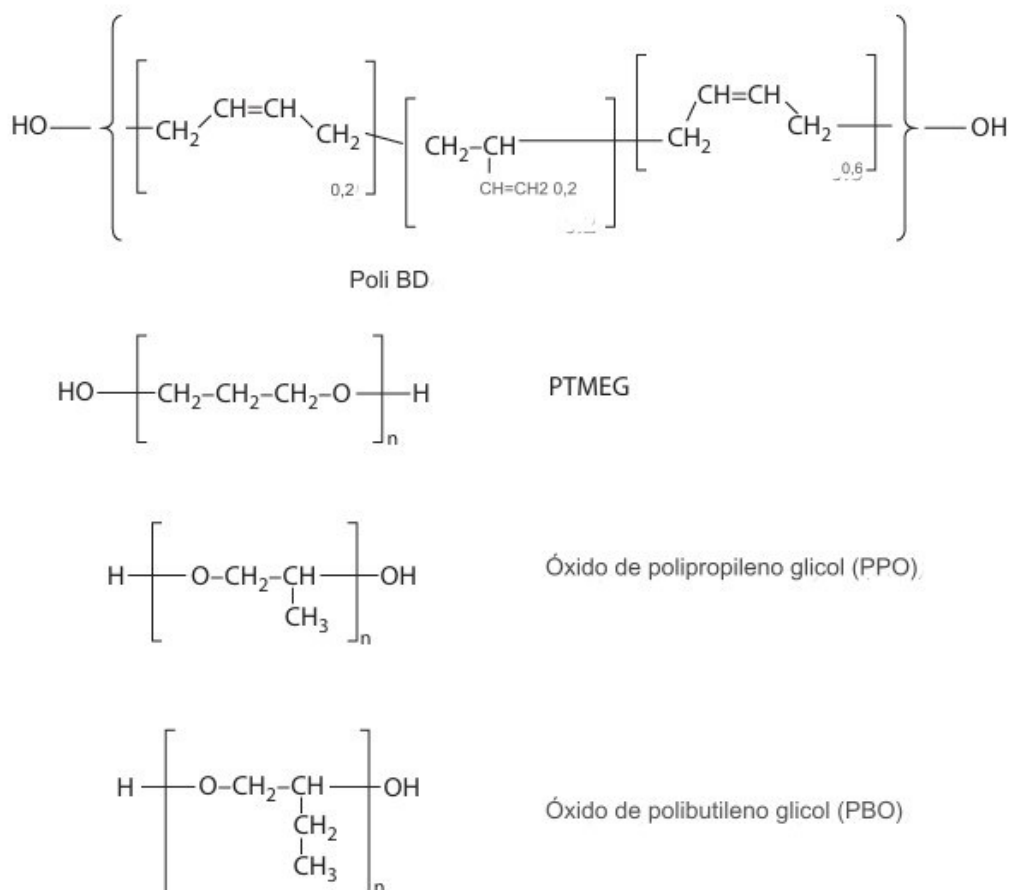
UGARTE *et al.* (2014) descreveram que a produção de espuma de poliuretano (PU) envolve dois processos químicos principais: o crescimento e a gelificação. A reação de crescimento ocorre entre um grupo de isocianato e moléculas de água, o que acarreta a formação de uréia e dióxido de carbono, e promove a expansão das bolhas de ar aprisionadas na mistura reativa. Já a gelificação envolve uma interação entre um grupo isocianato e um grupo hidroxila, formando as ligações de uretano.

Entre os polímeros submetidos ao processo de espuma, citam-se os poliuretanos, a borracha, o cloreto de polivinila e o poliestireno. As espumas são utilizadas normalmente como embalagens, almofadas em móveis e automóveis, e como isolantes térmicos (CALLISTER, 2002). Elas podem variar de rígida a flexível, dependendo da formulação específica. Em espumas flexíveis, a quantidade de poliálcool é geralmente maior em relação ao diisocianato, ao contrário das espumas rígidas, em que há maior concentração de diisocianato, o que resulta em

uma estrutura mais estável e rígida. Para estruturar a PUF, são usados agentes de expansão físicos, como a água, que geram células menores e uma estrutura mais aberta, contribuindo para a flexibilidade do material, e agentes de expansão químicos ou físicos com maiores pontos de ebulição para criar células maiores e estrutura mais fechada.

Em Szycher (2012), é evidenciado que espumas de alta qualidade e elastômero são produzidas por polióis à base de poliéter. A Figura 22, a seguir, apresenta a estrutura do poli-BD, politetra metileno éter glicol (PTMEG), polipropileno óxido glicol e polibutileno, os mais importantes na produção das espumas.

Figura 22 - Estruturas químicas de poliéter polioli.



Fonte: Adaptado, Szycher (2012).

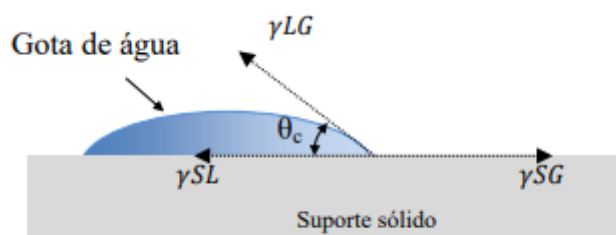
Os compósitos polímero-madeira, principalmente os polímeros termoplásticos, normalmente exibem um escurecimento da coloração natural do polímero puro, o que é uma característica favorável para determinados usos (MATTOS *et al.*, 2016). Nas espumas reforçadas com cargas celulósicas, a cor obtida geralmente apresenta tons amarronzados,

contrastando com o amarelo característico do PU expandido puro (GU *et al.*, 2013). Zhang *et al.* (2012), destacam outras propriedades superficiais importantes, como o ângulo de contato, em que as espumas rígidas de PU foram reforçadas com nanofibras de celulose, resultando em ângulos de contato menores.

1.10.3 Ângulo de contato nos compósitos de poliuretano

Almeida (2017) explica que, dependendo da função do grupo ancorado, é possível transformar uma superfície hidrofílica em lipofílica ou hidrofóbica. Fatores como o ângulo de contato entre o líquido e a superfície, a energia superficial e a rugosidade da superfície determinam as características hidrofóbicas e hidrofílicas de uma superfície. Quando uma gota de líquido entra em contato com uma superfície sólida, o ângulo formado entre o plano tangente à gota e o plano que contém a superfície é chamado de ângulo de contato, conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 23 - Representação do ângulo de contato.

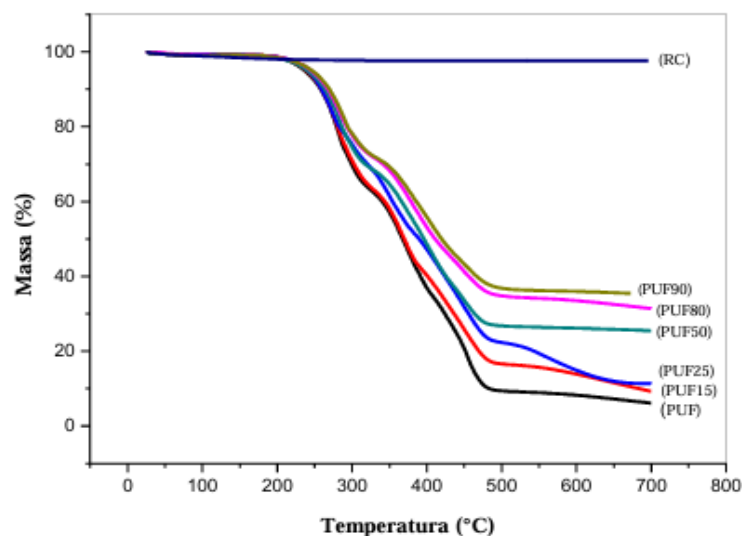


Fonte: Almeida (2017).

1.10.4 Desempenho térmico de compósitos à base de poliuretano

As espumas de poliuretano geralmente exibem dois ou três estágios distintos de perda de massa na termogravimetria, comportamento que também é observado em compósitos de PU, conforme indicado em Chattopadhyay *et al.* (2009), Phan *et al.* (2019) e Almeida (2017). Isso pode ser visto na Figura 24.

Figura 24 - Termogravimetria da PUF, PUF15, PUF25, PUF50, PUF80 e PUF90 (incorporado o resíduo de catalisador da indústria de petróleo) sob atmosfera de N₂, razão de aquecimento de 10°C min⁻¹ até 700°C e vazão de gás 30 ml/min⁻¹



Fonte: Almeida (2017).

Chattopadhyay *et al.* (2009) relatam que, para ampliar a versatilidade dos materiais compósitos de poliuretano, foram iniciados estudos sobre a redução de sua inflamabilidade. Nesse sentido, têm sido propostos procedimentos, como o uso de compostos com grupos funcionais retardantes de chama (especialmente grupos hidroxila), a formação de revestimentos retardantes de fogo e a incorporação de antipirenos na mistura de reação para aumentar a resistência das espumas de PU ao fogo.

Ainda segundo os autores, a decomposição térmica dos PUs é um processo complexo que envolve diversas reações. Explica-se que ele ocorre em virtude de fenômenos químicos e físicos múltiplos, dividindo-se em três importantes etapas: libertação de materiais voláteis; cisão e despolimerização, resultando em perda de massa e degradação das propriedades mecânicas; e degradação completa, que gera hidrocarbonetos simples, gases como CO e CO₂, além de diversos compostos orgânicos e um resíduo carbonáceo.

Wang *et al.* (2023) esclarecem que a espuma de poliuretano pertence à classe de materiais de isolamento térmico poroso (PMTIs), com baixa condutividade térmica, baixa densidade e excelentes características mecânicas, o que impulsiona sua aplicação em áreas como construção, conservação de água e energia, equipamentos químicos heterogêneos e nos setores aeroespacial e de aviação.

Lopes (2020) informa que a determinação da densidade aparente das espumas tem o objetivo de analisar seu potencial utilização em isolamento térmico. Soeiro (2017) relata que os isolantes térmicos têm como finalidade evitar ou reduzir a condução, irradiação e a

convecção, reduzindo, portanto, as trocas de calor entre o ambiente e o sistema. A condutividade térmica nos compósitos é influenciada por vários fatores, incluindo a natureza da carga ou reforço, a estrutura das células, a presença das células abertas ou fechadas e o tamanho dessas células (KANG, *et al.* 2009).

Thirumal *et al.* (2007) reportam que a estrutura polimérica reticulada com células fechadas mostrou densidades de 10 kg/m^3 até 1000 kg/m^3 . Ainda segundo eles, os isolantes térmicos mais eficientes tinham densidades entre 28 kg/m^3 até 50 kg/m^3 . A capacidade de isolamento, baseada nessa faixa de densidade, deve-se à baixa condutividade térmica (fator k) do gás que está contido na estrutura celular da espuma.

De acordo com Lopes (2020), os valores obtidos por meio da condutibilidade térmica de espumas feitas com polióis derivados do petróleo é maior que da espuma oriunda de polioli à base de óleos alimentares, o que conferiu à espuma derivada de óleos alimentares maior isolamento térmico. Galvão *et al.* (2015) relatam que condutividade térmica das espumas de poliuretano com a adição de pó de vidro (PV) não afetou significativamente as propriedades termofísicas, quando comparadas às do PUR puro ($0,040 \text{ W/m-K}$) e que sua função de isolamento térmica não foi reduzida. Assim, possibilita-se não só a preservação ambiental, mas também maior economia.

Shen *et al.* (2021) evidenciam que a espuma de poliuretano, a espuma de poliestireno e a espuma de fenólica apresentam boas propriedades de isolamento térmico e podem ser usadas como materiais para isolar paredes de construções, porém, sua limitada capacidade de retardar o fogo restringe sua aplicabilidade. Assim, aumentar o FR desses polímeros é um desafio para garantir sua segurança e confiabilidade em diversas aplicações

Fica perceptível, então, que a principal desvantagem das espumas de poliuretano é ter alta inflamabilidade e fácil ignição. De fato, de acordo com Vilar (2004), sendo materiais orgânicos, essas espumas são inflamáveis e, devido ao seu uso na construção civil para isolamento, deve-se cumprir a legislação de resistência ao fogo, o que exige a adição de retardantes de chama (FRs) ao polímero.

Chattopadhyay *et al.* (2009) relatam que os principais métodos para incorporar os FRs nas espumas rígidas de PU utilizam aditivos ou compostos na sua formulação. Os FRs aditivos são misturados ao PU por meio físico, podendo resultar em baixa compatibilidade e degradar as propriedades mecânicas do polímero. Entretanto, o FRs reativos normalmente são compostos orgânicos com funcionalidade de retardar o fogo e grupos funcionais ativos, que podem ser capazes de formar ligações covalentes com o PUs. Com efeito, os FRs reativos oferecem vantagens em relação aos FRs aditivos, quais sejam: melhor compatibilidade entre o polímero

e o FR; degradação das propriedades mecânicas do PU reduzida; possibilidade de serem utilizadas em menores concentrações para alcançar o mesmo nível de retardamento de chama.

Gallo e Agnelli (1998) informam que a utilização de agentes retardantes de chama aditivos e reativos (modificação química dos polímeros), além de aplicação de revestimentos antichama e combinação de vários métodos, são os diversos grupos para reduzir a inflamabilidade dos polímeros. O retardante de chama deve bloquear ou inibir o processo de combustão, podendo agir fisicamente, quimicamente ou de ambas as maneiras nas três fases da matéria (sólida, líquida ou gasosa), interferindo particularmente no processo de queima. Os principais retardantes aditivos de chama são: hidróxido de alumínio, boratos, fosfatos, halogenados, trióxido de antimônio, hidróxido de magnésio. A Figura 25 ilustra cada tipo de mecanismos de ação dos retardantes de chama.

Figura 25 – Exemplo dos mecanismos de ação dos FRs.



Fonte: Adaptado de www.flameretardants-online (2025).

De acordo com Venier *et al.* (2015), a utilização de retardadores de chama à base de halogênios começou a crescer na década de 1970, e o uso de sistemas bromados aumentou na década de 1980 (DALEY, 2011). Liu *et al.* (2016) relatam que, nos anos de 1990, iniciou-se o uso de retardadores de chama livre de halogênios em substituição à base de halogênio, tendo em vista que emitem gases tóxicos e corrosivos.

Mensah *et al.* (2022) observam que a maioria das pesquisas atuais estão com ênfase em sistemas não halógenos, devido a algumas agências governamentais implementarem regras que proíbem a produção e o uso de retardadores de chama halogenados, como os éteres difenílicos poli (Penta/octa) bromados, hexabromociclododecanos, tetrabromobisfenol A e bifenilos

polibromadose (listados na Convenção de Estocolmo sobre Poluentes Orgânicos Persistentes) e passarem a exigir o uso de retardadores de chama ecológicos, de origem biológica e sustentáveis, o que aumentou a sua demanda.

Ressalte-se que vários retardadores de chama inovadores foram desenvolvidos a partir de resíduos de biomassa da casca de arroz, conforme estudos de Krishnadevi e Selvaraj (2016) e Pereira (2023), da casca de ovo, apontado por Oualha *et al.* (2019), entre outros.

Jahn *et al.* (2020) alcançaram resultados satisfatórios para a utilização de hemiceluloses modificadas como retardantes de chama. Foi viável aplicar retardante de chama ao material isolante de fibra, que obteve classificação idêntica na proteção contra incêndio e um desempenho superior na combustão lenta, assim como os tradicionais retardadores de chama.

Gallo e Agnelli (1998) informam que o processo de queima em polímeros ocorre em cinco etapas, conforme ilustrado na Figura 26, quais sejam:

I- Aquecimento: o material recebe calor de uma fonte externa, fazendo com que sua temperatura aumente gradativamente. Esse calor pode ser transferido por meio de contato direto com uma chama, por gases quentes ou pela condução por meio de um sólido. Os fatores principais que influenciam nesse processo incluem o calor específico do material, sua condutividade térmica e o calor latente relacionado a possíveis mudanças de fase. Nessa fase, inicia-se a decomposição do polímero;

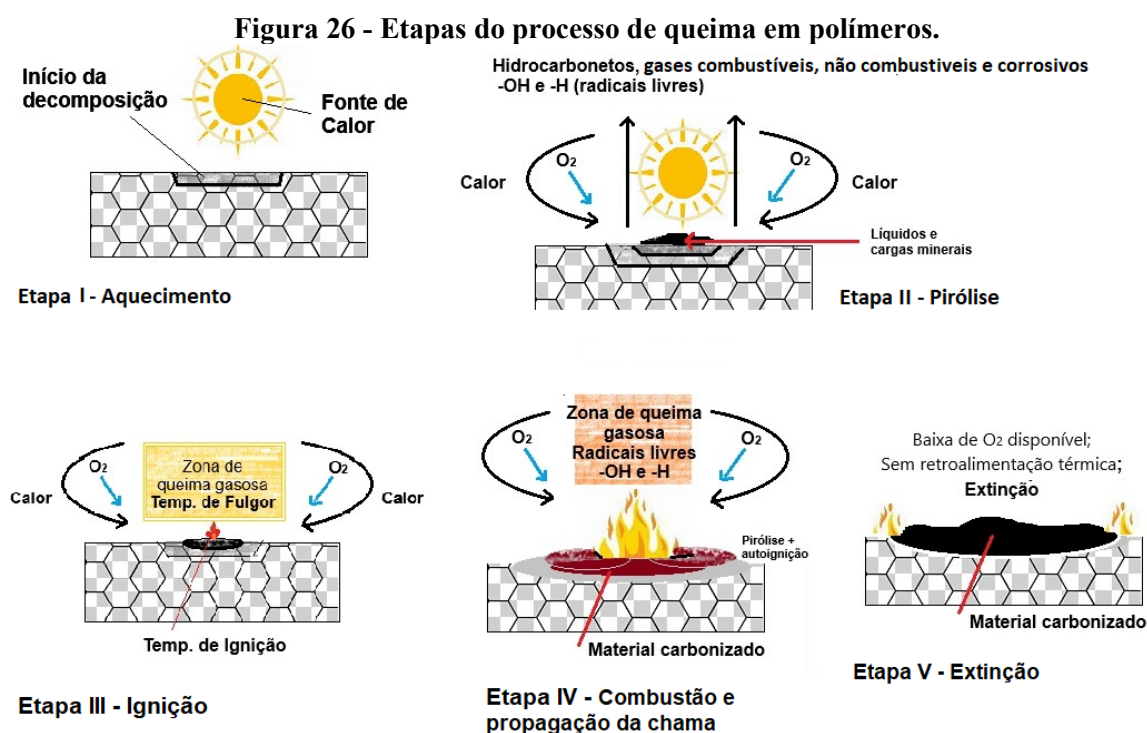
II- Pirólise: os diversos componentes de um material polimérico atingem suas temperaturas de decomposição e começam a liberar diferentes substâncias, que podem incluir: gases combustíveis, como alcanos, alcenos, formaldeído e monóxido de carbono; gases corrosivos, como cloreto de hidrogênio e brometo de hidrogênio; líquidos, como fragmentos resultantes da quebra das cadeias poliméricas; partículas sólidas, como fuligem, fibras de vidro e cargas minerais; radicais livres. A interação física entre essas substâncias é o que forma a fumaça. O fator predominante neste estágio é a temperatura de início da pirólise de cada componente. Geralmente, a pirólise segue um mecanismo de radicais livres, desencadeado pela presença de pequenas quantidades de oxigênio ou impurezas oxidantes absorvidas pelos polímeros durante seu processamento. Nesse processo, formam-se grupos hidroperóxidos (ROOH), cuja decomposição gera radicais altamente reativos, como H. e HO., essenciais nos estágios mais avançados da queima. As reações ocorrem rapidamente, produzindo uma ampla gama de espécies químicas, incluindo hidrocarbonetos de baixo peso molecular e os próprios radicais H. e HO. Essas substâncias migram para a chamada zona de queima gasosa, onde o próximo estágio do processo tem início. Além disso, também podem ser liberados gases não combustíveis, como vapor d'água e dióxido de carbono;

III- Ignição: à medida que os produtos da pirólise se difundem, a partir da superfície do material polimérico, eles encontram o oxigênio que se move em sentido contrário. Esse encontro ocorre em uma região denominada **zona de queima gasosa**, onde a combinação entre a temperatura, a concentração de gases combustíveis e a quantidade de oxigênio atinge condições favoráveis para a ignição, o que ocorre de duas formas. **Por fonte externa de calor**: quando o material atinge o **ponto de fulgor**, que é a temperatura mínima para que a combustão seja iniciada com auxílio de uma fonte externa; e **por autoignição**: quando a temperatura é suficientemente alta para que a combustão ocorra espontaneamente, sem a necessidade de uma fonte externa, atingindo o **ponto de ignição**. Os principais fatores que influenciam essa etapa incluem: **temperaturas de ignição e autoignição**, que determinam a facilidade com que o material começa a queimar e **índice de oxigênio**, que representa a concentração mínima de oxigênio necessária para que a combustão seja sustentada (vide item

referente ao índice de oxigênio);

IV- Combustão e propagação da chama: os radicais livres gerados durante a pirólise desempenham um papel crucial na etapa de ignição, iniciando reações de combustão altamente exotérmicas (como ilustrado anteriormente). O calor liberado por essas reações dá início a um processo chamado **retroalimentação térmica**, no qual o calor gerado mantém e intensifica os processos de pirólise e ignição, desde que haja material combustível disponível. Nesse estágio, o fogo se propaga pela superfície do material, alcançando novas áreas e tornando o processo de queima completamente irreversível. O principal fator que influencia esta etapa é o **calor de combustão** dos componentes presentes no material polimérico; e

V- Extinção: à medida que o fogo se espalha por todas as partes do material polimérico, as quantidades de combustível e oxigênio (especialmente em sistemas fechados) começam a diminuir progressivamente. Chega-se, então, a um ponto em que o calor produzido pelas reações de combustão não é mais suficiente para manter o mecanismo de retroalimentação térmica. Nesse momento, o processo de queima entra em seu estágio final, conhecido como **extinção**. O fator principal que influencia essa etapa é o **índice de oxigênio** do material polimérico, que determina a concentração mínima de oxigênio necessária para sustentar a combustão.



Fonte: Adaptado de Pereira (2023).

Com o objetivo de vencer incompatibilidades de dispersão e adesão entre a matriz polimérica e a nanossílica, Li *et al.* (2019) analisaram o desempenho térmico, mecânico e acústico do material com a incorporação de nanossílica com teores de 0,5%, 1% e 1,5% em razão do peso total do compósito de PU. A incorporação para o preenchimento, a fim de reduzir o potencial de ignição, baseou-se em soluções de compósitos com materiais ricos em sílica como retardante de chama. De acordo com Behnam *et al.* (2018), quando se usaram teores de 4% e 8% de nanossílicas hidroxiladas, foi verificado aumento na temperatura de degradação, por meio da termogravimetria dos compósitos de PU com modificadores de superfície TEOS

(Tetraetoxissilano) e APTS (3-Aminopropiletoxissilano).

Pereira (2023) e Son *et al.* (2020) investigaram a propriedade de retardância à propagação de chama de compósitos de poliuretano incorporados com a cinza da casca de arroz. Destaque-se que Pereira (2023) relata melhor enquadramento na classe da norma de desempenho de resistência à chama (quando comparado ao PU Controle) com o uso do poliuretano incorporado com 8% de cinza da casca de arroz, comprovando sua propriedade de retardância à propagação de chama. O resultado da termogravimetria confirma esse efeito, por causa da baixa perda de massa de cinza da casca de arroz na síntese do compósito, o que contribuiu para o aumento da estabilidade térmica dos materiais com temperaturas maiores que 250°C, potencial uso em solução de proteção térmica de edificações.

Na norma UL-94 (2023), aborda-se a metodologia para análise do comportamento à chama em materiais poliméricos da indústria de manufaturados, porém isso pode ser aplicado como análise preliminar em qualquer material quanto à inflamabilidade. A inflamabilidade por exposição ao fogo da amostra das espumas é tratada na maior dimensão, tendo sido preparada por secagem em estufa por 7 dias a $70 \pm ^\circ\text{C}$ ou mantida à temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ sob umidade de 50%. As características de ensaio previstos na norma constam no quadro 1, estabelecido por Gold (2003).

Quadro 1 - Ensaios da norma UL-94 (2023) de queima horizontal e em espumas poliméricas

Tipo	Tamanho da amostra	Característica do ensaio	Classe	Desempenho
Queima horizontal	13,5±0,5 mm de largura 125±5 mm de comprimento com espessura de 13 mm	25, 100 da borda da amostra marcações, de aplicação da chama por 30 s.	HB	Amostra que não tenha uma taxa de queima superior a 40 mm. Material extingue a chama antes a marcação de 100 mm
Queima Horizontal de espumas	50±1 mm de largura e 150± mm de comprimento com espessura de 13 mm	Na base do aparato de ensaio algodão de 50x50 mm 25, 60 e 125 mm da borda da amostra marcações, de aplicação da chama por 60 s.	HBF	Amostra que tenha taxa de queima menor que 40mm/min ou qualquer espessura que extingue a chama anterior a marcação a 125 mm de ponta livre
			HF-1	Degradação inferior a 60 mm posterior ao tempo de chama e fulgor inferior a 30s, 4/5 da amostra com o tempo de chama $\leq$ a 2s e 1/5 com tempo de chama $\leq$ 10s, ausência de ignição do algodão por fuligem incandescente
			HF-2	Ignição do algodão por fuligem incandescente + HF-1

Fonte: Adaptado de Gold (2003) e UL-94 (2023).

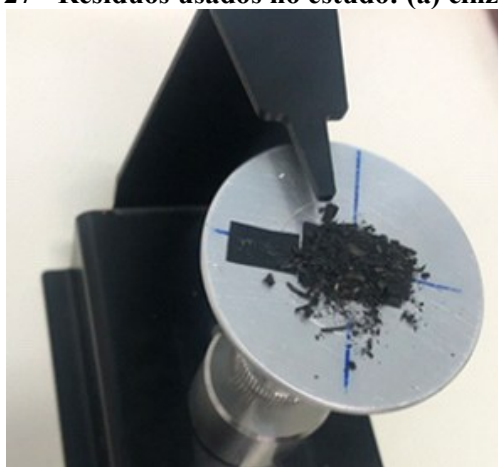
MATERIAIS E MÉTODOS

1.11 Materiais

As cinzas da casca de aveia utilizadas foram fornecidas pela empresa SL Alimentos, situada em Londrina (Paraná). Elas foram obtidas a partir da queima das cascas usadas como biomassa para alimentar as caldeiras, que geram 5,76 MW de potência térmica nominal. As cinzas da casca de arroz, após tratamento prévio por combustão controlada em leito fluidizado, com teor superior a 90% de SiO_2 , foram gentilmente cedidas pela Silcca Nobre®, Indiana. A Figura 27 (a, b) ilustra os resíduos utilizados no estudo. O azul de metileno foi obtido da Neon Comercial ($\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{S} \cdot x\text{H}_2\text{O}$ e peso molecular = 319,85). O reagente isocianato empregado nas amostras foi o MDI, conhecido comercialmente como Ecopoly Iso Biopol (Poly Urethane Indústria e Comércio).

O polioliol de origem vegetal utilizado para sintetizar o PU — comercialmente conhecido como Biopol® 411 ($\text{OH} = 294 \text{ mg}$, KOH g^{-1} e funcionalidade = 2,7) — foi adquirido da Poly-Urethane (Ibirité, Brasil). O polipropilenoglicol ($\text{Mn } 2000 \text{ g mol}^{-1}$, PPG 2000) foi obtido da Sigma-Aldrich. O catalisador empregado foi o composto organometálico de Octoato de Estanho (II) (TIN) - Liocat® 29, proveniente da Miracema-Nuodex (Campinas, Brasil). Também foi usado o tensoativo à base de silicone comercialmente chamado de Tegostab® B 8135 — fornecido pela Evonik (Essen, Alemanha) — e água deionizada.

Figura 27 - Resíduos usados no estudo: (a) cinza da casca da aveia; (b) cinza da casca de arroz.



(a)



(b)

Fonte: Autora (2024).

1.12 Métodos

Foi sintetizada uma amostra de poliuretano (PU Controle) e foram desenvolvidas três formulações de compósitos poliméricos contendo 5% (PUCA5), 15% (PUCA15) e 25% (PUCA25) de cinza da casca de aveia (CA), e outras três contendo 2,5% (PUMIX5), 7,5% (PUMIX15) e 12,5% (PUMIX25) de uma combinação de cinza da casca de arroz (CCA) e cinza da casca de aveia (CA) em relação à massa total de reagentes polióis da espuma de PU.

As técnicas de caracterização aplicadas à cinza da casca de aveia e de arroz, ao PU Controle e aos compósitos de PU foram essenciais para compreender as propriedades dos materiais em estudo e o impacto da incorporação dos resíduos. Para a análise de cinza da casca de aveia e de arroz, empregou-se a microscopia eletrônica de varredura para examinar a morfologia superficial e as características microestruturais. A difração de raios X foi aplicada para determinar a estrutura cristalina ou amorfa, enquanto a espectroscopia de energia dispersiva permitiu a análise semi-quantitativa dos elementos químicos presentes.

A identificação de grupamentos químicos orgânicos foi realizada por meio da espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier. Já para o poliuretano (PU Controle) e seus compósitos, as análises incluíram MEV para investigar a morfologia superficial, características macroestruturais e a interação entre o PU e os resíduos incorporados. A DRX também foi utilizada para verificar a estrutura cristalina ou amorfa do material compósito. Assim como nas cinzas, o FTIR identificou grupamentos químicos e o EDS analisou os elementos presentes.

A análise termogravimétrica foi fundamental para determinar a degradação térmica. O ângulo de contato avaliou o grau de molhabilidade das espumas, e as técnicas de sorção foram empregadas para mensurar a capacidade de remoção do contaminante. Por fim, o teste UL-94 avaliou a propagação de chama, determinando a taxa relativa de queima e a extensão da combustão de materiais espumosos dispostos horizontalmente.

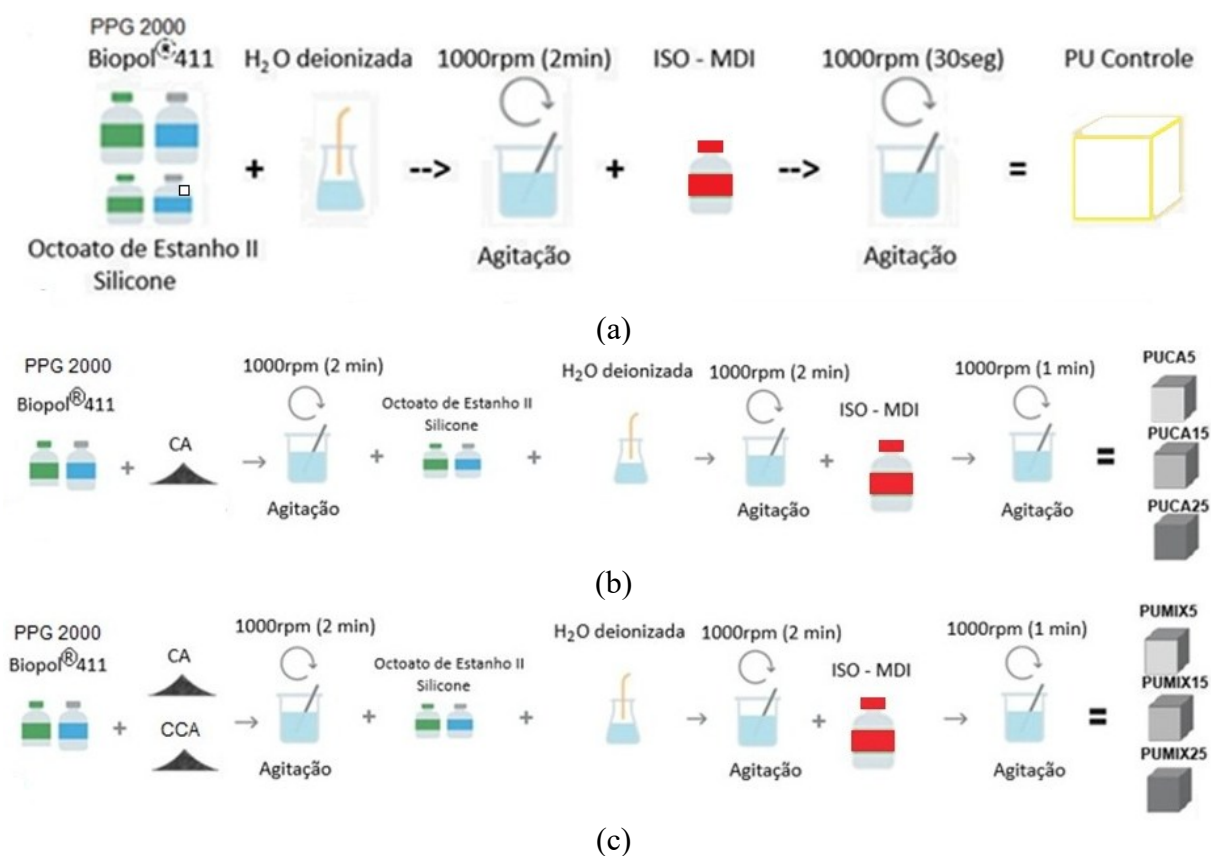
O desempenho dos compósitos na sorção de azul de metileno em meio aquoso foi avaliado por meio de uma análise estatística. Essa análise utilizou critérios de confiabilidade e significância para comparar os resultados com os valores encontrados na literatura. Com o intuito de potencializar a eficiência de remoção do azul de metileno, optou-se pela incorporação de cinza da casca de aveia e cinza da casca de arroz à matriz adsorvente, explorando as propriedades porosas da cinza rica em sílica amorfa.

1.13 Preparação das amostras

A espuma de poliuretano e os compósitos foram sintetizados no laboratório Lepcom, Laboratório de Engenharia de Polímeros e Compósitos da UFMG, com metodologia estabelecida por Almeida (2017), Hoang *et al.* (2018), Almeida *et al.* (2018) e Almeida *et al.* (2020). Sob uma razão molar $[NCO]/[OH] = 2,2$ em temperatura ambiente (cerca de 25°C), foi produzida a espuma de PU Controle.

Na formulação, 11,25 g de Biopol® 411; 1,25 g de polipropilenoglicol PPG 2000; 0,40 g de água deionizada; 0,10 g de surfactante de silicone; 0,025 g de catalisador de octoato de estanho (II). Eles foram misturados e submetidos à agitação mecânica em cerca de 1000 rpm por 2 minutos. Na sequência, 17,99 g de MDI foram adicionados à mistura e agitados por 30 segundos. A produção da espuma de PU Controle está ilustrada na Figura 28 (a).

Figura 28- Produção das amostras: (a) Espuma PU Controle; (b) Espumas de PU incorporadas com a CA; (c) Espumas de PU incorporadas com CA e CCA.



Fonte: Autora (2025).

Na mistura, a água deionizada atuou como expansor químico e o surfactante de silicone proporcionou estabilidade às células do PU. A reação para a cura da espuma deu-se em temperatura ambiente (25°C) e em repouso por 48 horas até que ocorresse a estabilização do material. Após esse período, cortes cúbicos de 0,7 cm³ foram realizados para os ensaios de sorção.

A síntese dos compósitos seguiu a metodologia desenvolvida por Almeida (2017) e Hoang *et al.* (2018), segundo a qual incorpora-se a quantidade de resíduo de CA e resíduo de CA e CCA em conjunto com os polióis, conforme mostrado na Figura 28 (b). Para a síntese dos compósitos de poliuretano com o resíduo de cinza da casca de aveia, 11,25 g de Biopol® 411 foram adicionados, além de 1,25 g de polipropilenoglicol PPG 2000 de PU, e os polióis foram misturados com diferentes porcentagens em massa de CA: 5%, 15%, 25% (em função da massa total dos polióis).

Na sequência, o material foi agitado mecanicamente (cerca de 1000 rpm) por 2 minutos em um recipiente. Posteriormente, foi adicionado 0,40 g de água deionizada; 0,10 g de surfactante de silicone; 0,025 g de catalisador de octoato de estanho (II), e os componentes foram agitados novamente por 2 minutos. Finalmente, houve nova mistura e agitação (1000 rpm), por 1 minuto, de 17,99 g de MDI. Os compósitos sintetizados foram cortados em dimensão iguais para cada experimento após a reação de solidificação completa (Almeida, 2017 e Almeida *et al.*, 2020).

Para a síntese dos compósitos poliuretanos com o resíduo de cinza da casca de aveia, em conjunto com o resíduo de cinza da casca de arroz, seguiu a metodologia explicada anteriormente, no entanto os polióis foram misturados com porcentagens em massa de CA e CCA: 2,5%, 7,5%, 12,5% (em função da massa total dos polióis). A produção dos compósitos de poliuretano com os resíduos de cinza da casca de aveia e cinza de casca de arroz está mostrada na Figura (c).

1.14 Caracterização das amostras produzidas

1.14.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS)

As amostras da espuma controle e dos compósitos com cinza da casca de aveia (CA) foram cortadas em dimensões de aproximadamente 2x2x1 cm. A cinza da casca de aveia e cada amostra de espuma foram submetidas à microscopia eletrônica de varredura (MEV) para análise

da morfologia superficial no equipamento EVAC/AIR – TM4000Plus Tabletop Microscope – HITACHI, no Centro Design Empresa (CDE) da Universidade do Estado de Minas Gerais.

As amostras de cinza da casca de aveia (CA) e cinza da casca de arroz (CCA) foram preparadas dispersando-as em acetona e aplicando gotas sobre o substrato de silício metálico do microscópio. A espuma controle e os compósitos com CA e CA com CCA incorporadas foram preparados em lâminas de 1x1 cm, imersas previamente em nitrogênio líquido, fraturadas e revestidas com uma camada de carbono por pulverização. Posteriormente, as amostras foram analisadas por MEV para que fosse examinada a morfologia superficial, utilizando o equipamento FEG - Quanta 200 FEI.

O equipamento possuía detectores de elétrons secundários, retroespalhados e transmitidos (STEM), e sistemas integrados, como o Pegasus: EDS (espectrômetro de raios X de energia dispersiva) e EBSD (difração de elétrons retroespalhados), com variação de voltagem de 200 V a 30 kV, corrente de feixe superior a 100 nA, resolução de 1,6 nm a 30 kV em alto vácuo e 3,5 nm a 3 kV em baixo vácuo, com distância focal variando de 3 mm a 99 mm e aumento de 12x (na distância de trabalho maior) até 1.000.000x em baixo e alto vácuo. A análise dos dados foi realizada utilizando o *software* Veusz, no Centro de Microscopia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

1.14.2 Difratometria de raios X (DRX)

As caracterizações das estruturas constantes na cinza da casca de aveia, na cinza da casca de arroz, e nos materiais compósitos sintetizados a partir desses resíduos foram produzidas por meio do difratômetro de raios X (Malvern PANalytical X'Pert, Empyrean, Holanda) com monocromador de cristal de grafite em 40kV a 40 mA e tubo de cobre. A varredura foi realizada com velocidade de $0,06^{\circ} \cdot s^{-1}$ e amplitude angular 2θ de 3 a 90° .

1.14.3 Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

Os experimentos de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foram realizados com o espectrômetro Thermo Scientific Nicolet™ 6700 Gold, no modo de reflexão total atenuada (ATR), e, contra um cristal de ZnSe, as amostras com as superfícies de resíduos de CA e CCA enriquecidas foram pressionadas. A varredura foi produzida na faixa de 650 cm^{-1} – 4000 cm^{-1} .

1.14.4 Termogravimetria (TG)

Para identificar as variações de massa pela degradação térmica de cinza da casca de aveia, foram realizadas análises de termogravimetria da espuma PU Controle e dos materiais compósitos sintetizados desse resíduo, que estiveram relacionados a temperaturas específicas em amostras de aproximadamente 9,0 mg, dispostas em cadinhos de platina à temperatura ascendente de 25°C a 800°C em atmosfera dinâmica de N₂, taxa de aquecimento igual a 10° C/min⁻¹ e ao resfriamento a ar sintético em 30 ml/min⁻¹.

Para os materiais compósitos sintetizados a partir da combinação do resíduo de CA e CCA, o ensaio foi realizado em um equipamento da SHIMADZU, modelo DTG60H em atmosfera de nitrogênio, sob uma taxa de aquecimento de 10° C/min⁻¹ até a temperatura de 800°C. A quantidade de amostra usada no ensaio foi de aproximadamente 2,0 mg.

1.14.5 Ângulo de Contato

O ângulo de contato interfacial entre as fases líquida e sólida, relacionado à espuma controle e aos compósitos, foi realizado por um goniômetro DIGIDROP de instrumentos GBX. A medição foi feita por meio da deposição de uma gota de 6 µL de água deionizada sobre as superfícies das amostras, mantidas à temperatura ambiente (25 ± 3°C), com dimensões de 10x15x1mm. A média dos ângulos de contato, direito e esquerdo, foi calculada usando o software Visiodrop. Para o tratamento estatístico, foram realizadas seis repetições dos valores médios dos ângulos observados, adotando-se um intervalo de confiança com nível de significância de 5% com base em uma distribuição normal gaussiana.

1.14.6 Ensaios de sorção do Azul de Metileno

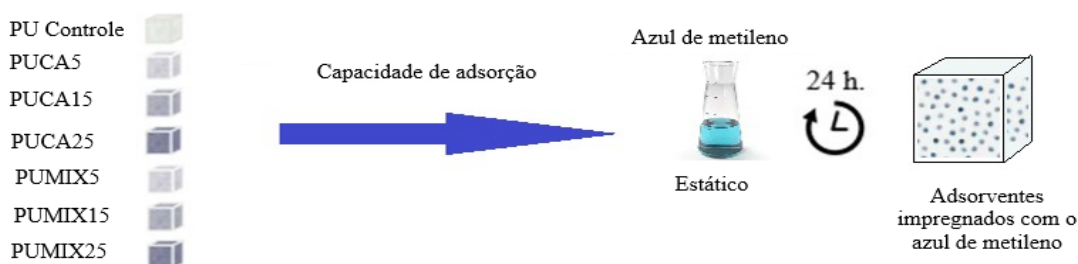
A espuma controle e os compósitos de PU com resíduos de cinza da casca de aveia e a combinação de cinza da casca de aveia com cinza da casca de arroz incorporados foram submetidos a ensaios para medir a capacidade de adsorção, nas concentrações de 10 mg/L, 20 mg/L e 50 mg/L de azul de metileno em sistema aquoso, conforme Figura 29, por meio de adaptações às metodologias implementadas por Almeida (2017) e Almeida *et al.* (2020).

A espuma de poliuretano e compósitos foram cortadas em formato cúbico (~0,7 cm³) correspondentes a 35 mg e imersas em frascos de vidros (125 mL) contendo 30mL de soluções de azul de metileno com a concentração desejada (50mg/L), adaptado de Baldez *et al.* (2008) e

Ren *et al.* (2021). Os frascos foram vedados e submetidos à agitação de 150 rpm em agitador (Dubinoff Quimis) por 24h, sob temperatura ambiente (25 ± 3 °C). Após o tempo de agitação, uma porção da solução de cada frasco foi coletado com uma seringa de 20mL e filtrada com um filtro de membrana millex-HV 450 mm. Uma pequena amostra do filtrado (4,5 mL) foi analisada em um espectrofotômetro UV-Vis (UV-2600, Shimadzu) para determinar a concentração do azul de metileno em comprimentos de onda 664 nm, de acordo com Ezeugo (2018), Oladoye *et al.* (2022) e Elgarahy *et al.* (2025).

As concentrações iniciais e finais de MB foram determinadas. A quantidade de MB adsorvida no equilíbrio foi calculada por meio da Equação (3.1) e a eficiência de remoção foi estimada utilizando a Equação (3.2), descritas no item 3.6.1.

Figura 29- Esquema do processo de adsorção de azul de metileno em espumas de PU.



Fonte: Autora (2025).

Foram realizadas análises de variância (ANOVA) de um fator, com nível de significância de 5%. Para essa análise, foram consideradas as amostras PU Controle, PUCA5, PUCA15, PUCA25, PUMIX5, PUMIX15 e PUMIX25, cada uma com tamanho amostral igual a 2. O objetivo foi verificar se existe uma correlação significativa entre a capacidade de sorção na concentração de 50 mg/L de azul de metileno e os diferentes teores de resíduo de cinza da casca de aveia e da combinação de cinza da casca de aveia com cinza da casca de arroz incorporados na espuma de PU.

Posteriormente, foram realizadas análises de variância (ANOVA) de fator duplo sem repetição, com nível de significância de 5%. Para essa análise, também foram consideradas a PU Controle, PUCA5, PUCA15, PUCA25, PUMIX5, PUMIX15 e PUMIX25, cada uma composta por três amostras. O objetivo foi verificar se existe uma correlação significativa entre a capacidade de sorção nas concentrações de 10 mg/L, 20 mg/L e 50 mg/L de azul de metileno para os diferentes teores de resíduo de cinza da casca de aveia e da combinação de cinza da casca de aveia com cinza da casca de arroz incorporados na espuma de PU, adaptado de Martins (2011).

1.14.7 Ensaios de inflamabilidade

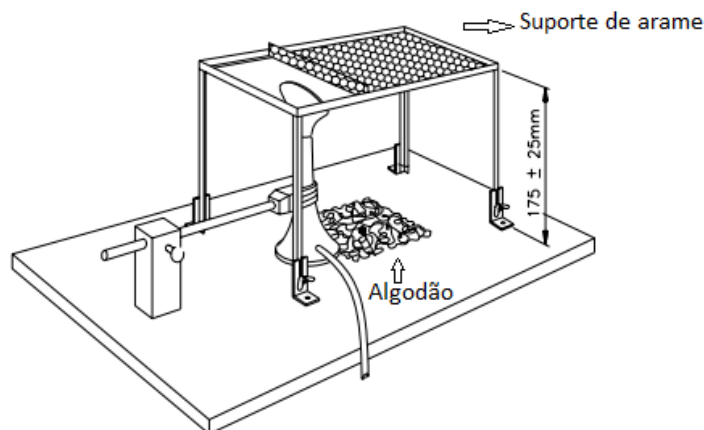
Para investigar a inflamabilidade, foi realizado o teste *Horizontal Burning Foamed Test*, HB; HBF, HF-1 e HF-2 acerca da queima horizontal dos materiais de espuma, seguindo a metodologia da norma de padrões de desempenho UL-94 (2023).

Para o ensaio HB, a norma exige que as amostras tenham dimensões de 125 ± 5 mm x $13,5 \pm 0,5$ mm x 13 mm, sejam preparadas em temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ (ambiente) e colocadas em um aparelho utilizado para a degradação térmica das espumas. Durante os testes, foram registrados o tempo decorrido da propagação da chama e a taxa de queima. Com base nos resultados, os materiais se classificariam ou não em HB.

Para o ensaio HBF, HF-1 e HF-2, a norma informa que as amostras devem ter dimensões de 150 ± 5 mm x 50 ± 1 mm x 10 mm, sejam preparadas em temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ (ambiente) e em umidade higroscópica, e colocadas em um aparelho utilizado para a degradação térmica das espumas. Durante os experimentos, registrou-se o tempo de pós-chama e pós-luminescência, o tempo para a chama atravessar um vão específico e o comprimento da amostra danificada. Com base nos resultados, os materiais foram classificados em três níveis de inflamabilidade: HF-1 ou HF-2, cada um representando diferentes graus de resistência ao fogo.

As amostras foram condicionadas ao ensaio em até 30 minutos depois do condicionamento e em temperaturas de 15°C a 35°C com umidade relativa $\leq 75\%$. Foram dessecadas por 24 h e usadas em até 30 minutos sobre a amostra de algodão. A Figura 30 ilustra o aparato usado pela UL-94 (2023).

Figura 30 - Ensaio de inflamabilidade para materiais de espuma de baixa densidade



Fonte: Adaptado de UL-94 (2023).

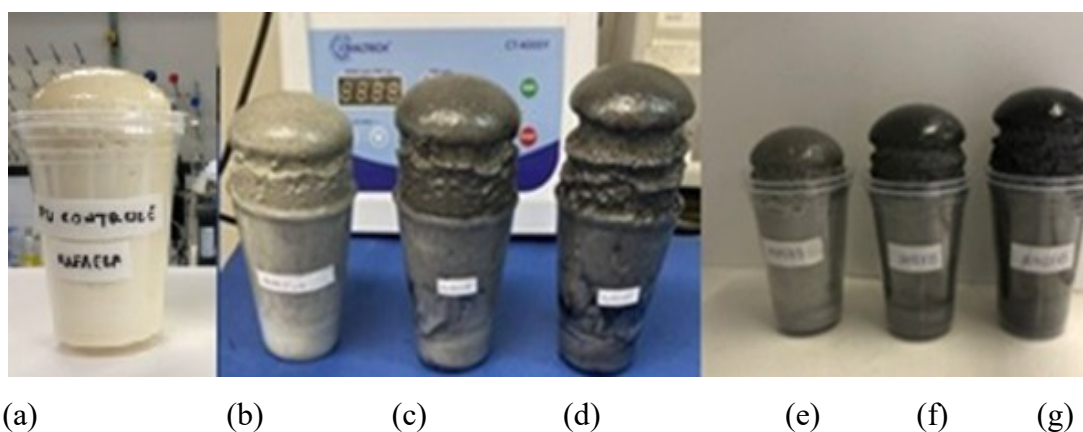
RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.15 Caracterização dos Materiais

A CA possui cor na tonalidade cinza-escuro, o que pôde ser constatado devido à presença de carbono após a degradação térmica a que o resíduo foi submetido, conforme mencionado por Giese *et al.* (2017) e Bellaver (2019). A perda ao fogo se relaciona com o processo de calcinação, devido ao tempo de queima ou modelo de forno, podendo ainda estar relacionado com a volatilização dos demais compostos a temperaturas maiores. A temperatura da calcinação está relacionada ao índice de amorfismo da amostra, que, quando calcinada a maiores temperaturas, possui estrutura mais cristalina e com mais picos, além de halo amorfo menos pronunciado em relação às outras amostras, possuindo menor reatividade (BELLAYER, 2019). Queiroz (2020) informa que cinza de casca de aveia apresenta grande quantidade de sílica (52,76%) e massa específica real de 2,095 g/cm³.

A CCA também possui cor cinza escurecido, que pode indicar a presença de carbono após o processo de degradação térmica ao qual o resíduo foi exposto, corroborando com os estudos de Fiore *et al.* (2020) e Assi *et al.* (2020). Pereira *et al.* (2024) relatam que o resíduo CCA calcinado apresentou uma área superficial específica baixa de 5,58 m²/g, medida por sorção de N₂, e uma composição de 93,64% de sílica, confirmada por fluorescência de raios X. Apolônio *et al.* (2020) também apontam alto teor de sílica na CCA (80%). A imagem da espuma e dos compósitos estão ilustradas na Figura 31 (a, b, c, d, e f, g).

Figura 31 – Espuma controle e compósitos sintetizados: (a) PU Controle; (b) compósito PUCA5; (c) compósito PUCA15; (d) compósito PUCA25; (e) compósito PUMIX5; (f) compósito PUMIX15; (g) compósito PUMIX25.



Nota-se, pelo aspecto visual, coloração mais escura à medida que aumenta o teor da CA nas espumas (b), (c) e (d) e o teor de CA com CAA nas espumas (e), (f) e (g). A preparação dos compósitos com incorporação de 5% e 15% de resíduo obteve melhores condições de síntese quando comparada ao material com 25% de resíduo, dada a dificuldade de homogeneização dos reagentes, que aumenta significativamente com a quantidade de resíduo, por tornar a mistura mais viscosa e espessa. Essa elevada viscosidade dificulta a dispersão uniforme dos reagentes, podendo formar aglomerados, comprometendo a qualidade final do compósito.

Assim, torna-se necessário realizar manualmente a regulação nas rotações na agitação, iniciando em velocidades menores de giro da hélice no misturador até atingir 1000 rpm, a fim de contornar a resistência imposta pela mistura densa. Dessa maneira, corroboram-se os estudos de Szycher (2012), que revela a dificuldade na homogeneização das espumas de PU incorporadas em carga inorgânica de carbonatos de cálcio, areia ou sulfato de bário, e Pereira (2023), que relata a dificuldade em homogeneizar a espuma de PU incorporada em maior teor da cinza casca de arroz.

1.15.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva de Raios-X (EDS)

As imagens obtidas por MEV do resíduo de cinza da casca de aveia estão ilustradas nas Figuras 32 (a, b, c, d). Evidencia-se que a morfologia das partículas do resíduo apresenta formato alongado e irregular e, em toda a sua estrutura, percebe-se uma série de vazios e poros, que se formaram durante o processo de queima, conforme relatos de Bellaver (2019) e Queiroz (2020). As partículas são angulares, com superfícies irregulares, que refletem a estrutura original da casca. Essa morfologia porosa, com cavidades e canais, contribui para a capacidade do material de adsorver outras substâncias, como contaminantes em soluções aquosas.

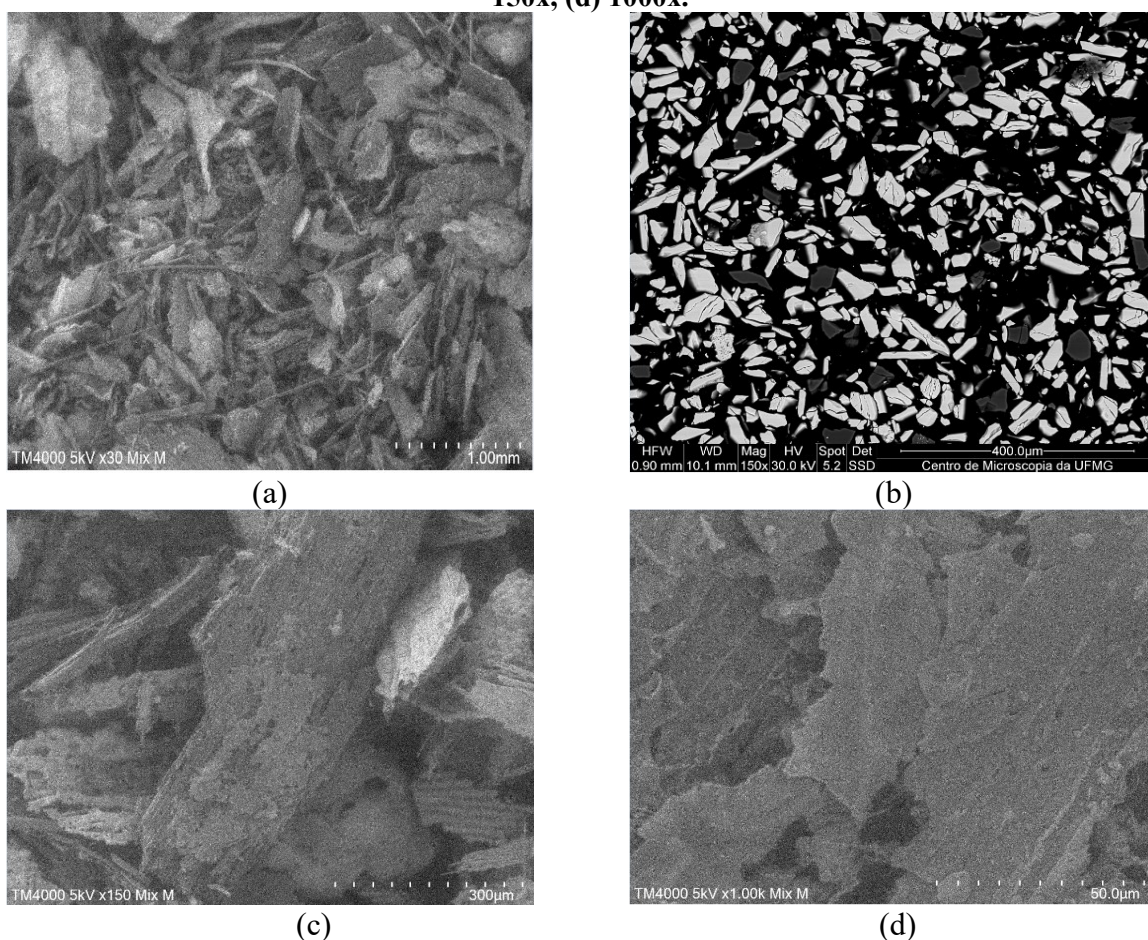
Nas CAs estudadas por Bellaver (2019), que foram calcinadas à temperatura de 500°C, constatando-se a ocorrência de perda de componentes orgânicos que compunham a casca da aveia e estavam presentes nas cavidades (vazios) desse resíduo. Com efeito, restou o material inorgânico, que é mais resistente ao calor e não volatilizou durante o processo de calcinação da amostra.

O mesmo autor, em seu trabalho, quando comparou a amostra calcinada a 500°C em relação à amostra calcinada a 650°C, percebeu que o material calcinado à maior temperatura apresentou menos vazios, estava mais densificado e iniciava um processo de fusão. A cinza calcinada à temperatura de 800°C possuiu maior deformação em sua estrutura, o que provocou

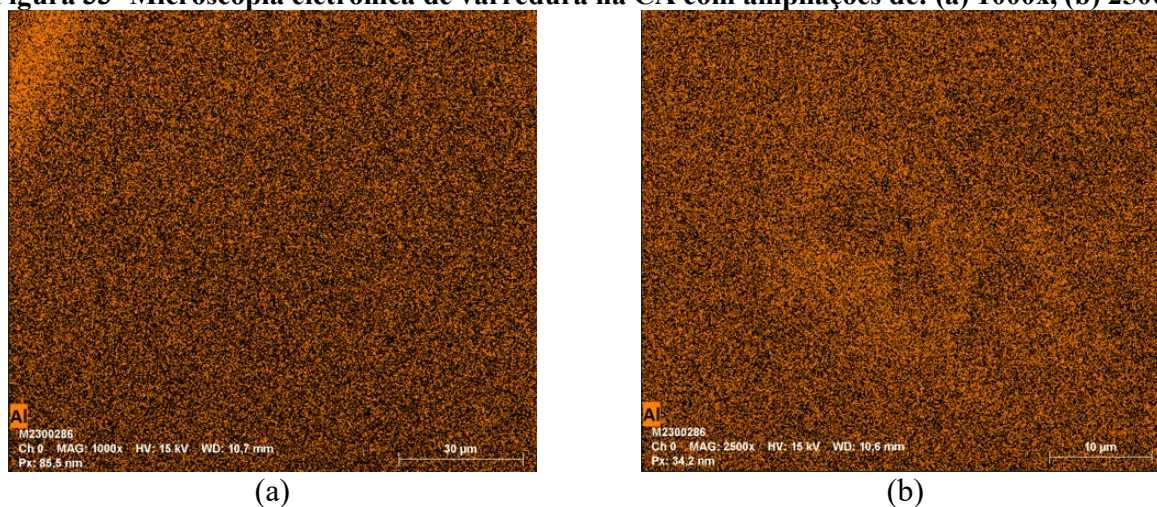
uma fusão do material e posterior solidificação, ou seja, houve perda do formato apresentado na temperatura de 500°C.

Queiroz (2020) informou o alto teor de matéria orgânica na cinza (12,9%), possivelmente resultante à queima incompleta do material, o que pode reduzir sua capacidade pozolânica e de filler. Vafakish *et al.* (2025), ao compararem as imagens obtidas por MEV dos biochars de casca de aveia produzidos entre 500 e 600 °C e a 700 °C, observaram que o material tratado na temperatura mais alta apresentou uma superfície mais lisa e sem poros visíveis.

Figura 32- Microscopia eletrônica de varredura na CA com ampliações de: (a) 30x, (b) 100x, (c) 150x, (d) 1000x.



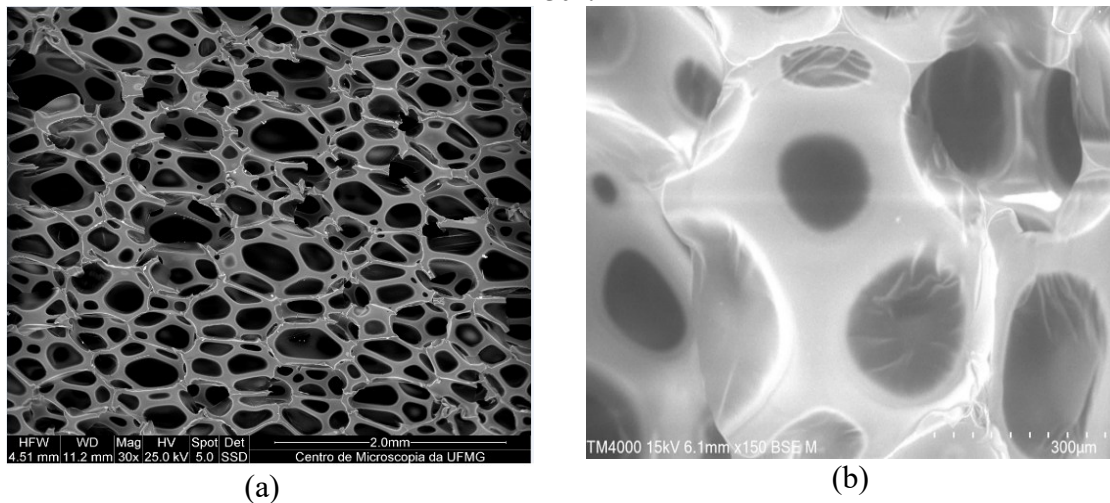
As imagens obtidas por MEV do resíduo de cinza da casca de arroz estão ilustradas nas Figuras 33 (a, b). Nela, evidencia-se que a morfologia das partículas do resíduo apresenta formato irregular, e em toda a sua estrutura, percebe-se aglomeração das partículas e poros. Essa morfologia porosa contribui para a capacidade do material de adsorver outras substâncias, segundo observado por Pereira *et al.* (2024).

Figura 33- Microscopia eletrônica de varredura na CA com ampliações de: (a) 1000x, (b) 2500x.

A análise EDS foi realizada para as amostras de resíduos de CA e CCA. As amostras foram preparadas por dispersão em substrato de silício metálico, permitindo a análise elementar semiquantitativa dos resíduos. A amostra CA demonstrou predominantemente óxido de ferro e sílica, enquanto a amostra CCA apresentou predominância de óxido de cálcio e sílica.

A seguinte Figura 34 (a, b) ilustra a morfologia da PU Controle. Nota-se a presença de superfície porosa, com alto teor de poros distribuídos e separados por uma pequena parede, o que corrobora os estudos de Soeiro (2017) e Balieiro (2023). Verificam-se também células de tamanhos e formatos irregulares, assim como os observados por Branca *et al.* (2003) e Almeida *et al.* (2020). A norma a ASTM D6226 (2021) determina que plásticos celulares são formados de membrana ou paredes de polímeros que delimitam cavidades ou células pequenas. Essas células podem ser denominadas como interconectadas (célula aberta), não conectadas (célula fechada) ou apresentar qualquer combinação dessas características.

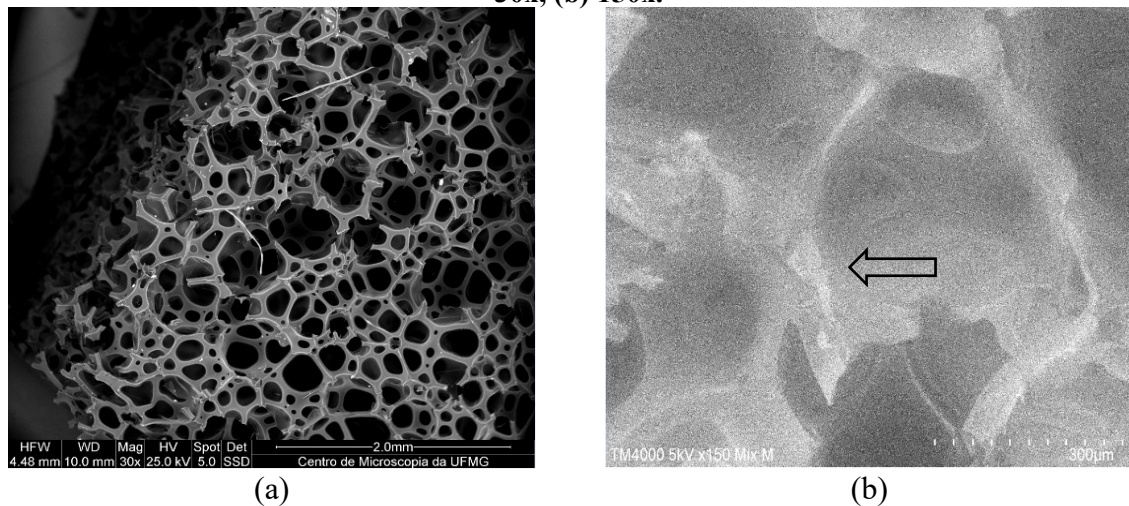
Figura 34 - Microscopia eletrônica de varredura da PU Controle com ampliações de: (a) 30x, (b) 150x.



A morfologia obtida por MEV do compósito com incorporação de 5% de CA na matriz polimérica de PU (PUCA5) está mostrada a seguir, na Figura 35 (a, b). As partículas do resíduo depositadas nas paredes da célula do compósito se assemelham às analisadas por Pereira (2023), que observou a ocorrência de sílica calcinada em sítios polares da superfície do polímero de PU com a incorporação de cinza da casca de arroz.

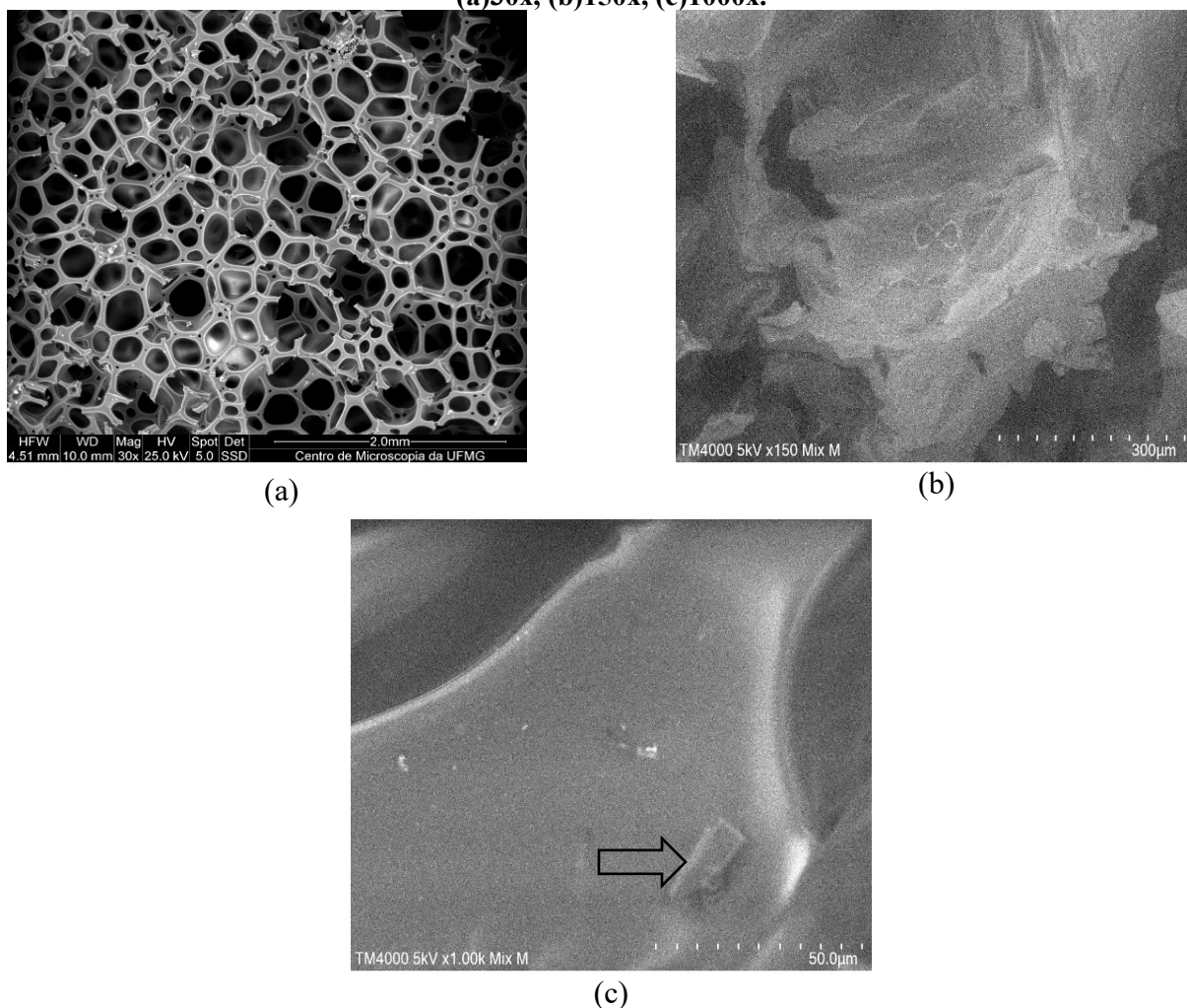
O resíduo inorgânico adicionado no PU torna as células irregulares, modificando o tamanho dos poros e sua estrutura morfológica, como observado em Soeiro (2017) e Almeida (2017). Constatou-se também que as células são revestidas por uma película, assim como relato por Neira (2011) e Soeiro (2017), o que favorece o processo de isolamento térmica de um sistema, pois o ar confinado em pequenos vazios é isolante térmico.

Figura 35 - Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos: PUCA5 com ampliações de: (a) 30x, (b) 150x.



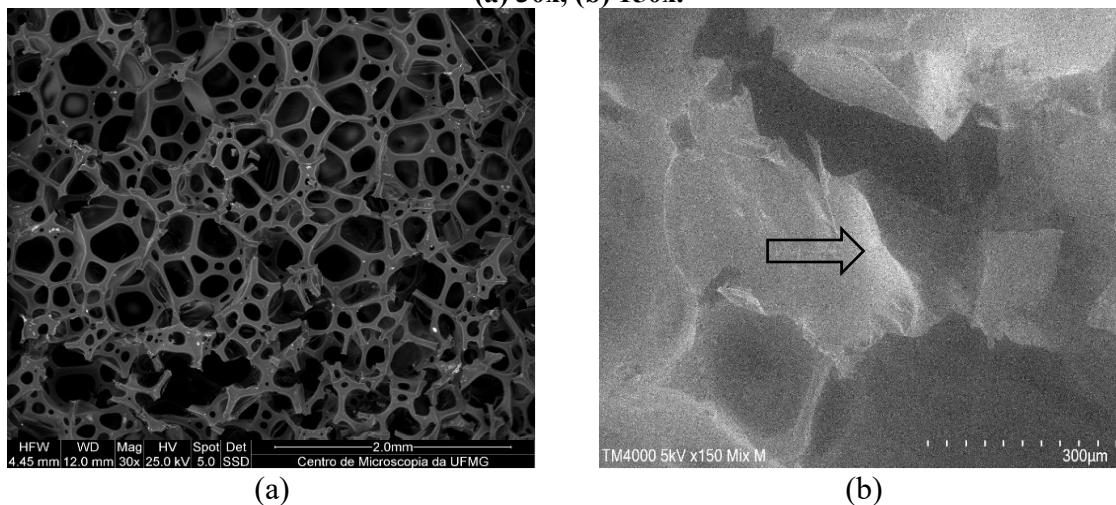
A Figura 36 (a, b, c) mostra que a incorporação de 15% de resíduo de CA nas espumas de poliuretano resultou em partículas sólidas, que se dispersaram e cobriram a superfície do resíduo. A Figura 36 (c) apresenta a cinza da casca de aveia com tamanhos distintos constantes no interior do compósito PUCA15 e sua incorporação na matriz de poliuretano, de maneira equivalente às partículas de cinza da casca de arroz nos compósitos sintetizados por Pereira *et al.* (2024) e Bui *et al.* (2020).

Figura 36 - Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos: PUCA15 com ampliações de: (a)30x, (b)150x, (c)1000x.



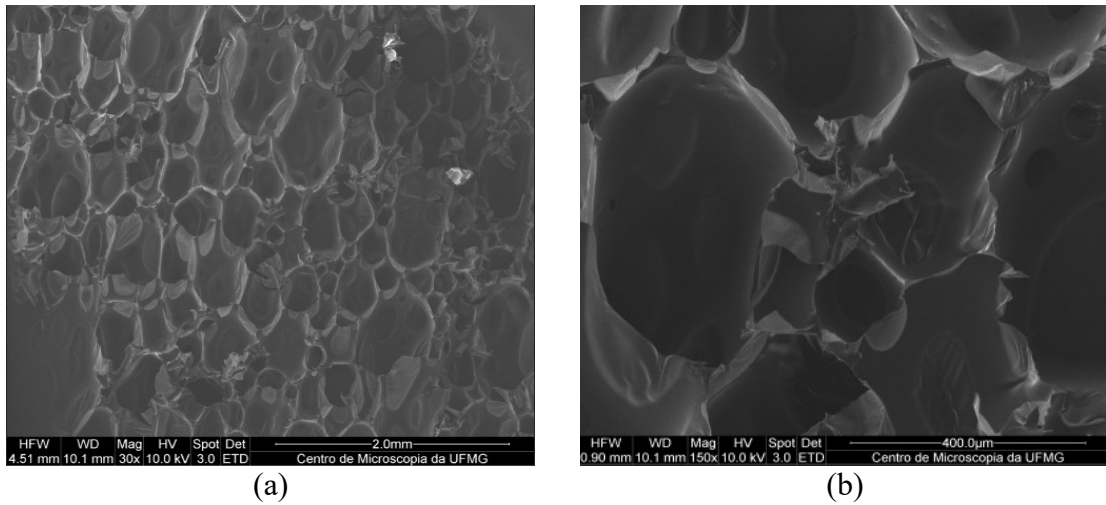
O resultado da análise por MEV do compósito PUCA25 pode ser observado na Figura 37 (a, b). A incorporação de CA evidenciou mapa de composição seletiva entre dois elementos mais presentes na porção do material, de modo análogo aos estudos de Pereira (2023) sobre a incorporação de CCA na matriz polimérica. Os resíduos se distribuem com homogeneidade na junção entre os poros e entre as paredes do polímero, confirmando a eficiente integração das partículas inorgânicas com o poliuretano, fato também observado por Almeida (2017).

Figura 37 - Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos: PUCA25 com ampliações de: (a) 30x, (b) 150x.



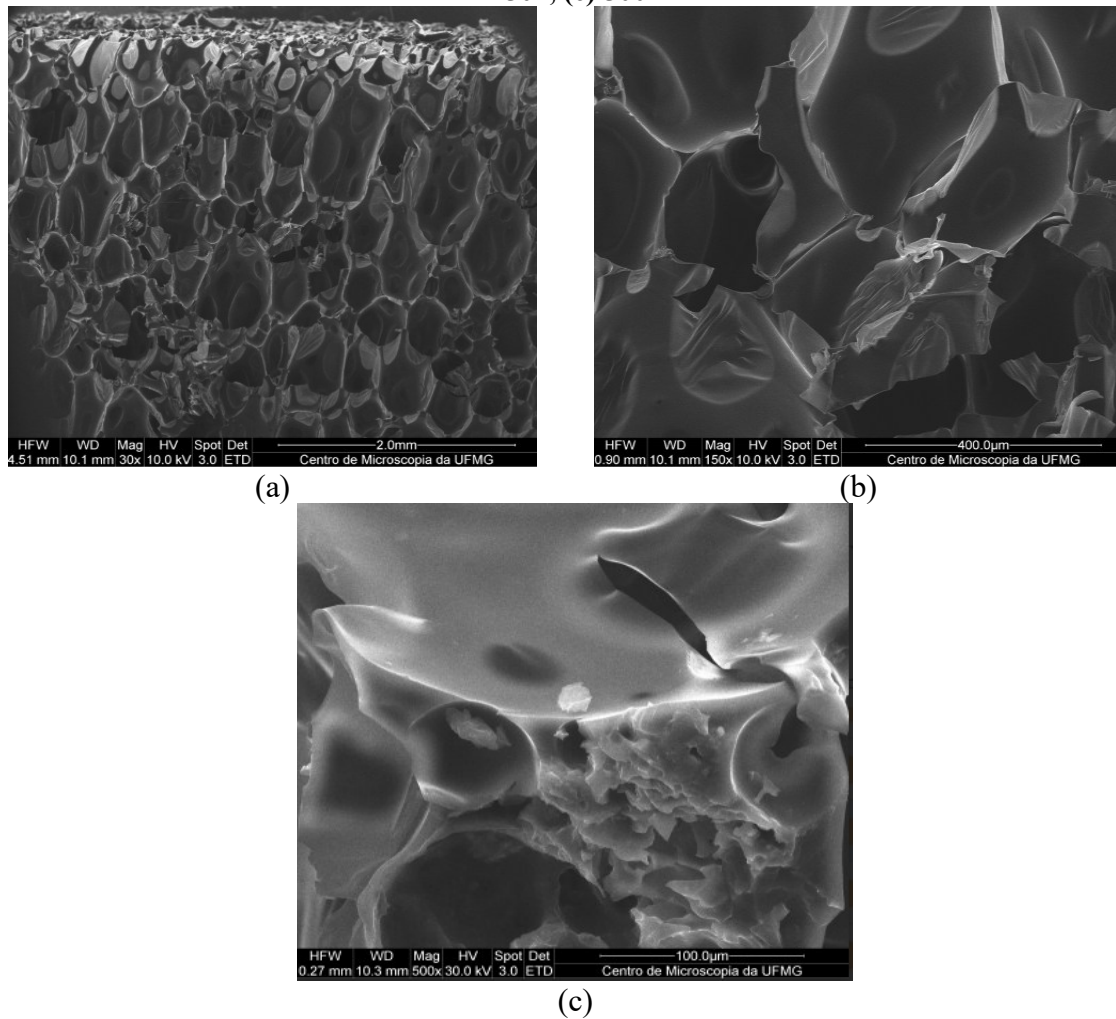
A morfologia do compósito obtida por MEV do compósito, com a combinação de 2,5% de CA e 2,5% CCA incorporada à matriz polimérica de PU (PUMIX5) está apresentada na Figura 38 (a, b). A incorporação do resíduo inorgânico ao PU resulta em células irregulares, modificando o tamanho dos poros e sua estrutura morfológica. As partículas do resíduo depositadas nas paredes da célula do compósito assemelham-se às analisadas no compósito PUCA5. Observou-se a presença de sílica calcinada em sítios polares da superfície do polímero de PU, devido à incorporação da combinação de cinza da casca de aveia com a cinza da casca de arroz. Constatou-se também que as células são revestidas por uma película, similarmente ao que foi observado nas imagens de MEV do compósito PUCA5.

Figura 38- Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos: PUMIX5 com ampliações de: (a) 30 e (b) 150x



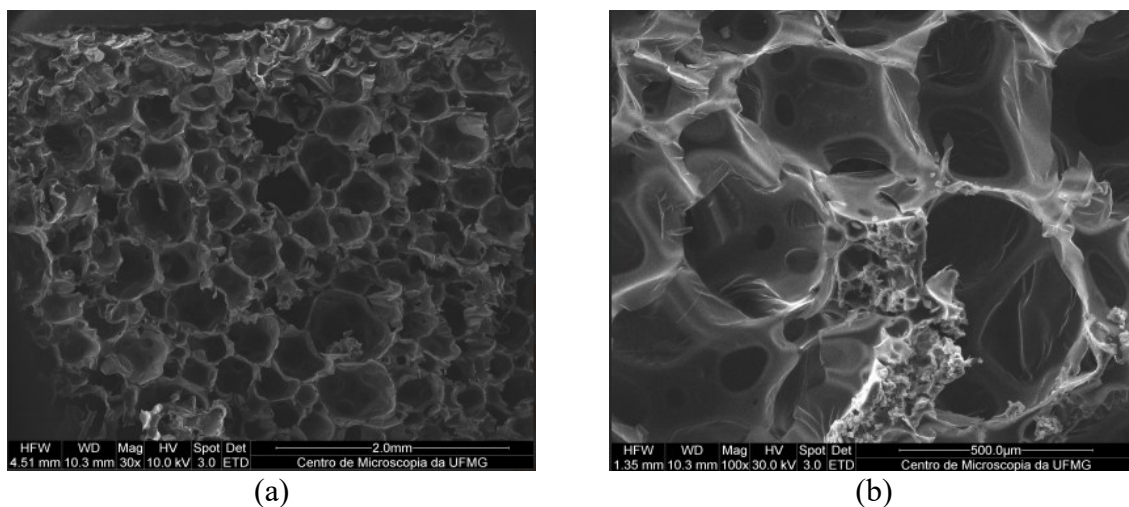
A Figura 39 (a, b, c) ilustra que a incorporação de 7,5% de CA e 7,5% CCA na espuma de poliuretano resultou em partículas, que dispersaram e cobriram a superfície do resíduo, semelhante ao que foi observado nas imagens de MEV do compósito PUCA15.

Figura 39- Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos: PUMIX15 com ampliações de: (a) 30x, (b) 150x, (c) 500x



A análise por MEV do compósito PUMIX25 está ilustrado na Figura 40 (a, b). A incorporação de CA e CCA evidenciou um mapa de composição seletiva mostrando dois elementos mais presentes no material. Os resíduos distribuem-se homogeneamente entre os poros e nas paredes do polímero, confirmando a eficiente integração das partículas inorgânicas com o poliuretano, fato também observado no compósito PUCA25.

Figura 40- Microscopia eletrônica de varredura dos compósitos: PUMIX25 com ampliações de: (a) 30x, (b)150x.

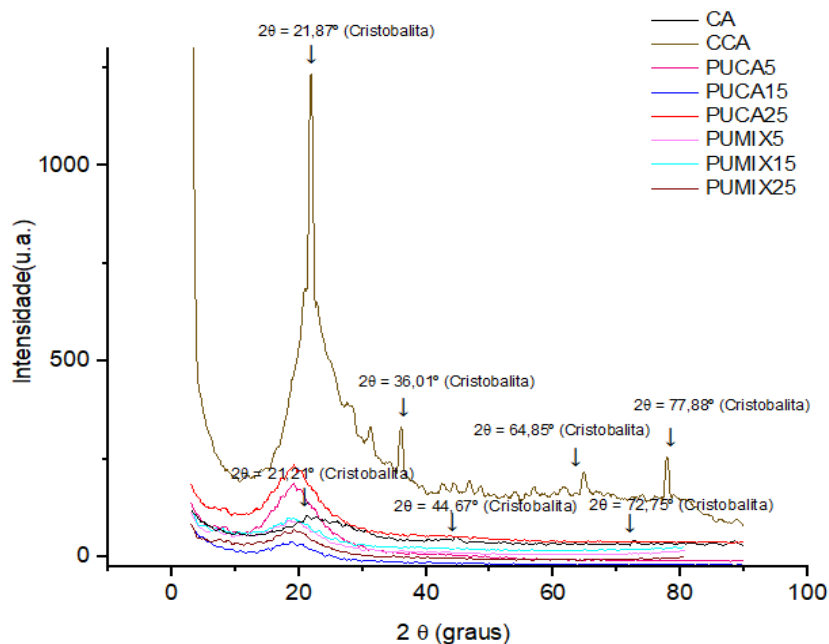


1.15.2 Difratometria de raios X (DRX)

O padrão da análise difratométrica da CA, CCA, PUCA5, PUCA15, PUCA25, PUMIX5, PUMIX15 e PUMIX25 está mostrado na Figura 41. Evidenciaram-se, no resíduo de CA, estruturas de cristobalita na forma cristalina da sílica, nos ângulos $2\theta = 21,21^\circ$, $44,67^\circ$ e $72,75^\circ$. A presença destes reflexos, em conjunto com a ausência de um halo amorfo pronunciado, indica que a sílica presente encontra-se predominantemente em forma cristalina, conforme apontado por Giese *et al.* (2017) e Bellaver (2019) como consequência de que a degradação térmica do resíduo se dá na temperatura de calcinação de 800°C , no ângulo $2\theta = 21,21^\circ$.

A difração de raios X da CCA apresentou picos nos ângulos $2\theta = 21,87^\circ$, $36,01^\circ$, $64,85^\circ$ e $77,78^\circ$, também compatíveis com a fase de cristobalita (SiO_2), o que sugere que a sílica se encontra predominantemente como cristobalita, resultado de tratamento térmico do resíduo em altas temperaturas, de modo a promover a cristalização da sílica originalmente amorfa, como observado por Pereira (2023). A incorporação de CA e CCA à matriz PU pouco alterou a estrutura amorfa da PU Controle. Isso porque os compósitos PUCA5, PUCA15, PUCA25, PUMIX5, PUMIX15 e PUMIX25, exibem o pico de difração amplo próximo a $2\theta = 20^\circ$, também relatado nos estudos de Almeida *et al.* (2020) e Assi *et al.* (2020).

Figura 41- Difrátogramas de raio X do resíduo da CA, CCA e seus compósitos.



1.15.3 Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

O espectro dos resíduos, da PU Controle e dos compósitos estão exibidos na Figura 42 (a, b). A CA apresentou picos nas bandas de 785 cm^{-1} , 1084 cm^{-1} e 2352 cm^{-1} , e a CCA teve picos nas bandas 772 cm^{-1} e 1052 cm^{-1} . Observou-se bandas características em 800 e 750 cm^{-1} , atribuídas aos modos de estiramento e flexão das ligações C–C em estruturas aromáticas, indicando claramente a presença de anéis aromáticos nas amostras dos resíduos analisados. Vafakish *et al.* (2025) relatam que o alto teor aromático do biochar de aveia contribui para sua eficácia como adsorvente para azul de metileno.

A PU Controle apresentou picos nas bandas de 785 cm^{-1} , 810 cm^{-1} e 1007 cm^{-1} . A presença da estrutura do isocianato (MDI) na espuma é confirmada a uma banda característica em 812 cm^{-1} , devido à vibração de ligação C–H do anel aromático, conforme observado por Kodippili (2003). O compósito de PUCA5 apresentou pico nas bandas de 1048 cm^{-1} , semelhantes aos compósitos de PUCA15 e PUCA25, em que se percebe a presença do poliéter alifático PPG 2000 na amostra, por meio da detecção das vibrações do grupo éter C–O–C, corroborando, assim, as observações de Almeida (2017), que informa pico na região de 1047 cm^{-1} da espuma de PU com incorporação de a resíduo de catalisador do craqueamento de petróleo.

O compósito PUMIX5 apresentou picos em 1052 cm^{-1} , semelhantes aos compósitos de

PUMIX15 e PUMIX25, em que se observam vibrações características dos grupos (Si–O–Si), provenientes do uso do surfactante de silicone, com picos mais evidentes nesses compósitos quando comparado à espuma PU Controle. Os compósitos registraram pico máximo da banda de estiramento N–H registrado em 3318 cm^{-1} . Pereira *et al.* (2024) relatam que o PU Controle obteve picos com maior intensidade em relação aos compósitos na banda de estiramento (N–H), registrado em 3311 cm^{-1} .

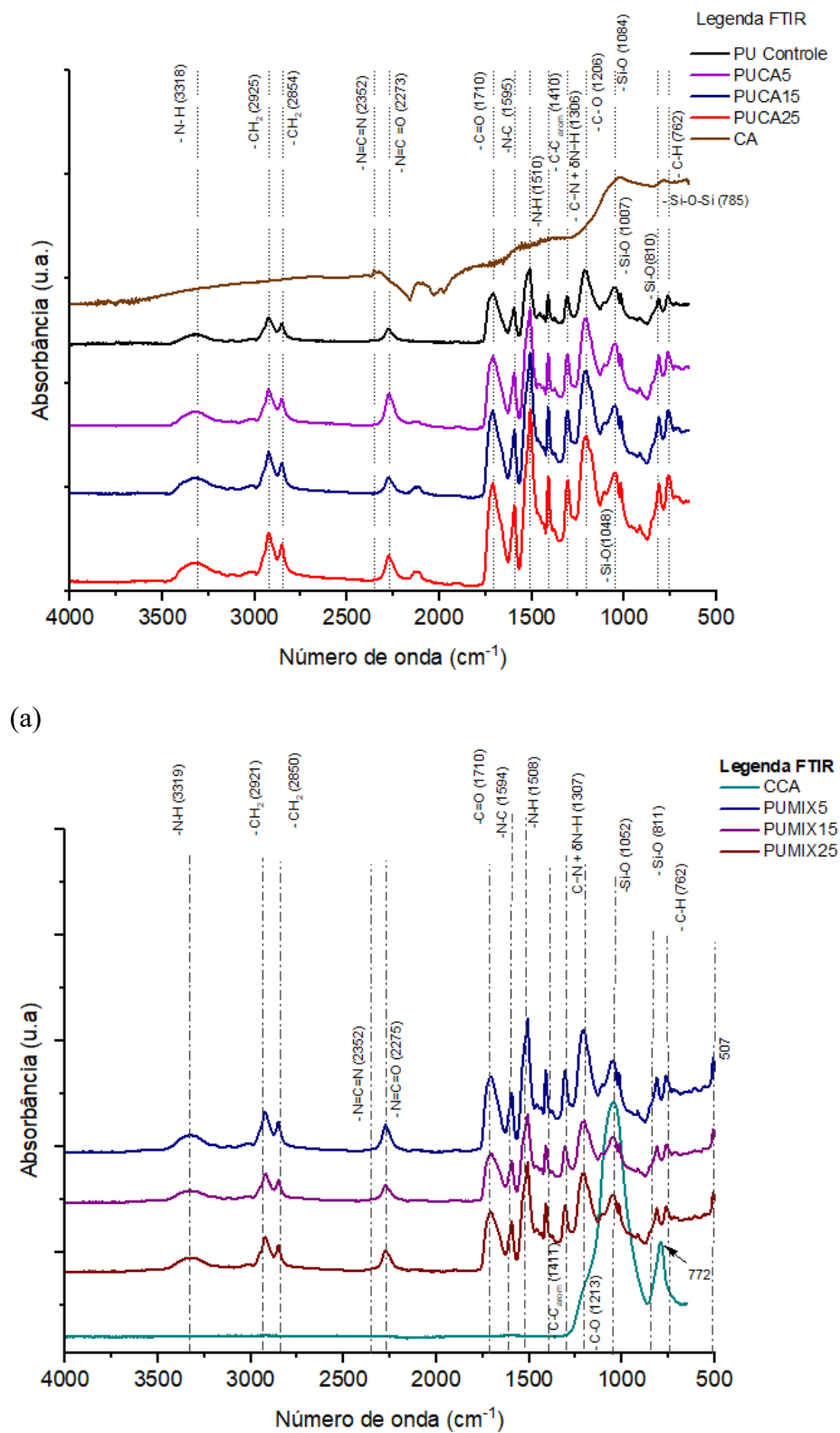
O pico máximo da banda de deformação de Si–O foi registrado em 1052 cm^{-1} , indicando vibrações de grupos de (Si–O–Si), devido à utilização do surfactante de silicone, sendo esses picos maiores nos compósitos sintetizados com a cinza da casca de arroz. Foram constatadas vibrações de carbonila nos compósitos em 1710 cm^{-1} . Observou-se uma banda característica em 1410 cm^{-1} , atribuída ao grupo de (C–C) arom e bandas características em 1306 cm^{-1} nos compósitos, atribuídas ao grupo C–N + δ N–H (amida II e amida III), de forma semelhante aos indicados por Pergal *et al.* (2021). A banda em 2273 cm^{-1} refere-se ao grupo NCO não reagido, cuja intensidade se torna mais acentuada com o aumento da porcentagem de resíduo.

Na Figura 42 (b), a incorporação das cargas inorgânicas resultou em uma maior quantidade de grupos NCO não reagidos (ou livres).

Phan *et al.* (2019) apontam pico em $531,0\text{--}532,4$, que poderia ser atribuído a O=C e/ou O=P, e o pico em $533,0\text{--}533,1$ que é atribuído a -O- nos grupos C–O–C, C–O–P e / ou C–OH. Segundo os autores, os resultados do FTIR demonstram que PU-RH/ATH produziu Al_2O_3 , que cobria a superfície do material, e que o PU-RH/OP gerava um resíduo contendo fósforo durante a decomposição, que poderia atuar como um carvão resistente ao calor, levando a uma alta estabilidade térmica e a um excelente retardamento de chama. Ainda é informado que os espectros FTIR dos resíduos PU-RH/ATH e PU-RH/OP mostram uma banda adicional de Al–O (668 cm^{-1}) e estão relacionados ao óxido de alumínio/fosfato de alumínio nas estruturas decompostas por ATH e OP. Além disso, os picos em 1613 e 1090 cm^{-1} são atribuídos às bandas de alongamento P–OH e P–O em PU-RH / OP, respectivamente.

Esses achados confirmam ainda mais as habilidades FR do ATH e OP na formação das camadas de caracteres. Essas camadas podem funcionar como uma barreira, inibindo o transporte térmico e de oxigênio e impedindo que o lado interno dos materiais seja exposto diretamente ao calor e à zona de combustão.

Figura 42 - Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR): (a) resíduo CA, espuma e dos compósitos de CA; (b) resíduo de CCA e dos compósitos de CA com o CCA.



Os compósitos com cargas de CA e CA com CCA apresentaram picos nas bandas 3318

cm^{-1} e 1510 cm^{-1} ; e 3319 cm^{-1} e 1508 cm^{-1} , respectivamente, que estão relacionadas às vibrações dos radicais (N-H) presentes nos grupos uretanos, os quais foram evidenciados também nas caracterizações da CCA em Almeida (2017). A análise revelou ainda presença dos grupos siloxanos, estabelecidos pelas vibrações de deformação nas bandas mostradas na Figura 42. Pergal *et al.* (2021) relatam a existência de pico na banda de 2270 cm^{-1} , referente aos grupos isocianatos na matriz polimérica. Isso remete ao modo incompleto de consumo do reagente na síntese dos compósitos, o que não ocorreu com a espuma de PU Controle.

A Tabela 12, a seguir, evidencia os principais grupos funcionais da espuma e dos compósitos com a cinza da casca de aveia e a combinação de cinza da casca de aveia com a cinza da casca de arroz, conforme observações de Kodippili (2003), Almeida (2017), Phan *et al.* (2019), Pergal *et al.* (2021), Pereira (2023) e Vafakish *et al.* (2025).

Tabela 12- Faixas de números de onda por grupos funcionais na região de radiação infravermelho

Grupo vibracional	Banda (cm^{-1})
Estiramento N-H	3500-3200
Estiramento alifáticos C-H (CH_2)	2915-2940
Alongamento simétrico C-H (CH_2)	2854
Estiramento N=C=O	2270
N=C=N	2136 -2100
Estiramento N-H	1750-1300
Estiramento C=O	1670-1710
Estiramento N-C (grupo uretano)	1600
(C-C) arom	1600 a 1410
C-N + δ N-H (amida II e amida III)	1535 a 1311
Deformação C-O	1215-1050
Deformação Si-O	830-1100
(C-H) arom	817
(C-C) arom	800 - 750
Deformação C-H (grupos aromáticos)	810-600
Si-O	

Fonte: Adaptado de Kodippili (2003), Almeida (2017), Phan *et al.* (2019), Pergal *et al.* (2021), Pereira (2023) e Vafakish *et al.* (2025).

1.15.4 Termogravimetria (TG) e Termogravimetria derivada (DTG)

Shen *et al.* (2021) relatam que os siloxanos apresentam alta energia de dissociação, o que confere à sílica grande estabilidade térmica em temperaturas elevadas. A Figura 43 (a, b) mostra os resultados da termogravimetria da espuma de PU Controle e compósitos com CA, evidenciando os três estágios de decomposição térmica da PU Controle e compósitos, assim como os observados por Chattopadhyay *et al.* (2009), Almeida (2017), Behnam *et al.* (2018) e

Pergal *et al.* (2021).

O primeiro estágio terminou em 330°C, correspondente à degradação térmica de 40% da espuma, associado à degradação de domínios rígidos (quebra dos elos de uretano), sendo este o estágio de maior pico, segundo relatado por Pergal *et al.* (2021). O segundo estágio foi finalizado entre 350°C e 500°C, devido à decomposição de componentes ésteres, enquanto o terceiro estágio foi atribuído à degradação dos segmentos flexíveis (poli(dimetilsiloxano) macrodiol), de 500°C a 550°C, conforme citado por Pergal *et al.* (2021).

Mahfuz *et al.* (2004) relataram que a estabilidade térmica das espumas de PU pode ser aumentada pelo uso de partículas de dióxido de titânio (TiO₂) e carboneto de silício (SiC). Eles demonstraram que a estabilidade térmica melhora à medida que a quantidade de TiO₂ aumenta, devido ao seu efeito catalítico na reticulação das espumas de PU. Porém, no maior conteúdo de SiC (3% em peso), as partículas prejudicam a interação de Van der Waals entre as cadeias de PU, resultando em uma redução da estabilidade térmica. A grande área de superfície dos materiais de enchimento nanométricos provoca um aumento na interação interfacial, o que pode aprimorar a estabilidade térmica do material.

Na Figura 44, a primeira etapa da decomposição, mostra o máximo da degradação térmica entre 250°C e 300°C. Na Figura 43 ocorreu pico de degradação térmica em 100°C, corroborando os estudos de Almeida *et al.* (2018), que indicam os valores entre 100°C e 300°C, sendo o compósito PUCA25 o mais estável, seguido dos compósitos PUCA15 e PUCA5, respectivamente, e o menos estável foi espuma de PU Controle. Já para as espumas com incorporação da combinação de cinza da casca de aveia com a cinza da casca de arroz, o compósito PUMIX15 foi o mais estável, seguido dos compósitos PUMIX5 e PUMIX25.

Figura 43 - Análise de termogravimetria (TG) e termogravimetria derivada (DTG) da espuma de poliuretano e dos compósitos de PUCA.

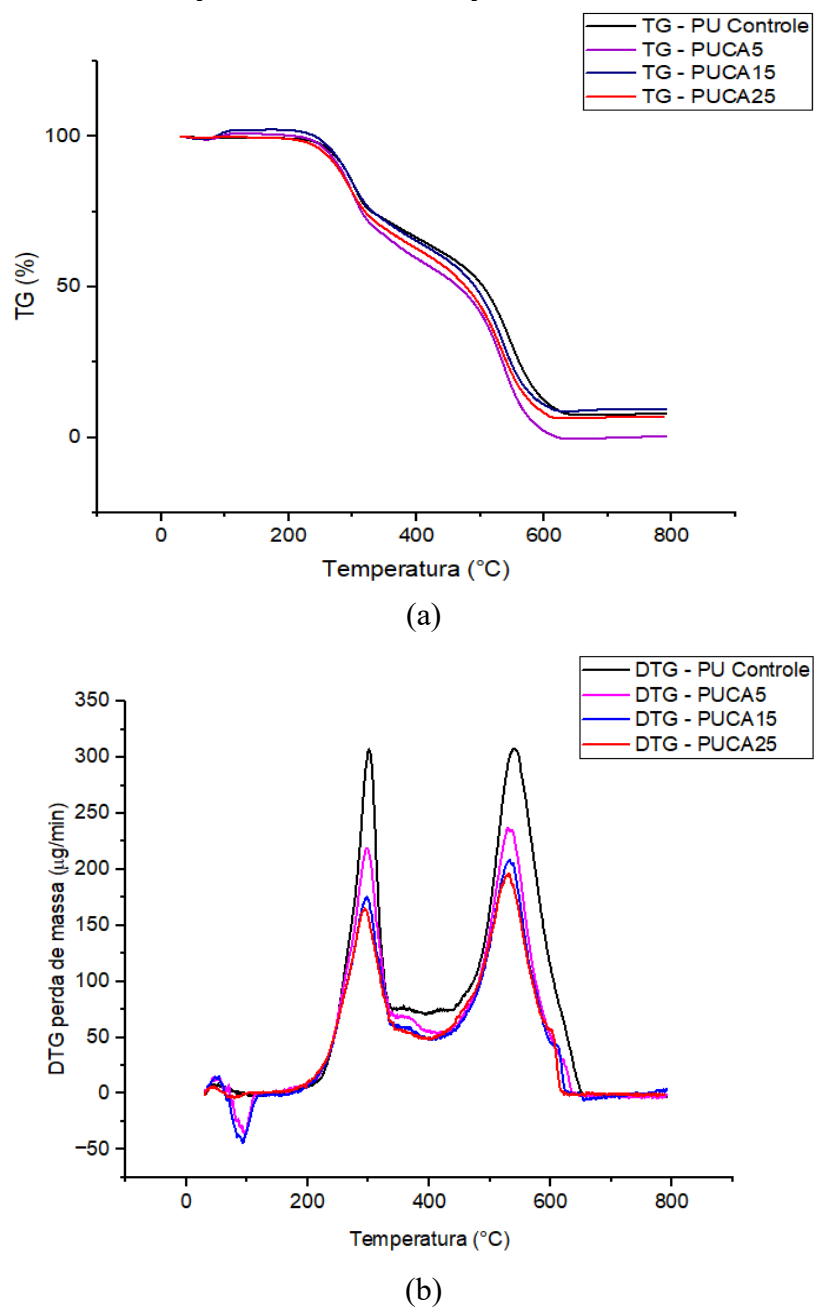
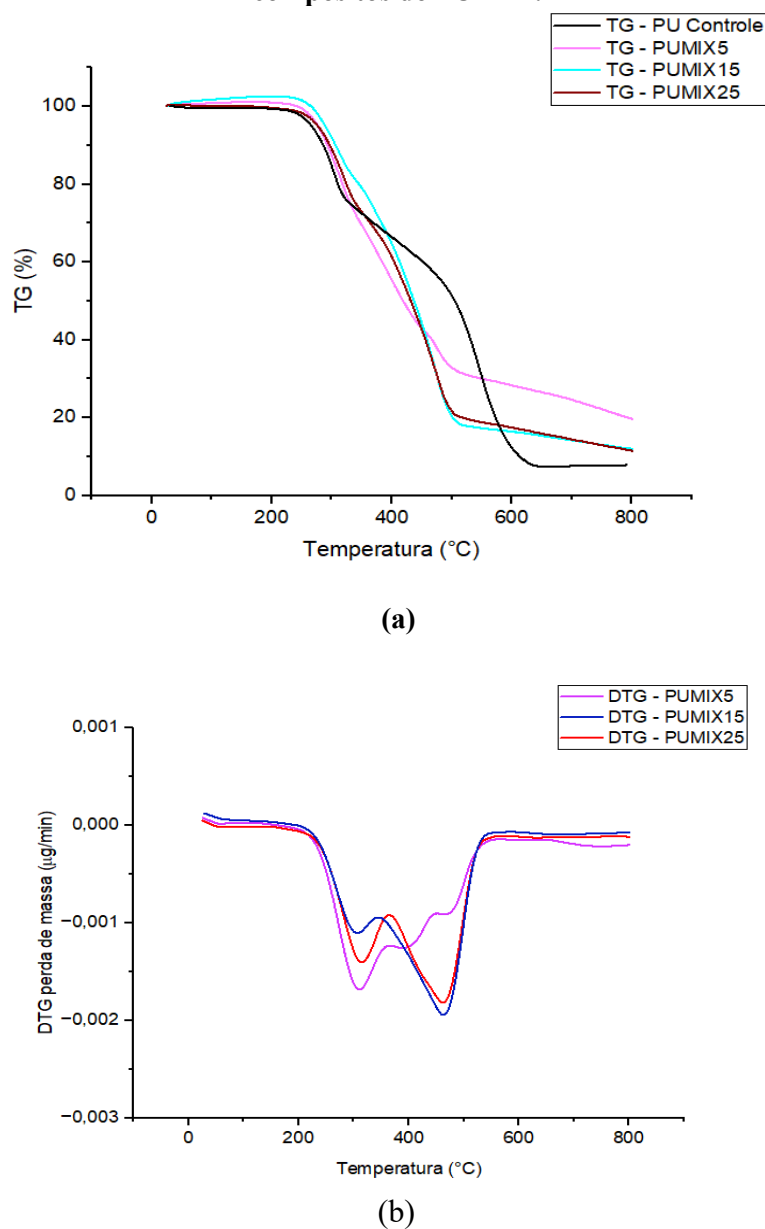


Figura 44-Análise de termogravimetria (TG) e termogravimetria derivada (DTG) dos compósitos de PUMIX.



A Figura 43 mostra uma relação direta entre o teor de resíduo de CA incorporado aos compósitos e o aumento do material remanescente em temperaturas superiores a 500°C, o que também foi observado por Chai *et al.* (2018) e Almeida (2017) — Figura 24 — e está apresentado na Tabela 13, a seguir. Embora não linear, essa tendência é observada ao se comparar o PUCA5 (0,51%) com o PUCA15 (9,34%) e o PUCA25 (6,67%), em que os percentuais de resíduo acompanham, em geral, o teor de CA utilizado nas incorporações, especialmente no compósito PUCA15.

Tabela 13 - Informações obtidas a partir da termogravimetria dos materiais estudados.

Material	T _{10%} (°C)	T _{50%} (°C)	T _{max%} (°C)	Resíduo calcinado (%)
PU Controle	285,6	506,9	538,4	7,8
PUCA5	278,9	465,6	529,2	0,51
PUCA15	274,7	478,0	530,9	9,34
PUCA25	285,5	493,4	532,7	6,67
PUMIX5	292,5	418,88	309,7	29,08
PUMIX15	306,3	437,2	463,3	16,91
PUMIX25	296,2	431,61	462,4	18,52

Nota: T_{10%}: temperatura em que 10% do material se decompõe termicamente devido à volatilização;

T_{50%}: temperatura em que metade do peso do material foi degradado termicamente; T_{max}: temperatura na qual o material exibe o pico exotérmico máximo, relativo à perda de massa por unidade de tempo na análise diferencial.

O comportamento de degradação térmica da PU Controle foi semelhante aos resultados de degradação de compósitos de espuma de poliuretano com cinza da casca de arroz apresentados por Pereira *et al.* (2024) até a perda de 10% da amostra. Após o primeiro pico endotérmico nos compósitos durante a análise termogravimétrica diferencial, verificou-se melhoria na estabilidade e proteção térmica, devido o primeiro estágio de degradação dos compostos voláteis, por volta de 330°C.

Esse padrão, observado nas curvas de TG e DTG, sugere aumento da temperatura de processamento das espumas, além de apontar para uma redução nas taxas de perda de materiais durante o processo de pirólise. A diferença mais significativa nas temperaturas observadas nesse intervalo foi de 20°C para o compósito PUCA5, enquanto o compósito PUCA15 apresentou uma diferença de 15°C, próxima à diferença da PUCA25 com 16°C. Isso indica ganhos percentuais de estabilidade de cerca de 6,1%, 4,5% e 4,8% respectivamente.

A estabilidade durante a pirólise é um indicador da energia das ligações entre os elementos presentes no material incorporado e os sítios de ligação na matriz polimérica de poliuretano, principalmente na região dos isocianatos, conforme relataram Maia *et al.* (2022). Os autores não identificaram o comportamento de resistência à degradação térmica nos compósitos, ao contrário de Pereira (2023) que enfatiza a importância do histórico de degradação térmica do resíduo de CCA, o qual contribui para melhor desempenho na estabilidade dimensional.

Zafar e Sharmin (2012) explicam que, na faixa de temperatura entre 300 e 500°C, ocorre uma rápida perda de massa devido à quebra das ligações dos grupos uretanos. Além disso, conforme McKenna e Hull (2016), nesse intervalo também ocorre a decomposição de isocianatos e amidas. A segunda etapa ocorreu de 350°C a 500°C, e as amostras da série PUCA apresentaram estabilidade semelhante, com a PU Controle destacando-se em relação às demais. Já para as espumas com incorporação da combinação de cinza da casca de aveia com a cinza

da casca de arroz, o compósito PUMIX15 foi o menos estável.

O terceiro estágio da decomposição foi entre 500°C a 550°C, que esteve associada à quebra de ligações mais resistentes, como os grupos alifáticos C–C, aromáticos, FR ou outros compostos com elevada estabilidade térmica, segundo apontado por Phan *et al.* (2019), nas temperaturas de 510°C a 760°C. Na curva DTG, houve menores perdas de massa para o compósito de PUCA25.

Os valores na Tabela 13 indicam que, quando ocorre a perda de 10% da massa dos materiais, há uma leve redução da estabilidade térmica com o aumento do teor de CA incorporado ao PU Controle. No entanto, as amostras PUMIX mostram um aumento na $T_{10\%}$, indicando uma melhor estabilidade térmica inicial em comparação com o PU Controle. A amostra PUMIX15 se destaca com a maior estabilidade inicial (306,3 °C).

Observa-se que todas as amostras modificadas, tanto da série PUCA quanto da série PUMIX, apresentam uma queda na temperatura em que atingem 50% de perda de massa, em comparação com o PU Controle (506,9 °C). Constatou-se que não houve diferença significativa de perda de massa entre os compósitos PUCA15 e PUCA25.

Os resultados da Tabela 13 indicam uma estabilidade térmica superior à observada em compósitos de PU em estudos realizados por Pereira *et al.* (2024).

1.15.5 Ângulo de contato

As medições do ângulo de contato da espuma controle e dos compósitos, apresentadas na Figura 45, foram realizadas por meio de 6 e 10 medições, respectivamente, e nível de significância de 5%. Os valores alcançados para θ foram: 109,05°±5,45° (PU Controle), 93,54°±4,67° (PUCA5), 88,80°±4,44° (PUCA15), 80,23°±4,01° (PUCA25), 84,26°±4,21° (PUMIX5), 92,45°±4,62° (PUMIX15), 109,64°±5,48° (PUMIX25). Os ângulos de contato observados variaram de modo diferente à medida que se aumentou o teor de resíduo de CA e CCA incorporados à matriz polimérica. O caráter hidrofóbico da espuma de PU Controle e dos compósitos foi confirmado pelos valores de θ superiores a 80°, corroborando os estudos de Almeida (2017).

Os valores de θ foram maiores na ausência do resíduo de CA, registrando $\theta = 109,05^\circ$ na espuma PU Controle, e em baixos teores de CA (PUCA5 $\theta \approx 93^\circ$), quando comparados aos ângulos 15% (PUCA15 $\theta \approx 88^\circ$) e 25% (PUCA25 $\theta \approx 80^\circ$). Já os valores de θ foram maiores em 25% da combinação dos resíduos CA e CCA (PUMIX25 $\theta \approx 109^\circ$), quando comparados aos ângulos 5% (PUMIX5 $\theta \approx 84^\circ$) e 15% (PUMIX15 $\theta \approx 92^\circ$) desses resíduos. Tais valores

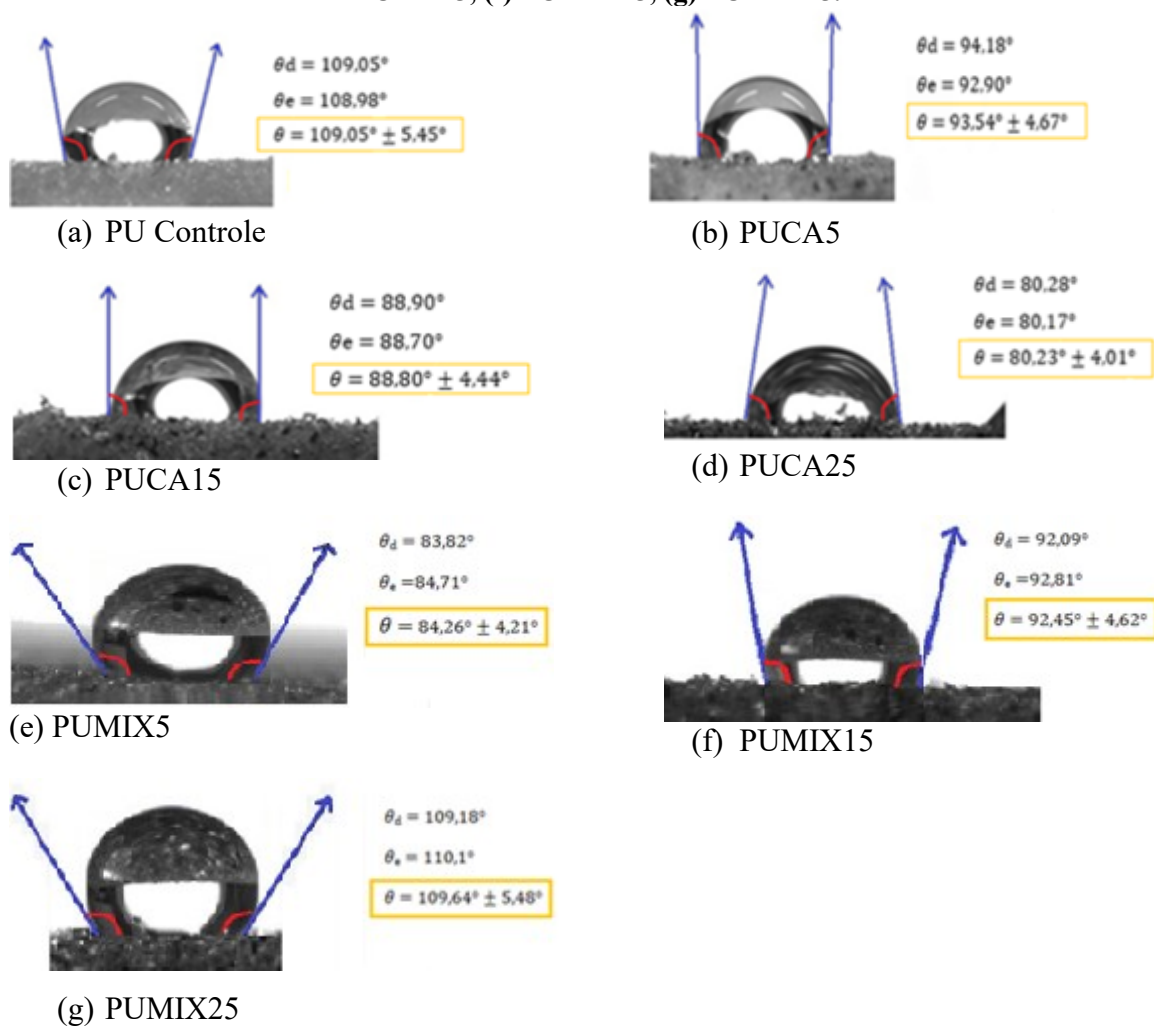
sugerem que a espuma PU Controle e os compósitos de PU podem ser eficazes na adsorção de contaminantes com propriedades hidrofóbicas. O aumento da carga de CA reduziu o ângulo de contato, o que sugere que a presença de sílica calcinada na superfície diminuiu a hidrofobicidade dos materiais.

Por outro lado, o compósito PUMIX25 apresentou ângulo de contato ligeiramente superior ao do PU Controle. Esse resultado indica que, na concentração de 25% e na presença combinada de CA e CCA, a sílica calcinada e a morfologia de poros achatados atuam conjuntamente para aumentar a hidrofobicidade do material. A incorporação do resíduo na matriz polimérica pode aumentar a rugosidade, um fator que favorece a hidrofobicidade do compósito. Isso ocorre, quando a gota de líquido estabelece contato parcial com a superfície do material e, em parte, com o ar (Grundke *et al.* 2014).

Maia *et al.* (2022) observaram que os ângulos de contato variaram conforme os níveis crescentes de resíduo incorporados à matriz polimérica. Almeida (2017) demonstrou um aumento no ângulo de contato em compósitos de poliuretano com quantidades crescentes do resíduo de catalisador do craqueamento de petróleo, proporcionando, aumento na hidrofobicidade dos materiais.

Maia *et al.* (2022) também relataram aumento gradual no ângulo de contato dos compósitos com teor de 5%, 10%, 20%, 30% e 40% do resíduo de cinza de café (CR) em comparação ao PU puro, que apresentou valores de ângulo de contato de $86,0 \pm 4,4^\circ$, e à medida que o resíduo da cinza de café (CR) foi incorporado às espumas de PU, obtiveram-se valores em torno de 9° , 15° , 34° , 28° e 34° , respectivamente, constatando um maior caráter hidrofóbico das espumas com adição do resíduo de café do que o PU puro.

Figura 45- Ângulo de contato: (a) PU Controle, (b) PUCA5, (c) PUCA15, (d) PUCA25, (e) PUMIX5, (f) PUMIX15, (g) PUMIX25.



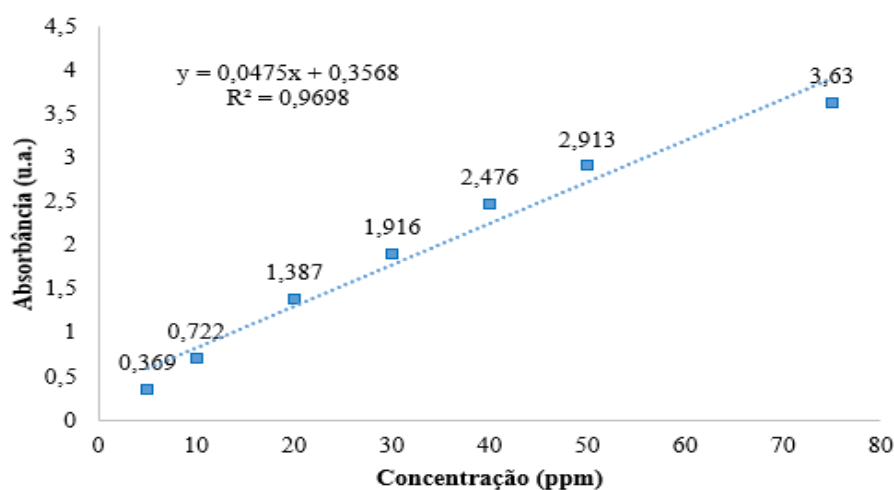
1.16 Curva de Calibração

O espectro de absorção do azul de metileno em soluções aquosas com concentrações variando de 5 a 75 mg/L, analisadas entre 180 e 800 nm, para determinar a curva de calibração, está elencado na Tabela 14.

Tabela 14 - Resultados do espectro de absorção para determinar a curva de calibração.

Concentração (mg/L)	Absorbância	Comprimento de onda (nm)
75	3,630	664
50	2,913	
40	2,476	
30	1,916	
20	1,387	
10	0,722	
5	0,369	

O valor máximo de absorbância estava em um comprimento de onda igual a 664 nm, o que ratifica os estudos de Baldez *et al.* (2008) e Oladoye *et al.* (2022). Os resultados geraram uma curva de calibração, ilustrada na Figura 46, com coeficiente de correlação $R^2 = 0,9879$, demonstrando a eficiência da técnica de detecção quantitativa de azul de metileno em soluções aquosas, que pode confirmar as concentrações das soluções produzidas.

Figura 46- Curva de calibração para o azul de metileno.

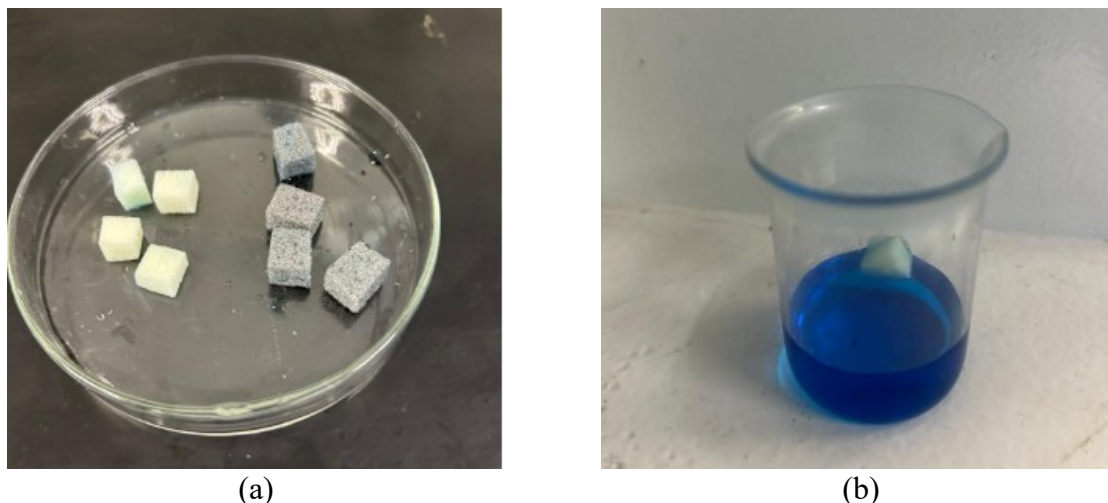
1.17 Resultados de desempenho

1.17.1 Capacidade de sorção

Para determinar a capacidade de sorção de azul de metileno pelos materiais desenvolvidos – espuma PU Controle e seus compósitos de PUCA e PUMIX – seguiu-se uma

metodologia baseada nos trabalhos científicos de Baldez *et al.* (2008), Almeida *et al.* (2020) e Asweisi *et al.* (2021). A Figura 47 (a e b) expõe os compósitos utilizados para determinar a quantidade de azul de metileno retida por unidade de massa das espumas e seus compósitos, que foi calculada a partir da Equação 3.1.

Figura 47- Amostras de PU Controle e os compósitos em cubos (a) e imersos no azul de metileno na concentração de 50 mg/L (b).



A Tabela 15 apresenta a capacidade de sorção de azul de metileno do ensaio em sistema monofásico com concentração de 10 mg/L e nela verifica-se que os compósitos não apresentam tendência de crescimento de sorção. A análise da capacidade de adsorção das espumas de poliuretano modificadas revelou uma dependência entre o desempenho de remoção do corante azul de metileno e a composição e concentração das cinzas incorporadas. A espuma de poliuretano (PU Controle) apresentou uma remoção de 22,45%. A PUCA5 demonstrou uma melhoria no desempenho com 30,30% de remoção.

No entanto, o aumento da concentração de cinza de aveia nos compósitos PUCA15 e PUCA25 levou a uma redução na eficiência, com remoções de 27,22% e 15,07%, respectivamente, sugerindo que uma alta concentração pode prejudicar a estrutura porosa da espuma. Em contrapartida, a combinação da cinza de aveia e de arroz demonstrou um comportamento distinto, visto que a PUMIX5 apresentou um percentual de remoção de 34,60%, superior à sua análoga PUCA5, e o aumento desses resíduos na PUMIX15 resultou em uma queda na eficiência para 16,61%. Já a formulação PUMIX25 destacou-se como a mais eficaz, com o percentual de remoção de 41,37%, o que foi corroborado pelo maior valor de capacidade de adsorção (q_e) de 4,51 mg.g⁻¹.

Esse desempenho pode estar relacionado tanto à maior hidrofobicidade apresentada pelo

compósito ($\theta = 109, 64^\circ$), conforme ilustrado na Figura 45(g), quanto à sua morfologia. A morfologia de poros achatados e a estrutura celular irregular observadas nos compósitos PUMIX por MEV, ilustradas nas Figuras 38, 39 e 40, podem proporcionar uma área de superfície interna mais acessível ao contaminante, favorecendo a difusão e o contato com os sítios de adsorção.

Pereira *et al.* (2024) observaram desempenho superior na sorção de derivados de óleo diesel por espumas de poliuretano em compósitos com maior hidrofobicidade — comportamento também verificado tanto na espuma de PU Controle quanto nos compósitos PUMIX25 e PUCA5 avaliados neste estudo, conforme mostrado na Figura 45. Esses resultados indicam que a sinergia entre as duas cinzas é otimizada em concentrações mais elevadas, tornando a formulação PUMIX25 a mais promissora para aplicações futuras em tratamento de efluentes.

Tabela 15- Capacidade de sorção de azul de metileno pela espuma PU Controle e os compósitos na concentração de 10 mg/L.

Espuma	Absorbância	Ce(mg/L)	qe (mg/g)	massa	Porcentagem
PU Controle	0,861	10,61	2,45	0,0376	22,45
PUCA5	0,81	9,54	3,53	0,0352	30,30
PUCA15	0,83	9,96	3,18	0,0351	27,22
PUCA25	0,909	11,63	1,71	0,0361	15,07
PUMIX5	0,782	8,95	4,01	0,0354	34,60
PUMIX15	0,899	11,41	1,91	0,0358	16,61
PUMIX25	0,738	8,03	4,51	0,0377	41,37
Azul de metileno	1,007	13,69			

A Tabela 16 demonstrou a relação entre a eficiência da adsorção e o tipo e a concentração de cinzas incorporadas nas espumas de poliuretano modificadas que foram utilizadas na remoção do corante de azul de metileno, na concentração de 20 mg/L. A espuma PU Controle apresentou uma remoção de 36,32%. A adição de 5% de cinza da casca de aveia na formulação PUCA5 resultou em um aumento significativo no desempenho, com uma remoção de 46,28%, o que possibilitou sua classificação como a mais eficiente de todas as amostras testadas.

No entanto, o aumento da concentração desse resíduo nos compósitos PUCA15 e PUCA25 levou a uma redução na eficiência, com remoções de 29,78% e 14,73%, respectivamente, indicando que a alta concentração de cinza da casca de aveia pode ser

prejudicial à capacidade de adsorção. Esse desempenho está, ainda, relacionado à menor hidrofobicidade apresentada pelos compósitos PUCA15 ($\theta \approx 88^\circ$) e PUCA25 ($\theta \approx 80^\circ$), conforme ilustrado na Figura 45(c e d). Em contraste, as espumas que continham a mistura de cinza da casca de aveia e arroz (PUMIX) apresentaram um desempenho consistentemente inferior.

A PUMIX5 removeu apenas 15,17% do corante, enquanto as formulações PUMIX15 e PUMIX25 foram as menos eficazes, com remoções de apenas 7,64% e 9,08%. Esses resultados sugerem que, neste estudo, a presença de cinza da casca de arroz não foi benéfica para o processo de adsorção. A capacidade de adsorção (q_e), medida em mg/g, também reforça esses achados, com a PUCA5 apresentando o maior valor (mg.g^{-1}). Portanto, a formulação PUCA5 é a mais promissora para futuras aplicações.

Tabela 16- Capacidade de sorção de azul de metileno pela espuma PU Controle e os compósitos na concentração de 20 mg/L.

Espuma	Absorbância	Ce(mg/L)	q_e (mg/g)	massa	Porcentagem
PU Controle	0,932	12,11	6,24	0,0332	36,32
PUCA5	0,842	10,21	7,35	0,0359	46,28
PUCA15	0,991	13,35	5,16	0,0329	29,78
PUCA25	1,127	16,21	2,42	0,0347	14,73
PUMIX5	1,123	16,13	2,34	0,0369	15,17
PUMIX15	1,191	17,56	1,20	0,0362	7,64
PUMIX25	1,178	17,29	1,35	0,0383	9,08
Azul de metileno	1,26	19,01			

A Tabela 17 demonstrou a eficiência da sorção de azul de metileno na concentração de 50 mg/L, em função do aumento do teor de CA e CA/CCA incorporado à matriz polimérica. A maior capacidade de sorção de azul de metileno foi de $18,479 \text{ mg.g}^{-1}$ (registrada no compósito PUCA25), devido ao elevado teor de resíduo de CA em comparação aos demais compósitos, o que proporciona um número significativamente maior de sítios ativos para interação com o corante catiônico. A presença do resíduo aumenta a porosidade da espuma, ampliando a área superficial disponível para adsorção.

Além disso, os grupos funcionais do poliuretano, como $-\text{NH}$ e $-\text{C}=\text{O}$, juntamente com os componentes da casca de aveia (celulose, hemicelulose e sílica), fornecem sítios ativos para interações eletrostáticas e ligações de hidrogênio com o corante catiônico. A espuma PU Controle demonstrou uma boa capacidade de remoção, atingindo 37,70%. Todavia, o melhor

desempenho foi observado no compósito PUCA25, que alcançou uma remoção de 44,80%. Nesse material, a presença do resíduo pode ter induzido a diminuição do tamanho médio dos poros, o que, por sua vez, pode favorecer o aumento da área superficial específica.

Há perspectivas de que haja uma maior quantidade de paredes internas por unidade de volume, ou seja, maior número de sítios ativos disponíveis para interação com o adsorvato, favorecendo a adsorção. De forma geral, as espumas modificadas apenas com cinza de casca de aveia apresentaram resultados superiores na adsorção de azul de metileno em comparação aos compósitos que continham a mistura de cinza da casca de aveia e cinza de casca de arroz.

Tabela 17- Capacidade de sorção de azul de metileno pela espuma PU Controle e os compósitos na concentração de 50 mg/L.

Espuma	Absorbância	Ce(mg/L)	qe (mg/g)	massa	Porcentagem
PU Controle	1,867	31,79	15,32	0,0377	37,70
PUCA5	2,028	35,18	13,03	0,0365	31,06
PUCA15	1,967	33,90	13,86	0,0371	33,58
PUCA25	1,695	28,17	18,95	0,0362	44,80
PUMIX5	2,104	36,78	11,50	0,0372	27,93
PUMIX15	2,103	36,76	11,36	0,0377	27,97
PUMIX25	2,189	38,57	10,22	0,0366	24,42
Azul de metileno	2,781	51,04			

Os estudos revelam que o compósito PUCA25 aprimora a sorção de azul de metileno, atingindo uma capacidade de 3,63 mg/g⁻¹ superior à da espuma sem resíduos (PU Controle). Esse aumento é atribuído à elevada quantidade de sílica (SiO₂) da cinza, que oferece mais sítios ativos para a adsorção do corante. Por outro lado, PUCA5 e PUCA15 teve a capacidade de sorção reduzida em 2,29 mg/g⁻¹ e 1,46 mg/g⁻¹, respectivamente. Essa redução pode ser explicada pela dispersão inadequada do resíduo ou pela falta de sítios de adsorção suficientes nessas concentrações mais baixas.

Em contraste, a incorporação da combinação de cinza da casca de aveia com a cinza de casca de arroz (PUMIX5, PUMIX15 e PUMIX25) reduz a sorção do azul de metileno. Os valores reduziram-se em 7,45 mg/g⁻¹, 7,59 mg/g⁻¹ e 8,73 mg/g⁻¹ em relação ao PUCA25, o que possivelmente decorre de um efeito mais pronunciado da aglomeração das partículas da mistura de cinzas. Esse fenômeno pode ter reduzido a acessibilidade dos poros da espuma, tornando os sítios de adsorção menos acessíveis ao corante.

Considerando que as cinzas de casca de aveia são resíduos da queima de biomassa, o

desenvolvimento desses compósitos de poliuretano com a cinza da casca de aveia (PUCA) assume um potencial ambiental notável. Os resultados de sorção alcançados no estudo demonstram essa promessa. Além disso, ao comparar nossos resultados com outros materiais adsorventes disponíveis na literatura, o compósito de PUCA25 desenvolvido exibiu capacidade de sorção de azul de metileno equivalente ou até superior para a concentração de 50 mg/L. Isso reforça a eficácia de cinza da casca de aveia como um componente valioso para o aprimoramento de materiais adsorventes, oferecendo uma solução sustentável para o tratamento de efluentes.

A análise estatística (ANOVA) como único fator dos dados das amostras apresentou um valor de F inferior a 1. Isso sugere que a hipótese nula é válida e não há diferença entre as médias. Considerando os teores de CA e CA/CCA presentes nos compósitos, os resultados da análise estatística estão apresentados nas Tabela 18 e Tabela 19.

Tabela 18- Resultado da análise de variância (ANOVA) com o teor de CA para a concentração de 50 mg/L.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	22,63279	3	7,544265	0,101692	0,954844	6,591382
Dentro dos grupos	296,7489	4	74,18721			
Total	319,3817	7				

Tabela 19-Resultado da análise de variância (ANOVA) com o teor de CA e CCA para a concentração de 50 mg/L.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	7,270629	3	2,423543	0,065133	0,975574	6,591382
Dentro dos grupos	148,8367	4	37,20917			
Total	156,1073	7				

Como o valor de F crítico padronizado (studentizado), com nível de significância de 0,05, é 5,93 e (p-valor = 0,954 e 0,0975) para os graus de liberdade observados, conclui-se que, não existe uma diferença estatisticamente significativa entre as médias dos quatro grupos de espumas.

Posteriormente, realizou-se a análise estatística (ANOVA) com fator duplo sem repetição, em que o valor de F foi superior a 1. Isso sugere que a hipótese inicial do teste de variâncias seja rejeitada. Considerando as concentrações de 10 mg/L, 20mg/L e 50mg/L de azul de metileno, os resultados da análise estatística estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20- Resultado da análise de variância (ANOVA) com concentrações de 10 mg/L, 20mg/L e 50 mg/L.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F	valor-P	F crítico
Amostras	32,00438	6	5,334063	0,99089	0,47322	2,99612
Concentrações	475,5496	2	237,7748	44,1706	2,93E-06	3,885294
Erro	64,59722	12	5,383101			
Total	572,1512	20				

Como o valor de F crítico padronizado (studentizado), com nível de significância de 0,05, é 3,835 e (p-valor = 02,93E-06) para os graus de liberdade observados, conclui-se que a hipótese nula — de que não há diferença significativa entre as médias — deve ser rejeitada. Isso conduz à análise de como as médias de capacidade de sorção se distinguem entre si a ponto de apresentarem diferenças estatisticamente significativas.

Por meio do teste de Tukey, foram realizadas comparações entre as diferenças mínimas significativas Δ (d.m.s) e o valor estimado do parâmetro estatístico $\hat{Y}$, conforme apresentado na Equação 3.10. A Tabela 21 indica que a concentração 50 mg/L tem um efeito significativamente diferente no valor de q em comparação com as concentrações 10 e 20 mg/L, observando-se, assim, um aumento potencial de sorção desses materiais.

Tabela 21- Resultado da análise de Tukey de comparações entre as variâncias.

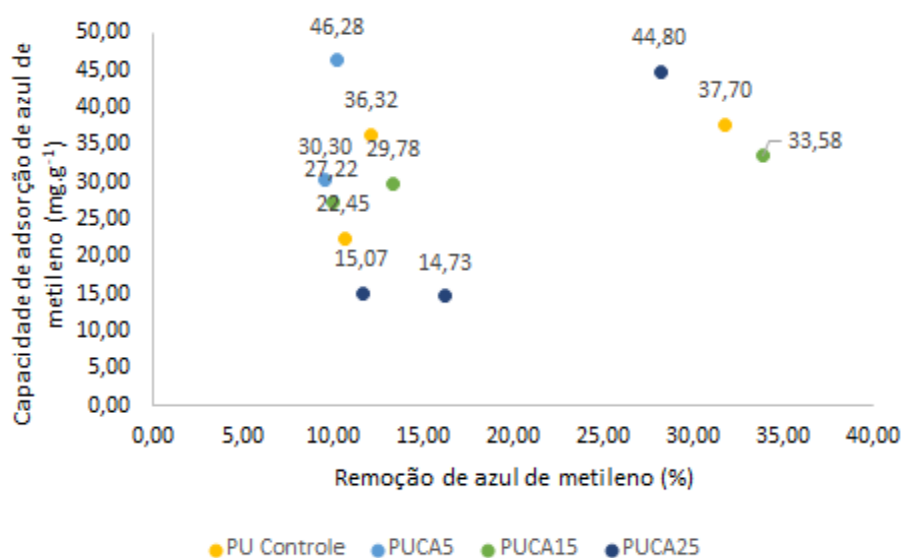
Comparação entre as concentrações	Δ (d.m.s.)	$\hat{Y}$	Significância
10 vs 20	3,307	0,68	Não
10 vs 50	3,307	10,41	Sim
20 vs 50	3,307	9,73	Sim

Nesse estudo avaliou a eficiência de remoção de azul de metileno por espumas de poliuretano (PU) modificadas e a PU Controle, variando a concentração inicial do corante (10, 20 e 50 mg L⁻¹) e a composição do adsorvente. As análises foram divididas entre PU Controle, as séries da PUCA e PUMIX. A PU Controle apresentou eficiência de remoção de 37,70% a 22,45%, indicando um desempenho inferior em comparação com as amostras modificadas em certas condições. Esses dados indicam que nenhuma das espumas modificadas manteve um desempenho consistentemente superior em todas as condições testadas, sugerindo que a eficiência de remoção não é determinada exclusivamente pela composição da espuma, mas também pela interação com as variáveis do meio, como a concentração inicial do corante.

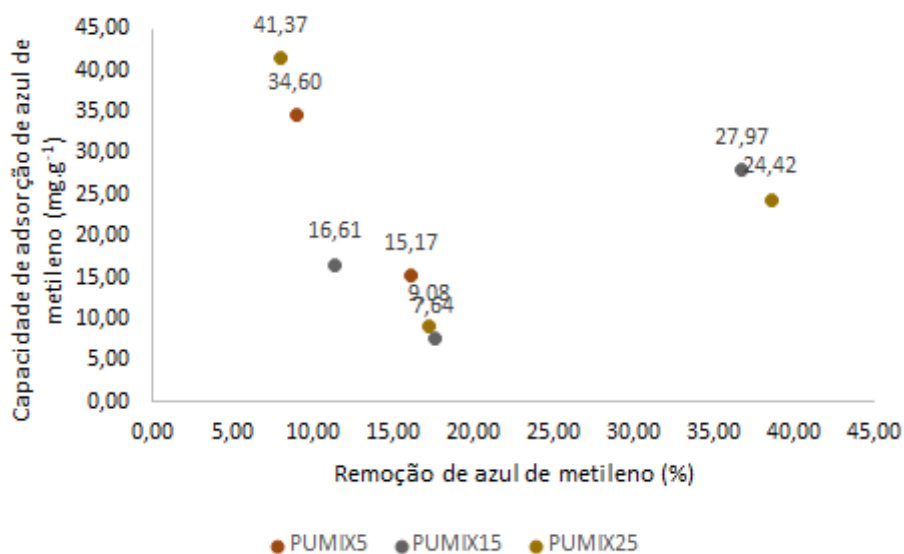
Adsorventes como sementes de manga modificadas e carvão ativado de madeira de acácia alcançaram eficiências significativamente superiores, com valores de 99,9% a 96,9% e 85% a 60%, respectivamente. A casca de fruta de romã também foi testada como adsorvente e

mostrou eficiência de remoção variando entre 90,92% e 70,25% para concentrações de 25 mg/L a 300 mg/L. Já o carvão ativado de *Hydnocarpus pentandra* demonstrou uma alta eficiência de 10,20% a 98,8% em concentrações iniciais muito baixas, de 0,05 mg/L a 0,20 mg/L (Oladoye *et al.*, 2022). A Figura 48 (a, b) ilustra a influência da concentração inicial na remoção do azul de metileno. As Tabelas 15, 16 e 17, contém um resumo da eficiência de remoção das amostras.

Figura 48- Influência da concentração inicial na remoção do azul de metileno, à temperatura ambiente e pH natural: (a) PU Controle e compósitos PUCA; (b) Compósitos PUMIX.



(a)



(b)

O aumento na concentração inicial do corante 10 mg L⁻¹ para 50 mg L⁻¹ resultou na diminuição do percentual de remoção (R%) dos compósitos com a incorporação da combinação de cinza da casca de aveia com a cinza da casca de arroz: 6,67% (PUMIX5) e 16,95%

(PUMIX25) conforme ilustrado na Figura 48 (b). Esse efeito pode ser atribuído à saturação dos sítios ativos na superfície do adsorvente, o que limita a penetração e a adsorção do corante nas camadas internas do material.

De forma semelhante, Antunes *et al.* (2018) observaram uma redução de cerca de 8% na eficiência de remoção ao elevarem a concentração inicial da solução de azul de metileno de 60 mg L^{-1} para 100 mg L^{-1} em ensaios de adsorção utilizando a casca de abacaxi como adsorvente. Os autores ainda relatam que tal comportamento pode ser atribuído ao fato de que concentrações iniciais mais altas do adsorvato intensificam o gradiente de concentração entre as fases líquida e sólida, o que atua como força motriz para a transferência do corante em direção à superfície do adsorvente.

1.17.2 Inflamabilidade

O teste para analisar os comportamentos de propagação à chama entre o PU Controle e os compósitos PUCA5, PUCA15 e PUCA25 foi realizado por meio do ensaio de inflamabilidade de espumas da UL-94 HB (2023) com condicionamento das amostras próximo 23°C . A aplicação da chama em uma das extremidades das amostras se deu por 30 segundos. A Tabela 22 informa os resultados UL-94 HB da PU controle os PUCA5, PUCA15 e PUCA25. Também foram analisados os comportamentos de propagação à chama entre o PU Controle e os compósitos PUCA5, PUCA15, PUCA25, PUMIX5, PUMIX15 e PUMIX25, por meio do ensaio de inflamabilidade de espumas da UL -94 HBF, HF-1, HF-2 (2023) com condicionamento das amostras próximo a 23°C e umidade higroscópica.

A aplicação da chama em uma das extremidades das amostras se deu por 60 segundos. A Tabela 23 apresenta os resultados UL-94 HBF, HF-1 e HF-2. A Figura 49 (a, b, c, d, e, f e g) evidencia as amostras das espumas analisadas e a Figura 50 exibe a câmara de inflamabilidade da MAQTEST para a degradação térmica dos materiais ensaiados. O equipamento emprega um bico de Bunsen com diâmetro interno de $9,5 \pm 0,5 \text{ mm}$ para a aplicação da chama. O corpo de prova é fixado em suportes em formato de "U" com marcações de comprimento para padronização. Na base, uma bandeja coleta resíduos, enquanto a circulação de ar é controlada por aberturas na parte superior e inferior. Adicionalmente, um temporizador pode ser utilizado para medir o tempo de atuação da chama com precisão.

Figura 49- Amostras das espumas analisadas: (a) PU Controle; (b) PUCA5; (c) PUCA15; (d) PUCA25, (e) PUMIX5, (f) PUMIX15, (g) PUMIX25.

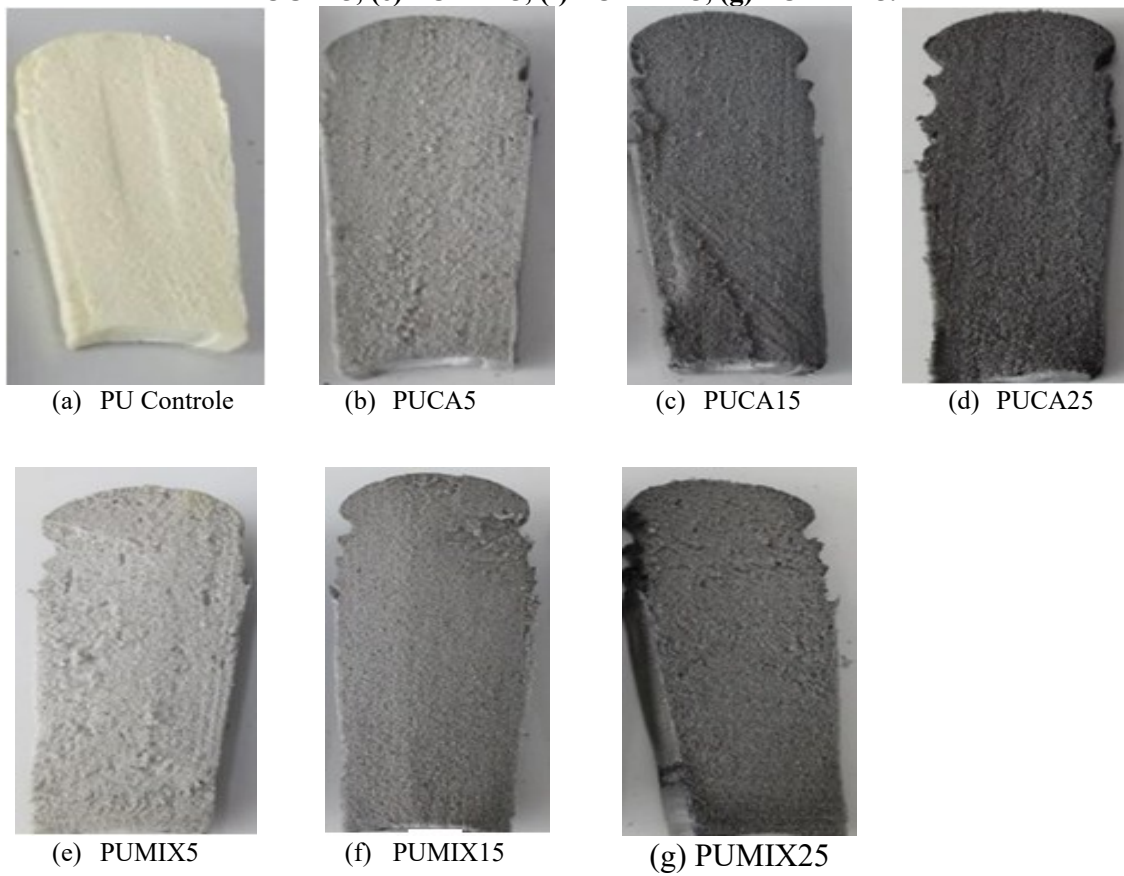


Figura 50- Equipamento utilizado para o Ensaio de Flamabilidade das amostras.



1.17.2.1 Ensaio da norma UL94 HB

As amostras PU Controle, PUCA5, PUCA15 e PUCA25 não atenderam aos critérios de aprovação no ensaio de inflamabilidade UL 94 HB, o qual, para corpos de prova com espessura entre 3 e 13 mm, exige que a taxa de queima não ultrapasse 40 mm/min ou que a chama se apague antes de atingir a marca final do corpo de prova, conforme apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 - Resultados da UL-94(HB) para as amostras PU Controle, PUCA5, PUCA15 e PUCA25.

Material	Dimensões do corpo de prova (mm)	Tempo decorrido (Seg) 25-100mm	Resultado (mm/min)
PU Controle	14 x 13	76	59,2
PUCA5	15,5 x 13	58	77,5
PUCA15	17,5 x 13	40	112,5
PUCA25	18,5 x 13	36	125

Durante o teste, as amostras queimaram completamente e liberaram fragmentos incandescentes de material inerte, que caíram sobre o algodão posicionado abaixo, conforme Figura 51, provocando sua ignição.

Figura 51-Fragmentos Incandescentes das Amostras após o Ensaio de Flamabilidade



1.17.2.2 Ensaio da norma UL94 HB, HF1, HF-2

Os resultados do ensaio de flamabilidade, conduzido de acordo com a norma UL 94, indicaram que nenhuma das amostras de espuma de poliuretano (PU), incluindo o material puro (PU Controle) e os compósitos modificados (PUCA e PUMIX), atendeu aos critérios de segurança exigidos pelas classificações HBF, HF-1 e HF-2. A espuma PU Controle e os

compósitos degradaram até a linha de 125 mm, no período de 60 segundos. Assim, quando as amostras atingiram a linha de 25 mm foi iniciado a cronometragem com outro dispositivo, conforme determina a norma UL 94 HBF, HF1, HF-2.

As amostras foram testadas em diferentes posições: as amostras laterais (1 e 5) foram expostas nas extremidades do corpo de prova, enquanto as amostras centrais (2, 3 e 4) foram retiradas da região central. Essa distinção foi feita para verificar a influência da homogeneidade do material no comportamento de queima. No entanto, todas as cinco amostras de cada lote de avaliação degradaram por completo.

Este resultado corrobora achados de estudos anteriores, como o de Phan *et al.* (2019), que também observaram a queima completa de espumas de poliuretano reforçadas com cinza da casca de arroz no ensaio UL 94 HB. Contudo, o estudo de Attia *et al.* (2015), que utilizou casca de arroz in natura em poliestireno, registrou uma redução na taxa de queima. A Tabela 23 resume o tempo de pós-chama, pós-fluxo e o comprimento danificado de cada material avaliado.

Tabela 23 - Informações obtidas a partir do ensaio de flamabilidade dos materiais estudados (HBF, HF-1, HF-2).

Material		Tempo pós chama (Seg)	Tempo pós fluxo	Comprimento danificado
PU Controle	1 – Lateral	26	0	140
	2 – Central	31		
	3 – Central	46		
	4 – Central	35		
	5 – Lateral	40		
PUCA5	1 – Lateral	6	0	155
	2 – Central	30		
	3 – Central	37		
	4 – Central	39		
	5 – Lateral	41		
PUCA15	1 – Lateral	10	0	175
	2 – Central	43		
	3 – Central	40		
	4 – Central	39		
	5 – Lateral	42		
PUCA25	1 – Lateral	34	0	185
	2 – Central	43		
	3 – Central	46		
	4 – Central	36		
	5 – Lateral	37		
PUMIX5 (dimensão: 15,3x 13 mm)	1 – Lateral	16	0	163
	2 – Central	31		
	3 – Central	33		
	4 – Central	36		
	5 – Lateral	30		
PUMIX15 (dimensão: 16,4 x 13mm)	1 – Lateral	7	0	164
	2 – Central	27		
	3 – Central	30		
	4 – Central	32		
	5 – Lateral	29		
PUMIX25 (dimensão: 16,5 x 13mm)	1 – Lateral	8	0	163
	2 – Central	38		
	3 – Central	48		
	4 – Central	40		
	5 – Lateral	45		

A Tabela 23 mostra que tanto as amostras de PU Controle quanto as amostras dos compósitos iniciaram o processo de queima com propagação da chama, resultando no desprendimento de uma fase condensada (na forma líquida da matriz polimérica derretida) sobre o algodão abaixo do suporte, o que provocou a ignição. A Figura 52 exhibe o material desprendido no algodão.

Figura 52- Fragmentos das Amostras Coletados no Algodão, abaixo do suporte.

Embora a espuma controle e os compósitos não tenham sido classificados pela Norma UL-94 (HBF, HF-1 e HF-2), verificou-se que o tempo de pós chama do compósito PUMIX15 foi menor quando comparado a PU Controle, para as cinco amostras previstas num lote de avaliação. Portanto, o resultado do ensaio quanto à propagação de chamas para o compósito de PUMIX15 mostrou-se melhor do que o desempenho observado para a espuma de PU Controle, o que representa um fator de retardância à chama deste compósito com CA e CCA incorporadas.

A avaliação da estabilidade térmica (Tabela 13) e do desempenho à chama pelo teste UL-94 (Tabela 23) revelam mecanismos distintos de resposta ao calor. Os compósitos PUMIX apresentaram a melhor estabilidade térmica inicial ($T_{10\%}$), com o PUMIX15 atingindo 306,3 °C, superando o PU Controle (285,6 °C). Essa maior resistência inicial correlaciona-se com o desempenho superior na extinção da chama, visto que os compósitos PUMIX exibiram tempos pós-chama mais curtos (entre 7 s e 16 s nos testes laterais), sugerindo boa capacidade de autoextinção. Tal efeito é diretamente atribuído ao elevado teor de resíduo calcinado nos compósitos PUMIX5 (29,08%), PUMIX15 (16,91%) e PUMIX25 (18,52%).

Uma possível explicação para o tempo de pós chama ser menor no compósito PUMIX comparado ao da espuma PU Controle, está no histórico dos resíduos, isto é, de terem sido previamente submetidos à degradação térmica a altas temperaturas. A CA e CCA não favorecem a progressão da combustão de voláteis, que aumentam a inflamabilidade, pois não contêm compostos orgânicos combustíveis e voláteis, e atuam para reduzir o processo de degradação provocado pela temperatura, fato apontado nos estudos de Pereira (2023), na utilização de cinza da casca de arroz incorporada à espuma de poliuretano, e Attia *et al.* (2015) no estudo do uso da casca de arroz in natura adicionada ao poliestireno.

Shen *et al.* (2021) mencionaram que há formação de uma camada de sílica, durante o

processo de queima, que atua como uma barreira protetora da parte interna da matriz polimérica nos compósitos incorporados com carga de partículas de SiO_2 , de maneira a melhorar a retardância à propagação de chamas.

CONCLUSÕES

A metodologia empregada permitiu a obtenção de espuma PU Controle e de compósitos PUCA e PUMIX com características adequadas para iniciar a pesquisa. A cinza da casca de aveia e a cinza da casca de arroz utilizadas neste estudo demonstram potencial para serem incorporadas às espumas de poliuretano, apresentando-se como uma alternativa sustentável.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) revelou que o método de incorporação foi eficaz, pois os resíduos de CA e CCA foram integrados de forma satisfatória na matriz polimérica, conforme evidenciado pela sua presença nas paredes das células das espumas. A cinza da casca de aveia e a cinza da casca de arroz exibiram morfologia irregular.

A difratometria de raios X indicou que a cinza da casca de aveia apresenta predominância de sílica e presença de fases cristalinas de cristobalita. A análise também foi realizada para a cinza da casca de arroz, que apresentou predominantemente sílica amorfa, embora a presença de cristobalita cristalina também tenha sido detectada. Esse resultado advém do processo de combustão em altas temperaturas observado em plantas de gaseificação.

A identificação de SiO_2 , obtida por meio da espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier, revelou a vibração de grupos siloxanos na superfície dos resíduos de CA e CCA. A investigação dos grupos moleculares na PU Controle, PUCA5, PUCA15, PUCA25, PUMIX5, PUMIX15, PUMIX25 mostrou a presença de grupos siloxanos, carbonila e aminas.

A análise de termogravimetria evidenciou que a incorporação da CA e CCA alterou a estabilidade térmica da matriz de poliuretano (PU). Na curva TG, foi possível identificar menores perdas para o compósito de PUCA25, devido ao aumento do resíduo de CA.

A espuma PU Controle e seus compósitos exibiram características hidrofóbicas, evidenciadas pelo ângulo de contato. Contudo, a incorporação de cinza da casca de aveia (CA) — que é hidrofílica — na matriz polimérica não resultou em um aumento da hidrofobicidade. Em contrapartida, o aumento dos teores de cinza da casca de arroz (CCA) — também hidrofílica — nos compósitos PUMIX demonstrou um incremento na hidrofobicidade. O compósito PUMIX25 atingiu o ângulo de contato de $109,64^\circ \pm 5,48^\circ$. Isso sugere que a incorporação de cinza da casca de arroz foi mais eficaz em promover as propriedades hidrofóbicas do material.

As espumas de poliuretano (PU), tanto na sua forma controle quanto em formas modificadas com cinza da casca de aveia e cinza da casca de arroz, possuem a capacidade de remoção do corante azul de metileno. A PU Controle removeu 38% ($15 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) do contaminante, na concentração inicial de 50 mg/L^{-1} . O compósito PUMIX25, na concentração

de 10 mg/L^{-1} , atingiu uma eficiência de remoção de 41% ($5 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$). Já o compósito PUCA25, na concentração de 50 mg/L^{-1} , destacou-se com a maior capacidade de adsorção, resultando em uma taxa de remoção de 45% ($19 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$).

Ainda, a partir dos dados e informações obtidas no estudo da retardância à propagação da chama pela UL-94, conclui-se que a PU Controle, PUCA5, PUCA15, PUCA25, PUMIX5, PUMIX15 e PUMIX25 não conseguem se autoguiar rapidamente ou queimar por um tempo excessivo quando expostas a uma fonte de ignição. Porém, o compósito PUMIX15 alcançou melhor desempenho de resistência à chama, pois demonstrou tempo de pós-chama inferior ao das outras amostras. O ensaio de inflamabilidade foi utilizado como ponto de partida para verificar essa característica nos materiais avaliados.

Os resultados da termogravimetria confirmaram esse efeito, evidenciado pela baixa perda de massa de cinzas da casca de aveia e de arroz empregadas na síntese dos compósitos, o que contribuiu para o aumento da estabilidade térmica dos materiais em temperaturas acima de 250°C . Assim, o aproveitamento de cinza da casca de aveia e cinza da casca de arroz apresenta-se como uma alternativa economicamente viável e sustentável para o tratamento de efluentes contaminados por corantes têxteis.

Recomendações para Trabalhos Futuros

Sugere-se a ampliação dos estudos sobre os compósitos desenvolvidos, de modo a aprofundar o conhecimento sobre suas propriedades e potenciais aplicações. Recomenda-se avaliar o desempenho desses materiais na remoção de outros poluentes, além do corante azul de metileno, abrangendo diferentes classes de contaminantes orgânicos e inorgânicos em sistemas aquosos.

Além disso, recomenda-se a realização de ensaios de sorção até a saturação dos materiais, possibilitando a construção de isotermas de adsorção e a determinação dos parâmetros termodinâmicos associados ao processo. Tais análises poderão fornecer informações mais detalhadas sobre os mecanismos de interação entre o adsorvato e a matriz polimérica modificada.

Adicionalmente, sugere-se a realização de estudos de dessorção para avaliar a capacidade de regeneração e o número de ciclos de reuso dos compósitos, a fim de comprovar sua viabilidade econômica e sustentabilidade ambiental. Por fim, recomenda-se aprofundar a análise da resistência térmica e do comportamento à chama, por meio de ensaios padronizados e regulamentados, visando à aplicação potencial desses materiais em sistemas de isolamento e em componentes de construção com requisitos de segurança contra incêndio.

REFERÊNCIAS

- ABDELWAHEB, M. *et al.* Adsorption of nitrate, phosphate, nickel and lead on soils: risk of groundwater contamination. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 179, p. 182-187, abr. 2019.
- ADESEMUYI, M. F. *et al.* Preparation and characterisation of biochars from elephant grass and their utilisation for aqueous nitrate removal: effect of pyrolysis temperature. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 6, p. 104507, 2020.
- AL-NAIEMA, I. *et al.* Impacts of co-firing biomass on emissions of particulate matter to the atmosphere. **Fuel**, v. 162, p. 111– 120, dez. 2015.
- ALMEIDA, F.C.R. *et al.* Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 31-38, 2015.
- ALMEIDA, Marys Lene Braga. **Espumas poliméricas contendo resíduo de catalisador de indústria de petróleo como adsorventes para contaminantes orgânicos aquosos**. 2017. 156 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUBD-AX9LYG> . Acesso em: 02 jan. 2025.
- ALMEIDA, M. L. B. *et al.* Polyurethane foams containing residues of petroleum industry catalysts as recoverable pH-sensitive sorbents for aqueous pesticides. **Journal of Hazardous Materials**, Elsevier BV, v. 346, p. 285-295, mar. 2018.
- ALMEIDA, M. L.B. *et al.* Bio-based polyurethane foams with enriched surfaces of petroleum catalyst residues as adsorbents of organic pollutants in aqueous solutions. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 28, p. 2511–2522, jun. 2020.
- ALMEIDA, M. L.B. *et al.* Biocompósitos ambientais para adsorção do pesticida mancozeb da água. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 18, n. 10, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n10-021> . Acesso em: 02 jan. 2025.
- ANTUNES, E. C. S. *et al.* Remoção de corante têxtil utilizando a casca do abacaxi como adsorvente natural. **HOLOS**, v. 5, p. 5334, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/44969> . Acesso em: 02 janeiro 2025.
- APOLONIO, P. H. *et al.* Produção de geopolímeros utilizando cinza da casca de arroz como fonte complementar de sílica. **Cerâmica**, v. 66, p.172-178, jun. 2020.
- ASSI, A. *et al.* Review of the reuse possibilities concerning ash residues from thermal process in a medium-sized urban system in northern Italy. **Sustainability**, v. 12, n. 10, p. 4193, maio 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL. **ASTM D6226-21**: Standard test method for open cell content of rigid cellular plastics. West Conshohocken: ASTM International, 2021.

ASWEISI, A.; ALGHERYANI, K. Mechanism and kinetic studies of methylene blue adsorption on commercial polyurethane foam. **Journal of Alasmariya University: Basic and Applied Sciences**, v. 6, n. 5, p. 714-724, dez. 2021.

ATTIA, N. F. *et al.* Synergistic study of carbon nanotubes, rice husk ash and flame retardant materials on the flammability of polystyrene nanocomposites. **Materials Today: Proceedings**, Elsevier BV, v. 2, n. 7, p. 3998–4005, 2015.

AZAT, S. **Silica**: assessment methods of synthesis from rice husk, main physical chemical characteristics and practical applications. Almaty: Kazakh University, 2018. ISBN 9786010437739.

BALARAM, V. Recent advances in the determination of elemental impurities in pharmaceuticals: status, challenges and moving frontiers. **Trends in Analytical Chemistry**, v. 80, p. 83-95, 2016.

BALARAM, V. *et al.* Pollution of water resources and application of ICP-MS techniques for monitoring and management: A comprehensive review. **Geosystems and Geoenvironment**, v. 2, p. 100210, 2023.

BALDEZ, E. *et al.* Employment of polyurethane foam for the adsorption of Methylene Blue in aqueous medium. **Journal of Hazardous Materials**, v. 159, n. 2-3, p. 580-586, nov. 2008.

BALTRENAS, P.; BALTRENAITE, E. **Sustainable environmental protection technologies**: contaminant biofiltration, adsorption and stabilization. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2020. (Sustainable Environmental Protection Technologies). ISBN 9783030477240.

BALIEIRO, Lorena Corrêa de Souza. **Revalorização dos resíduos provenientes da casca de nozes macadâmia como enchimento em compósitos de poliuretano derivado do óleo de mamona**. 2023. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <http://www.bdt.d.uerj.br/handle/1/19835>. Acesso em: 02 jan. 2025.

BARRETO, F. M. *et al.* Análise térmica de um eco compósito de poliuretano de mamona com rejeito de madeira. **Holos**, vol. 7, p. 110-120, set. 2016.

BASSO, A. M. *et al.* **Físico-química experimental**. Natal: IFRN, 2022.

BELLAVER, Gustavo Bridi. **Influência da temperatura de calcinação da casca de aveia para utilização como material cimentício suplementar**. 2019. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/219361>. Acesso em: 02 jan. 2025.

BENGTSTRÖM, L. *et al.* The role of isocyanates in fire toxicity. **Fire Science Reviews**, v. 5, n. 4, p. 1-23, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/301925548_The_role_of_isocyanates_in_fire_toxicity. Acesso em: 02 jan. 2025.

- BEHNAM, R. *et al.* Incorporation of silica nanoparticles and polyurethane into hybrid composites for increase of char residue. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 135, n. 6, p. 3311–3319, ago. 2018.
- BEYER, A. Chapter 15:2-factor ANOVA. In: BEYER, A. **Introduction to statistics for psychology**: Maricopa Community Colleges, 2024. Disponível em: <https://open.maricopa.edu/psy230mm/chapter/chapter-15-2-factor-anova/>. Acesso em: 08 set. 2025.
- BRANCA, C. *et al.* Reaction kinetics and morphological changes of a rigid polyurethane foam during combustion. **Thermochimica Acta**, v. 399, p. 127-137, 2003.
- BUI, T. M. A. *et al.* Investigation of crosslinking, mechanical properties and weathering stability of acrylic polyurethane coating reinforced by SiO₂ nanoparticles issued from rice husk ash. **Materials Chemistry and Physics**, Elsevier BV, v. 241, p. 122445, fev. 2020.
- CALCIOLARI, A. R. *et al.* Remoção do corante azul de metileno de solução aquosa usando biomassa de pele de prata de café (coffee silverskin) como bioadsorvente de baixo custo. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 3, p. e20220141, 2022.
- CALLISTER JÚNIOR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- CALVO-CORREAS, T. *et al.* Linseed oil-based polyurethane rigid foams: Synthesis and Characterization. **Journal of Renewable Materials**, v. 3, n. 1, p. 3–13, jan. 2015. Disponível em: <https://www.techscience.com/jrm/v3n1/49612>. Acesso em: 02 jan. 2025.
- CHAI, H. *et al.* Effect of inorganic additive flame retardant on fire hazard of polyurethane exterior insulation material. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 135, n. 5, p. 2857–2868, nov. 2018.
- CHANG, Q. **Colloid and interface chemistry for water quality control**. London: Academic Press, 2016. ISBN 9780128093153.
- CHATTOPADHYAY, D.K.; WEBSTER, D.C. Thermal stability and flame retardancy of polyurethanes. **Progress in Polymer Science**, v. 34, n.10, p. 1068-1133, jun. 2009.
- CHEN, Y. *et al.* Application studies of activated carbon derived from rice husks produced by chemical-thermal process — a review. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 163, n. 1, p. 39-52, 2011.
- CHUN, J.; LEE, J. H. Recent progress on the development of engineered silica particles derived from rice husk. **Sustainability**, v. 12, n. 24, p. 10683, dez. 2020.
- CONTROLADORIA-GERAL DO ESTADO DE MINAS GERAIS - CGE. **Cartilha ESG: sustentabilidade ambiental, social e governança na Controladoria-Geral do Estado**. Belo Horizonte: CGE, 2022. Disponível em: <https://www.cge.mg.gov.br>. Acesso em: 10 ago. 2024.
- CORDEIRO, L. de N. P. C. *et al.* Caracterização da cinza de caroço de açaí residual para adição ao concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 45-55, jan./mar. 2019.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-8621201900010029>. Acesso em: 02 jan. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Série histórica das safras: grãos por produto**. Brasília, DF: CONAB, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historicadas-safras/itemlist/category/908-graos-por-produtos>. Acesso em: 21 fev. 2024.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais. In: ISAIA, G. C. (ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 1, cap. 8, p. 261–309.

DALEY, R. Flame retardant troubles attributable to weak chemical regulations. **Public Health Rep**, v. 126, n. 4, p. 458–459, jul./ago. 2011. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/003335491112600402>. Acesso em: 02 jan. 2025.

DAS, A.; MAHANWAR, P. A brief discussion on advances in polyurethane applications. **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research**, v. 3, n. 3, p. 93–101, jul. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2020.07.002>. Acesso em: 02 jan. 2025.

DEANE, D.; COMMERS, E. Oat cleaning and processing: general steps. In: WEBSTER, F. (ed.). **Oat's chemistry and technology**. American Association of Cereal Chemists, p. 371–412, 1986.

ELGARAHY, A. M. *et al.* Dual function of gellan gum-infused polyurethane foam for remediation of methylene blue dye and sustainable acoustic protection. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 310, p. 142833, 2025.

ELTAWEL, A. S. *et al.* Carboxymethyl cellulose/carboxylated graphene oxide microbeads for efficient adsorption of cationic methylene blue dye. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 154, p. 307–318, 2020.

EZEUGO, J. N. O. Removal of methylene blue from aqueous solution by adsorption onto activated carbon prepared from animal bone and corncob — an agricultural waste. **World News of Natural Sciences**, v. 19, p. 32–44, 2018. Disponível em: <http://www.worldnewsnaturalsciences.com>. Acesso em: 02 jan. 2025.

FARIA, K. C. P. *et al.* Recycling of sugarcane bagasse ash waste in the production of clay bricks. **Journal of Environmental Management**, v. 101, p. 7–12, 2012.

FERRAZ, F. M.; YUAN, Q. Performance of oat hulls activated carbon for COD and color removal from landfill leachate. **Journal of Water Process Engineering**, v. 33, p. 101040, 2020.

FIORE, E.; Stabellini, B.; Tamborini, P. A systemic design approach applied to rice and wine Value chains: the case of the InnoVaEcoFood Project in Piedmont (Italy). **Sustainability**, v. 12, n. 21, p. 9272, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12219272>. Acesso em: 02 jan. 2025.

FLAME RETARDANTS-ONLINE. **Flame retardants mode of action**. Disponível em: <https://www.flameretardants-online.com/flame-retardants/mode-of-action>. Acesso em: 02

jan. 2025.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Production indices**. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>. Acesso em: 08 jul. 2024; 19 fev. 2025.

FUNGARO, D. A.; ROVANI, S. **Extração de sílica a partir das cinzas de resíduo da cana-de-açúcar em diferentes condições de extração alcalina**. In: **Anais**. Santo André, SP: Universidade Federal do ABC (UFABC), 2019. p. 240. ISBN: 978-65-5040-024-8.

FURLAN, L. G. Avaliação das propriedades de compósitos de polipropileno reforçados com casca de aveia. **Química Nova**, v. 35, n. 8, p.1499-1501, jul. 2012.

GALLO, J. B.; AGNELLI, J. A. M. Aspectos do comportamento de polímeros em condições de incêndio. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 8, n. 1, p. 23–37, 1998.

GALVÃO, A. C. P. *et al.* Obtenção e caracterização de espumas rígidas de poliuretano (PUR) com pó de vidro sodo-cálcico (PV) do rejeito da lapidação. **HOLOS**, v. 31, n. 5, p. 2085, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.15628/holos.2015.2085>. Acesso em: 02 jan. 2025.

GIESE, A. C. H. *et al.* Caracterização de cinza da casca de aveia para a utilização como substituição parcial ao cimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 59., 2017, Bento Gonçalves. **Anais**. São Paulo: IBRACON, 2017.

GÓES, M. M. *et al.* Polyurethane foams synthesized from cellulose-based wastes: Kinetics studies of dye adsorption. **Industrial Crops and Products**, v. 85, p. 149-158, 2016.

GOLD, C. **UL-94** – test for flammability of plastics materials for parts in devices and appliances. Laird Technologies, 2003. Disponível em: <https://cdn.lairdtech.com/home/brandworld/files/EMIUL-94TestforFlammabilityofPlasticMaterialsforPartsinDeviceandAppliancesTechnicalNoteDownload.pdf> . Acesso em: 26 ago. 2024.

GONÇALVES, Ana Raquel Pinheiro. **Desenvolvimento de novos polímeros biocompatíveis para utilização em ambiente aquático**. 2019. 51 f. Dissertação (Mestrado em Química Tecnológica) - Faculdade de Ciências, Departamento Química e Bioquímica, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2019. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10451/39081>. Acesso em: 02 jan. 2025.

GRUNDKE, K. *et al.* Experimental studies of contact angle hysteresis phenomena on polymer surfaces — Toward the understanding and control of wettability for different applications. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 222, p. 1-27, 2014.

GU, R. *et al.* A feasibility study of polyurethane composite foam with added hardwood pulp. **Industrial Crops and Products**, v. 42, n. 1, p. 273-279, 2013.

HAO, H. *et al.* Towards next generation design of sustainable, durable, multi-hazard resistant, resilient, and smart civil engineering structures. **Engineering Structures**, v. 277, p. 115477, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115477>. Acesso em: 02 jan. 2025.

HOANG, A. T. *et al.* An absorption capacity investigation of new absorbent based on polyurethane foams and rice straw for oil spill cleanup. **Petroleum Science and Technology**, v. 36, n. 5, p. 361-370, jan. 2018, DOI: 10.1080/10916466.2018.1425722.

INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS (ICTA-UFRGS). **Casca de arroz**. Disponível em: https://www.ufrgs.br/alimentus1/terradearroz/grao/gr_casca.htm. Acesso em: 02 jan. 2025.

INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (NISAM); INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS (ICTR – USP). **Avaliação da casca de aveia para produção biotecnológica de xilitol**. Santa Catarina, 2004. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/actascitechnol/index.php/ActaSciTechnol/article/view/1509/868> . Acesso em: 03 abr. 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Diagnóstico dos resíduos orgânicos do setor agrossilvipastoril e agroindústrias associadas**: relatório de pesquisa. Brasília, 2012. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/combustivel-do-futuro/subcomites-1/combustiveis-maritimos-1/documentos-subcomite/ipea-2012-diagnostico-dos-residuos-organicos-do-setor-agrossilvopastoril-e-agroindustrias-associadas.pdf/view>. Acesso em: 03 abr. 2024.

JAHN, A. *et al.* Utilization of hemicelluloses as example for holistic recovery of agricultural residues. **Chemie Ingenieur Technik**, v. 92, n. 11, p. 1764-1771, ago. 2020.

KANG, J. W. *et al.* Effects of nucleating agentes on the morphological, mechanical and thermal insulating properties of rigid polyurethane foams. **Macromolecular Research**, v. 17, n. 11, p. 856-862, 2009.

KHATRI, N.; TYAGI, S. Influences of natural and anthropogenic factors on surface and groundwater quality in rural and urban areas. **Frontiers in Life Science**, v. 8, n. 1, p. 23-39, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/21553769.2014.933716>. Acesso em: 02 jan. 2025.

KUMARI, S. *et al.* Novel cellulose nanowhiskers-based polyurethane foam for rapid and persistent removal of methylene blue from its aqueous solutions. **Chemical Engineering Journal**, v. 304, p. 728-736, 2016.

KODIPPILI, G. C. **Structural characterization of polyurethane foam and implications**. **Structural characterization of polyurethane foam and implications of aging of aging**, 2003. 129 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Missouri University of Science and Technology, Rolla, 2003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.25669/4pd3-tuw2>. Acesso em: 23 jan. 2025.

KRISHNADEVI, K.; SELVARAJ, V. Biowaste material reinforced cyanate ester based epoxy composites for flame retardant applications. **High Performance Polymers**, v. 28, n. 8, p. 881-894, 2016.

LARSON, R.; FARBER, B. **Estatística Aplicada**. 6. ed. São Paulo: Pearson Education do

Brasil, 2015. ISBN 9780134683416.

LI, T. T. *et al.* Mechanical, acoustic, and thermal performances of shear thickening fluid rigid polyurethane foam composites: effects of content of shear thickening fluid and particle size of silica. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 136, n. 18, p. 47359, jan. 2019.

LIAN, Z. *et al.* Hydrogen production by fluidized bed reactors: a quantitative perspective using the supervised machine learning approach. **J**, v. 4, n. 3, p. 266-287, jul. 2021.

LIU, X. *et al.* Recent studies on the decomposition and strategies of smoke and toxicity suppression for polyurethane based materials. **RSC Advances**, v. 6, n. 74, p. 64742-64757, 2016. DOI: 10.1039/c6ra14345h.

LOPES, E. *et al.* Caracterização elementar da casca de arroz e suas cinzas por MIP OES após decomposição ácida com sistema de refluxo. **Química Nova**, v. 40, n. 9, p. 1009-1017, 2017.

LOPES, Raquel de Jesus da Graça. **Novas espumas de poliuretano para painéis sandwich**. 2020. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2020. Disponível em: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1126518382258848/Dissertacao.pdf>. Acesso em: 02 jan. 2025.

MAHFUZ, H. *et al.* Fabrication, synthesis and mechanical characterization of nanoparticles infused polyurethane foams. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 35, n. 4, p. 453-60, abr. 2004.

MAIA, L. S. *et al.* Coffee husks residues incorporated into polyurethane foam towards greener material for diesel S10 and S500 removal and recovery. **Industrial Crops and Products**, v. 189, p. 115747, dez. 2022.

MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento). **Projeções do Agronegócio: Brasil 2022/23 a 2032/33: projeções de longo prazo**. Secretaria de Política Agrícola. Brasília, 2022. Disponível: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/projecoes-do-agronegocio-2022-2023-a-2032-2033.pdf/view>. Acesso em: 21 fev. 2024.

MARCO, Catusa de. **Preparação, caracterização e aplicação de um compósito ferromagnético na remoção do corante verde de malaquita em meio aquoso**. 2015. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/handle/11338/965>. Acesso em: 23 de jul. 2025.

MARKED RESEARCH FIRM. **Polyurethane foams market**. Disponível em: www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/polyurethane-foams-market-1251.html. Acesso em: jul. 2024.

MARTINS, Leonardo Madeira. **Estudo da aplicação de processos oxidativos avançados no tratamento de efluentes têxteis visando o seu reuso**. 2011. 109 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2011. Disponível em:

<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/54814/1/DISSERTACAO-LEONARDO-MADEIRA.pdf>. Acesso em: 3 de jul. 2025.

MATTOS, B. D. *et al.* Color changes of wood from *Pinus taeda* and *Schizolobium parahybum* treated by in situ polymerization of methyl methacrylate using cross-linkers. **Maderas: Ciencia y Tecnología**, v. 18, n.1, p. 113-124, 2016.

MCKENNA, S. T.; HULL, T. R. The fire toxicity of polyurethane foams. **Fire Sciences Review**, v. 5, n. 3, p. 1-27, 2016.

Mc.MULLEN, M. S. Oats. In: KULP, K.; PONTE Jr, J. G. (ed.). **Handbook of cereal science and technology**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 2000. p. 127-147.

MENG, L. *et al.* Hierarchically porous silicon-carbon-nitrogen hybrid materials towards highly efficient and selective adsorption of organic dyes. **Scientific Reports**, v. 5, p. 7910, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/srep07910> . Acesso em: 03 abr. 2024.

MENSAH, R.A. *et al.* A review of sustainable and environment-friendly flame retardants used in plastics. **Polymer Testing**, v. 108, p. 107511, abr. 2022.

MOAWED, E. A. *et al.* Synthesis of tannic acid azo polyurethane sorbent and its application for extraction and determination of atrazine and prometryn pesticides in foods and water. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 3, p. 61-65, 2015.

MUKHERJEE, M. *et al.* Fluorine-free sustainable three-dimensional superhydrophobic and superoleophilic robust foam for efficient oil/water separation. **ACS Applied Engineering Materials**, v. 2, n. 11, p. 324-334, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsaenm.3c00696> . Acesso em: 02 jan. 2025.

NANNI, A. *et al.* Thermo-mechanical and morphological properties of polymer composites reinforced by natural fibers derived from Wet Blue leather wastes: a comparative study. **Polymers**, v. 13, n. 11, p. 1837, jun. 2021.

NASCIMENTO, R. F. do *et al.* **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Fortaleza: Imprensa Universitária da UFC, 2014. 256 p. (Estudos da Pós-Graduação). ISBN 978-85-7485-186-0.

NASCIMENTO, G. M. *et al.* Estudo e comparação entre compósitos reforçados com fibras naturais, fibras de vidro e híbridos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 13., 2019, Uberlândia. **Anais eletrônicos [...]**. São Paulo: Blucher, 2019. Disponível em: <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/33158>. Acesso em: 15 jan. 2025.

NATIONAL CENTER FOR BIOTECHNOLOGY INFORMATION. **PubChem Compound Summary for CID 6099, Methylene Blue**. Bethesda: National Library of Medicine, 2025. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/6099>. Acesso em: 27 maio 2025.

NEIRA, Dorivalda Santos Medeiros. **Desenvolvimento de um compósito de espuma rígida de poliuretana de mamona e fibras de sisal para isolamento térmica**. 2011. 89 f. Tese

(Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011. Disponível em:

<https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/15573>. Acesso em: 23 de fev. 2025.

OLADOYE, P. O. *et al.* Methylene blue dye: toxicity and potential elimination technology from wastewater. **Results in Engineering**, v. 16, p. 100678, dez. 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, A CIÊNCIA E A CULTURA (UNESCO). **Engenharia para o desenvolvimento sustentável: um resumo**. 2022. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000383368>. Acesso em: 08 jun. 2024.

OUALHA, M. A. *et al.* Development of metal hydroxide nanoparticles from eggshell waste and seawater and their application as flame retardants for ethylene-vinyl acetate copolymer (EVA). **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 128, p. 994-1001, 2019.

PEREIRA, Marcus Vinicius Vieira. **Espumas de poliuretano com cinzas de casca de arroz: análise da utilização na sorção de óleo diesel e como retardante de chama**. 2023. 125 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/59616>. Acesso em: 04 de jan. 2025.

PEREIRA, M. V. V. *et al.* Eco- friendly polyurethane composites with rice husk ash residue to remove petroleum hydrocarbons from aqueous media. **Polymer Bulletin**, v. 81, p. 11773-11794, abr. 2024.

PERGAL, M. V. *et al.* Effect of mesoporous silica nanoparticles on the properties of polyurethane network composites. **Progress in Organic Coatings**, v. 151, p. 106049, fev. 2021.

PHAN, H. T. *et al.* Excellent fireproof characteristics and high thermal stability of rice husk-filled polyurethane with halogen-free flame retardant. **Polymers**, v. 11, n. 10, p. 1587, set. 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11101587>.

PISTERS, K.; PRAKASH, A. Investigations of axial and radial variations of heat transfer coefficient in bubbling fluidized bed with fast response probe. **Powder Technol**, v. 207, n. 1-3, p. 224-231, 2011.

PLAZINSKI, W. *et al.* Theoretical models of sorption kinetics including a surface reaction mechanism: A review. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 152, n. 1, p. 2-13, 2009.

QUANSAH, J. O. *et al.* Nascent rice husk as an adsorbent for removing cationic dyes from textile wastewater. **Environmental Sciences**, v. 5, n. 2, p. 115-120, maio 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.51959/es.2020.106>. Acesso em: 26 jan. 2025.

QUEIROZ, Cláudio Luiz. **Comportamento de uma mistura de solo, cal de carbureto e cinza da casca de aveia com adição de fibras**. 2020. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2020.

Disponível em:

<https://www.upf.br/uploads/Conteudo/ppgeng/2020/CLAUDIO%20QUEIROZ.pdf>. Acesso em: 14 de julho 2024.

RÊGO, João Henrique da Silva. **Viabilidade Técnica da utilização da cinza de casca de arroz produzida sem controle da temperatura como adição mineral ao cimento**. 2001. 199 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2001.

REN, L. *et al.* Recyclable polyurethane foam loaded with carboxymethyl chitosan for adsorption of methylene blue. **Journal of Hazardous Materials**, v. 417, p. 126130, 2021.

ROSA, F. S.; SCHERER, M. J. Desempenho térmico de paredes de alvenaria protegidas com revestimento de compósitos de resíduos agrícolas. **Revista Gestão Industrial**, Ponta Grossa, v. 14, n. 2, p. 96-113, abr./jun. 2018.

RUVIARO, A. S. *et al.* Characterization and investigation of the use of oat husk ash as supplementary cementitious material as partial replacement of Portland cement: analysis of fresh and hardened properties and environmental assessment. **Construction and Building Materials**, v. 363, p. 129762, jan. 2023.

SARDAR, M. *et al.* Remediation of dyes from industrial wastewater using low-cost adsorbents. In: INAMUDDIN; M.I.A., LICHTFOUSE, E.; ASIRI, A.M. (org.). **Green adsorbents to remove metals, dyes and boron from polluted water**. Cham: Springer Nature, 2021. cap. 15, p. 411-435. (Environmental Chemistry for a Sustainable World, v. 49). Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-47400-3_15. Acesso em: 25 jan. 2025.

SANTOS, Sandra Helena Trindade. **Análise do comportamento de misturas de solos com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar e cinzas de casca de arroz**. 2015. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/27064/27064_1.PDF. Acesso em: 14 de jul. 2024.

SANTOS, S. F. dos. *et al.* Caracterização da adição de minerais ricos em cinzas de casca ao concreto. **Research, Society and Development**, v. 8, n.3, p. e2083727. DOI: 10.33448/rsd-v8i3.727. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/727>. Acesso em: 19 fev. 2025.

Secretaria de Estado de Infraestrutura - SEINFRA. **ESG: Sustentabilidade ambiental, social e governança nos projetos de infraestrutura e mobilidade de Minas Gerais**. Disponível em: http://www.parcerias.mg.gov.br/images/2021/Cartilha_ESG_Seinfra_MG.pdf. Acesso em: 10 jun. 2024.

SHEN, M.Y. *et al.* Flame retardance and char analysis of an eco-friendly polyurethane hyperbranched hybrid using the sol-gel method. **Sustainability**, v. 13, n. 2, p. 486, jan. 2021.

SILVA, R. B. *et al.* Cinzas de biomassa geradas na agroindústria do cacau: caracterização e uso em substituição ao cimento. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 15, n. 4, p. 321-334, out./dez. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212015000400053>. Acesso em: 16 jan. 2025.

SILVA, Virginia Ribeiro da. Espumas rígidas de poliuretano baseadas em óleos vegetais utilizando rejeitos industriais inorgânicos como carga e retardante de chamas. 2013. 117 f. Tese (Doutorado em Ciências – Química) – Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. Disponível em:

<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/SFSA-96PTZQ>. Acesso em: 20 de fev. 2025.

SILVA, J. D. da *et al.* Aplicação da ANOVA e dos testes de Fisher e Tukey em dados de recalque de edifícios de múltiplos pavimentos. **Revista Principia**, v. 59, n. 3, 2022.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021lid5388>. Acesso em: 29 ago. 2025.

SOEIRO, Eduardo Campelo. **Análise da viabilidade na utilização como isolante térmico de um compósito de poliuretano/pó de macambira**. 2019. 103 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/24645>. Acesso em: 22 fev. 2025.

SON, T. *et al.* Phosphorus/phosphorus-nitrogen flame retardants applied to polyurethane/rice husk eco-composites: thermal behavior, flame retardancy, and physico-mechanical properties. **Polymer Bulletin**, v. 78, n. 5, p. 2727–2743, maio 2020.

SZYCHER, M. **Szycher's Handbook of Polyurethanes**. 2. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2012. ISBN 9781439863138.

TAKEITI, C. Y. **Aveia**. Brasília, DF: Embrapa, 2021. Disponível em:

<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/tecnologia-de-alimentos/processos/grupos-de-alimentos/cereais-e-graos/aveia>. Acesso em: 21 mar. 2024.

TAMANINI, C. *et al.* Avaliação da casca de aveia para produção biotecnológica de xilitol. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 26, n. 2, p. 117-125, 2004.

TIEN, C. **Introduction to adsorption: basics, analysis, and applications**. Amsterdam: Elsevier, 2019.

TIPACHAN, C. *et al.* Flame retardant properties and thermal stability of polylactic acid filled with layered double hydroxide and rice husk ash silica. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 28, n.3, p. 948-961, jan. 2020.

THIRUMAL, M. *et al.* Mechanical, morphological and thermal properties of rigid polyurethane foam: effect of the fillers. **Cellular Polymers**, v. 26, n. 4, p. 245-259, 2007.

UGARTE, L. *et al.* Flexible polyurethane foams based on 100% renewably sourced polyols. **Industrial Crops and Products**, v. 62, p. 545-551, 2014.

UNDERWRITERS LABORATORIES. **UL-94: Standard for Safety for tests for flammability of plastic materials for parts in devices and appliances**. 7. ed. Northbrook: UL, 2023.

URICH, K. **Ionic intermediates in organic chemistry**. New York: John Wiley & Sons, 1967.

- VAFAKISH, B. *et al.* Unraveling the mechanisms of methylene blue adsorption onto biochar: a robust and sustainable approach for water remediation. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 22, n. 7, p. 7053-7064, 2025.
- VARANDA, L. D. *et al.* Physical performance of particleboards using castor oil-based adhesive. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 10, p. 707–712, 2018.
- VAZ JUNIOR, S. **Aproveitamento de resíduos agroindustriais: uma abordagem sustentável**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2020. 26 p. (Documento / Embrapa Agroenergia, 31). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1125203>. Acesso em: 21 fev. 2024.
- VENIER, M. *et al.* Halogenated flame retardants in the great lakes environment. **Accounts of Chemical Research**, v. 48, n. 7, p. 1853-1861, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.5b00180>. Acesso em: 25 jan. 2025.
- VIEIRA, M. D. *et al.* Produção e caracterização de espumas de poliuretano produzidas a partir de diferentes óleos vegetais. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, ano 8, v. 2, p. 166-188, out. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenhariaquimica/espumas-de-poliuretano>. Acesso em: 02 jan. 2025.
- VILAR, W. **Química e tecnologia dos poliuretanos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Vilar Consultoria, 2004. Disponível em: <https://poliuretanos.com.br>. Acesso em: 21 mar. 2024.
- VINHAL, J. O. *et al.* Modeling, kinetic, and equilibrium characterization of paraquat adsorption onto polyurethane foam using the ion-pairing technique. **Journal of Environmental Management**, v. 156, p. 200-208, 2015.
- WANG, Z. *et al.* Porous thermal insulation polyurethane foam materials. **Polymers**, Basel, v. 15, n. 18, 3818, set. 2023.
- WORLD FIRE STATISTICS**: report nº 29. Ljubljana: Center of Fire Statistics of CTIF, 2024. Disponível em: https://www.ctif.org/sites/default/files/2024-06/CTIF_Report29_ERG.pdf. Acesso em: 09 jul. 2024.
- ZAFAR, F.; SHARMIN, E. **Polyurethane**. **IntechOpen**, Rijeka: IntechOpen, 2012. 480 p. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/38589>. Acesso em: 02 jan. 2025.
- ZANELLA, M. **Engenharia Ambiental**, 2012. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/43669850/zanella-2012>. Acesso em: 12 jan. 2025.
- ZANONI, M. V. B.; YAMANAKA, H. (org.). **Corantes**: caracterização química, toxicológica, métodos de detecção e tratamento. 1. ed. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2016.
- ZHANG, C. *et al.* Correlation between the acoustic and porous cell morphology of polyurethane foam: effect of interconnected porosity. **Materials & Design**, v. 41, p. 319-325,

2012.

ZHANG, J. *et al.* Removal of methylene blue from aqueous solution by adsorption on pyrophyllite. **Journal of Molecular Liquids**, v. 209, p. 267-271, 2015.