



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA
E ENGENHARIA DE MATERIAIS (PPGCEM-UFPA)



MARCELO DE OLIVEIRA LIMA JÚNIOR

**CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO DE MATRIZ DE POLIURETANO À BASE
DE ÓLEO DE MAMONA E RESÍDUO DE CAROÇO DE AÇAÍ**

ANANINDEUA-PARÁ
2026

MARCELO DE OLIVEIRA LIMA JÚNIOR

**CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO DE MATRIZ DE POLIURETANO À BASE
DE ÓLEO DE MAMONA E RESÍDUO DE SEMENTE DE AÇAÍ**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM-UFPa), do *Campus* Universitário de Ananindeua (CANAN), da Universidade Federal do Pará (UFPa), como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre(a) em Ciência e Engenharia de materiais.

Orientador(a): Dr. Bruno Apolo Miranda Figueira.

Coorientador(a): Dra. Verônica Scarpini Candido.

Área de concentração: Caracterização, desenvolvimento e aplicação de materiais.

Linha de pesquisa: Tecnologia dos materiais.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- J95 Júnior, Marcelo de Oliveira Lima.
Caracterização de compósito de matriz de poliuretano à base
de óleo de mamona e resíduo de semente de açaí. / Marcelo de
Oliveira Lima Júnior. — 2026.
211 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Bruno Apolo Miranda Figueira.
Coorientação: Prof^ª. Dra. Verônica Scarpini Candido.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Campus Universitário de Ananindeua, Programa de Pós-Graduação
em Ciência e Engenharia de Materiais, Ananindeua, 2026.
1. Açaí. 2. Poliuretano de mamona. 3. Resíduos
lignocelulósicos. 4. Sustentabilidade. 5. Amazônia. I. Título.

CDD 620.118

MARCELO DE OLIVEIRA LIMA JÚNIOR

**CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO DE MATRIZ DE POLIURETANO À BASE
DE ÓLEO DE MAMONA E RESÍDUO DE SEMENTE DE AÇAÍ**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), do *Campus* Universitário de Ananindeua (CANAN), da Universidade Federal do Pará (UFPA), como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre(a) em Ciência e Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Caracterização, desenvolvimento e aplicação de materiais.

Linha de pesquisa: Tecnologia dos materiais.

Data de aprovação: 26/ 06 / 2026.

Banca examinadora

Prof.(a) Dr.(a) Bruno Apolo Miranda Figueira
Orientador(a) – (PPGCEM/UFPA)

Prof.(a) Dr.(a) Marcos Allan Leite dos Reis
Examinador(a) interno(a) – (PPGCEM/UFPA)

Prof.(a) Dr.(a) Oscar Jesus Choque Fernandez
Examinador(a) externo(a) – (PPGEMAT/UFPA)

Ao meu avô, Francisco Alves (Seu Chico), *in
memoriam*, que do céu continua olhando por
mim.

AGRADECIMENTOS

Para iniciar estes agradecimentos, expresso minha gratidão primeiramente a Deus, por me permitir alcançar lugares que, em muitos momentos, duvidei ser capaz de chegar.

Aos meus pais, Marcelo Lima e Sandra Oliveira, pelo apoio incondicional aos meus estudos, por sempre acreditarem em minha capacidade e por nunca me impedirem de buscar meus sonhos. Ao longo de toda a minha vida, foram minha base, meu suporte e minha maior rede de apoio. Ao meu avô, in memoriam, pelos ensinamentos sobre a vida e sobre a importância de permanecer forte diante das adversidades. Dentro de sua vivência, foi um dos homens mais inteligentes que tive o privilégio de conhecer. Ao meu irmão, Matheus, por caminhar ao meu lado e ser um grande parceiro em todos os momentos.

Aos amigos que fiz no laboratório, Diego, Giovana, Emily, Joelly, Manoel e Vitor, bem como a todos que por lá passaram e, de alguma forma, contribuíram para tornar esta jornada mais leve e agradável. Em especial, agradeço à Marcia Cardoso, pela constante motivação, pela paciência e, sobretudo, pelo cafezinho de todos os dias; ao Edson Miranda, pelo conhecimento compartilhado e pela disponibilidade em ensinar; e ao Leoncio Neto, pelas ideias, contribuições e parcerias estabelecidas ao longo deste percurso.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Bruno Apolo, por não permitir que eu desanimasse diante das dificuldades na construção das ideias e dos textos, bem como por toda a orientação concedida durante esta trajetória. À minha coorientadora, Profa. Dra. Verônica Scarpini, por ter me apresentado ao laboratório e proposto este desafio, por ouvir minhas ideias e, principalmente, por me chamar à responsabilidade nos momentos necessários. Seus conselhos, conversas e ensinamentos foram essenciais para minha evolução como pesquisador e como pessoa.

À Profa. Dra. Paula Fabíola, que, embora tenha contribuído na etapa final deste trabalho, teve participação essencial e me auxiliou em um dos momentos em que mais precisei. Ao Prof. Alisson Rios, pelo conhecimento compartilhado e por me ajudar a enxergar soluções quando as ideias pareciam não apresentar alternativas viáveis.

Ao Grupo de Pesquisa em Materiais Compósitos (GPMCOMP), espaço onde passei os últimos dois anos e que, de certa forma, tornou-se minha segunda casa. Aos Laboratórios de Práticas Tecnológicas (LAPTEC) e de Caracterização de Materiais (LACMAT) da Universidade Federal do Pará, pelo espaço e suporte oferecidos para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos e todas que, de alguma forma, fizeram parte da minha trajetória. A cada um, o meu mais sincero agradecimento.

“Tudo o que temos de decidir é o que fazer com o tempo que nos é dado”

J.R.R.Tolkien, O Senhor dos Anéis.

RESUMO

A crescente preocupação ambiental e a busca por materiais sustentáveis impulsionam a pesquisa em compósitos com reforços naturais. A utilização de fibras e particulados naturais em matrizes poliméricas é uma vertente consolidada na engenharia de materiais, devido aos resultados promissores em desempenho mecânico. Nesse contexto, a grande quantidade de resíduos de açaí sem destinação correta, combinada com a matriz polimérica de poliuretano baseado em óleo de mamona (PUOM), representa uma opção viável e sustentável para o desenvolvimento de novos materiais. Desse modo, este trabalho teve como objetivo principal investigar a influência da granulometria e da fração volumétrica de particulados de açaí (*Euterpe oleracea*) nas propriedades de compósitos de poliuretano de mamona (PUOM), visando o desenvolvimento de materiais sustentáveis. A metodologia envolveu a caracterização dos particulados por microscopia óptica, MEV/EDS, picnometria, DRX, TGA/DTG e FTIR, e dos compósitos por ensaios mecânicos (tração, compressão, flexão, impacto Izod, dureza Shore D), absorção de água e flamabilidade. Os principais resultados demonstraram que a incorporação dos particulados de açaí alterou significativamente as propriedades da matriz. A formulação 60G1 (60% de particulados finos) destacou-se pela otimização da resistência à tração ($16,51 \pm 1,62$ MPa, 8% superior à matriz pura) e compressão ($37,94 \pm 2,17$ MPa, 544% de ganho), além de apresentar a maior redução na taxa de queima ($10,37 \pm 1,86$ mm/s, 60% de diminuição) e supressão do gotejamento. As formulações 50G2 e 60G2 (particulados intermediários) exibiram o melhor desempenho em resistência à flexão ($21,45 \pm 1,75$ MPa para 60G2). A dureza Shore D aumentou com a adição dos particulados, sendo a 60G3 (particulados grossos) a de maior valor ($64,9 \pm 2,71$). A absorção de água aumentou devido ao caráter higroscópico dos particulados, mas permaneceu dentro de limites aceitáveis para certas aplicações. A análise microestrutural por MEV revelou a presença de vazios e falha interfacial, que impactaram negativamente as propriedades mecânicas, especialmente a tenacidade ao impacto. A aplicação desses compósitos é promissora em ambientes internos, como painéis de revestimento. Conclui-se que os compósitos de PUOM/açaí apresentam um grande potencial como materiais de engenharia, com a formulação 60G1 oferecendo o melhor balanceamento de propriedades. Para otimizar o desempenho, estudos futuros devem focar na redução da fração de vazios e na melhoria da adesão interfacial.

Palavras-chave: Açaí; Poliuretano de mamona; Resíduos lignocelulósicos; Sustentabilidade; Amazônia.

ABSTRACT

The growing environmental concern and the search for sustainable materials are driving research into composites with natural reinforcements. The use of natural fibers and particulates in polymeric matrices is a consolidated area in materials engineering due to promising results in mechanical performance. In this context, the large quantity of acai waste without proper disposal, combined with a castor oil-based polyurethane (COPU) polymeric matrix, represents a viable and sustainable option for the development of new materials. Therefore, the main objective of this work was to investigate the influence of particle size and volumetric fraction of acai (*Euterpe oleracea*) particulates on the properties of castor oil polyurethane (COPU) composites, aiming at the development of sustainable materials. The methodology involved the characterization of the particulates by optical microscopy, SEM/EDS, pycnometry, XRD, TGA/DTG, and FTIR, and the composites by mechanical tests (tensile, compression, flexural, Izod impact, Shore D hardness), water absorption, and flammability. The main results showed that the incorporation of acai particulates significantly altered the matrix properties. The 60G1 formulation (60% fine particulates) stood out for optimizing tensile strength (16.51 ± 1.62 MPa, 8% higher than the pure matrix) and compression (37.94 ± 2.17 MPa, a 544% gain), in addition to presenting the greatest reduction in burning rate (10.37 ± 1.86 mm/s, a 60% decrease) and suppression of dripping. Formulations 50G2 and 60G2 (intermediate particulates) exhibited the best performance in flexural strength (21.45 ± 1.75 MPa for 60G2). Shore D hardness increased with the addition of particulates, with 60G3 (coarse particulates) showing the highest value (64.9 ± 2.71). Water absorption increased due to the hygroscopic nature of the particulates but remained within acceptable limits for certain applications. Microstructural analysis by SEM revealed the presence of voids and interfacial failure, which negatively impacted mechanical properties, especially impact toughness. The application of these composites is promising in indoor environments, such as cladding panels. It is concluded that COPU/acai composites show great potential as engineering materials, with the 60G1 formulation offering the best balance of properties. To optimize performance, future studies should focus on reducing the void fraction and improving interfacial adhesion.

Keywords: Açaí; Castor oil polyurethane; Lignocellulosic waste; Sustainability; Amazon.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODS).....	23
Figura 2 – Disposição final adequada x inadequada de RSU no Brasil em 2024.	26
Figura 3 – Principais fontes de resíduos e subprodutos agroindustriais.....	27
Figura 4 – Palmeira do açaí.	29
Figura 5 – Anatomia do caroço de açaí, corte transversal: (1) Embrião; (2) Endocarpo; (3) cicatriz; (4) polpa; (5) Pericarpo + Tegumento; (6) Mesocarpo.....	29
Figura 6 – Produção do fruto de açaí por estado.	30
Figura 7 – Resíduos de açaí.	31
Figura 8 – Estrutura molecular de polímeros termoplásticos (a) e termorrígido (b).....	34
Figura 9 – Reações de: a) uretano; b) poliuretano.	36
Figura 10 – Planta de mamona: (a) planta inteira, (b) inflorescência, (c) sementes.	38
Figura 11 – Ilustração das fases constituintes de um material compósito.....	41
Figura 12 – Ilustração das formas de reforço: (a) reforço contínuo unidirecional; (b) reforço contínuo bidirecional; (c) reforço descontínuo alinhado; (d) reforço descontínuo disperso.	42
Figura 13 – Ilustração esquemática da região interfacial do compósito redesenhado.....	44
Figura 14 – Tamanhos bases dos reforços com partículas.	44
Figura 15 – Deformação da matriz ao redor da partícula.	45
Figura 16 – Fluxograma da pesquisa.	48
Figura 17 – Máquina de separação de fibras e sementes de açaí.	50
Figura 18 – Aspecto dos caroços após passarem por separação mecânica.	51
Figura 19 – Moinhos 1 e 2.....	53
Figura 20 – Esquema do uso da parafusadeira como misturador mecânico.....	59
Figura 21 – Esquema de utilização do molde metálico.	59
Figura 22 – Prensagem das placas.	60
Figura 23 – Placas produzidas e prensa de madeira.	60
Figura 24 – Modelagem das placas e cortes realizados para tração.	61
Figura 25 – Modelagem das placas e cortes realizados para flexão.	61
Figura 26 – Modelagem das placas e cortes realizados para compressão e Izod.	62
Figura 27 – Técnica de delimitação de área útil com o miriti.	62
Figura 28 – Gráfico de distribuição de partículas.	68
Figura 29 – Partículas de açaí processadas apenas em M1: a) G1; b) G2; c) G3.....	70

Figura 30 – Partículas de açaí processadas apenas em M2: a) G1; b) G2; c) G3.....	70
Figura 31 – Partículas lavadas para retirada das micropartículas.....	71
Figura 32 – Micrografias das partículas de açaí: a, b) G1; c, d) G2; e, f) G3. Ampliações de 30× em a) e c). Ampliação de 100× em e). Ampliações 1000× em b), d) e f).	73
Figura 33 – Difração de raios-X do açaí in natura.	75
Figura 34 – Gráfico de TGA e DTG do açaí.	77
Figura 35 – Espectro de FTIR do açaí.	79
Figura 36 – Espectro de FTIR das matérias primas e compósitos produzidos.....	81
Figura 37 – Aspectos dos compósitos pós ensaio de tração: (a) G1, (b) G2 e (c) G3.....	84
Figura 38 – Gráficos de resistência a tração: a) para compósitos com G1; b) para compósitos com G2 e c) para compósitos com G3.....	85
Figura 39 – Gráfico de deformação x módulo de Young: A) composições estudadas com G1; b) composições estudadas com G2; c) composições estudadas com g3.....	87
Figura 40 – gráfico comparativo de resistência a tração.	88
Figura 41 – Aspectos dos corpos de provas pós ensaio de compressão.	97
Figura 42 – Resultados de resistência a compressão: a) composições estudadas com G1; b) composições estudadas com G2; c) composições estudadas com G3	99
Figura 43 – Resultados de deformação e módulo de compressão a) composições estudadas com G1; b) composições estudadas com G2; c) composições estudadas com G3.....	100
Figura 44 – Gráfico comparativo de resistência a compressão dos compósitos produzidos.	102
Figura 45 – Corpos de provas após o ensaio de dobramento.	111
Figura 46 – Gráficos de resistências a dobramento dos compósitos.	113
Figura 47 – Gráficos de deformação x módulo corda dos compósitos.	114
Figura 48 – Gráfico comparativo de resistência a dobramento dos compósitos produzidos.	115
Figura 49 – Gráficos de energia Izod dos compósitos.....	128
Figura 50 – Gráfico comparativo de energia a impacto Izod dos compósitos produzidos....	129
Figura 51 – Gráficos de dureza Shore D dos compósitos: a) composições com G1; b) composições com G2; c) composições com G3.	137
Figura 52 – Gráfico comparativo de dureza Shore D.....	138
Figura 53 – Superfície dos compósitos ensaiados em dureza Shore D.	139
Figura 54 – Comparativo de absorção de água dos compósitos produzidos.	152
Figura 55 – Gráfico comparativo de taxa de queima.....	160
Figura 56 – Comportamento de queima: a) matriz pura; b) compósito.....	161

Figura 57 – Análises por MEV das regiões de fratura dos compósitos após ensaio de tração: a) 40G1; b) 40G1 ampliado 300x; c) 50G1; d) 50G1 ampliado 300x; e) 60G1; f) 60G1 ampliado 300x.	167
Figura 58 – Análises por MEV das regiões de fratura dos compósitos após ensaio de tração: a) 40G2; b) 40G2 ampliado 300x; c) 50G2; d) 50G2 ampliado 300x; e) 60G2; f) 60G2 ampliado 300x.	169
Figura 59 – Análises por MEV das regiões de fratura dos compósitos após ensaio de tração: a) 40G3; b) 40G3 ampliado 300x; c) 50G3; d) 50G3 ampliado 300x; e) 60G3; f) 60G3 ampliado 300x.	171
Figura 60 – Análises por MEV das regiões dos compósitos após ensaio de compressão: a) 40G1; b) 40G1 ampliado 300x; c) 50G1; d) 50G1 ampliado 300x; e) 60G1; f) 60G1 ampliado 300x.	173
Figura 61 – Análises por MEV das regiões dos compósitos após ensaio de compressão: a) 40G2; b) 40G2 ampliado 300x; c) 50G2; d) 50G2 ampliado 300x; e) 60G2; f) 60G2 ampliado 300x.	175
Figura 62 – Análises por MEV das regiões dos compósitos após ensaio de compressão: a) 40G3; b) 40G3 ampliado 300x; c) 50G3; d) 50G3 ampliado 300x; e) 60G3; f) 60G3 ampliado 300x.	177
Figura 63 – Análises por MEV das regiões dos compósitos após ensaio de flexão/dobramento: a) 40G1; b) 40G1 ampliado 300x; c) 50G1; d) 50G1 ampliado 300x; e) 60G1; f) 60G1 ampliado 300x.	179
Figura 64 – Análises por MEV das regiões dos compósitos após ensaio de flexão/dobramento: a) 40G2; b) 40G2 ampliado 300x; c) 50G2; d) 50G2 ampliado 300x; e) 60G2; f) 60G2 ampliado 300x.	181
Figura 65 – Análises por MEV das regiões dos compósitos após ensaio de flexão/dobramento: a) 40G3; b) 40G3 ampliado 300x; c) 50G3; d) 50G3 ampliado 300x; e) 60G3; f) 60G3 ampliado 300x.	183
Figura 66 – Análises por MEV das regiões de fratura dos compósitos após ensaio de impacto Izod: a) 40G1; b) 40G1 ampliado 300x; c) 50G1; d) 50G1 ampliado 300x; e) 60G1; f) 60G1 ampliado 300x.	185
Figura 67 – Análises por MEV das regiões de fratura dos compósitos após ensaio de impacto Izod: a) 40G2; b) 40G2 ampliado 300x; c) 50G2; d) 50G2 ampliado 300x; e) 60G2; f) 60G2 ampliado 300x.	187

Figura 68 – Análises por MEV das regiões de fratura dos compósitos após ensaio de impacto Izod: a) 40G3; b) 40G3 ampliado 300x; c) 50G3; d) 50G3 ampliado 300x; e) 60G3; f) 60G3 ampliado 300x.	189
--	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resinas poliméricas, características e limitações.	35
Tabela 2 – Composição principal ácido graxo do óleo de rícino.	39
Tabela 3 – Propriedades e características da AGT 1315.	49
Tabela 4 – Valores do teste da DMCA.	50
Tabela 5 – Tipos de grãos no beneficiamento.	52
Tabela 6 – Proporção de granulometrias produzidas em cada moinho.	54
Tabela 7 – Composição dos materiais compósitos.	58
Tabela 8 – Quantidade de cada tipo de grão produzida de açaí.	69
Tabela 9 – Picnometria das partículas de açaí com etanol e água.	74
Tabela 10 – Resumo comparativo das densidades discutidas nessa sessão.	75
Tabela 11 – Principais bandas no espectro de FTIR das partículas de caroço de açaí.	80
Tabela 12 – Principais bandas identificadas nos espectros de FTIR dos compósitos PUOM/açaí.	83
Tabela 13 – Resumo dos resultados das propriedades obtidas em tração.	84
Tabela 14 – Comparação da melhor resistência à tração obtida neste estudo com valores reportados na literatura	90
Tabela 15 – ANOVA para as propriedades obtidas no ensaio de tração para G1.	90
Tabela 16 – Tukey para as propriedades em tração para G1.	91
Tabela 17 – ANOVA para as propriedades obtidas no ensaio de tração para G2.	92
Tabela 18 – Tukey para as propriedades em tração para G2.	93
Tabela 19 – ANOVA para as propriedades obtidas no ensaio de tração para G3.	94
Tabela 20 – Tukey para as propriedades em tração para G3.	94
Tabela 21 – Anova bifatorial com repetição para resistência a tração.	95
Tabela 22 – Tukey para k=3 da resistência a tração.	96
Tabela 23 – Tukey para resistência a tração de k=9.	96
Tabela 24 – Resumo das propriedades obtidas no ensaio de compressão.	98
Tabela 25 – Comparação da melhor resistência à compressão obtida neste estudo com valores reportados na literatura.	104
Tabela 26: ANOVA para as propriedades obtidas no ensaio de compressão para G1.	104
Tabela 27 – Tukey para as propriedades em compressão para G1.	105
Tabela 28 – ANOVA para as propriedades obtidas no ensaio de compressão para G2.	106

Tabela 29 – Tukey para as propriedades em compressão para G2.....	106
Tabela 30 – ANOVA para as propriedades obtidas no ensaio de compressão para G3.....	107
Tabela 31 – Tukey para propriedades de compressão G3.....	108
Tabela 32 – Anova bifatorial com repetição para resistência a compressão.....	109
Tabela 33 – Tukey para k=3 da resistência a compressão.....	110
Tabela 34 – Tukey para k=9 da resistência a compressão.....	110
Tabela 35 – Tabela de resumo das propriedades obtidas no ensaio de dobramento.....	112
Tabela 36 – Comparação dos resultados de dobramento/flexão deste estudo com painéis lignocelulósicos reportados na literatura.....	117
Tabela 37 – Resumo do desempenho em dobramento dos compósitos produzidos em relação aos requisitos normativos.....	119
Tabela 38 – ANOVA para as propriedades obtidas no ensaio de dobramento para G1.....	120
Tabela 39 – Tukey para as propriedades em dobramento para G1.....	120
Tabela 40 – ANOVA para as propriedades obtidas no ensaio de dobramento para G2.....	122
Tabela 41 – Tukey para as propriedades em dobramento para G2.....	122
Tabela 42 – ANOVA para as propriedades obtidas no ensaio de dobramento para G3.....	123
Tabela 43 – Tukey para as propriedades em dobramento para G3.....	124
Tabela 44 – Anova bifatorial com repetição para resistência a dobramento.....	125
Tabela 45 – Tukey para k=3 da resistência a dobramento.....	126
Tabela 46 – Tukey para k=9 da resistência a dobramento.....	126
Tabela 47 – Tabela de resumo do impacto Izod realizado.....	128
Tabela 48 – ANOVA para energia de impacto Izod de G1.....	130
Tabela 49 – Tukey para energia de impacto Izod de G1.....	131
Tabela 50 – ANOVA para energia de impacto Izod de G2.....	131
Tabela 51 – Tukey para energia de impacto Izod de G2.....	132
Tabela 52 – ANOVA para energia de impacto Izod de G3.....	132
Tabela 53 – Tukey para energia de impacto Izod de G3.....	133
Tabela 54 – Anova bifatorial com repetição para energia de impacto Izod.....	134
Tabela 55 – Tukey k=3 para energia de impacto Izod.....	134
Tabela 56 – Tukey k=9 para energia de impacto Izod.....	135
Tabela 57 – Tabela de resumo da dureza Shore D dos compósitos produzidos.....	136
Tabela 58 – ANOVA para as propriedades obtidas no ensaio de Dureza Shore D para G1.....	140
Tabela 59 – ANOVA para ensaio de Dureza Shore D para G1.....	140

Tabela 60 – ANOVA para as propriedades obtidas no ensaio de dureza Shore D para G2..	141
Tabela 61 – ANOVA para ensaio de Dureza Shore D para G2	141
Tabela 62 – ANOVA para as propriedades obtidas no ensaio de Dureza Shore D para G3 .	142
Tabela 63 – ANOVA para ensaio de Dureza Shore D para G3	142
Tabela 64 – Anova bifatorial com repetição para dureza Shore D.....	143
Tabela 65 – Tukey para k=3 de dureza Shore D.	144
Tabela 66 – Tukey para k=9 de dureza Shore D.	144
Tabela 67 – Valores de densidade prática e frações de vazios para tração.	146
Tabela 68 – Valores de densidade prática e frações de vazios para compressão.	147
Tabela 69 – Valores de densidade prática e frações de vazios para flexão.	149
Tabela 70 – Valores de densidade prática e frações de vazios dos compósitos.	151
Tabela 71 – Tabela de absorção de água e porosidade aparente ao final de 24 horas.....	152
Tabela 72 – ANOVA para absorção de água em 24 horas das composições com G1.	154
Tabela 73 – Tukey para absorção de água em 24 horas G1.	155
Tabela 74 – ANOVA para absorção de água em 24 horas G2.....	155
Tabela 75 – Tukey para absorção de água em 24 horas G2	156
Tabela 76 – ANOVA para absorção de água em 24 horas G3	156
Tabela 77 – Tukey para absorção de água em 24 horas G3	157
Tabela 78 – Anova bifatorial com repetição para absorção de água.	157
Tabela 79 – Teste de Tukey com k = 3 para absorção de água em 24 horas.	158
Tabela 80 – Teste de Tukey com k = 9 para absorção de água em 24 horas.	158
Tabela 81 – Taxa de queima dos compósitos produzidos no ensaio de flamabilidade.	159
Tabela 82 – ANOVA para flamabilidade dos compósitos de G1.	162
Tabela 83 – Tukey para flamabilidade dos compósitos de G1.....	162
Tabela 84 – ANOVA para flamabilidade dos compósitos de G2.	163
Tabela 85 – Tukey para flamabilidade dos compósitos de G2.....	164
Tabela 86 – ANOVA para flamabilidade dos compósitos de G3.	164
Tabela 87 – ANOVA para flamabilidade dos compósitos	165
Tabela 88 – Tukey de flamabilidade para os compósitos com k=3	165
Tabela 89 – Tukey de flamabilidade para os compósitos com k=9	166
Tabela 90 – Síntese das formulações de destaque e dos requisitos de serviço associados à aplicação proposta.	192

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 OBJETIVO GERAL	21
1.1.1 Objetivos específicos.....	22
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 AGENDA 2030 E A POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	23
2.2 RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS.....	26
2.3 AÇAÍ.	28
2.4 MATRIZ POLIMÉRICA.....	33
2.4.1 Resinas termofixas poliméricas.....	34
2.5 POLIURETANO (PU).....	35
2.5.1 Poliuretano baseado em óleo de mamona (PUOM)	37
2.6 MATERIAIS COMPÓSITOS.....	40
2.6.1 Compósitos particulados	44
2.6.2 Aplicação de compósitos particulados em painéis de revestimento.....	46
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
3.1 MATERIAIS.	48
3.2 MÉTODOS	49
3.2.1 Beneficiamento dos caroços de açaí.....	49
3.2.2 Caracterização do resíduo de semente de açaí	54
3.3 CONFECÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS.....	57
3.3.1 Confecção dos corpos de provas.	57
3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS	63
3.4.1 Ensaio de tração	63
3.4.2 Ensaio de compressão.....	63
3.4.3 Ensaio de dobramento.....	63
3.4.4 Ensaio de impacto.....	64
3.4.5 Ensaio de dureza.....	64
3.4.6 Determinação da densidade dos compósitos e fração de vazios.....	64
3.4.7 Absorção de água.....	65
3.4.8 Flamabilidade.....	66
3.4.9 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) das fraturas.....	66
3.5 TRATAMENTO ESTATÍSTICO.....	66

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS PARTICULADOS DE AÇAÍ.....	68
4.1.1 Beneficiamento das granulometrias de açaí.	68
4.1.2 Morfologia dos particulados.....	69
4.1.3 Densidade por picnometria.....	74
4.1.4 Caracterização por Difração de raios-X.	75
4.1.5 Análise Termogravimétrica.....	76
4.1.6 Espectroscopia Vibracional no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) do açaí.	78
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS.....	80
4.2.1 Espectroscopia Vibracional no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....	80
4.2.2 Ensaio de Tração dos compósitos produzidos.....	84
4.2.3 Ensaio de compressão dos compósitos produzidos.	97
4.2.4 Ensaio de flexão (dobramento) dos compósitos produzidos.	110
4.2.5 Ensaio de impacto Izod	127
4.2.6 Ensaio de Dureza Shore D.	136
4.2.7 Densidade prática e fração de vazios.	145
4.2.8 Absorção de água	151
4.2.9 Flamabilidade.....	159
4.2.10 Análise morfológica da região de fratura do compósitos por microscopia eletrônica de varredura.	167
4.3 ANÁLISES DE APLICABILIDADE.	191
4.3.1 Viabilidade de aplicação e condições.....	191
4.3.2 Formulação ideal do estudo.....	191
5 CONCLUSÃO	194
6 TRABALHOS FUTUROS.....	196
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	197

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico está diretamente associado à evolução dos materiais, desde aqueles utilizados em aplicações básicas até ligas e sistemas avançados empregados em setores estratégicos (Zhao et al., 2023). Nesse processo, a ciência e a engenharia de materiais têm buscado desenvolver soluções que atendam às demandas de desempenho, segurança e menor impacto ambiental ao longo do ciclo de vida dos produtos (Gudayu et al., 2021).

Entretanto, o avanço tecnológico também intensificou o consumo de matérias-primas provenientes de fontes não renováveis, agravando problemas ambientais relacionados à extração e ao processamento desses recursos (Marchi et al., 2022). Além disso, o descarte inadequado de resíduos sólidos, como plásticos derivados do petróleo e subprodutos da agroindústria, pode causar impactos ambientais e sociais significativos. Esses impactos também estão associados à persistência de materiais poliméricos no ambiente e à dificuldade de destinação adequada de determinados resíduos industriais e agroindustriais (Cosme et al., 2024; Jakubowska et al., 2022; Tavares et al., 2025).

Diante desses desafios, setores industriais e pesquisadores têm buscado soluções capazes de alinhar sustentabilidade e desenvolvimento tecnológico. Dessa forma, conceitos como renovabilidade, biodegradabilidade e reciclabilidade dos materiais tornaram-se cada vez mais centrais nas discussões científicas e de políticas públicas, principalmente impulsionadas pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pelas Nações Unidas para a Agenda 2030 (Almeida et al., 2025; Reis et al., 2021).

Nesse contexto, cientistas e engenheiros de materiais buscam desenvolver soluções sustentáveis para substituir ou reduzir o uso de materiais tradicionais, sem comprometer requisitos de desempenho mecânico, térmico e de durabilidade. Dentre as estratégias adotadas, o desenvolvimento de compósitos poliméricos tem sido amplamente estudado (Müzel et al., 2020; Silva et al., 2025).

De forma geral, os compósitos são materiais constituídos por dois ou mais componentes, sendo uma fase matriz e uma ou mais fases dispersas, que podem atuar como carga ou reforço (Aravinth et al., 2022). A combinação dessas fases permite obter propriedades atrativas, diferentes daquelas apresentadas pelos materiais quando utilizados isoladamente (Alsuwait et al., 2022). No caso dos compósitos de matriz polimérica, a incorporação de cargas lignocelulósicas naturais pode contribuir para o desenvolvimento de materiais com maior apelo

ambiental e potencial de aplicação em diferentes setores (Reis et al., 2021; Santos et al., 2025; Szadkowski; Śliwka-Kaszyńska; Marzec, 2025).

Apesar dessas vantagens, muitas matrizes poliméricas, principalmente as sintéticas, ainda estão associadas a impactos ambientais, uma vez que o petróleo permanece como matéria-prima predominante na síntese de diversos polímeros, além de ser uma fonte não renovável e envolver elevado custo energético em sua produção (Tao et al., 2020). Por esse motivo, buscase a utilização de resinas de menor toxicidade e maior conteúdo renovável, como o poliuretano à base de óleo de mamona (PUOM), em materiais compósitos de matriz polimérica (Chen; Wu; Chen, 2021).

Embora existam discussões na literatura sobre a toxicidade e a sustentabilidade plena do PUOM, sua utilização permanece relevante por envolver a reação entre um pré-polímero à base de isocianato e um poliol poliéster extraído das sementes da planta *Ricinus communis* L. Assim, o PUOM não deve ser tratado como uma matriz totalmente natural, mas como uma alternativa parcialmente renovável para o desenvolvimento de compósitos (Cruz et al., 2022; Landoni et al., 2023; Nedjimi, 2022).

A escolha do PUOM também está relacionada à possibilidade de interação com materiais lignocelulósicos, uma vez que grupos hidroxila presentes na superfície desses materiais podem reagir com grupos -NCO, favorecendo a adesão química entre matriz e reforço (Faria et al., 2020c; Zanini et al., 2022). Entretanto, a eficiência dessa adesão e as propriedades finais do compósito dependem de fatores como morfologia, granulometria, distribuição das partículas, fração volumétrica e método de processamento.

No contexto dos reforços lignocelulósicos, a escolha entre fibras e partículas apresenta implicações técnicas importantes. Embora as fibras tendam a oferecer maior capacidade de transferência de tensões, as partículas podem proporcionar processamento simplificado e melhor acabamento superficial. Além disso, a eficiência do reforço com partículas depende da área superficial específica, da distribuição granulométrica e da compatibilidade química com a matriz, sendo que frações volumétricas mais elevadas podem aumentar a rigidez do material, embora, em alguns casos, possam reduzir a resistência à tração (Makri et al., 2023).

Na região amazônica, destaca-se o resíduo agroindustrial proveniente da cadeia produtiva do açaí (*Euterpe oleracea* Mart.). Esse fruto natural da Amazônia, amplamente cultivado, é reconhecido pelo alto valor nutritivo de seus frutos globosos (Barros et al., 2021; Martins et al., 2021b; Nascimento, 2008). Entretanto, sua cadeia produtiva gera quantidades expressivas de resíduos, uma vez que apenas cerca de 10% da massa do fruto corresponde à

parte aproveitável comercialmente, enquanto os 90% restantes, formados por fibras e sementes, são descartados (Barros et al., 2021).

Diante desse cenário, o aproveitamento do caroço de açaí em compósitos poliméricos representa uma alternativa para agregar valor a um resíduo abundante e reduzir impactos associados ao seu descarte. No entanto, apesar dos avanços observados na literatura, ainda são limitados os estudos que utilizam a semente de açaí sem a fibra, na forma particulada, em frações volumétricas elevadas e com avaliação sistemática do efeito da granulometria sobre as propriedades finais do compósito.

Nesse contexto, a presente dissertação foca na combinação da semente de açaí, sem a fibra, com a matriz de poliuretano obtido do óleo de mamona. O objetivo principal é analisar a viabilidade técnico-científica do uso dessa semente como enchimento em matriz de PUOM, considerando diferentes faixas granulométricas: G1, abaixo de 0,30 mm; G2, de 0,30 mm a 0,60 mm; e G3, de 0,60 mm a 1,18 mm. Para tanto, foram selecionadas formulações com 40, 50 e 60% em volume de partículas de açaí, buscando explorar altos teores de resíduo e investigar o comportamento dos compósitos quanto às propriedades físicas, mecânicas, térmicas, microestruturais, de absorção de água e de flamabilidade.

Como não há normas específicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas aplicáveis diretamente ao material desenvolvido, foram adotadas, para fins comparativos e de possível validação dos resultados, principalmente mecânicos, as normas ABNT NBR 14810:2, 2024 (painéis de partículas de madeira) e ABNT NBR 14715-1:2021 (Chapas de gesso para drywall Parte 1: Requisitos). A proposta busca contribuir para o desenvolvimento de compósitos com elevada fração de resíduo agroindustrial e matriz parcialmente renovável, com potencial aplicação não estrutural em painéis de revestimento, além de promover a valorização tecnológica de um subproduto abundante na região amazônica.

1.1 Objetivos Geral

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a influência da adição do caroço de açaí nas propriedades e microestrutura de compósitos de matriz de PU.

1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar o resíduo de açaí: Morfologia, densidade aparente, composição mineralógica, comportamento térmico por TGA e identificar ligações químicas e grupos funcionais por FTIR;
- Avaliar a interação vibracional dos grupos funcionais matriz/partículas;
- Avaliar o efeito da granulometria e da fração volumétrica nas propriedades físicas, mecânicas, de absorção de água e de flamabilidade dos compósitos;
- Correlacionar a fração de vazios e os mecanismos de fratura com o desempenho mecânico dos compósitos;
- Analisar os mecanismos de fratura dos compósitos, correlacionando as características microestruturais com o desempenho mecânico;
- Identificar a formulação com melhor equilíbrio de propriedades para aplicação em painéis de revestimento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Agenda 2030 e a política nacional de resíduos sólidos

Em setembro de 2015, durante a Cúpula das Nações Unidas sobre o desenvolvimento sustentável, foram estabelecidos os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Os ODS foram criados com o propósito de serem um apelo universal à ação para erradicar a pobreza, proteger o planeta e assegurar que todas as pessoas desfrutem de paz e prosperidade. Os ODS representam uma agenda global ambiciosa e integrada, que busca abordar os maiores desafios do mundo, como a desigualdade, as mudanças climáticas, a degradação ambiental, a paz e a justiça, com a meta de serem alcançadas até o ano de 2030. A Figura 1 apresenta os 17 ODS.

Figura 1 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODS).



Fonte: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>

Os ODS incentivam e aprimoram estudos de diversas maneiras, pois fornecem uma estrutura abrangente para a pesquisa e a inovação. Eles direcionam a atenção para problemas globais urgentes, estimulando a investigação em áreas como energias renováveis, saúde pública, segurança alimentar, educação de qualidade e gestão sustentável de recursos naturais. Além disso, a adoção das energias renováveis, em particular, exemplifica como os

ODS orientam pesquisas voltadas à redução de emissões, promoção do crescimento econômico inclusivo e melhoria da saúde pública (Huo; Ni; Shah, 2025; Victoria Agbakwuru et al., 2024).

Ao definir metas e indicadores claros, os ODS criam uma demanda por dados, análises e soluções baseadas em evidências, o que impulsiona a pesquisa científica e tecnológica. Universidades, centros de pesquisa e outras instituições são incentivados a desenvolver projetos que contribuam para o alcance desses objetivos, gerando conhecimento novo e aplicável. Exemplos como o caso de Tamil Nadu, na Índia, demonstram que iniciativas sustentáveis impulsionadas pelas ODS resultam em benefícios socioeconômicos e ambientais mensuráveis, como crescimento do Produto Interno Bruto e significativa redução das emissões de carbono (Ramesh, 2025).

Além disso, os ODS promovem uma abordagem interdisciplinar, pois os desafios que eles abordam raramente podem ser resolvidos por uma única área do conhecimento. Isso estimula a colaboração entre diferentes campos de estudo, como ciências sociais, ambientais, econômicas e tecnológicas, enriquecendo a pesquisa e a formação de profissionais mais completos. Eles também fomentam a pesquisa aplicada, buscando soluções práticas para problemas reais, e a inovação em políticas públicas e modelos de negócios sustentáveis (Llamas et al., 2025). A convergência entre inovação, propriedade intelectual e governança ambiental tem-se mostrado estratégica para potencializar o impacto dos esforços voltados ao desenvolvimento sustentável, ao mesmo tempo que revela desafios relativos ao acesso igualitário às tecnologias e à inclusão social, especialmente em países em desenvolvimento. Evidências empíricas recentes em países do BRICS, por exemplo, ilustram que estratégias integradas envolvendo inovação verde, energia renovável e financiamento sustentável são determinantes na redução de emissões e no alinhamento com metas de desenvolvimento socioambiental, apesar dos desafios de crescimento econômico e desigualdade regional (Amin et al., 2025; Huo; Ni; Shah, 2025).

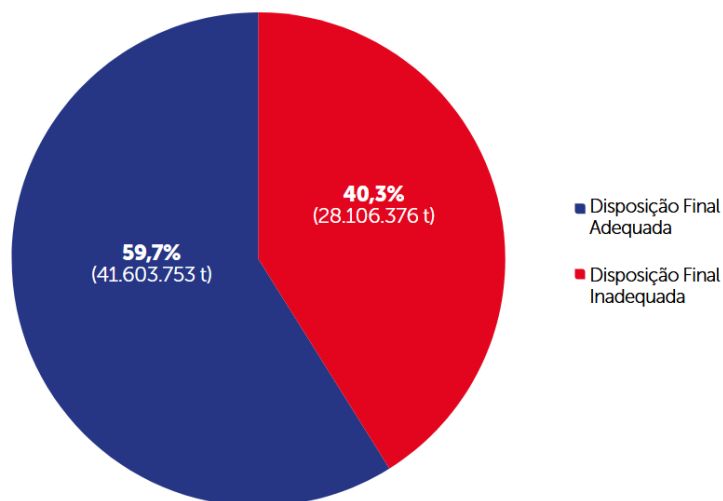
No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei Federal nº 12.305 de 2010 e regulamentada pelo Decreto Federal nº 7.404/2010, representa um marco fundamental no Brasil para enfrentar os desafios sociais, econômicos e ambientais decorrentes da gestão inadequada dos resíduos sólidos. Ela estabelece princípios, objetivos e instrumentos para uma gestão integrada e ambientalmente adequada, priorizando a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos, e a disposição final ambientalmente correta dos rejeitos, definidos como resíduos sem possibilidade de tratamento ou recuperação (Brasil, 2010).

A PNRS abrange todos os geradores de resíduos, reconhecendo o resíduo sólido reutilizável como um bem econômico e incentivando sua reutilização e reaproveitamento. Para o setor agroindustrial, a lei é de suma importância, pois impulsiona a busca por soluções sustentáveis para os resíduos agrossilvopastoris. Ela introduz a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, o que significa que diversos atores, desde fabricantes até consumidores, são corresponsáveis pela gestão dos resíduos. Isso estimula a implementação de sistemas de logística reversa e o aproveitamento de resíduos agroindustriais, que frequentemente possuem potencial para geração de energia ou reinserção em cadeias produtivas. A lei exige que os geradores de resíduos agrossilvopastoris elaborem seus planos de gerenciamento de resíduos sólidos e incentiva o poder público a criar medidas indutoras e linhas de financiamento para pesquisas e desenvolvimento de tecnologias limpas aplicáveis a esses resíduos, utilizando a pesquisa científica e tecnológica como um de seus instrumentos (Brasil, 2010).

Embora exista a proposta pela PNRS, a realidade dos descartes de resíduos sólidos urbanos (RSU). Segundo a associação brasileira de resíduos e meio ambiente (ABREMA), no ano de 2024 foram gerados 81,6 milhões de RSU. Dessa quantidade, 85,5% foram encaminhados para disposição final (adequada e inadequada) ou seja, 69,7 milhões de toneladas. Dessa quantidade com as projeções feitas para o panorama 2025, indicou que 59,7% dessa quantidade foi disposta em aterros sanitários (disposição final ambientalmente adequada).

A Figura 2 revela que 40,3% do RSU tem uma disposição final inadequada, o que evidencia o não cumprimento total da determinação legal da PNRS. Para reverter o cenário atual, é fundamental implementar uma abordagem de gestão e gerenciamento integrada que priorize o desenvolvimento sustentável. Isso implica na adoção de tecnologias capazes de transformar resíduos em recursos valiosos, recuperando-os e valorizando-os antes que sejam descartados em aterros. A PNRS estabelece como um de seus princípios o reconhecimento dos resíduos sólidos reutilizáveis e recicláveis como um bem de valor social, capaz de gerar trabalho, renda e promover a cidadania. Embora o conceito de economia circular não seja explicitamente mencionado, a PNRS, ao estimular a recuperação de resíduos por meio de processos tecnológicos acessíveis e economicamente sustentáveis, propõe uma transição de um modelo de economia linear para um circular.

Figura 2 – Disposição final adequada x inadequada de RSU no Brasil em 2024.



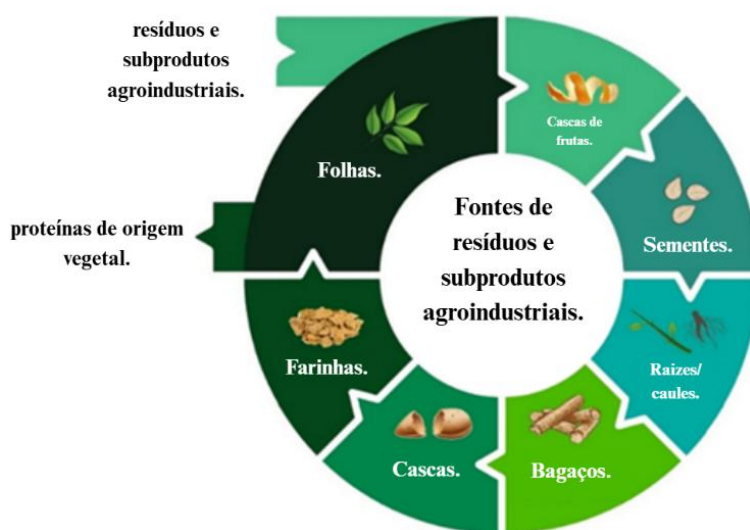
Fonte: ABREMA (2025).

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) destaca a produção agropecuária como uma das atividades socioeconômicas humanas mais relevantes, focada na geração de alimentos, fibras e bioenergia. A transição para a bioeconomia, também referida como economia circular, ocorreu quando a agropecuária começou a fornecer matéria-prima, na forma de resíduos agrícolas, para a produção de novos bioinsumos e bioprodutos. Essa abordagem tem gerado benefícios socioeconômicos e ambientais para a sociedade. Tal progresso foi viabilizado pelo avanço tecnológico e científico, que permitiu a incorporação e o uso desses resíduos em novos processos industriais, conforme apontado por Junior, (2020).

2.2 Resíduos agroindustriais

Os resíduos agroindustriais são aqueles gerados durante o processamento industrial de produtos pecuários e agrícolas. Esses resíduos são gerados após a retirada dos produtos de valor, resultando em subprodutos indesejáveis (Naik et al., 2023). Anualmente, a indústria agroalimentar pode gerar o equivalente a cerca de 190 milhões de toneladas de subprodutos. Porém, o resíduo gerado por esses produtos é visto apenas como um poluente (Hadidi et al., 2024). A Figura 3 apresenta as principais fontes de resíduos agroindustriais.

Figura 3 – Principais fontes de resíduos e subprodutos agroindustriais.



Fonte: Hadidi et al. (2024)

A priorização de uma economia circular impulsiona o desenvolvimento de compósitos fabricados com matrizes poliméricas renováveis e que incorporam resíduos agroindustriais (Andrade et al., 2025). Tais resíduos, provenientes de atividades como a extração madeireira e o agroextrativismo, representam um desafio ambiental, mas também uma oportunidade para avançar em práticas sustentáveis (Leite-Barbosa et al., 2024).

Com atributos favoráveis, como a não toxicidade, baixa densidade, características mecânicas promissoras, biodegradabilidade e baixo custo, a produção de novos materiais compósitos a partir desses subprodutos torna-se favorável para aplicação em diversos setores como automotivo, eletrônico, agricultura, manufatura ativa, medicina, embalagens e da construção civil (Andrade et al., 2025). Devido a esse potencial, a reutilização desses resíduos agrícolas é considerada uma das prioridades na economia verde (Morales et al., 2021).

No Brasil, com destaque para a região amazônica, existe uma grande biodiversidade de recursos naturais, responsável por inúmeras atividades econômicas, principalmente pelo agroextrativismo, que gera uma grande quantidade de resíduos agro. Dentre os resíduos amazônicos observados, destacam-se os das atividades de colheita e produção do açaí, castanhas-do-Pará e os provenientes da extração de madeiras (Hidayat et al., 2022).

Essa vasta gama de resíduos gerados por esses setores agrícolas e agroindustriais oferece recursos abundantes para a formulação desses compósitos. Pesquisas recentes destacam a utilização de resíduos agroindustriais na tentativa de promover a economia circular e aplicar a ODS 12. Por exemplo, diversos resíduos vegetais têm sido empregados em compósitos, como

casca de amendoim, casca de soja e palha de milho (Andrade et al., 2025), fibras curtas de bagaço de cana-de-açúcar (Lazarini; Marconcini, 2021), pó da casca de café (Ortiz-Barajas *et al.*, 2020), palha de trigo e resíduo de cevada (Hameed; Ali, 2021), casca de noz, casca de avelã (Barczewski; Sałasińska; Szulc, 2019), resíduos de *Jatropha curcas* L. (pinhão-mansão) (Müller et al., 2019), pó de casca de amendoim (Nasution et al., 2020; Pączkowski; Puszka; Gawdzik, 2021), cascas trituradas de sementes de girassol (Stănescu; Bolcu, 2022) e resíduos de malte e/ou acerola (Abreu et al., 2021). Esses estudos demonstram viabilidade técnica, porém a maioria utiliza frações volumétricas baixas.

No panorama da região amazônica, serragem, aparas de madeira, cascas de castanha-do-Pará e sementes de açaí têm sido amplamente investigadas como reforços em compósitos poliméricos, podendo ou não resultar em melhorias de resistência mecânica, estabilidade térmica e biodegradabilidade, embora os compósitos poliméricos sejam majoritariamente produzidos com resinas sintéticas, alternativas têm sido buscadas para reduzir o uso dessas resinas, substituindo-as parcialmente por matrizes de origem mais natural, como o poliuretano obtido do óleo de mamona, conforme proposto por Ellenberger et al. (2023).

Assim, ao reconhecer o potencial dos resíduos agroindustriais para a geração de novos materiais e para a reinserção desses subprodutos na cadeia econômica produtiva, torna-se natural direcionar a atenção para biomassas regionais de elevada disponibilidade. Entre elas, destaca-se o açaí, uma palmeira amplamente distribuída na região amazônica e que possui expressiva geração de resíduos com potencial para utilização em compósitos, especialmente por sua elevada proporção de componentes lignocelulósicos.

2.3 Açaí

A *Euterpe oleracea* Mart. é uma espécie de palmeira encontrada na região amazônica, conhecida como açaizeiro, que comumente cresce em áreas alagadas. É um palmito comestível (Barros et al., 2021) e produz um fruto roxo escuro chamado açaí. O fruto possui um alto valor energético e é rico em fitoquímicos com propriedades antiproliferativas, anti-inflamatórias e antioxidantes (Martins et al., 2021). As plantas na fase adulta têm o caule (estipe) de 3 a 20 m de altura, e com um diâmetro que pode variar de 7 a 18 cm (Nascimento, 2008). A Figura 4 apresenta a palmeira do açaí.

Figura 4 – Palmeira do açaí.

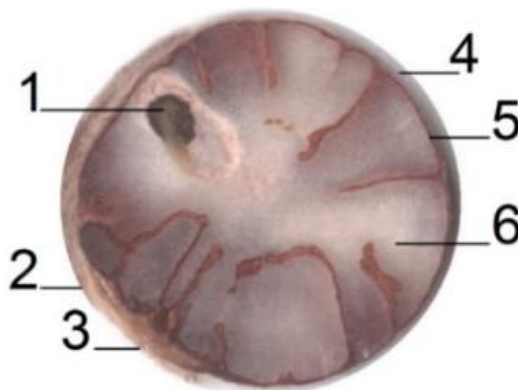


Fonte: Prudente (2024).

Os frutos do açaizeiro possuem forma de drupas ou globos, que podem ter coloração verde ou violeta quando maduros (Monteiro et al., 2024). Entretanto, a coloração deles quando maduros pode variar de acordo com a espécie. Essas cores variam de tons de verde a amarelo-creme, no popularmente conhecido como açaí "branco" (Martins et al., 2021).

Os caroços possuem um diâmetro que varia de 1,0 a 1,5 cm e um peso aproximado de 1,5 g (Monteiro et al., 2024). A estrutura do fruto apresenta uma fina casca (epicarpo), uma polpa carnuda (pericarpo) e uma única semente coberta por uma fina camada lignocelulósica (endocarpo) (Martins et al., 2021). A casca e a polpa do açaí representam apenas 10% do peso do fruto, sendo os 90% restantes compostos pelas sementes e pelas fibras que as envolvem (Barros et al., 2021). A Figura 5 apresenta a anatomia dos caroços de açaí.

Figura 5 – Anatomia do caroço de açaí, corte transversal: (1) Embrião; (2) Endocarpo; (3) cicatriz; (4) polpa; (5) Pericarpo + Tegumento; (6) Mesocarpo.

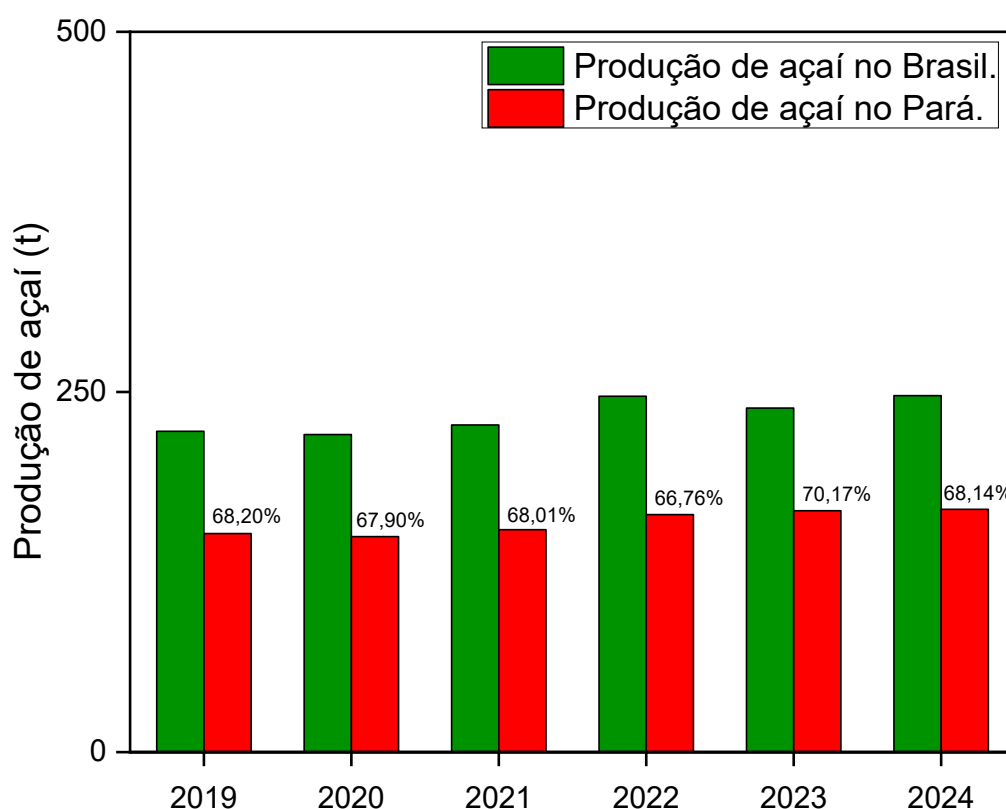


Fonte: Guerreiro et al. (2022).

O açaí, também referido como material lignocelulósico, é uma fonte renovável, biodegradável e de baixo custo, com aplicações multifuncionais e ambientalmente amigáveis (Gonçalves et al., 2023). Estudos têm caracterizado esses resíduos para diversas aplicações na tentativa de inserir esses resíduos na construção civil e em compósitos (Barbosa et al., 2022a; Monteiro et al., 2024). A semente de açaí é composta principalmente por celulose (32–45%), hemicelulose (19–25%) e lignina (14–26%), embora essas proporções possam variar regionalmente (Monteiro et al., 2024). Dada a natureza hidrofílica desses materiais lignocelulósicos, tratamentos são frequentemente necessários para controlar sua alta absorção de água (Monteiro et al., 2024). Embora tratamentos químicos possam eliminar componentes, como OH, que podem ser facilitadores da ligação química com grupos uretânicos dos poliuretanos de mamona.

Segundo o IBGE, em 2024, o Brasil produziu 247.461 toneladas do fruto açaí, sendo que pelo menos desde o ano de 2019 o estado do Pará produz anualmente cerca de 65% desse valor. A Figura 6 ilustra o gráfico da produtividade de açaí ao longo dos últimos seis anos.

Figura 6 – Produção do fruto de açaí por estado.



Fonte: IBGE (2025).

No estado do Pará podem-se encontrar as maiores reservas naturais de açaí. A colheita do fruto ajuda na subsistência de famílias locais (Gonçalves et al., 2023). Apesar desse enorme potencial econômico e de produção, surge uma problemática ambiental, 90% da massa total do fruto de açaí é considerado subproduto dessa cadeia de produção (Monteiro et al., 2024). Utilizando como panorama o ano de 2024, onde a produção foi de 168.527 toneladas do fruto, levando em consideração que 90% do fruto vira resíduo, pode-se considerar que no ano de 2024 foram geradas cerca de 151.674,3 toneladas de resíduo de açaí. A Figura 7 ilustra os resíduos depositados ao longo da cidade após o processo de extração da polpa.

Figura 7 – Resíduos de açaí.



Fonte: Autoria própria, 2026

De toda a produção gerada por essa cadeia produtiva, apenas uma pequena parte dos resíduos é reinserida no processo de fabricação de novas matérias-primas (Melo et al., 2021). Dentre os principais campos de aplicação que envolvem a reutilização dos caroços de açaí estão a geração de energia, no qual o açaí é utilizado para alimentar as caldeiras, e no agronegócio, na utilização como fertilizantes (Santos et al., 2020). Devido à baixa demanda por reutilização dessas sementes, uma grande quantidade é queimada, gerando gases que contribuem para o efeito estufa, ou são descartadas de forma displicente, o que acaba poluindo os lençóis freáticos e os solos, além de propagar doenças e pragas nos centros urbanos. (Barros et al., 2021).

Nos últimos anos, o açaí vem sendo estudado, de forma que se encontre a utilização e aplicações nos diversos setores de aplicação, principalmente como reforço em materiais compósitos, visando a valorização desse subproduto e a promoção de uma economia circular.

Oliveira et al. (2022) produziram espumas de poliuretano à base de poliol de mamona com 5 a 20% de resíduo de açaí. A composição com 5% apresentou aumento da resistência à compressão e do módulo de elasticidade, enquanto teores a partir de 10% reduziram o desempenho compressivo. A resistência ao impacto aumentou com a incorporação do reforço, atingindo 0,56 kJ/m² com 20% de resíduo. Também foram observadas redução do tamanho dos poros e melhoria do desempenho térmico, principalmente em concentrações de até 10%, indicando potencial para aplicações de isolamento na construção civil.

Araújo et al. (2023) avaliaram biocompósitos de borracha natural reforçados com resíduo de açaí tratado e não tratado. A unidade phr representa a quantidade de resíduo para cada 100 partes de borracha. A resistência à tração aumentou de aproximadamente 5 para 8,6 MPa com a adição de 50 phr, permanecendo em cerca de 6,2 MPa após envelhecimento a 70 °C. O alongamento na ruptura atingiu 1117%, a dureza aumentou de 55 para 56 Shore A e o desgaste por abrasão chegou a aproximadamente 400 mm³·40 m⁻¹.

Em outro estudo, Barbosa et al. (2022a) produziram painéis poliméricos com partículas de semente de açaí, obtendo densidades superiores a 0,8 g/cm³. A expansão em espessura atingiu cerca de 8% após 2 h e 17% após 24 h, enquanto a absorção de água variou de aproximadamente 29,67%, para partículas maiores, a 56,65%, para partículas menores. Embora a maioria dos painéis tenha atendido aos requisitos de ligação interna, nenhum alcançou os valores mínimos de resistência à extração de parafusos, de 800 N no topo e 1020 N na superfície. Ainda assim, os autores indicaram o potencial desses painéis para aplicações internas não estruturais, como divisórias e forros.

Apesar dos avanços apresentados nesses estudos, observa-se que a maioria das investigações se restringe a baixos teores de inserção do resíduo de açaí na matriz polimérica ou a aplicações muito específicas, além de frequentemente utilizarem as fibras, deixando as sementes sem finalidade definida. Portanto, este trabalho parte da necessidade de aprofundar o estudo de compósitos com teores médios/elevados, entre 40 e 60% em volume, de sementes de açaí, caracterizadas por sua estrutura lignocelulósica e baixa absorção de água, incorporadas em uma matriz de poliuretano à base de óleo de mamona (PUOM). Essa abordagem visa não apenas ao aproveitamento mais significativo desse resíduo abundante, mas também ao desenvolvimento de materiais sustentáveis com potencial de aplicação ampliado e adequado desempenho mecânico e físico-químico, contribuindo para a valorização de resíduos e para uma cadeia produtiva mais sustentável na região amazônica.

2.4 Matriz polimérica

Os polímeros podem ser classificados quanto ao tipo de fonte de origem, natural ou sintética. Essa distinção é relevante não apenas quanto à obtenção da matéria-prima, mas também pelas implicações ambientais do ciclo de vida dos materiais, já que polímeros derivados de fontes renováveis e biodegradáveis apresentam benefícios ambientais significativos em comparação com os sintéticos convencionais (Sette et al., 2024). Além disso, a escolha do tipo de polímero impacta diretamente a sustentabilidade das aplicações industriais e o desenvolvimento de novos materiais alinhados às demandas ambientais atuais.

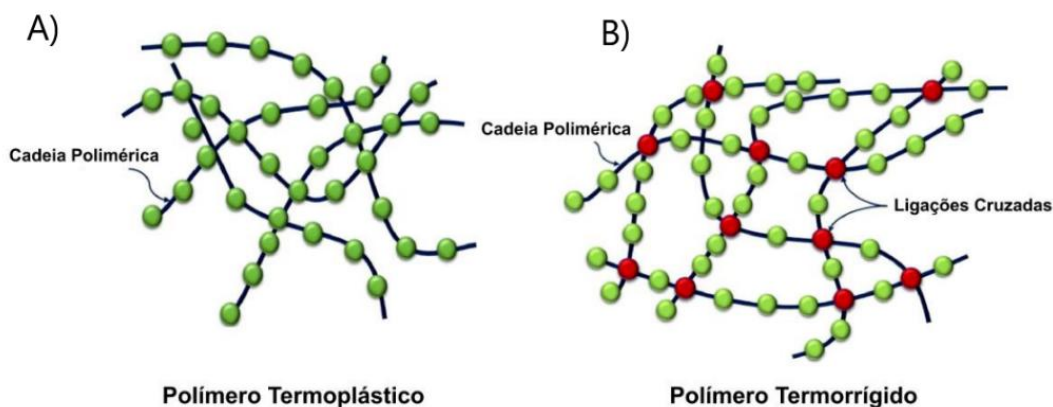
Os polímeros naturais são obtidos a partir de animais ou plantas, como o poliuretano obtido do óleo de mamona, enquanto os sintéticos são produzidos por reações de polimerização a partir de pré-polímeros e outros vários componentes quimicamente ativados (Gieroba et al., 2023; Ramakrishnan et al., 2022). Os polímeros são formados pela união de pequenas moléculas unitárias chamadas monômeros, que se unem por ligações covalentes. No processo de polimerização, essas ligações podem resultar em diferentes arranjos de cadeias poliméricas, lineares ou ramificadas (Haque et al., 2021). Além disso, os polímeros podem ser classificados quanto ao comportamento térmico em termoplásticos e termofixos, classificação relevante para aplicações em materiais compósitos (Hsissou et al., 2021).

Quando utilizados como matrizes em materiais compósitos, os materiais poliméricos são atrativos devido às suas boas características, como baixa temperatura de processamento, baixo custo e alta resistência à ruptura. No entanto, o uso do polímero como componente único muitas vezes não atende às melhores condições de aplicação (Wang et al., 2020). A forma, características e composição dos componentes de reforço adicionados ao polímero contribuem positivamente para o desempenho mecânico geral do material compósito (Tang et al., 2023). Nesse contexto, os dois tipos de polímeros comumente utilizados como matriz são os termofixos e os termoplásticos (Karthik et al., 2020).

Os polímeros termoplásticos não possuem ligações cruzadas em sua cadeia polimérica e, por isso, podem ser fundidos e remodelados repetidamente após o aquecimento, podendo, consequentemente, ser reciclados ao fim do seu uso primário (Sultana et al., 2023). Apesar dessas vantagens, os termoplásticos apresentam limitações em aplicações que exigem maior rigidez e estabilidade dimensional em serviço, características mais bem atendidas pelos polímeros termofixos (Hsissou et al., 2021).

Os polímeros termofixos, devido à presença das ligações cruzadas, que impedem o deslizamento das cadeias moleculares quando aquecidas (Kazemi; Faisal Kabir; Fini, 2021), tornam os termofixos materiais não recicláveis após sua cura (Babu et al., 2022). Uma vez curados, formam uma estrutura reticulada que lhes confere maior estabilidade térmica e rigidez, sendo cruciais para aplicações industriais. (Hsissou et al., 2021). De forma geral, os termofixos são mais rígidos que os termoplásticos e oferecem melhor resistência à fluência (Hsissou et al., 2021). Os polímeros termofixos são capazes de garantir ao compósito boa estabilidade dimensional, alta rigidez e baixa deformação sob cargas leves, quando comparados aos metais, além de apresentarem boas propriedades de isolamento elétrico e térmico (Karthik et al., 2020). A Figura 8 ilustra a estrutura molecular dos polímeros termofixos e termoplásticos.

Figura 8 – Estrutura molecular de polímeros termoplásticos (a) e termorrígido (b).



Fonte: Kazemi; Faisal Kabir; Fini (2021).

2.4.1 Resinas termofixas poliméricas

As resinas poliméricas são materiais viscosos que, ao finalizarem seu processo de cura por reação exotérmica, endurecem, formando um polímero sólido com peso molecular médio maior do que o inicial (Ramakrishnan et al., 2022). Embora existam resinas de origem natural, o uso de resinas sintéticas tornou-se predominante nas aplicações de engenharia (Ramakrishnan et al., 2022). Dentre os polímeros termofixos, as resinas poliméricas são as mais utilizadas como matriz em compósitos devido à sua versatilidade, facilidade de processamento e boas propriedades mecânicas. A seguir, são apresentadas as principais resinas termofixas e suas características na Tabela 1.

Tabela 1 – Resinas poliméricas, características e limitações.

Resina	Características	Limitações
Éster vinílico	Possuem boa dureza e resistência química, além de alta qualidade nos compósitos finais.	São inflamáveis e sofrem contrações no processo de cura.
Fenólica	Possuem boas propriedades térmicas, boa resistência ao fogo e boas propriedades elétricas.	Coloração escura (marrom/preta), limitando aplicações estéticas.
Poliéster	Possuem boas propriedades elétricas e resistência química, excelentes propriedades em compósitos. Seu processo de cura ocorre em temperatura ambiente, facilmente manuseável.	Contraem durante a cura, emitem estireno e são inflamáveis.
Silicone	Possuem propriedades elétricas, resistência à hidrólise e oxidação, além de resistência ao fogo. São resinas não tóxicas.	Cura em altas temperaturas, com longos tempos de cura e baixa adesão a alguns substratos.
Poliéster insaturado	Possuem boa resistência à fadiga e propriedades mecânicas adequadas.	Emitem estireno durante a cura.
Poliuretano	Possuem boas características em compósitos, resistência química, resistência ao impacto e à abrasão.	Coloração pode ser limitada; uso de isocianatos (tóxicos) no processo de cura.

Fonte: adaptado de Nascimento (2025).

Dentre as resinas apresentadas, o poliuretano se destaca pela sua versatilidade, resistência ao impacto e possibilidade de obtenção a partir de fontes renováveis, características que justificam sua escolha como matriz no presente trabalho, conforme detalhado na seção seguinte.

2.5 Poliuretano (PU)

Dentre as resinas termofixas apresentadas na Tabela 1, o poliuretano (PU) merece destaque devido à sua versatilidade e ampla gama de aplicações. O poliuretano surgiu em 1937, sendo desenvolvido pelo Dr. Otto Bayer e sua equipe a partir da reação de um poliéster diol com um diisocianato (Pęczek; Pamuła; Białowiec, 2024). Sua popularização ocorreu com o advento da Segunda Guerra Mundial, quando eram utilizados em roupas de isolamento

A razão entre grupos isocianato (NCO) e grupos hidroxila (OH), conhecida como razão NCO/OH ou índice de isocianato, é um parâmetro fundamental que determina o grau de reticulação e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas do PU. Pesquisas demonstram que ajustes precisos na razão NCO/OH impactam diretamente a formação de redes de poliuretano mais homogêneas e influenciam características como flexibilidade, dureza superficial, transparência e resistência a solventes, sobretudo quando a razão se encontra entre 0,75 e 1,0 (Funatsu et al., 2026). Além disso, o tipo e a funcionalidade dos polióis usados para fornecer grupos hidroxila também afetam a densidade de reticulação e, por consequência, a resistência química e mecânica dos sistemas poliuretânicos (Zhang; Ni; Xu, 2025).

O PU pode ser classificado, dependendo de sua estrutura química, em termoplástico (TPU), termofixo ou elastomérico, cada um com propriedades e aplicações distintas (Ellenberger et al., 2023). Para o desenvolvimento de compósitos, o poliuretano é frequentemente empregado em sua forma termofixa ou elastomérica, devido à sua capacidade de formar redes reticuladas que conferem propriedades mecânicas e estabilidade dimensional adequadas para diversas aplicações. Esse material é altamente multifuncional devido ao uso de produtos químicos como catalisadores, surfactantes e extensores de cadeia, o que o torna amplamente difundido na produção em campos da construção civil, médica, elétrica e automotiva (Ellenberger et al., 2023). O PU atualmente é bastante utilizado como revestimento ou adesivo, pois possui flexibilidade, cura rápida e resistência a produtos químicos, características que o tornam ideal para essas aplicações (Ramakrishnan et al., 2022).

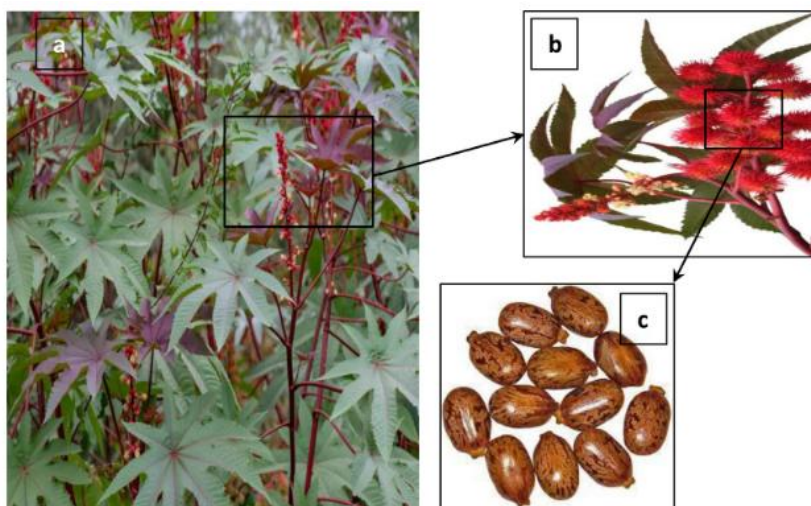
2.5.1 Poliuretano baseado em óleo de mamona (PUOM)

De forma tradicional, os polióis comerciais são predominantemente derivados do petróleo. Entretanto, o uso de óleos vegetais tem sido bastante difundido no mercado. Devido ao custo-benefício e por não agredirem o meio ambiente, quando comparados aos derivados do petróleo, esses polióis são atrativos para a produção de PUs naturais (Gharib; Pang; Holland, 2020). Nesse contexto, a busca por alternativas mais sustentáveis é impulsionada pela necessidade de reduzir a dependência de matérias-primas fósseis e mitigar a toxicidade associada a alguns isocianatos tradicionais, sendo o uso de polióis de base vegetal a alternativa mais viável para a produção de PUs (Zanini et al., 2022). Esses materiais podem apresentar baixa toxicidade, biodegradabilidade e alta pureza (Ellenberger et al., 2023), tornando-se

suscetíveis à degradação quando corretamente modificados (Brzeska; Piotrowska-Kirschling, 2021).

Dentre os polióis vegetais disponíveis, o óleo de mamona ou óleo de rícino destaca-se como um dos mais utilizados para a síntese de PU. O óleo de rícino é obtido a partir das sementes da *Ricinus communis* L., pertencente à família Euphorbiaceae, é cultivado em regiões subtropicais e tropicais (Nedjimi, 2022). A espécie pode atingir de 5 a 12 metros de altura. As folhas possuem comprimento de 15 a 45 cm (Landoni et al., 2023). Os frutos são encapsulados, com características lisas ou espinhosas, de 1,5 a 2,5 cm de comprimento e de cor amarronzada. As sementes são elipsoides, de 9 a 17 mm de comprimento (Landoni et al., 2023). A Figura 10 ilustra as características da mamona.

Figura 10 – Planta de mamona: (a) planta inteira, (b) inflorescência, (c) sementes.

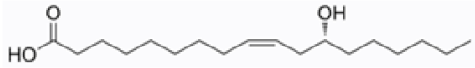
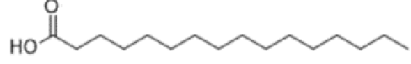
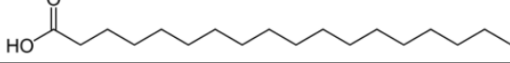


Fonte: Landoni et al. (2023).

O óleo extraído das sementes possui diversas propriedades farmacológicas e medicinais, sendo anticancerígeno, antioxidante, anti-hepatite, antimicrobiano, antiviral e antifúngico (Nedjimi, 2022). Do ponto de vista químico, seu destaque deve-se ao alto teor de ácido ricinoleico, um ácido graxo hidroxilado presente em pelo menos 90% de sua composição. Essa característica transforma o óleo de mamona em um poliol poliéster trifuncional natural com enorme potencial de uso (Faria et al., 2020c), sendo que nenhum outro óleo vegetal comercial apresenta disponibilidade de ácido graxo tão elevada (Landoni et al., 2023). Além do ácido ricinoleico, o óleo de mamona apresenta em sua composição, em menores quantidades, os

ácidos linoleico, oleico, palmítico e esteárico (Landoni et al., 2023), conforme indicado na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição principal ácido graxo do óleo de rícino.

Ácido Graxo	Quantidade (%)	Estrutura Química
Ricinoleico (C18:1-OH)	88–92	
Linoleico (C18:2)	4,2–4,8	
Oleico (C18:1)	2,3–3,4	
Palmítico (C16:0)	0,8–1,1	
Esteárico (C18:0)	0,6–1,1	

Fonte: Landoni et al. (2023).

Essa composição singular, aliada à condição de poliol natural (Cruz et al., 2022), torna o óleo de mamona um insumo de grande interesse para a síntese de poliuretanos com base biológica. O poliuretano à base de óleo de mamona (PUOM) foi desenvolvido inicialmente para reduzir os impactos gerados pelos PUs tradicionais e, desde então, vem sendo empregado em estudos voltados à produção de materiais ecologicamente corretos (Gava et al., 2015). Na medicina, por exemplo, foram desenvolvidos enxertos ósseos com esse material, cujas características não são agressivas para humanos nem para o meio ambiente. Mesmo possuindo uma parte essencialmente sintética, quando comparado a outras resinas, o impacto ambiental causado pode ser considerado inferior.

Do ponto de vista estrutural, a combinação química entre a matriz de PUOM e reforços lignocelulósicos ocorre em razão da forte interação entre os grupos OH e NCO presentes nesses materiais, o que promove uma boa adesão química entre o reforço e a matriz (Faria et al., 2020c). Essa compatibilidade torna o PUOM especialmente adequado como matriz polimérica na produção de compósitos reforçados com fibras naturais, pois ambos são obtidos de fontes renováveis, configurando uma combinação promissora para a produção de compósitos sustentáveis (Ellenberger et al., 2023; Neves et al., 2022). No entanto, variáveis como adição de cargas, forma, condições e métodos de processamento podem afetar diretamente as propriedades do material final (Zanini et al., 2022), e o desempenho mecânico e as qualidades

de proteção dos materiais PU à base de óleo de mamona ainda apresentam limitações que necessitam ser superadas (Konovalov; Saprykina; Zuev, 2023a).

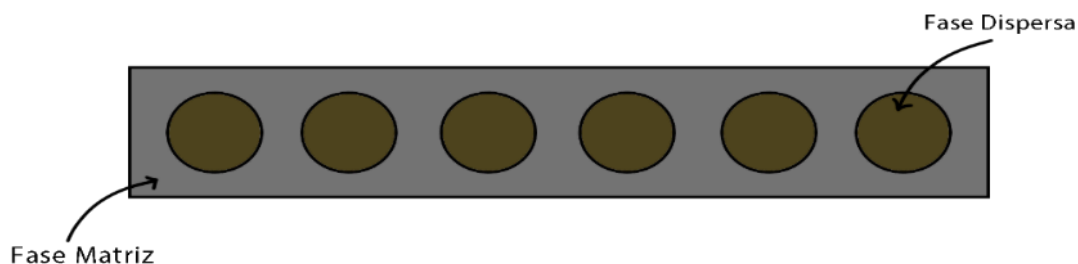
Para superar essas limitações e otimizar as propriedades, diversos estudos têm explorado a incorporação de cargas naturais em PUOM, demonstrando a capacidade de ajustar suas características para diferentes aplicações. Por exemplo, na avaliação de compósitos com cargas particuladas, Júnior *et al.*, (2023a) investigaram o PUOM com rejeitos da indústria madeireira (serragem de eucalipto) e cerâmica vermelha (chamote). Os resultados indicaram que o aumento da fração volumétrica de chamote influencia o módulo de elasticidade e o módulo de ruptura, com valores de tração entre 1,910 e 3,449 MPa e resistência ao impacto Izod de 47,61 a 115,44 J/m. A análise por MEV também revelou que as partículas contribuem para a redução da porosidade. Complementarmente, Hellmeister *et al.*, (2021) utilizaram resíduos de madeira de balsa para desenvolver painéis *Oriented Strand Board* (OSB) com resina de PUOM, classificando o material como OSB tipo 1, adequado para ambientes internos.

Esses estudos evidenciam a versatilidade do PUOM e a capacidade de ajustar suas propriedades mecânicas e funcionais por meio da incorporação de diferentes tipos de reforços naturais, tornando-o uma matriz promissora para o desenvolvimento de compósitos sustentáveis com aplicações que variam de baixa a média exigência estrutural. Nesse contexto, a utilização de resíduos de açaí como carga em compósitos de PUOM representa uma estratégia alinhada a essa busca por materiais inovadores e ecologicamente responsáveis.

2.6 Materiais compósitos.

Os materiais compósitos são obtidos a partir da combinação de dois ou mais materiais com propriedades mecânicas e físicas distintas. Essa combinação resulta em um novo material com propriedades otimizadas para aplicações específicas, podendo apresentar maior resistência mecânica, menor densidade, melhor relação custo-benefício ou características ajustadas conforme o projeto (Karem; Salih, 2022; Kumar; Manna; Dang, 2022). De forma geral, os compósitos são formados por uma fase contínua, denominada matriz, e uma ou mais fases descontínuas, chamadas de dispersas, que podem atuar como reforço ou carga (Hsissou *et al.*, 2021). Alguns exemplos de materiais que se enquadram nessa definição são madeiras compensadas, concreto armado e polímeros reforçados com fibras, como a aramida (Khalid *et al.*, 2021). A Figura 11 ilustra o material compósito e suas fases.

Figura 11 – Ilustração das fases constituintes de um material compósito.



Fonte: Autoria própria, 2026.

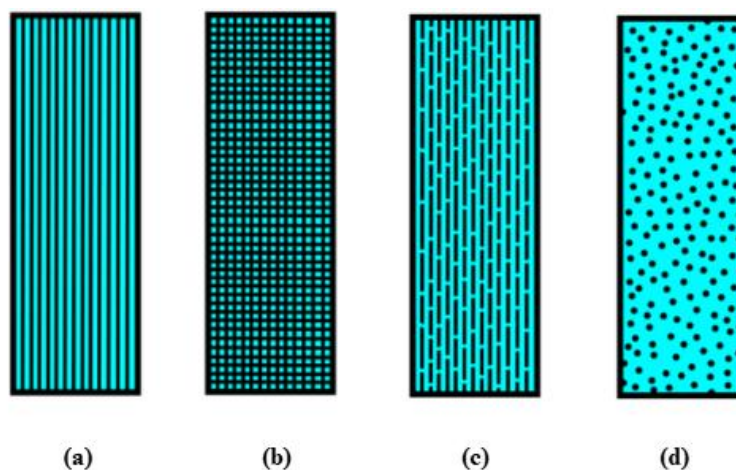
O mercado global de materiais compósitos tem apresentado crescimento expressivo nas últimas décadas, impulsionado pela demanda por materiais mais leves, resistentes e versáteis em setores industriais estratégicos. Nesse contexto, destaca-se a incorporação de fibras naturais e resíduos industriais como alternativas promissoras para reforço de compósitos, promovendo soluções mais sustentáveis, eficientes e alinhadas com exigências regulatórias e ambientais atuais (Felippe et al., 2025; Neto, 2023).

A matriz do material compósito é responsável por englobar a fase dispersa, fornecer proteção mecânica, transmitir as tensões e conferir estabilidade e orientação aos reforços (Hsissou et al., 2021). Com base no tipo de matriz utilizada, os compósitos podem ser classificados em três categorias principais: compósitos de matriz polimérica (CMP), compósitos de matriz cerâmica (CMC) e compósitos de matriz metálica (CMM) (Gedam et al., 2023; Kalizhanova et al., 2023).

A fase dispersa pode ser constituída por diferentes tipos de elementos, cada um com funções específicas. Quando formada por fibras de alto desempenho, geralmente apresenta resistência mecânica superior à da matriz, conferindo rigidez ao sistema e atuando na resistência a cargas mecânicas e na obstrução da propagação de trincas (Müzel et al., 2020). No caso de cargas contendo partículas, a função principal é modificar propriedades como rigidez, densidade e custo, podendo ou não aumentar a resistência mecânica do sistema. Os compósitos podem ser classificados de acordo com o tipo de fase dispersa utilizada (Murthy et al., 2023). As fibras podem ser do tipo contínuo, que são fibras longas que preenchem todo o comprimento da matriz, podendo ainda ser unidirecionais ou bidirecionais (Niendorf; Raeymaekers, 2021). No preenchimento descontínuo, encontram-se fibras curtas alinhadas ou dispersas na matriz, assim como cargas particuladas em forma de pó ou partículas esféricas (Niendorf; Raeymaekers, 2021). A forma, as características e a composição da fase dispersa são aspectos

cruciais que determinam as propriedades finais do compósito produzido (Koodalingam; Senthilkumar; Rajesh Babu, 2020). A Figura 12 ilustra alguns tipos de reforço.

Figura 12 – Ilustração das formas de reforço: (a) reforço contínuo unidirecional; (b) reforço contínuo bidirecional; (c) reforço descontínuo alinhado; (d) reforço descontínuo disperso.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Atualmente, os compósitos ganharam destaque em relação aos materiais convencionais, pois, em sua maioria, apresentam características como alta resistência à tração, flexão e impacto, além de alta rigidez, resistência à fadiga e baixa corrosão (Khan et al., 2024; Koodalingam; Senthilkumar; Rajesh Babu, 2020). Devido a essas propriedades, os compósitos são amplamente utilizados na indústria aeroespacial, automotiva (carrocerias de veículos), construção civil (pontes, estruturas) e naval (navios, embarcações), onde o baixo peso e a alta resistência mecânica são propriedades requeridas (Cavalcanti et al., 2021; Nagabushanam et al., 2023).

Outro fator que torna os compósitos atrativos é a liberdade de ajustar suas características e propriedades de acordo com a necessidade do projeto (Khan et al., 2024). Quando comparados aos metais, os CMPs permitem a fabricação de peças com formas complexas e menor densidade. Reduzir o peso resulta em economia no consumo de combustíveis em aviões e automóveis (Thamizh Selvan et al., 2021). Embora aplicações aeroespaciais utilizem compósitos de alto desempenho, compósitos com cargas naturais têm ganhado espaço em aplicações de menor exigência estrutural, como painéis de revestimento, mobiliário e construção civil, onde o custo e a sustentabilidade são fatores determinantes.

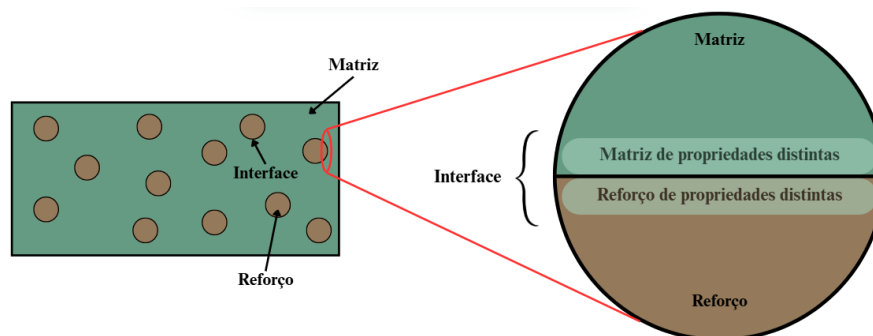
A adesão na interface entre a matriz e a fase dispersa, além das características inerentes das resinas, é crucial para as propriedades mecânicas dos compósitos (Bai et al., 2022). Esta interface, apesar de pequena, desempenha um papel significativo, determinado por mecanismos de ligações interfaciais, como interdifusão, reações químicas, atração eletrostática e adesão mecânica (Lee; Khalina; Lee, 2021). As propriedades mecânicas dos materiais compósitos, incluindo tração, compressão, cisalhamento, fadiga, impacto e flexão, estão relacionadas à qualidade da adesão entre a fase dispersa e a matriz (Singh et al., 2020). Uma adesão inadequada entre os componentes pode resultar na dispersão ineficiente das cargas aplicadas, tornando o material mais suscetível à fragilidade (Cavalcanti et al., 2021; Singh et al., 2020). Assim, a escolha adequada dos materiais constituintes do compósito é fundamental para assegurar boas propriedades mecânicas no produto final (Cavalcanti et al., 2021).

O mecanismo de fratura nos compósitos opera pelos seguintes princípios: à medida que a tensão aumenta na estrutura do material, a propagação da trinca ocorre com microfissuras transversais que se propagam lentamente em direção ao reforço (Dolbachian; Harizi; Aboura, 2023). Ao atingir a superfície do reforço, a fissura segue o caminho de menor resistência, localizado na região da interface entre reforço e matriz, resultando em um descolamento interfacial. O avanço deste mecanismo leva à ruptura do material (Dolbachian; Harizi; Aboura, 2023).

Em compósitos contendo partículas, o mecanismo de fratura difere, pois elas atuam como concentradores de tensão e a propagação da trinca ocorrendo preferencialmente ao seu redor ou através da matriz. A morfologia, o tamanho e a dispersão das partículas também exercem um papel relevante nesse contexto, pois estudos mostram que partículas de menor tamanho e distribuição homogênea contribuem para uma maior adesão interfacial e, conseqüentemente, melhoram as propriedades mecânicas dos compósitos devido ao aumento da área de contato e à redução de concentrações de tensões críticas (Kang et al., 2020; Li et al., 2018). A Figura 13 ilustra o esquema da região interfacial.

Nos últimos anos, tem havido um crescente interesse no desenvolvimento de compósitos sustentáveis, que utilizam matrizes de fontes renováveis e cargas provenientes de resíduos agroindustriais. Esses materiais visam reduzir o impacto ambiental, valorizar resíduos e promover a economia circular, mantendo propriedades adequadas para aplicações específicas (Felippe et al., 2025; Matheus et al., 2021).

Figura 13 – Ilustração esquemática da região interfacial do compósito redesenhado.

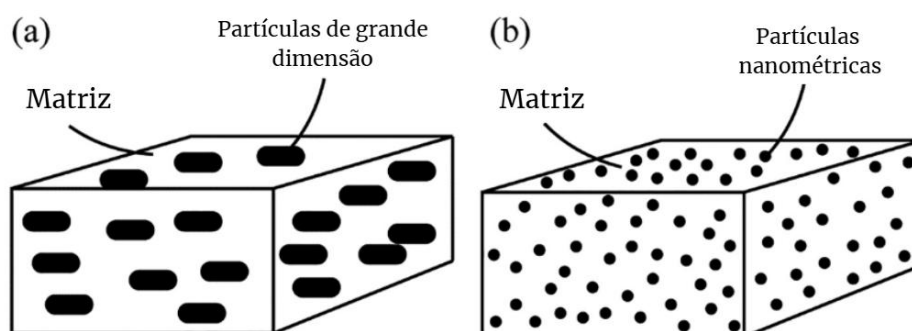


Fonte: Adaptado de Huang et al. (2021).

2.6.1 Compósitos contendo partículas

Nos compósitos reforçados com partículas, podem ser utilizadas partículas curtas como reforço, e tendo como base o tamanho médio desses reforços, este tipo de compósito pode ser classificado como compósito reforçado com partículas grandes ou compósito reforçado por nanopartículas, conforme pode ser observado na imagem 14.

Figura 14 – Tamanhos bases dos reforços com partículas.

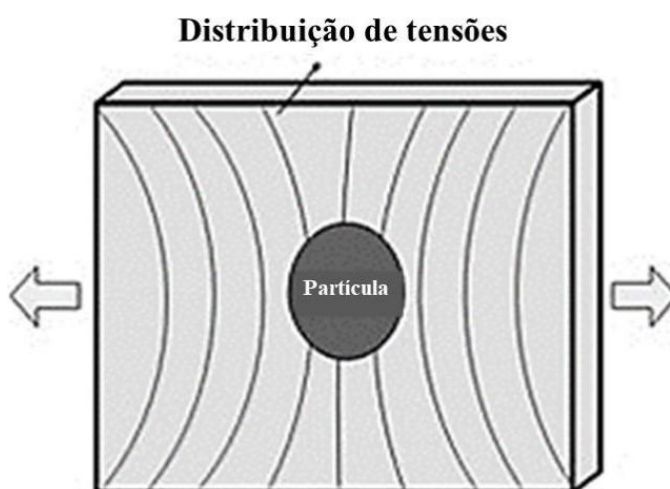


Fonte: Egbo (2021).

Nos compósitos de partículas grandes, que possuem tamanhos milimétricos ou superiores, as partículas são as principais responsáveis por suportar a carga e tendem a restringir a deformação da matriz em suas interfaces. O uso de cargas particuladas tem aumentado devido à sua facilidade de processamento, ampla disponibilidade e à vasta gama de combinações possíveis com diferentes matrizes. Quando um compósito é submetido a um carregamento

mecânico, a tensão é transferida da matriz, que é a parte menos rígida, para a carga, que possui maior rigidez. Dessa forma, a carga é responsável por suportar a maior parte do esforço aplicado (Balieiro, 2023). Essa restrição é o mecanismo fundamental de reforço (Egbo, 2021). A Figura 15 apresenta a ilustração da deformação da matriz ao redor de uma partícula em um compósito sujeito a uma carga de tração.

Figura 15 – Deformação da matriz ao redor da partícula.



Fonte: Balieiro (2023).

A incorporação de partículas em materiais compósitos é uma estratégia relevante, especialmente no contexto da sustentabilidade e da valorização de resíduos. Características como granulometria, morfologia e composição das partículas influenciam diretamente as propriedades físicas e mecânicas resultantes, otimizando o desempenho estrutural e a sustentabilidade dos compósitos (Barbosa et al., 2022b; Rocha; Miranda; Parchen, 2019).

Compósitos contendo partículas são caracterizados por partículas quase sempre equiaxiais, dispersas em uma matriz polimérica, cerâmica ou metálica. Essas partículas podem ter formas irregulares ou regulares, como cúbicas, esféricas e tetragonais. Elas são materiais sólidos, insolúveis na matriz, e sua função é conferir novas funcionalidades ao material, como o aumento da resistência. As partículas de reforço são geralmente mais resistentes que a matriz, aderem-se fortemente a ela e melhoram as propriedades mecânicas do compósito. A tendência é que a eficiência na formação desses compósitos seja maior quanto menor o tamanho das partículas de reforço (Wijesinghe et al., 2019).

Logo, a adequação da granulometria de partículas residuais, como as de madeira, mármore e granito, pode melhorar significativamente propriedades como a resistência à tração na flexão e a densidade, além de promover o aproveitamento sustentável de resíduos (Barbosa et al., 2022b; Rocha; Miranda; Parchen, 2019).

No contexto de resíduos lignocelulósicos, como a semente de açaí, a utilização de partículas como reforço em compósitos para a construção civil e outras aplicações oferece vantagens significativas. Partículas podem promover um incremento na resistência mecânica, atribuído ao aumento da área interfacial e a uma melhor transferência de tensões entre a matriz e o reforço. Isso é particularmente eficaz quando a distribuição do tamanho das partículas é controlada para evitar aglomerações e descontinuidades no compósito (Baye; Mekonone, 2025; Reis *et al.*, 2021). Além disso, as partículas tendem a proporcionar um melhor acabamento superficial em comparação com as fibras. Estudos corroboram que compósitos com partículas de menores dimensões podem apresentar maiores resistências à compressão, especialmente quando há homogeneização e dispersão adequadas na matriz, o que pode reduzir a porosidade e promove microestruturas mais densas e compactas (Tram et al., 2025; Wang; Yang; Zhang, 2022). Contudo, é importante esclarecer que em contato com o poliuretano obtido de mamona, as partículas, dependendo do tamanho, em alguns casos, pode resultar compósitos com estruturas mais porosa (Tram et al., 2025; Wang; Yang; Zhang, 2022).

Trabalhos recentes também evidenciam que partículas com menor granulometria, ao oferecerem uma maior área superficial de contato com a matriz, favorecem não apenas a transferência de tensões, mas também contribuem para uma microestrutura mais uniforme e homogênea. Isso se traduz em melhores propriedades mecânicas e maior resistência ao impacto, desde que não ocorram níveis elevados de aglomeração do reforço com partículas (Abdulkadir, S. A. *et al.*, 2025; Himanshu *et al.*, 2024). A aplicação de resíduos lignocelulósicos, como a semente de açaí, em compósitos com partículas, alinha-se à busca por materiais inovadores e ecologicamente responsáveis, com potencial para atender às demandas da construção civil e outras indústrias.

2.6.2 Aplicação de compósitos em painéis de revestimento

Os painéis contendo partículas ou aglomerados são tradicionalmente produzidos com resíduos de madeira. Contudo, essa prática fomenta a indústria madeireira, que contribui para o desmatamento, o aumento das emissões de carbono e a degradação ambiental (Expósito et al.,

2025; Rahim et al., 2024). A incorporação do açaí como carga em painéis compósitos representa, portanto, uma alternativa capaz de reduzir a demanda por madeira, evitar o esgotamento dos recursos florestais e promover práticas de fabricação mais ecológicas (Júnior et al., 2023a; Kibet et al., 2022; Rahim et al., 2024).

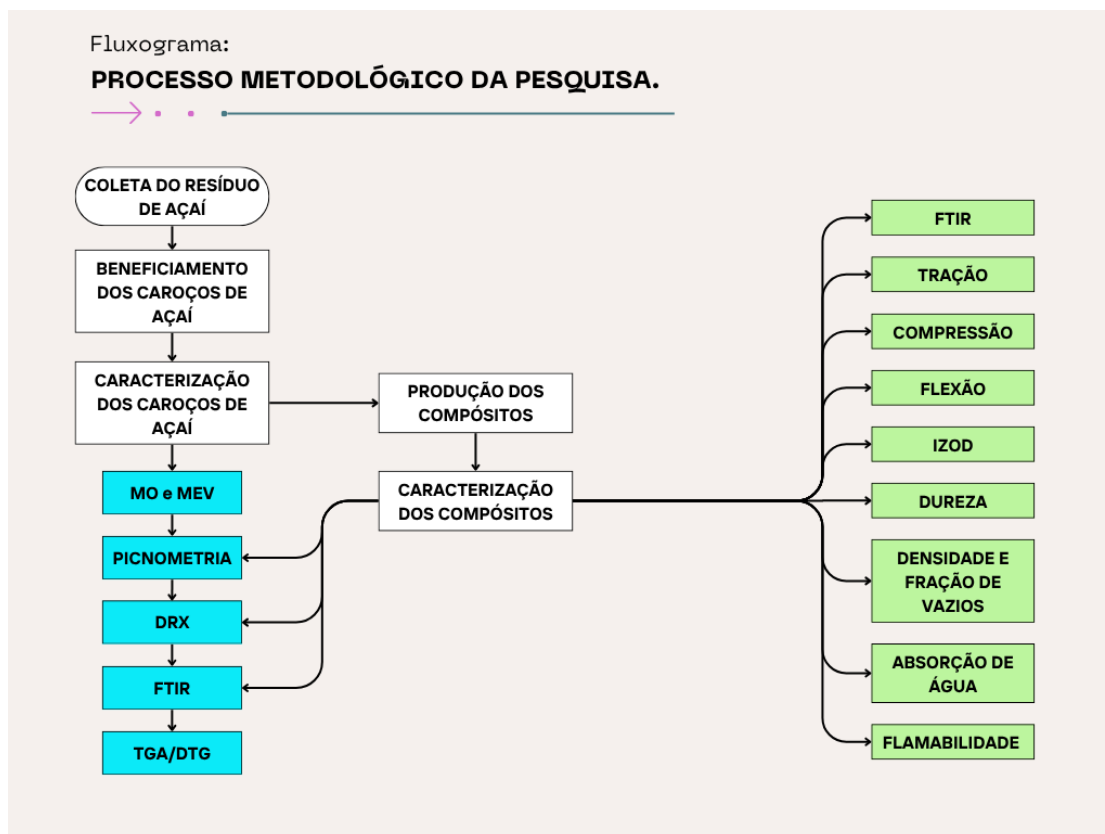
A possível aplicação desses painéis está predominantemente associada ao setor tecnológico B32 (produtos em camadas e materiais compósitos), podendo também relacionar-se aos setores B27 (painéis contendo partículas de origem vegetal), E04 (materiais para revestimento na construção civil) e A47, caso sejam utilizados como painéis decorativos.

A relevância deste estudo abrange dimensões ambientais, sociais e tecnológicas. Ambientalmente, contribui para a redução dos impactos da cadeia produtiva do açaí e para a diminuição da dependência de polímeros sintéticos derivados do petróleo. Socialmente, gera valor econômico ao reaproveitar as sementes como matéria-prima industrial, beneficiando comunidades extrativistas da região amazônica. Tecnicamente, propõe um compósito quase 100% baseado em materiais naturais, que combina uma matriz sustentável com um alto volume de subproduto agroextrativista abundante, estabelecendo um modelo tecnicamente robusto e replicável para materiais de engenharia sustentáveis desenvolvidos no contexto amazônico, com potencial aplicação em revestimentos não estruturais na construção civil e alinhado aos ODS 9 e 12 ao promover inovação, uso responsável de recursos e valorização de resíduos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia irá seguir o fluxograma ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Fluxograma da pesquisa.



Fonte: Autoria própria, 2026.

3.1 Materiais

Para o desenvolvimento deste estudo, foram utilizados resíduos de açaí e resina poliuretana derivada do óleo de mamona (AGT1315). Os resíduos de açaí foram coletados em um estabelecimento comercial na cidade de Ananindeua, Pará, Brasil, com coordenadas aproximadas de 1°21.76'S, 48°24.35'W. A coleta dos caroços foi realizada no final do expediente do estabelecimento, garantindo que o grupo amostral correspondesse ao material utilizado na produção do dia.

A resina AGT 1315, uma resina poliuretânica obtida do óleo de mamona, foi doada pela empresa Imperveg®, localizada em São Paulo. A doação ocorreu mediante um ofício

emitido pela coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais (PPGCEM), que solicitou uma quantidade específica para o desenvolvimento da pesquisa. A Tabela 3 ilustra as propriedades e características da resina.

Tabela 3 – Propriedades e características da AGT 1315.

Características da AGT 1315	
Densidade	1,08 g/cm ³
Pot life	15 min
secagem ao toque	60 a 90 min
Tempo de desmolde	2 horas
Cura total	24 horas

Fonte: Imperveg®.

3.2 Métodos

3.2.1 Beneficiamento dos caroços de açaí

O processo de beneficiamento dos resíduos foi adaptado a partir de Monteiro et al., (2024). Imediatamente após a coleta, os caroços foram lavados em dois ciclos de água corrente para a retirada de todas as impurezas provenientes do ciclo de produção do suco de açaí que ficavam aderidas às sementes. Após a lavagem, os caroços foram dispostos em bandejas e expostos ao ar ambiente por um período de 24 horas. Em seguida, passaram pelo processo de secagem em cinco ciclos de 30 minutos, totalizando 2 horas e 30 minutos. Ao final de cada ciclo de 30 minutos, os caroços foram agitados para garantir uma secagem uniforme. Após essa primeira etapa de secagem, os caroços seguiram para a etapa de desfibramento.

3.2.1.1 Desfibramento dos caroços de açaí

Devido à dificuldade em realizar o desfibramento manual dos caroços de açaí, e com o objetivo de utilizar exclusivamente as sementes sem as fibras neste estudo, foi desenvolvido um desfibrador mecânico de caroços de açaí (DMCA). O DMCA foi construído utilizando um motor de máquina de lavar reaproveitado, um tambor projetado e fabricado sob medida, e uma estrutura metálica para fixação do tambor. O equipamento opera com hélices curvadas na parte interna, responsáveis pela remoção das fibras por impacto, enquanto a estrutura do tambor em

tela realiza a retirada das fibras por atrito. A Figura 17 representa a visão geral do protótipo construído.

Figura 17 – Máquina de separação de fibras e sementes de açaí.



Fonte: Autoria própria, 2026.

O DMCA possui uma capacidade máxima de 1000 gramas e uma mínima de 800 gramas. Para verificar a eficiência da máquina, foram realizados três testes com 1000 gramas de sementes de açaí cada, por um período de uma hora. A Tabela 4 representa os valores obtidos em cada teste.

Tabela 4 – Valores do teste da DMCA.

Teste	Entrada (g)	Saída (g)	Massa de sementes utilizáveis (g)	Massa de fibras (g)	Eficiência (%)
1	1000	929	882,6	117,4	88,26
2	1000	935	877,3	122,7	87,73
3	1000	910	864,5	135,5	86,45

Fonte: Autoria própria, 2026.

Com base na Tabela 4 é possível observar que no moinho 1, a produção de partículas de açaí ficam majoritariamente na faixa da granulometria 4, essa granulometria são de grãos acima de 1.18 de tamanho, conseqüentemente isso indica que a falta de peneiras de menor abertura inviabiliza a utilização desse único moinho como cominuidor no processo de beneficiamento

das faixas granulométricas, ou, seja de 1000 gramas, aproximadamente 660,2 gramas eram utilizadas no moinho 2 para refinamento e obtenção dos grãos utilizados nesse trabalho.

A eficiência da máquina é determinada pela equação 1.

$$n = \frac{\text{Eficiência real}}{\text{Eficiência de projeto}} \quad (1)$$

Onde n representava o fator de segurança, cujo valor escolhido foi de 1,25. Este valor estava de acordo com a literatura clássica de projetos de máquinas (Budynas *et al.*, 2021) sendo aceitável para projetos altamente otimizados e com controle de variáveis.

Com base nos resultados obtidos nos testes, determinou-se uma eficiência média para a máquina de desfibrar açaí de 87,48 % $\pm$ 0,93. Com o fator de segurança de 1,25, foi determinado que a máquina de desfibrar açaí possuía uma eficiência de aproximadamente 70%. Isso significava que, para cada 1000 gramas, cerca de 700 gramas saíam prontas para o uso nos moedores. No final da etapa de desfibramento, os caroços apresentavam o aspecto conforme a Figura 18.

Figura 18 – Aspecto dos caroços após passarem por separação mecânica.



Fonte: Autoria própria, 2026.

3.2.1.2 Moagem das sementes

Para o estudo, foram definidos três tipos de faixas granulométricas: faixa granulométrica 1 (G1), correspondente a partículas abaixo de 0,3 mm; faixa granulométrica 2 (G2), correspondente a partículas na faixa de 0,3 mm a 0,6 mm; e faixa granulométrica 3 (G3), correspondente a partículas na faixa de 0,6 mm a 1,18 mm, conforme detalhado na Tabela 5. Essas faixas granulométricas foram definidas com o objetivo de controlar a variável relacionada ao tamanho das partículas e reduzir a influência de uma distribuição granulométrica muito ampla sobre as propriedades dos compósitos. Dessa forma, a separação em G1, G2 e G3 permitiu comparar, de maneira mais sistemática, o efeito de partículas finas, intermediárias e grossas na dispersão do reforço, na interação matriz/partícula, na formação de vazios e no desempenho físico-mecânico do material.

Tabela 5 – Tipos de grãos no beneficiamento.

Tipo de grão	Sigla	Faixa de tamanho das partículas (mm)	Observação
Faixa granulométrica 1	G1	< 0,30 mm	Partículas mais finas
Faixa granulométrica 2	G2	0,30 mm a 0,60 mm	Partículas intermediárias
Faixa granulométrica 3	G3	0,60 mm a 1,18 mm	Partículas mais grossas

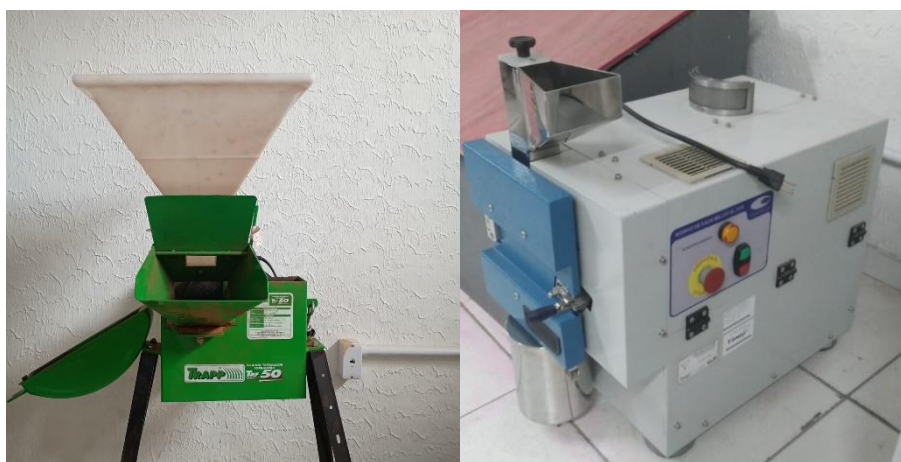
Fonte: Autoria própria, 2026.

Após a secagem inicial, os caroços foram levados novamente para a estufa para uma secagem total, onde permaneceram por 24 horas a uma temperatura de 80 °C. Em seguida, os caroços foram triturados no triturador forrageiro TRF-50 da TRAPP, utilizando uma peneira de 3 mm de abertura. Este equipamento foi designado como moinho 1 (M1). Foram realizados três ciclos de trabalho neste moinho. Cada ciclo foi executado com 1 kg de caroços desfibrados de açaí, durante 6 minutos, para verificar a quantidade produzida em cada faixa granulométrica.

As amostras trituradas no M1 foram peneiradas, permitindo a obtenção das frações G1, G2 e G3. Os grãos com tamanhos maiores que G3 (denominados G4, com diâmetro > 1,18 mm) foram então encaminhados ao moinho 2 (M2) para um beneficiamento mais refinado das partículas. O M2 corresponde a um moinho de facas com rotor helicoidal SL-31/H-NR10-12, equipado com peneira de 20 mesh, da SOLAB. A capacidade do M2 é inferior à do M1; por isso, foram utilizados apenas 150 g por ciclo de trabalho, com duração de 25 minutos. Ao final,

as amostras foram peneiradas para determinar o rendimento das faixas granulométricas requeridas. Ambos os moinhos estão disponíveis no Laboratório de Práticas Tecnológicas da UFPA (LaPTec). A Figura 19 apresenta os moinhos utilizados, à esquerda o moinho forrageiro e à direita o moinho de facas da Solab.

Figura 19 – Moinhos 1 e 2.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Durante a etapa de moagem preliminar, observou-se que a utilização da peneira de 3 mm no moinho M1 permitiu a passagem rápida da massa processada, indicando baixa retenção do material nessa configuração. Embora a adoção de uma peneira com menor abertura pudesse proporcionar maior redução granulométrica ainda nessa etapa, essa alternativa não foi empregada, pois tal componente não integrava o conjunto padrão do equipamento e demandaria fabricação sob medida.

O moinho M2, por sua vez, apresentava tambor de menor capacidade e limitação operacional para processar os caroços inteiros de açaí. Por esse motivo, o M1 foi utilizado na etapa inicial de fragmentação do material, enquanto o M2 foi empregado posteriormente para a moagem mais refinada, utilizando menores quantidades de partículas previamente fragmentadas.

A Tabela 6 apresenta a eficiência de produção, em porcentagem, para cada moinho, considerando as massas estabelecidas nos testes.

Tabela 6 – Proporção de granulometrias produzidas em cada moinho.

	MASSA (g)	G4 (%)	G3 (%)	G2 (%)	G1 (%)
	-	Acima de 1,18 mm	Entre 1,1–0,6 mm	Entre 0,6–0,3 mm	Abaixo de 0,3 mm
M1	1000	66,02 ± 1,66	19,51 ± 0,43	6,52 ± 0,56	7,50 ± 0,90
M2	150	-	70,56 ± 2,91	11,31 ± 1,73	11,40 ± 0,63

Fonte: Autoria própria, 2026.

Para determinar a produtividade de cada faixa granulométrica ao final do processo de beneficiamento, adotou-se, de forma adaptada, o procedimento de análise granulométrica descrito na ABNT NBR 7181. Inicialmente, utilizou-se 1 kg de sementes de açaí previamente desfibradas, as quais foram submetidas à moagem inicial no Moinho 1 (M1).

Após essa etapa, o material moído foi peneirado em peneira de 14 mesh, com abertura de 1,18 mm. A fração passante foi reservada, enquanto a fração retida foi encaminhada ao Moinho 2 (M2) para moagem complementar, até que todo o material fosse processado. Esse procedimento teve como finalidade aumentar a obtenção de partículas distribuídas nas faixas granulométricas G1, G2 e G3.

Concluído o beneficiamento, foram utilizadas amostras de 200 g para cada análise granulométrica. Para garantir maior representatividade, cada amostra foi distribuída sobre uma bandeja, homogeneizada manualmente e submetida ao procedimento de quarteamento, no qual a massa foi dividida em quatro frações aproximadamente equivalentes. Em seguida, uma dessas frações, correspondente a aproximadamente 1/4 da massa total, foi utilizada no conjunto de peneiras para determinação da distribuição granulométrica do material.

3.2.2 Caracterização do resíduo de semente de açaí

3.2.2.1 Microscopia óptica das partículas

As análises de microscopia óptica das partículas de açaí foram realizadas com o estereomicroscópio trinocular STEMI 305, da marca Zeiss, utilizando o software capture 2.4. O equipamento está disponível no Laboratório de Caracterização de Materiais da Universidade Federal do Pará (LACMAT). A análise teve como finalidade observar o aspecto morfológico geral das partículas.

3.2.2.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de Dispersão de Energia das partículas de açaí

As análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas no Instituto Federal do Pará (IFPA), utilizando um microscópio TESCAN Mira 3 FEG 250 com detector de elétrons secundários. O equipamento operou entre 5 e 15 kV, com distância de trabalho de 10 a 25 mm e ampliações de 90× a 1000×.

A análise por MEV teve como finalidade avaliar a morfologia superficial das partículas, observando rugosidade, irregularidades, poros, fraturas e possíveis aglomerações. A análise por EDS foi realizada simultaneamente para identificar a composição pontual elementar das partículas de açaí.

3.2.2.3 Determinação de massa específica.

O ensaio de picnometria para determinação da massa específica das amostras de açaí foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais (LABCMAT). O procedimento seguiu a norma ASTM D792-20 e adaptou o método de Almeida et al. (2025). Foram utilizados dois fluidos para o ensaio: álcool etílico 95% P.A./ACS, com densidade padrão de 0,789 g/cm³, e água destilada, com densidade de 1,00 g/cm³. Cada amostra de açaí foi ensaiada em triplicata, utilizando picnômetros de 50 mL.

O procedimento experimental seguiu da seguinte forma: a massa do picnômetro vazio (m_1) foi pesada, em seguida, pesou-se o picnômetro totalmente preenchido com o líquido (m_2). Uma quantidade separada de açaí (m_3) foi pesada. Posteriormente, o picnômetro foi pesado preenchido com o líquido e a quantidade de massa de açaí (m_4). Com essas quatro massas, foi possível determinar a densidade das faixas granulométricas do açaí utilizando as equações abaixo.

O valor do volume do picnômetro é determinado pela equação 2.

$$V_{\text{picnometro}} = \frac{(m_2 - m_1)}{\rho_{\text{fluido}}} \quad (2)$$

O valor do volume do fluido é determinado pela equação 3.

$$V_{\text{fluido}} = \frac{(m_4 - m_3 - m_1)}{\rho_{\text{fluido}}} \quad (3)$$

O valor do volume da fibra é determinado pela equação 4.

$$V_{\text{fibra}} = V_{\text{picnometro}} - V_{\text{fluido}} \quad (4)$$

O valor da densidade da fibra é determinado pela equação 5.

$$\rho_{\text{fibra}} = \frac{(m_3)}{V_{\text{fibra}}} \quad (5)$$

Com os resultados obtidos, foi possível determinar a densidade de cada granulometria utilizada e, com base nisso, definir uma única densidade para o resíduo de semente de açaí.

3.2.2.4 Análise de difração de raios X (DRX)

As análises por Difração de Raios-X (DRX) foram realizadas em um difratômetro modelo Empyrean da PANalytical. O equipamento utilizou tubos de raios-X cerâmico de anodo de Cu ($K\alpha_1 = 1,789010 \text{ \AA}$), foco fino-longo, filtro $K\beta$ de Fe e detector PIXCEL3D-Medpix3 1x1, operando no modo *scanning*, com voltagem de 40 kV e corrente de 35mA. A varredura foi feita em modo acoplado de θ a 2θ . O difratograma foi obtido na faixa de 2θ de 10° a 100° , com passo angular de aproximadamente $0,02^\circ$ e tempo total de varredura de cerca de 39 minutos. O equipamento estava disponível no Laboratório de Caracterização Mineral (LCM) do Instituto de Geociências (IG) da Universidade Federal do Pará.

A análise por DRX teve como finalidade identificar as fases cristalinas e amorfas presentes no resíduo de açaí, contribuindo para sua caracterização mineralógica e estrutural.

3.2.2.5 Caracterização térmica (TGA/DTG)

A TGA foi realizada em um analisador termogravimétrico TGA-50H da marca Shimadzu, sob atmosfera inerte de nitrogênio, com vazão de $50 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$. As amostras, com massa inicial de aproximadamente 11,5 mg, foram acondicionadas em cadinho de platina e

aquecidas de 20 °C até 1000 °C, a uma taxa de aquecimento constante. A TGA foi realizada no LSCN - Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais do IFAM.

A TGA/DTG teve como finalidade avaliar o comportamento térmico das partículas de açaí, identificando as principais etapas de perda de massa e as temperaturas associadas à degradação do material.

3.2.2.6 Espectroscopia Vibracional no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

As análises de FTIR, tanto das matérias-primas (açaí e PUOM depois de curado) quanto dos compósitos produzidos, foram realizadas em atmosfera de CO₂, cobrindo a faixa do infravermelho médio de 4000–400 cm⁻¹. As amostras foram cominuídas e levadas a um equipamento Bruker, modelo Vertex 70 V, Madison, com resolução de 8 cm⁻¹. A FTIR foi realizada no Laboratório de Espectroscopia Vibracional e Altas Pressões da Universidade Federal do Pará.

A análise por FTIR teve como finalidade identificar os principais grupos funcionais das matérias-primas e dos compósitos, bem como avaliar possíveis interações químicas entre a matriz de PUOM e as partículas de açaí.

3.3 Confeção dos materiais compósitos

3.3.1 Confeção dos corpos de provas.

Os corpos de prova foram produzidos a partir das amostras de açaí cominuídas (G1, G2 e G3). A preparação da mistura para a produção do compósito seguiu a metodologia adaptada de Oliveira et al., (2022) e Júnior et al., (2023), enquanto as medidas de pré-polímero e poliol seguiram os padrões estabelecidos pelo fabricante. O pré-polímero (componente A) e o poliol (componente B) foram misturados na proporção de 1:1,2 em volume, respectivamente. As frações de massas utilizadas foram de 40, 50 e 60%. Os valores de proporções para a produção do compósito foram dados pela regra da mistura, de acordo com a Equação 6.

$$\%f = \frac{mf/\rho f}{(mf/\rho f) + (mr/\rho r)} \quad (6)$$

Sendo:

$\%f$ a porcentagem de fibra

mf a massa da fibra

ρf a densidade da fibra

mr a massa da resina

ρr a densidade da resina

A nomenclatura dos compósitos seguiu a seguinte formatação, de acordo com a Tabela 7. A numeração (40, 50 e 60) significava a quantidade de açaí adicionada à matriz em volume, e G1, G2 e G3 representavam a faixa granulométrica utilizada.

Tabela 7 – Composição dos materiais compósitos.

Granulometria	0%	40%	50%	60%
G1	PUOM	40G1	50G1	60G1
G2	-	40G2	50G2	60G2
G2	-	40G3	50G3	60G3

Fonte: Autoria própria, 2026.

A escolha das frações volumétricas teve como finalidade explorar a incorporação de uma quantidade significativa de resíduo agroindustrial na matriz de PUOM, diferentemente de estudos que utilizam pequenas porcentagens de carga apenas como reforço pontual. Assim, buscou-se avaliar o comportamento dos compósitos em teores elevados de partículas, mas sem extrapolar limites de processamento e impregnação da matriz, considerando como referência a literatura, que indica proporções máximas próximas de 70% de reforço para 30% de resina em sistemas compósitos (Pardini; Neto, 2016, p. 24)

Na preparação da mistura, utilizou-se como misturador mecânico uma furadeira/parafusadeira de impacto da The Black Tools Tb-21pkx e uma haste de misturar tinta. Foi utilizado o gatilho de velocidade 1 para rotações mínimas, que variavam de 0 a 400 rpm, sendo empregada a velocidade de 400 rpm e torque de 35 N/m (condições máximas de uso para o gatilho na velocidade 1. A Figura 20 ilustra essa descrição.

O açaí e o poliol foram misturados por um tempo de 1 minuto e ficaram em descanso por 30 minutos. O molde foi selado com uma fita desmoldante da Redelease, e vaselina em pomada foi aplicada em toda a superfície do molde como desmoldante. Após os 30 minutos, a

massa de pré-polímero foi adicionada à massa de açaí e poliol e misturada por 2 minutos nas condições máximas da parafusadeira na velocidade 1, de forma homogênea, permanecendo em repouso por 1 minuto.

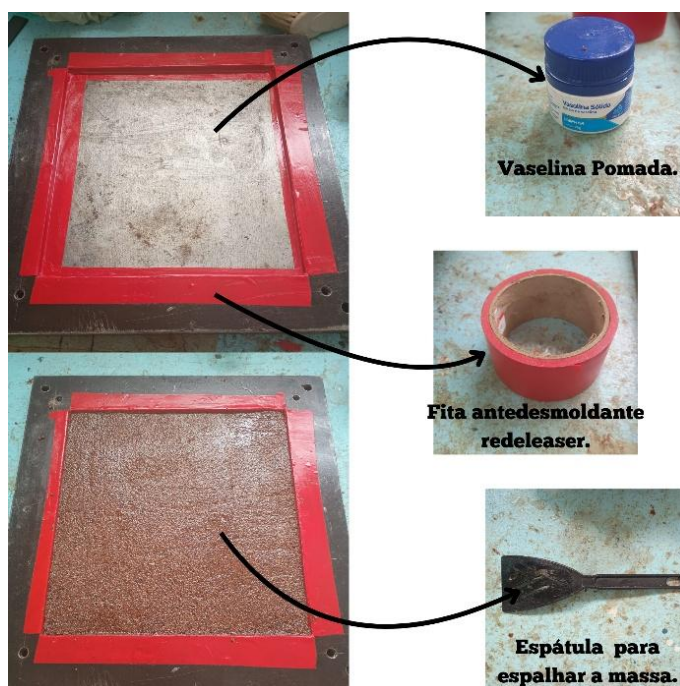
Figura 20 – Esquema do uso da parafusadeira como misturador mecânico.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Em seguida, a mistura foi levada ao molde metálico e espalhada com o auxílio de uma espátula de plástico sobre o molde, de forma a preencher toda a área de contato, onde a massa permaneceu até o fim do *pot life* (15 min). A Figura 21 representa esse esquema.

Figura 21 – Esquema de utilização do molde metálico.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Posteriormente, o molde foi fechado e levado à prensa hidráulica de capacidade de 15 TON, disponível no LAPTEC na Universidade Federal do Pará. Na prensa, foi aplicada uma carga de 3 TON por um período de 2 horas; depois, a carga foi retirada, e o molde foi removido, permanecendo por mais 2 horas fechado. Ao final de 4 horas, a placa foi desenformada sem riscos de prejudicar sua estrutura. A Figura 22 apresenta a prensagem das placas.

Figura 22 – Prensagem das placas.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Após a desmoldagem, os painéis de $28,5 \times 28,5$ cm foram levados a uma pequena prensa de madeira, onde permaneceram por 7 dias até a finalização do processo de polimerização, visando evitar que os painéis flambassem durante o processo de polimerização.

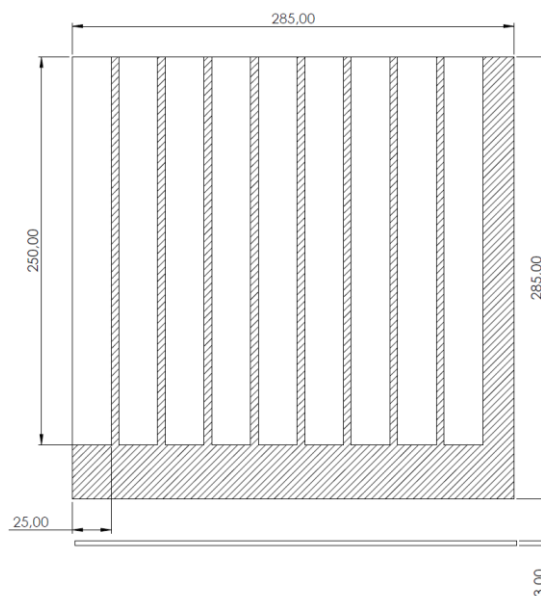
Figura 23 – Placas produzidas e prensa de madeira.



Fonte: Autoria própria, 2026.

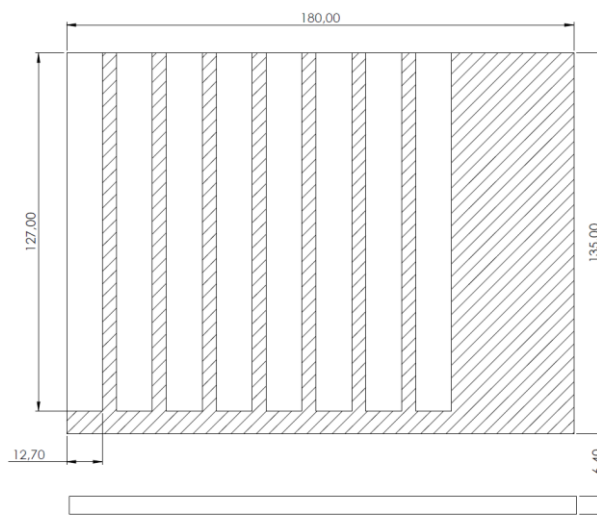
Como para ensaios mecânicos era solicitada uma espessura de material diferente, foi produzida uma placa para cada tipo de ensaio. Após a etapa de polimerização, os corpos de prova foram recortados da placa nas medidas de acordo com cada tipo de ensaio a ser realizado. As placas seguiam o modelo 3D conforme as Figuras 24, 25 e 26. As áreas com hachuras representavam as seções das placas que sobraram após a retirada dos corpos de prova.

Figura 24 – Modelagem das placas e cortes realizados para tração.



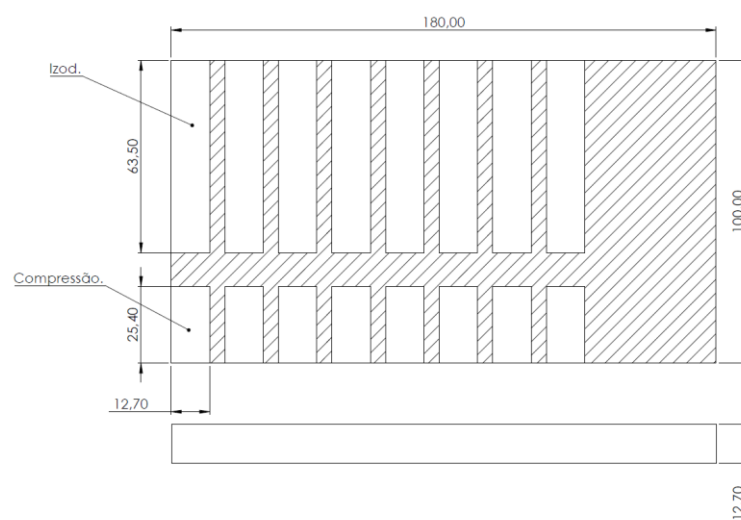
Fonte: Autoria própria, 2026.

Figura 25 – Modelagem das placas e cortes realizados para flexão.



Fonte: Autoria própria, 2026.

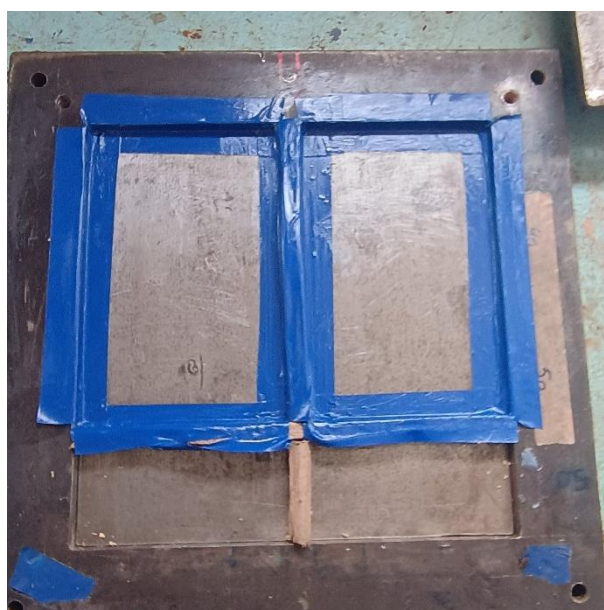
Figura 26 – Modelagem das placas e cortes realizados para compressão e Izod.



Fonte: Autoria própria, 2026.

O mesmo molde foi utilizado para produzir todas as placas e compósitos empregados no trabalho. Para delimitar as áreas a serem moldadas, utilizou-se o miriti como limitador, uma vez que, quando submetido à compressão dentro do molde, ele se comprimia sem atrapalhar a moldagem. A Figura 27 apresenta essa técnica.

Figura 27 – Técnica de delimitação de área útil com o miriti.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Essa técnica, além de proporcionar economia de materiais, uma vez que não era necessário utilizar toda a dimensão do molde para a produção de uma formulação, permitiu também que fossem trabalhadas de forma simultânea a produção de duas ou mais formulações.

3.4 Caracterização dos materiais compósitos

3.4.1 Ensaio de tração

Para o ensaio de tração, foram preparados oito corpos de prova para cada composição, de acordo com a norma ASTM D3039-17, com dimensões de $25 \times 250 \times 4$ mm. Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios iM-50 da Intermetric, utilizando célula de carga de 50 kN e velocidade de 2 mm/min. O equipamento estava disponível no Laboratório de Caracterização de Materiais (LACMAT), na Universidade Federal do Pará.

3.4.2 Ensaio de compressão

Para o ensaio de compressão, os corpos de prova foram preparados conforme a norma ASTM D695-23, com dimensões de $12,7 \times 12,7 \times 25,4$ mm. Os testes foram realizados em oito amostras de cada composição, utilizando uma máquina universal de ensaios iM-50 da Intermetric, com célula de carga de 50 kN e velocidade de 1,3 mm/min. O equipamento estava disponível no Laboratório de Caracterização de Materiais (LACMAT), na Universidade Federal do Pará.

3.4.3 Ensaio de dobramento

Para o ensaio de flexão/dobramento, os corpos de prova foram preparados de acordo com a norma ASTM D790-17, com dimensões de $6,4 \times 12,7 \times 127$ mm. Os testes foram realizados em oito corpos de prova de cada composição, utilizando uma máquina universal de ensaios iM-50 da Intermetric, com célula de carga de 5 kN, taxa de deslocamento de 2 mm/min e vão de apoio de 57 mm. O equipamento também estava disponível no Laboratório de Caracterização de Materiais (LACMAT), na Universidade Federal do Pará.

3.4.4 Ensaio de impacto.

O ensaio de impacto foi realizado utilizando o equipamento da fabricante SamKoon, da série XJC. O equipamento estava disponível no Laboratório de Caracterização dos Materiais (LACMAT), na Universidade Federal do Pará, e seguiu a norma ASTM D256 para o método Izod.

3.4.5 Ensaio de dureza.

O ensaio de dureza Shore D seguiu os parâmetros e padrões estabelecidos pela norma ASTM D2240-15(2021). Os corpos de prova foram confeccionados com laterais de 50×50 mm e espessura mínima de 6 mm. O teste foi executado com 10 medições realizadas a uma distância de 12 mm da borda, utilizando o durômetro série PCE-DD da PCE Ibérica S.L. O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Mecânica (LABEM) na UFPA campus Guamá.

3.4.6 Determinação da densidade dos compósitos e fração de vazios.

Para a determinação das densidades foi conduzida conforme a norma ABNT NBR 14810-2:2024 de forma adaptada. Foram cortados seis corpos de prova de cada formulação e para cada tipo de ensaio (tração, flexão e compressão), Izod não foi realizado devido a amostragem de compressão ser retirada do mesmo painel para Izod. Desta forma foram avaliados de forma isolada dentro de cada um desses ensaios mecânicos. As dimensões dos corpos de prova foram de $12 \times 12 \times 3$ mm. Dessa forma, foi possível calcular a densidade do painel em cada fração volumétrica e verificar a quantidade de vazios para cada tipo de ensaio. Com o auxílio da Equação 7, foi possível determinar a densidade dos painéis.

$$D = \frac{ms}{b_1 \times b_2 \times e} \quad (7)$$

Onde D é a densidade prática (g.cm^{-3}); ms é a massa seca (g); b_1 é a largura (cm); b_2 é o comprimento (cm); e é a espessura (cm).

E por meio da Equação 8 é possível calcular a fração de vazios dos compósitos produzidos em porcentagem.

$$n = \left(1 - \frac{D}{\rho_t}\right) \times 100 \quad (8)$$

Onde ρ_t é a densidade teórica dos compósitos, obtida pela Equação 9.

$$\rho_t = (V_{PUOM} \times \rho_{PUOM}) + (V_{ac} \times \rho_{ac}) \quad (9)$$

Onde V_{PUOM} e V_{ac} são as frações volumétricas de poliuretano obtido de óleo de mamona e açaí, respectivamente, e ρ_{PUOM} e ρ_{ac} são suas densidades.

3.4.7 Absorção de água.

O ensaio de absorção de água foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais (LACMAT), conforme a norma ASTM D570-22, tendo sido ensaiados cinco corpos de prova. Os corpos de prova foram inicialmente secos em estufa, a aproximadamente 100 °C por 24 horas, e pesados em uma balança analítica com resolução de 0,01 g. Em seguida, foram submersos em água destilada, e as massas foram medidas no tempo de 24 horas, semelhante ao procedimento descrito em Oliveira et al. (2022) e conforme a equação 10.

$$AA = \left(\frac{mu - ms}{ms}\right) \times 100 \quad (10)$$

Sendo, AA a absorção de água (%); mu a massa úmida (g); e ms a massa seca (g).

Devido à dificuldade de obtenção de massa imersa dos compósitos foram realizados a análise de porosidade aparente acessível à água de acordo com a equação 11.

$$P_a = \frac{m_{24h} - m_0}{\rho_{\text{água}} \times V} \times 100$$

Em que P_a corresponde à porosidade aparente acessível à água, expressa em porcentagem; m_0 representa a massa seca inicial do corpo de prova, em gramas;

m_{24h} corresponde à massa do corpo de prova após 24 horas de imersão em água, em gramas; $\rho_{\text{água}}$ representa a densidade da água, considerada igual a 1,00 g/cm³; e V corresponde ao volume geométrico do corpo de prova, em cm³.

3.4.8 Flamabilidade

O ensaio de flamabilidade foi conduzido com base na Underwriters Laboratories (UL), UL 94, método A, correspondente ao ensaio de queima horizontal aplicado a materiais poliméricos. Esse método permite avaliar a tendência de propagação da chama ao longo do corpo de prova por meio da determinação da taxa de queima. Ressalta-se que esse ensaio fornece uma indicação preliminar do comportamento do material frente à chama em condições controladas de laboratório, não representando, de forma direta, o desempenho do material em uma situação real de incêndio.

Para o ensaio horizontal, os corpos de prova são marcados em três regiões: uma de 25 mm onde a chama deve permanecer para promover o aquecimento do polímero, outra de 75 mm para medir a propagação da chama, e uma de 25 mm para que o corpo de prova seja fixado na garra. Os corpos de prova foram colocados horizontalmente, com a ponta do queimador Bunsen em um ângulo de 45°. O método foi adaptado de acordo com o procedimento realizado por Cardoso et al., (2025).

3.4.9 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) das fraturas

As análises de MEV das seções transversais dos compósitos foram realizadas no Laboratório Institucional de Microscopia Eletrônica de Varredura do Museu Paraense Emílio Goeldi, utilizando um microscópio TESCAN Mira 3 FEG 250 com detector de elétrons secundários. O equipamento operou a 5–15 kV, com distância de trabalho de 10–25 mm e ampliações de 90× a 1000×.

3.5 Tratamento estatístico

A partir dos resultados obtidos a partir dos ensaios de caracterização mecânica dos compósitos, foram aplicadas análises de variância (ANOVA) e testes de Tukey. Com o objetivo de verificar se as diferenças observadas nos gráficos e nas médias foram estatisticamente

significativas. Inicialmente, foi avaliado o efeito da fração volumétrica de partículas em cada granulometria (G1, G2 e G3) separadamente com a ANOVA de fator único e o teste de Tukey. Em seguida, utilizou-se ANOVA bifatorial com repetição para analisar simultaneamente os efeitos da fração volumétrica e da granulometria e suas interações, complementada por testes de Tukey considerando tanto o efeito principal da granulometria ($k = 3$) quanto todas as combinações fração $\times$ granulometria ($k = 9$).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

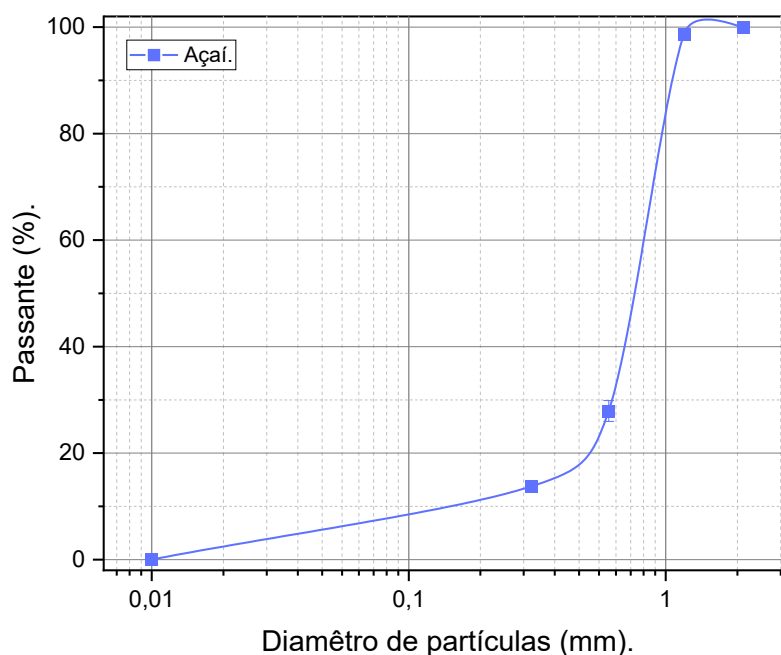
4.1 Caracterização das partículas de açaí

4.1.1 Beneficiamento das granulometrias de açaí

A análise granulométrica foi utilizada como ferramenta para avaliar a produtividade do processo de beneficiamento, permitindo identificar a quantidade de material obtida em cada faixa de tamanho. Essa informação é relevante porque a viabilidade de uso do resíduo em compósitos não depende apenas de suas propriedades, mas também da facilidade de obtenção das granulometrias desejadas.

No Moinho 2 (M2), observou-se que a maior produtividade ocorreu na faixa granulométrica G3, correspondente às partículas entre 0,60 e 1,18 mm. Esse comportamento indica que a obtenção de partículas de maior dimensão ocorre com maior facilidade durante o beneficiamento, enquanto a redução para faixas granulométricas menores exige maior tempo de moagem e maior energia de processamento. A Figura 28 apresenta a curva de distribuição granulométrica das partículas de caroço de açaí obtidos após o processo de beneficiamento.

Figura 28 – Gráfico de distribuição de partículas.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Cada ponto da curva corresponde ao percentual passante acumulado em uma peneira específica, considerando aberturas entre 2,00 mm e 0,30 mm. Observou-se que 100% do material passou pela peneira de 2,00 mm, indicando ausência de partículas superiores a essa dimensão. Na peneira de 1,18 mm, o percentual passante foi de 99,08%, enquanto nas peneiras de 0,60 mm e 0,30 mm os percentuais passantes foram de 30,48% e 15,15%, respectivamente.

Com base nesses dados, foi possível quantificar a produtividade de cada faixa granulométrica, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Quantidade de cada tipo de grão produzida de açaí.

Faixa granulométrica (mm)	Média (%)
1,18	1,30 ± 0,10
0,60 – 1,18 (G3)	70,37 ± 0,20
0,30 – 0,60 (G2)	14,07 ± 0,36
<0,30 (G1)	13,67 ± 0,35
Total peneirado	99,40
perdas	0,60

Fonte: Autoria própria, 2026.

Os resultados demonstram que a faixa G3 apresentou a maior produtividade, representando aproximadamente 70,37% do material obtido após o beneficiamento. Em contrapartida, as faixas mais finas, G2 e G1, apresentaram menores percentuais de produção, com 14,07% e 13,67%, respectivamente.

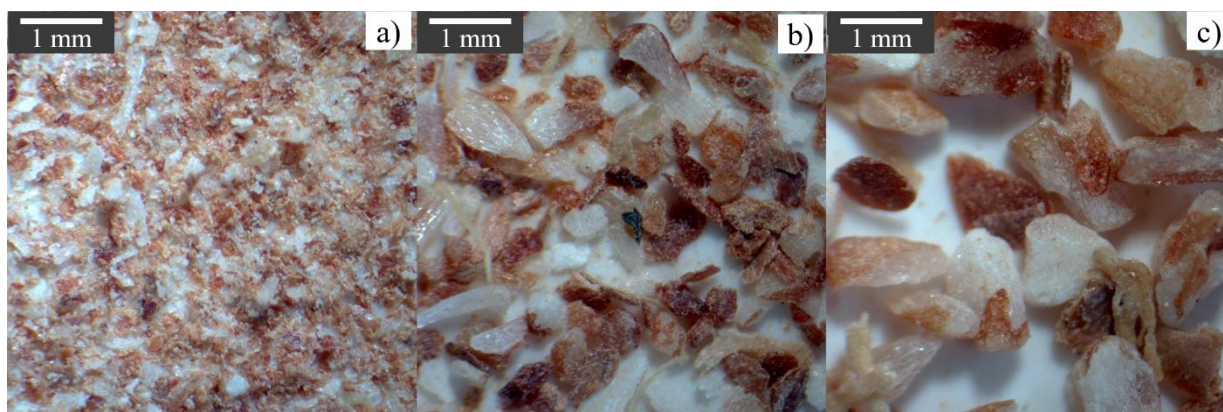
Esse comportamento indica que a redução granulométrica para partículas mais finas demanda maior esforço de moagem, uma vez que exige maior fragmentação das partículas. Dessa forma, pode-se inferir que as faixas granulométricas de maior dimensão são obtidas com maior facilidade e menor exigência operacional, enquanto a produção de partículas mais finas tende a ser mais trabalhosa, menos produtiva e potencialmente mais custosa em escala industrial.

4.1.2 Morfologia das partículas

A análise morfológica das partículas de caroço de açaí foi realizada inicialmente por microscopia óptica, com o objetivo de comparar o aspecto visual das partículas obtidas após o processamento nos moinhos M1 e M2. A Figura 29 apresenta as partículas obtidas após o

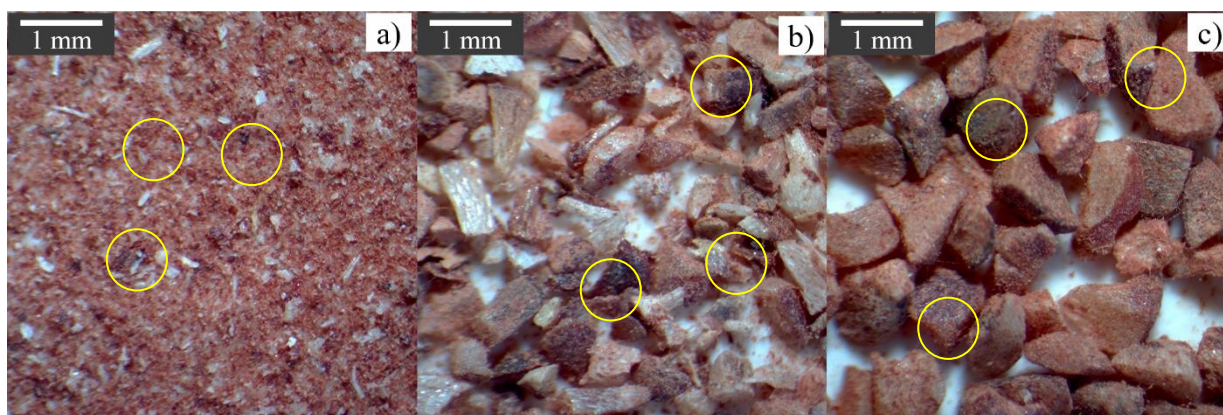
processamento no Moinho 1 (M1), enquanto a Figura 30 apresenta as partículas obtidas após o processamento no Moinho 2 (M2), considerando as faixas granulométricas G1, G2 e G3.

Figura 29 – Partículas de açaí processadas apenas em M1: a) G1; b) G2; c) G3.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Figura 30 – Partículas de açaí processadas apenas em M2: a) G1; b) G2; c) G3.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Nas Figuras 29 e 30, observa-se que as partículas de açaí apresentam morfologia predominantemente irregular, com presença de arestas, superfícies angulosas e formatos não uniformes, os círculos amarelos identificam regiões degradadas por atrito e calor das partículas do M2. Esse comportamento está associado aos esforços mecânicos impostos durante a moagem, como atrito, compressão e impacto entre as partículas e os componentes internos dos moinhos, os quais promovem a fragmentação do material (Barbosa et al., 2019).

A irregularidade superficial observada pode favorecer a adesão mecânica entre a partícula e a matriz polimérica, uma vez que superfícies não uniformes tendem a facilitar a

ancoragem física do reforço no interior da matriz. Esse efeito pode contribuir para uma interface mais resistente entre matriz e partícula, especialmente em sistemas nos quais a adesão ocorre também por mecanismos mecânicos de travamento superficial (Samal; Blanco, 2021).

Apesar da semelhança geral entre as partículas obtidas nos dois moinhos, foram observadas diferenças morfológicas importantes. As partículas processadas no M2 apresentaram aspecto superficial mais danificado quando comparados aos obtidos no M1, possivelmente em função do maior atrito e do aquecimento gerado durante a moagem mais refinada. Além disso, verificou-se maior presença de micropartículas aderidas à superfície das partículas maiores, principalmente nas frações granulométricas mais grossas.

A presença dessas micropartículas aderidas pode interferir na interação entre matriz e reforço, pois partículas finas depositadas sobre a superfície das partículas maiores podem atuar como uma barreira física, dificultando o contato direto entre a matriz de PUOM e a superfície principal do reforço. Esse efeito pode reduzir a eficiência da molhabilidade e comprometer parcialmente a compatibilidade entre as fases (Ceraulo et al., 2025).

A adesão dessas partículas menores à superfície das partículas maiores pode ser atribuída às forças de interação entre partículas, que, em determinadas condições, superam a ação da gravidade e favorecem a formação de aglomerados. Após a lavagem dos caroços maiores, observou-se que essas micropartículas se desprenderam com facilidade, conforme apresentado na Figura 31. Esse comportamento indica a ocorrência de aglomeração fraca, caracterizada pela adesão superficial de partículas finas sem forte ligação estrutural com as partículas maiores (Rajaonarivony *et al.*, 2022).

Figura 31 – Partículas lavadas para retirada das micropartículas.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Dessa forma, a lavagem seguida de secagem poderia ser incorporada como etapa adicional ao beneficiamento das partículas maiores, visando remover micropartículas aderidas e melhorar o contato direto entre matriz e reforço. Entretanto, considerando critérios de produtividade, economia de tempo e simplificação do processamento, essa etapa não foi adotada neste trabalho. Assim, as partículas maiores foram utilizadas nas condições em que foram obtidos após o processamento no M2.

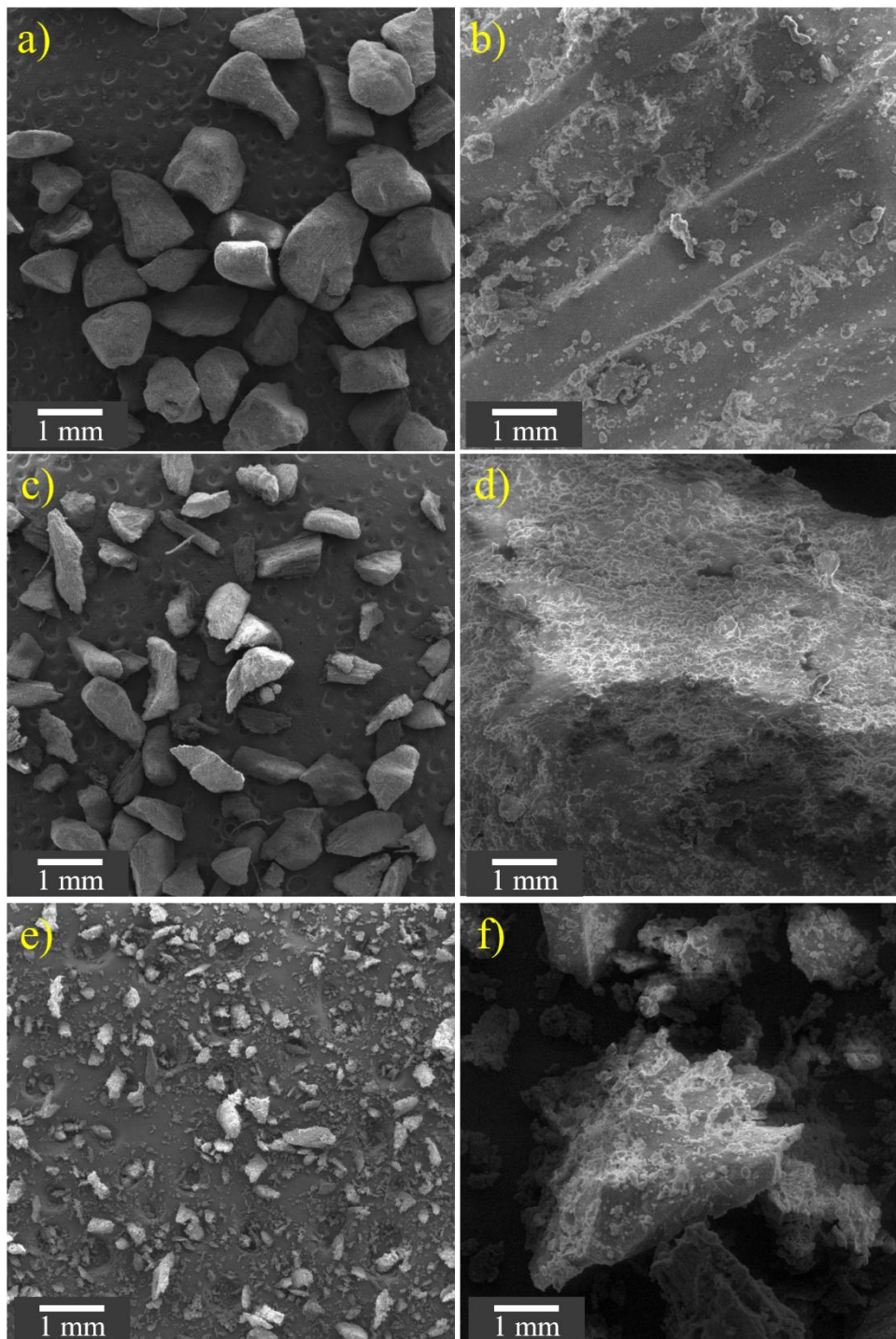
Complementarmente, a morfologia das partículas foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), permitindo uma observação mais detalhada da superfície. A Figura 32 apresenta as micrografias das faixas granulométricas G1, G2 e G3.

Nas micrografias apresentadas na Figura 32, observa-se que as partículas mantêm uma morfologia irregular, com presença de arestas, superfícies rugosas e geometrias não uniformes, corroborando as observações obtidas por microscopia óptica. Essas características são relevantes para a aplicação das partículas em compósitos, pois podem favorecer o travamento mecânico entre reforço e matriz, além de aumentar a área de contato superficial.

Além disso, as partículas apresentaram estrutura visualmente compacta, sem presença evidente de trincas acentuadas ou danos estruturais severos. Essa condição indica que o processo de moagem promoveu a fragmentação do caroço de açaí sem causar degradação morfológica intensa das partículas. Segundo Santos et al. (2021), estruturas compactas são características comuns em partículas lignocelulósicas desse tipo. Danos mais acentuados, como fissuras intensas e degradação superficial severa, são frequentemente associados a processos químicos mais agressivos, como tratamentos com ácido sulfúrico, conforme relatado por Igreja et al. (2023).

De modo geral, os resultados morfológicos indicam que as partículas de caroço de açaí apresentam características adequadas para utilização como carga em compósitos de matriz polimérica, especialmente devido à irregularidade superficial, à angularidade e à presença de superfícies rugosas. No entanto, a presença de micropartículas aderidos às partículas maiores deve ser considerada, pois pode influenciar a molhabilidade, a dispersão e a interação matriz/partícula durante a produção dos compósitos.

Figura 32 – Micrografias das partículas de açaí: a, b) G1; c, d) G2; e, f) G3. Ampliações de 30× em a) e c). Ampliação de 100× em e). Ampliações 1000× em b), d) e f).



Fonte: Autoria própria, 2026.

4.1.3 Densidade por picnometria

A Tabela 9 apresenta os valores obtidos pela picnometria com os grãos de açaí.

Tabela 9 – Picnometria das partículas de açaí com etanol e água.

Amostras	Densidades médias – Etanol (g/cm ³)	Densidades médias - Água (g/cm ³)
G3	1,40 ± 0,03	1,43 ± 0,19
G2	1,38 ± 0,03	1,44 ± 0,06
G1	1,39 ± 0,08	1,41 ± 0,17
AÇAÍ	1,39 ± 0,03	1,43 ± 0,09

Fonte: Autoria própria, 2026.

Para a picnometria, optou-se por verificar individualmente cada faixa de grão estudada, verificando possíveis discrepâncias entre valores de densidades em cada faixa. Entretanto, conforme os valores da Tabela 9, verificou-se que não há uma variação de densidade alta. Portanto, definiram-se as densidades médias para o resíduo de açaí. Os valores foram de $1,390 \pm 0,051$ g/cm³ com o etanol e de $1,431 \pm 0,151$ g/cm³ com a água. No estudo de Barbosa et al. (2019) para várias granulometrias de açaí a densidade encontrada ficou na faixa de 1,477–1,527 g/cm³.

A densidade do resíduo de açaí é comparável a outros resíduos lignocelulósicos, como as cascas de noz (1,421 g/cm³), avelã (1,437 g/cm³) e girassol (1,379 g/cm³) (Barczewski; Sałasińska; Szulc, 2019). Esse valor é um pouco maior que a densidade das cascas de café (1,30 g/cm³) (Gonçalves et al., 2021a), pó da casca de mandioca (1,19 g/cm³), banana (1,27 g/cm³) (Mbozo'o et al., 2024) e de grãos de mubafo (1,18 g/cm³) (Parfait et al., 2020); contudo, é significativamente menor que o de cargas sintéticas como Al₂O₃ (3,95 g/cm³), SiC (3,2 g/cm³) e Al (2,7 g/cm³) (Nayak et al., 2022). Desta forma, pode-se inferir que o açaí pode ser empregado na produção de compósitos de média ou alta densidade, sendo necessário ajustes de formulação para conseguir compósitos de baixa densidade. A Tabela 10 apresenta um resumo das densidades descritas.

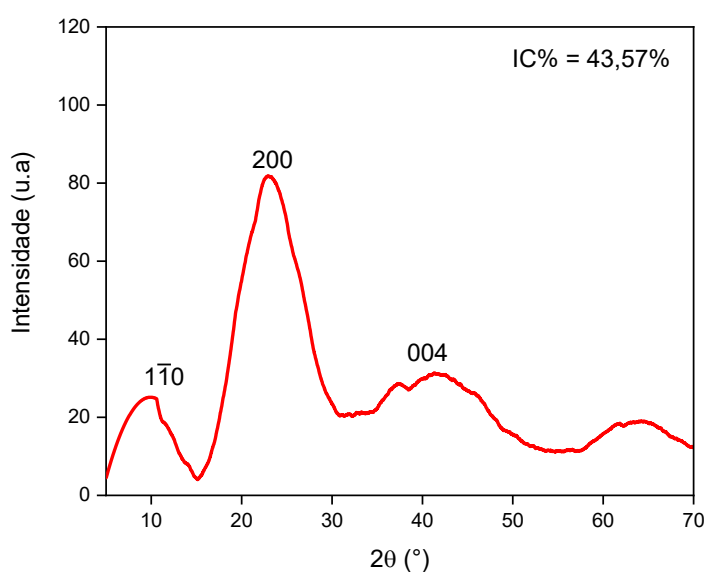
Tabela 10 – Resumo comparativo das densidades discutidas nessa sessão.

Material	Densidade (g/cm ³)	Referência
Semente de açaí (etanol)	1,390	Dados do presente estudo
Semente de açaí (água)	1,431	Dados do presente estudo
Semente de açaí	1,477–1,527	BARBOSA et al., 2019
Semente de jujuba	1,4	SRINIVASAN; JAYARAMAN, 2024
Resíduo da casca de café	1,3	GONÇALVES et al., 2021
Casca de noz (<i>Juglans regia</i>)	1,421	BARCZEWSKI; SAŁASIŃSKA; SZULC, 2019
Casca de avelã (<i>Corylus avellana</i>)	1,437	BARCZEWSKI; SAŁASIŃSKA; SZULC, 2019
Casca de girassol (<i>Helianthus annuus</i> L.)	1,379	BARCZEWSKI; SAŁASIŃSKA; SZULC, 2019
Pó da casca de mandioca	1,19	MBOZO'O et al., 2024
Casca de banana	1,27	MBOZO'O et al., 2024
Cascas dos frutos de mubafo	1,18	PARFAIT et al., 2020
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	3,95	NAYAK et al., 2022
Carboneto de silício (SiC)	3,2	NAYAK et al., 2022
Alumínio (Al)	2,7	NAYAK et al., 2022

4.1.4 Caracterização por Difração de raios-X

O resultado da caracterização estrutural/cristalográfica por difração de raios X é apresentado na Figura 33.

Figura 33 – Difração de raios-X do açaí in natura.



Fonte: Autoria própria, 2026.

De acordo com a indexação 4114994 – ICSD, o difratograma de raios X das partículas de açaí, apresentado na Figura 33, exibe três eventos característicos relacionados às frações cristalina e amorfa de materiais lignocelulósicos: um pico em $2\theta = 23^\circ$ atribuído ao plano (200), relacionado à celulose cristalina tipo I (Azevedo et al., 2021; Barros et al., 2021; Demosthenes et al., 2020); dois halos em torno de $2\theta = 10^\circ$ e $2\theta = 37^\circ$, correspondentes aos planos (1 $\bar{1}$ 0) e (004) (Yacob et al., 2024), respectivamente, sendo o primeiro proveniente de uma região amorfa e o outro oriundo da presença de celulose do tipo I, com menor intensidade intensa (Camillo, 2023; Silva et al., 2023).

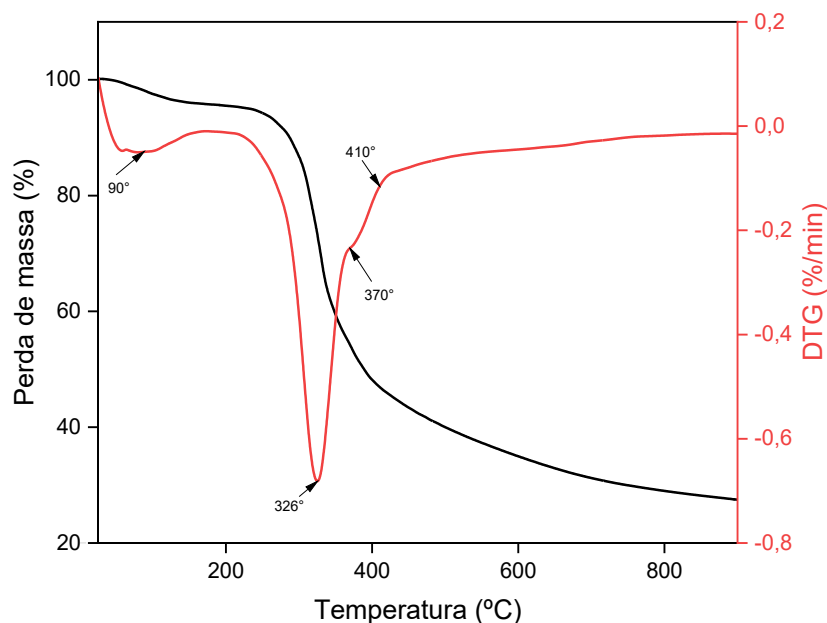
O índice de cristalinidade (IC) para o pó de açaí *in natura* foi de 43,57%, calculado conforme o método de Segal et al. (1959). Esse resultado é superior aos reportados por Barros et al. (2021) (IC = 34%) e Santos et al. (2021) (IC = 23%) para as sementes de açaí. Em comparação às fibras de açaí, o valor observado neste estudo supera o apresentado por Tavares et al. (2020) (IC = 31,3%), mas é inferior ao registrado por Silva et al. (2023) ($54,6 \pm 2,0\%$). Comparado a outros reforços lignocelulósicos, como o ubim (IC = 66%) (Marchi et al., 2022) e titica vine (IC = 78,3%) relatado por Cunha et al. (2022). De forma geral, os açaís apresentam índice de cristalinidade inferior a muitos reforços lignocelulósicos, todavia, isso não inviabiliza sua aplicação como agente de reforço ou preenchimento em compósitos poliméricos.

A coexistência de regiões cristalinas e amorfas nas partículas de açaí pode influenciar a interação interfacial com a matriz de poliuretano de mamona. As regiões amorfas, com maior acessibilidade de grupos hidroxila, podem oferecer mais sítios para interações químicas ou físicas com a matriz, enquanto as regiões cristalinas contribuem para a integridade estrutural das partículas. Essa dualidade da partícula de açaí o torna promissor para a fabricação de compósitos, quando misturado com o PUOM.

4.1.5 Análise Termogravimétrica

O comportamento térmico das partículas de caroço de açaí foi avaliado por análise termogravimétrica (TGA) e por sua derivada (DTG), permitindo identificar os principais eventos de perda de massa ao longo do aquecimento. A Figura 34 apresenta a curva TGA, em preto, e a curva DTG, em vermelho, obtidas no intervalo de 20 °C a 1000 °C. Observa-se que o material apresenta perda de massa progressiva durante o ensaio, característica associada à degradação térmica dos constituintes lignocelulósicos e à formação gradual de resíduo final.

Figura 34 – Gráfico de TGA e DTG do açaí.



Fonte: Autoria própria, 2026.

A análise termogravimétrica das partículas de caroço de açaí revelou três eventos principais de perda de massa. O primeiro evento, observado entre 45 °C e 140 °C, com pico na curva DTG em aproximadamente 90 °C, correspondeu a uma perda de massa inicial de 3,15%. Esse comportamento está relacionado, principalmente, à evaporação da água adsorvida e da umidade presente nas partículas de açaí (Araújo et al., 2023; Santos et al., 2021).

O segundo estágio de degradação ocorre em uma faixa mais ampla, iniciando-se por volta de 230°C e estendendo-se até aproximadamente 370 °C, com um pico proeminente na curva DTG em 326 °C, nesta etapa, a perda de massa do açaí é equivalente a 22,76% da massa inicial e é atribuída principalmente à decomposição da hemicelulose e da celulose amorfa, além do início da degradação da lignina, conforme consistentemente relatado na literatura, conforme relatado por Araújo et al. (2023), Oliveira et al. (2021) e Oliveira et al. (2022).

O terceiro evento foi identificado entre aproximadamente 370 °C e 410 °C, com pico na curva DTG em torno de 370 °C. Essa etapa apresentou perda de massa de 47,59% e está associada, predominantemente, à decomposição da celulose cristalina, juntamente com a continuidade da degradação da lignina. A celulose tende a se decompor em uma faixa de

temperatura mais estreita e definida, enquanto a lignina apresenta degradação mais lenta e distribuída ao longo de uma faixa térmica mais ampla (Oliveira et al., 2022).

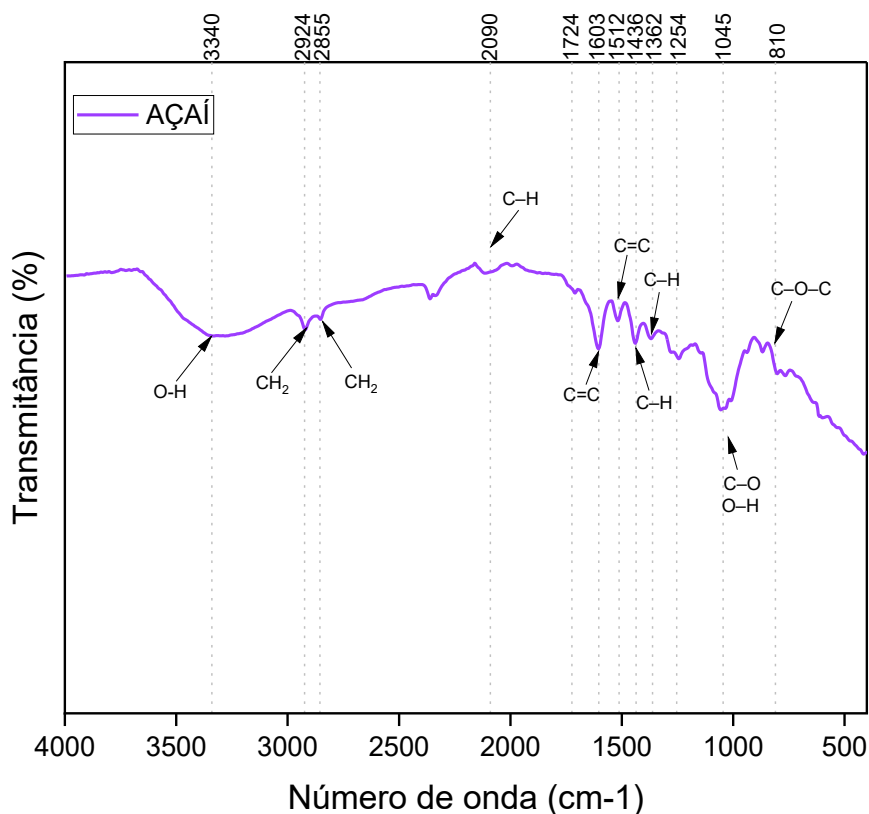
No final do ensaio, a 900 °C, a curva TGA indicou a permanência de aproximadamente 26% da massa inicial, correspondente ao resíduo carbonáceo/inorgânico formado durante a degradação térmica em atmosfera inerte. Dessa forma, os resultados de TGA/DTG indicam que as partículas de açaí apresentam degradação térmica progressiva, com principais eventos de perda de massa associados à umidade e à decomposição dos constituintes lignocelulósicos. Embora não tenha sido observado um patamar de estabilidade térmica plenamente definido até o final do ensaio, as principais etapas de degradação ocorreram em temperaturas superiores às aquelas normalmente empregadas no processamento dos compósitos de PUOM, indicando compatibilidade térmica do resíduo com a rota de fabricação adotada neste trabalho.

4.1.6 Espectros FTIR do açaí

A caracterização por espectroscopia vibracional no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foi realizada com o objetivo de identificar os principais grupos funcionais presentes nas partículas de caroço de açaí. Essa análise é importante por permitir a identificação de bandas características de materiais lignocelulósicos, associadas principalmente à presença de celulose, hemicelulose e lignina. Além disso, o FTIR auxilia na verificação de grupos químicos potencialmente envolvidos na interação com a matriz de poliuretano, como hidroxilas (O–H), ligações C–H, C=O, C–O e C–O–C.

A Figura 35 apresenta o espectro de FTIR das partículas de açaí, bem como as principais bandas identificadas. Uma banda larga e proeminente, observada em aproximadamente 3340 cm^{-1} , é atribuída à vibração de estiramento dos grupos hidroxila (O–H), confirmando a presença de componentes lignocelulósicos como celulose, hemicelulose e lignina (Cruz et al., 2023; Martins et al., 2021b; Pinheiro et al., 2023; Tavares et al., 2020). Na região entre 2924 e 2855 cm^{-1} , as bandas são associadas ao alongamento assimétrico dos grupos CH_2 presentes na celulose e hemicelulose (Cruz et al., 2023; Martins et al., 2021b). A vibração de alongamento simétrico da ligação C–H, também relacionada à celulose e hemicelulose, é identificada pela banda em 2090 cm^{-1} (Almeida et al., 2025).

Figura 35 – Espectro de FTIR do açai.



Fonte: Autoria própria, 2026.

As bandas em 1603 e 1512 cm^{-1} são características dos modos de vibração C=C de grupos aromáticos, indicando a presença de lignina (Azevedo et al., 2021; Camillo et al., 2023; Martins et al., 2021b; Rosa et al., 2025; Tavares et al., 2020). A deformação de C-H (grupos metil e metileno) na lignina é evidenciada pela banda em 1436 cm^{-1} (Chwastowski; Staroń, 2022; Tavares et al., 2020). Enquanto a banda em 1362 cm^{-1} também se relaciona à flexão da ligação C-H (Rosa et al., 2025). Estruturas aromáticas da lignina são ainda atribuídas à banda em 1254 cm^{-1} (Almeida et al., 2025).

A banda em 1045 cm^{-1} surge devido ao estiramento das ligações C-O e à deformação dos grupos O-H encontrados em polissacarídeos (Azevedo et al., 2021; Chwastowski; Staroń, 2022). Finalmente, a banda em 810 cm^{-1} é um indicativo das vibrações de estiramento C-O-C da ligação glicosídica, caracterizando a estrutura polissacarídica do material (Cruz et al., 2023; Martins et al., 2021b; Rosa et al., 2025).

As principais bandas observadas no espectro de FTIR das partículas de caroço de açaí estão resumidas na Tabela 11, juntamente com suas atribuições vibracionais e respectivas referências.

Tabela 11 – Principais bandas no espectro de FTIR das partículas de caroço de açaí.

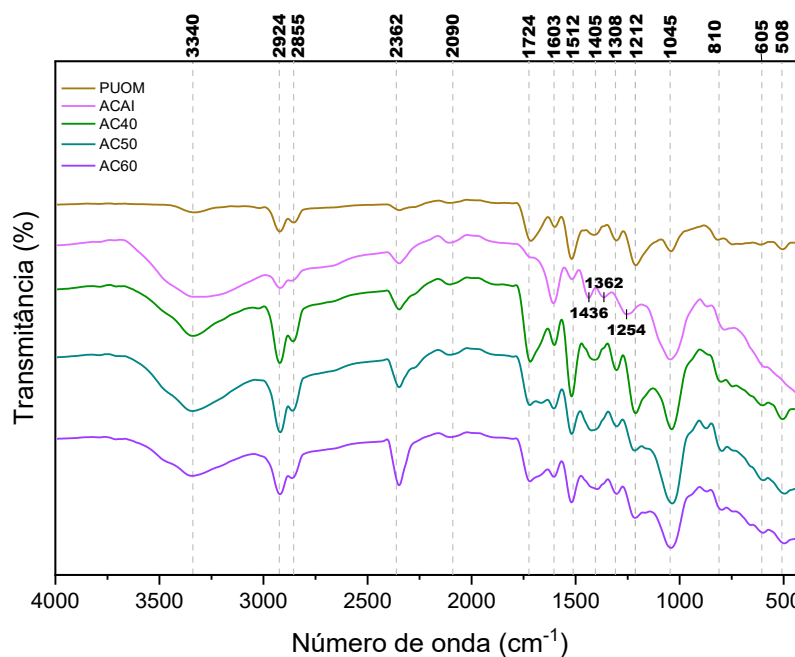
Número de onda (cm ⁻¹)	Atribuição	Referência
~3340	Estiramento O–H associado à celulose, hemicelulose e lignina.	Cruz et al. (2023); Martins et al. (2021b); Pinheiro et al. (2023); Tavares et al. (2020)
2924–2855	Estiramento assimétrico de CH ₂ da celulose e hemicelulose.	Cruz et al. (2023); Martins et al. (2021b)
2090	Estiramento simétrico C–H associado à celulose e hemicelulose.	Almeida et al. (2025)
1603 e 1512	Vibrações C=C de grupos aromáticos associados à lignina.	Azevedo et al. (2021); Camillo et al. (2023); Martins et al. (2021b); Rosa et al. (2025); Tavares et al. (2020)
1436	Deformação C–H de grupos metil e metileno da lignina.	Chwastowski; Staroń (2022); Tavares et al. (2020)
1362	Flexão da ligação C–H.	Rosa et al. (2025)
1254	Estruturas aromáticas associadas à lignina.	Almeida et al. (2025)
1045	Estiramento C–O e deformação O–H de polissacarídeos.	Azevedo et al. (2021); Chwastowski; Staroń (2022)
810	Estiramento C–O–C da ligação glicosídica.	Cruz et al. (2023); Martins et al. (2021b); Rosa et al. (2025)

4.2 Caracterização dos compósitos

4.2.1 Espectroscopia Vibracional no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A Figura 36 apresenta os espectros de FTIR e as bandas identificadas para as matérias-primas, açaí e CUPO, bem como para os compósitos produzidos (AC40, AC50 e AC60).

Figura 36 – Espectro de FTIR das matérias primas e compósitos produzidos.



Fonte: Autoria própria, 2026.

A banda na região $3329\text{--}3352\text{ cm}^{-1}$ está associada ao estiramento N–H do grupo uretano, com contribuição de grupos –OH provenientes da matriz e dos constituintes lignocelulósicos (celulose, hemicelulose e lignina), apresentando alargamento devido à formação de ligações de hidrogênio (Weng et al., 2024; Zanini et al., 2022; Zhang et al., 2021). Em comparação às matérias-primas, observa-se um leve deslocamento dessa banda para maiores números de onda (de 3329 cm^{-1} para $3341\text{--}3352\text{ cm}^{-1}$) com o aumento da fração volumétrica de açaí, sugerindo modificações nas interações intermoleculares, possivelmente associadas a rearranjos nas ligações de hidrogênio entre a matriz e as partículas.

As bandas em $2924\text{--}2920\text{ cm}^{-1}$ e $2855\text{--}2850\text{ cm}^{-1}$ são atribuídas aos estiramentos C–H assimétrico e simétrico de grupos alifáticos, respectivamente, presentes em ambas as fases (Cruz et al., 2023; Głowińska; Datta; Parcheta, 2017; Martins et al., 2021b). Na amostra AC40, a sobreposição das contribuições espectrais do COPU e do açaí resulta em maior intensidade relativa nessas regiões (Lee et al., 2025; Poletto; Zattera, 2013). Entretanto, com a redução do teor volumétrico de COPU nas amostras AC50 e AC60, observa-se diminuição dessas

intensidades, indicando a redução da contribuição relativa da matriz e o aumento da influência da fase lignocelulósica no comportamento vibracional do compósito.

Em todas as composições, a ausência de bandas na faixa $2270\text{--}2266\text{ cm}^{-1}$, característica do grupo --NCO , dentro do limite de detecção da técnica FTIR, indica o consumo desses grupos durante a reação, evidenciando a conversão completa dos grupos isocianato e a formação da matriz poliuretana (Weng et al., 2024; Zhang; Wan, 2025).

As bandas na região $1713\text{--}1724\text{ cm}^{-1}$ são atribuídas à combinação do estiramento C=O do grupo uretano com contribuições de carbonilas presentes na hemicelulose e na lignina, enquanto a banda em 1597 cm^{-1} é associada ao estiramento C=C de anéis aromáticos da lignina e da matriz COPU, com possível contribuição de deformações N-H (Camillo et al., 2023; Chen; Wu; Chen, 2021; Głowińska; Datta; Parcheta, 2017; Martins et al., 2021b; Rosa et al., 2025; Silva et al., 2025; Tavares et al., 2020; Zanini et al., 2022).

As bandas em 1512 cm^{-1} e 1412 cm^{-1} estão associadas ao acoplamento entre a flexão N-H e o estiramento C-N (característico da Amida II) e à deformação de grupos CH_2 da matriz (Głowińska; Datta; Parcheta, 2017; Rabelo Aparício et al., 2024; Zanini et al., 2022; Zhang; Wan, 2025). A banda em 1369 cm^{-1} , correspondente à flexão da ligação C-H , evidencia a contribuição da fase lignocelulósica (Rosa et al., 2025), enquanto a banda em 1308 cm^{-1} é atribuída ao estiramento C-N do poliuretano (Rabelo Aparício et al., 2024; Zanini et al., 2022).

As bandas nas faixas $1219\text{--}1215\text{ cm}^{-1}$ e $1045\text{--}1038\text{ cm}^{-1}$ são atribuídas ao estiramento C-O-C da matriz (Azevedo et al., 2021; Chwastowski; Staroń, 2022). Na região de $1018\text{--}1011\text{ cm}^{-1}$ e $868\text{--}802\text{ cm}^{-1}$, observam-se bandas associadas ao estiramento C-O em polissacarídeos e ao estiramento C-O-C da ligação β -glicosídica (Cruz et al., 2023; Martins et al., 2021b; Rosa et al., 2025), respectivamente. Por fim, as bandas na faixa de $764\text{--}609\text{ cm}^{-1}$ são atribuídas às vibrações fora do plano de C-H de anéis aromáticos da matriz COPU (Chen; Wu; Chen, 2021).

Adicionalmente, a banda em torno de 2361 cm^{-1} foi atribuída ao CO_2 atmosférico. O aumento de sua intensidade nas formulações com maior teor de açaí pode estar associado ao maior aprisionamento ou adsorção de CO_2 , possivelmente favorecido pelo aumento da fração de vazios do compósito. (Culp et al., 2013).

As principais bandas observadas nos espectros de FTIR dos compósitos PUOM/açaí estão resumidas na Tabela 12, permitindo correlacionar os números de onda às contribuições da matriz, das partículas lignocelulósicas e das interações matriz/reforço.

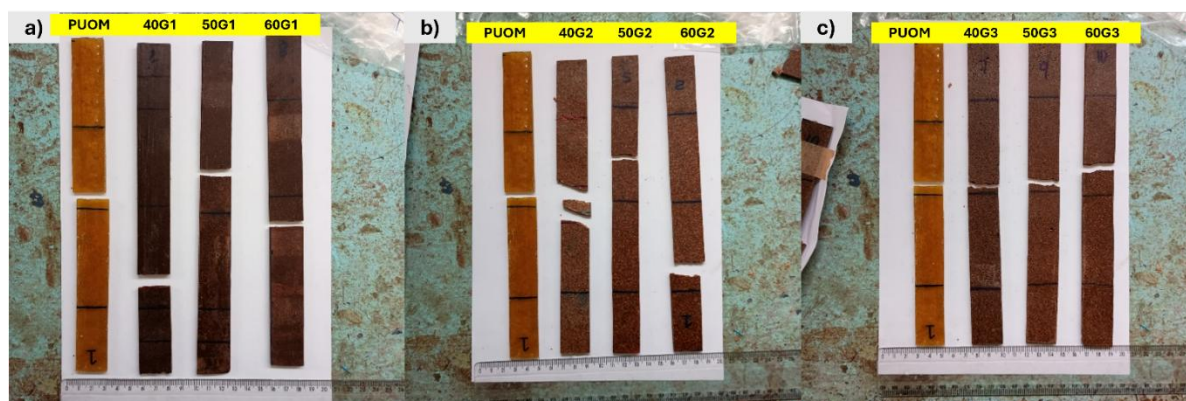
Tabela 12 – Principais bandas identificadas nos espectros de FTIR dos compósitos PUOM/açaí.

Número de onda (cm ⁻¹)	Atribuição	Referência
3329–3352	Estiramento N–H do grupo uretano, com contribuição de grupos O–H da matriz e dos constituintes lignocelulósicos; banda associada a ligações de hidrogênio.	Weng et al. (2024); Zanini et al. (2022); Zhang et al. (2021)
2924–2920	Estiramento assimétrico C–H de grupos alifáticos presentes na matriz e no açaí.	Cruz et al. (2023); Głowińska; Datta; Parcheta (2017); Martins et al. (2021b)
2855–2850	Estiramento simétrico C–H de grupos alifáticos presentes na matriz e no açaí.	Cruz et al. (2023); Głowińska; Datta; Parcheta (2017); Martins et al. (2021b)
2270–2266	Região característica do grupo –NCO; ausência da banda indica consumo dos grupos isocianato.	Weng et al. (2024); Zhang; Wan (2025)
1713–1724	Estiramento C=O do grupo uretano, com contribuição de carbonilas da hemicelulose e lignina.	Camillo et al. (2023); Chen; Wu; Chen (2021); Głowińska; Datta; Parcheta (2017); Martins et al. (2021b); Rosa et al. (2025); Silva et al. (2025); Tavares et al. (2020); Zanini et al. (2022)
1597	Estiramento C=C de anéis aromáticos da lignina e da matriz COPU, com possível contribuição de deformações N–H.	Camillo et al. (2023); Chen; Wu; Chen (2021); Głowińska; Datta; Parcheta (2017); Martins et al. (2021b); Rosa et al. (2025); Silva et al. (2025); Tavares et al. (2020); Zanini et al. (2022)
1512	Acoplamento entre flexão N–H e estiramento C–N, característico da Amida II.	Głowińska; Datta; Parcheta (2017); Rabelo Aparício et al. (2024); Zanini et al. (2022); Zhang; Wan (2025)
1412	Deformação de grupos CH ₂ da matriz.	Głowińska; Datta; Parcheta (2017); Rabelo Aparício et al. (2024); Zanini et al. (2022); Zhang; Wan (2025)
1369	Flexão da ligação C–H, associada à contribuição da fase lignocelulósica.	Rosa et al. (2025)
1308	Estiramento C–N do poliuretano.	Rabelo Aparício et al. (2024); Zanini et al. (2022)
1219–1215	Estiramento C–O–C da matriz.	Azevedo et al. (2021); Chwastowski; Staroń (2022)
1045–1038	Estiramento C–O–C da matriz.	Azevedo et al. (2021); Chwastowski; Staroń (2022)
1018–1011	Estiramento C–O em polissacarídeos.	Cruz et al. (2023); Martins et al. (2021b); Rosa et al. (2025)
868–802	Estiramento C–O–C da ligação β-glicosídica.	Cruz et al. (2023); Martins et al. (2021b); Rosa et al. (2025)
764–609	Vibrações fora do plano de C–H de anéis aromáticos da matriz COPU.	Chen; Wu; Chen (2021)
~2361	Estiramento assimétrico do CO ₂ atmosférico.	Culp et al. (2013)

4.2.2 Ensaio de Tração dos compósitos produzidos

O ensaio de tração seguiu os parâmetros da norma acordo com a norma ASTM D3039-17, nas dimensões de 25 x 125 x 3,00 mm. A Figura 37 apresenta os aspectos visuais dos corpos de provas após o ensaio de tração.

Figura 37 – Aspectos dos compósitos pós ensaio de tração: (a) G1, (b) G2 e (c) G3.



Fonte: Autoria própria, 2026.

A Tabela 13 apresenta o resumo dos resultados obtidos no ensaio de tração para os compósitos produzidos com a faixa granulométrica G1.

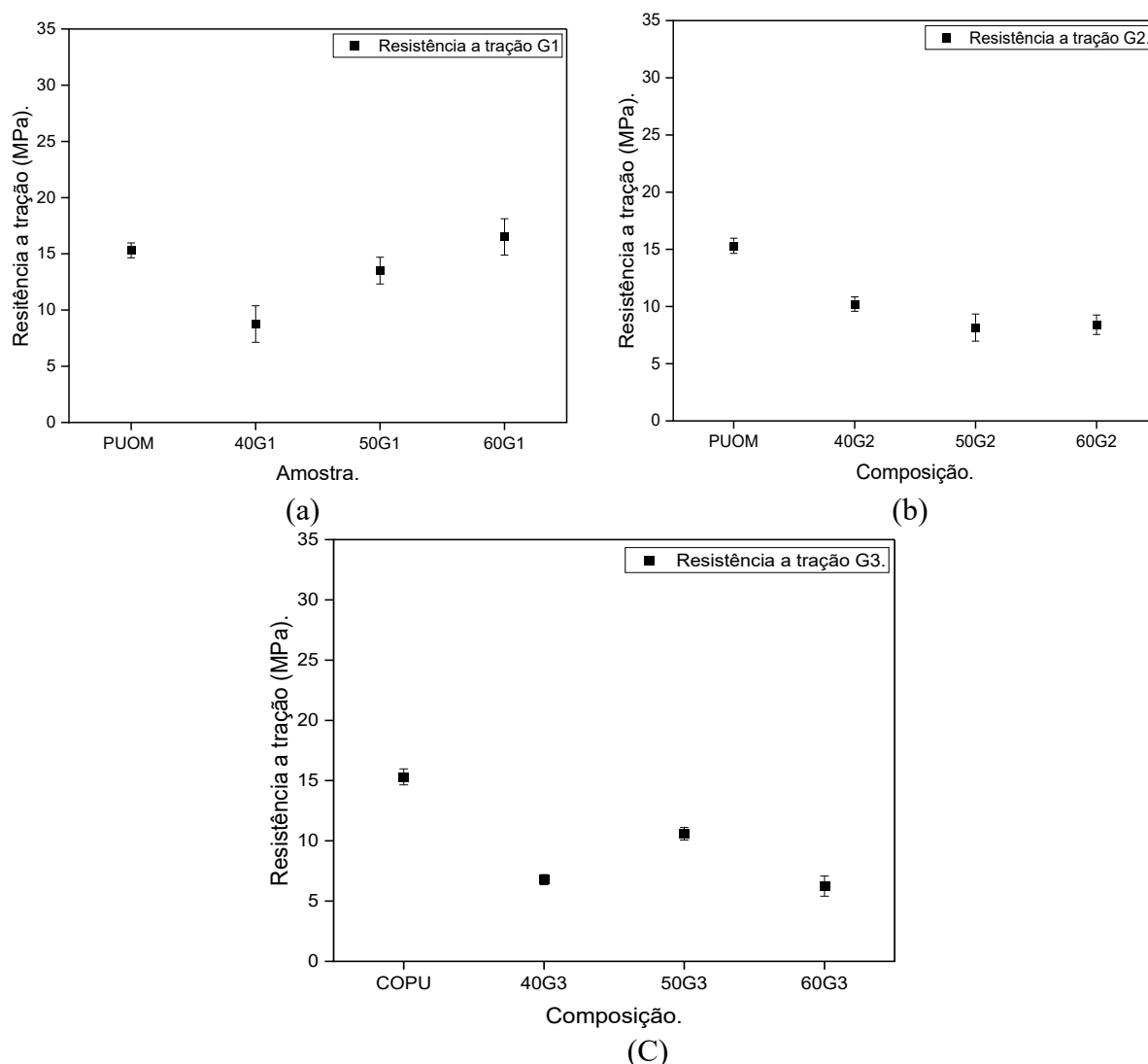
Tabela 13 – Resumo dos resultados das propriedades obtidas em tração.

Composição	Resistência a tração (MPa)	Deformação (mm/mm)	Módulo de Young (GPa)
PUOM	$15,31 \pm 0,66$	$0,135 \pm 0,028$	$0,73 \pm 0,09$
Granulometria 1			
40G1	$8,75 \pm 1,63$	$0,010 \pm 0,005$	$0,92 \pm 0,06$
50G1	$13,51 \pm 1,19$	$0,014 \pm 0,002$	$1,43 \pm 0,23$
60G1	$16,51 \pm 1,62$	$0,021 \pm 0,004$	$1,27 \pm 0,24$
Granulometria 2			
40G2	$10,21 \pm 0,63$	$0,0181 \pm 0,003$	$0,86 \pm 0,24$
50G2	$8,16 \pm 1,18$	$0,0128 \pm 0,002$	$1,03 \pm 0,21$
60G2	$8,41 \pm 0,85$	$0,0127 \pm 0,002$	$1,08 \pm 0,15$
Granulometria 3			
40G3	$6,78 \pm 0,42$	$0,0156 \pm 0,003$	$1,00 \pm 0,11$
50G3	$10,59 \pm 0,52$	$0,0028 \pm 0,001$	$1,80 \pm 0,15$
60G3	$6,25 \pm 0,85$	$0,0034 \pm 0,002$	$1,43 \pm 0,08$

Fonte: Autoria própria, 2026.

Os resultados foram inicialmente organizados por faixa granulométrica, com o objetivo de apresentar o comportamento dos compósitos produzidos em cada condição experimental. Assim, os gráficos individuais apresentados nesta etapa não têm como finalidade estabelecer uma comparação direta entre as granulometrias, mas sim demonstrar a variação da resistência à tração em função da fração volumétrica de açaí dentro de cada grupo granulométrico. A comparação geral entre as faixas G1, G2 e G3 será discutida posteriormente, a partir do gráfico comparativo e da análise conjunta dos valores médios obtidos. A Figura 38 apresenta os gráficos de resistência à tração dos compósitos, organizados individualmente por faixa granulométrica: G1, G2 e G3.

Figura 38 – Gráficos de resistência a tração: a) para compósitos com G1; b) para compósitos com G2 e c) para compósitos com G3



Fonte: Autoria própria, 2026.

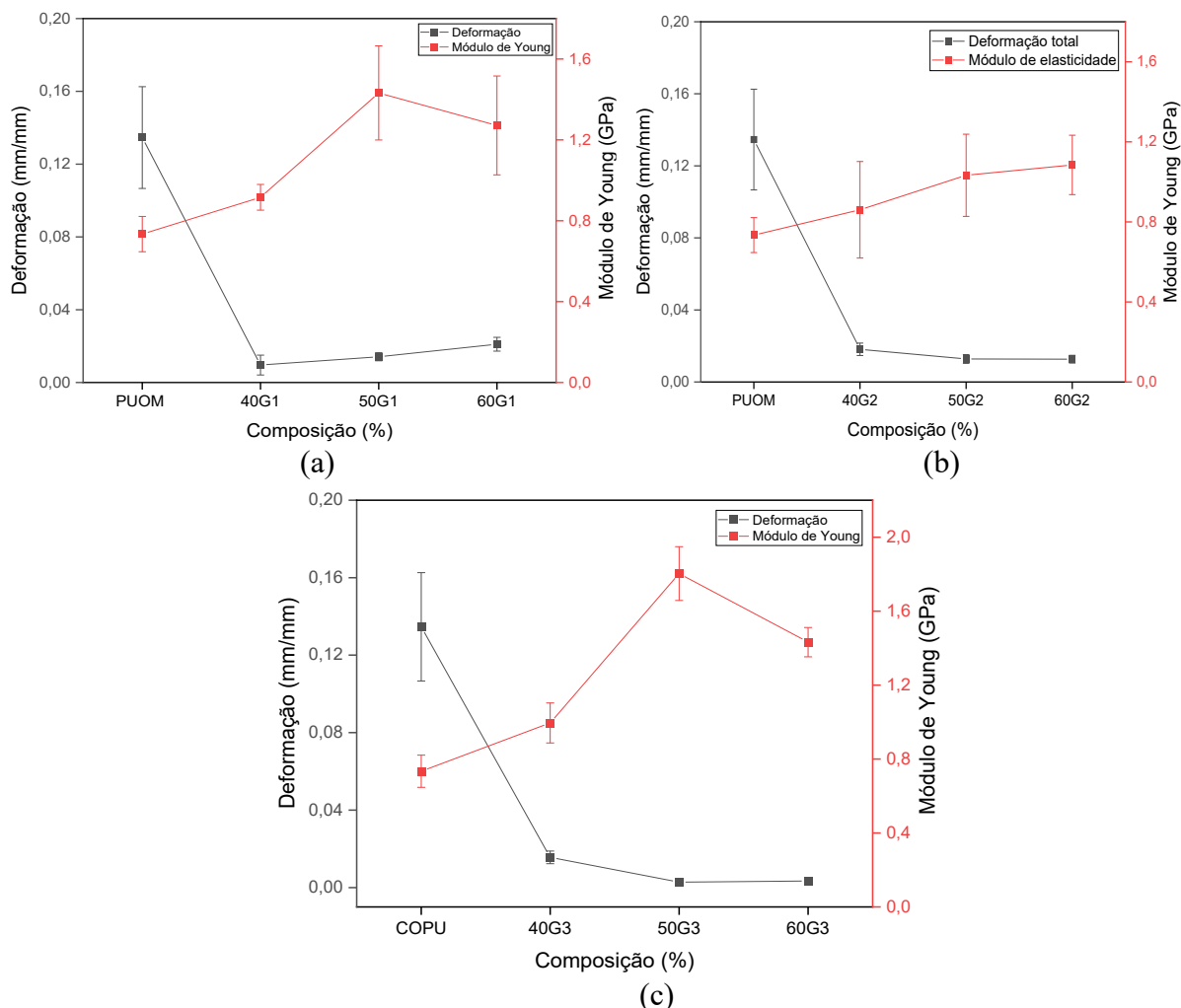
A Tabela 13 apresenta o resumo dos resultados obtidos no ensaio de tração para compósitos produzidos com G1. Com base nos resultados obtidos, a resistência à tração da matriz pura de PUOM foi de $15,31 \pm 0,66$ MPa.

Para as composições com granulometria G1, os valores obtidos foram de $8,75 \pm 1,63$ e $13,51 \pm 1,19$ MPa, para 40G1 e 50G1, respectivamente, correspondendo a reduções de aproximadamente 43% e 12% em comparação a matriz pura. Em contraste, a composição de 60G1 obteve a resistência de $16,51 \pm 1,62$ MPa, representando um aumento na resistência de 8% comparado a matriz pura. O gráfico correspondente à Figura 39 (a) exibe uma não linearidade na curva de resistência à tração, com um comportamento em "U" que, embora incomum, pode ser interpretado, que com partículas menores, em altas concentrações ocorre uma melhor compactação dos particulados dentro da matriz, otimizando a interface e a transferência de carga, resultando na recuperação da resistência na composição 60G1

Para as composições com granulometria G2, os valores de resistência à tração foram de $10,21 \pm 0,63$ MPa, $8,16 \pm 1,18$ MPa e $8,41 \pm 0,85$ MPa para 40G2, 50G2 e 60G2 respectivamente, representando reduções de 33%, 47% e 45% na resistência comparadas à matriz pura. O gráfico 39 (b) mostra uma curva mais linearizada, sugerindo que nenhuma fração volumétrica de G2 atuou como reforço. Isso pode indicar que as partículas de tamanho intermediário não favorecem a adesão interfacial com a matriz de poliuretano de mamona, e o aumento da fração volumétrica não reverte essa tendência, mas sim consolida a degradação das propriedades mecânicas. A estabilização da resistência entre 50G2 e 60G2 pode sinalizar que a rede de partículas atinge uma saturação, porém sem uma contribuição positiva para a resistência.

Nas formulações com granulometria G3 39 (c), os resultados para resistência à tração foram de $6,78 \pm 0,42$ MPa para 40G3, $10,59 \pm 0,52$ MPa para 50G3 e $6,25 \pm 0,85$ MPa para 60G3. Esses valores correspondem a quedas de resistência de 56%, 31% e 59%, respectivamente, em relação ao PUOM puro. O comportamento irregular observado sugere que partículas grossas introduzem defeitos de forma menos controlada, atuando como pontos de concentração de tensão, e resultando em má distribuição e aglomeração, o que leva a uma alta variabilidade e a um comportamento mecânico imprevisível. A Figura 39 apresenta o gráfico de resultados de deformação e módulo de Young para os compósitos produzidos.

Figura 39 – Gráfico de deformação x módulo de Young: A) composições estudadas com G1; b) composições estudadas com G2; c) composições estudadas com g3.



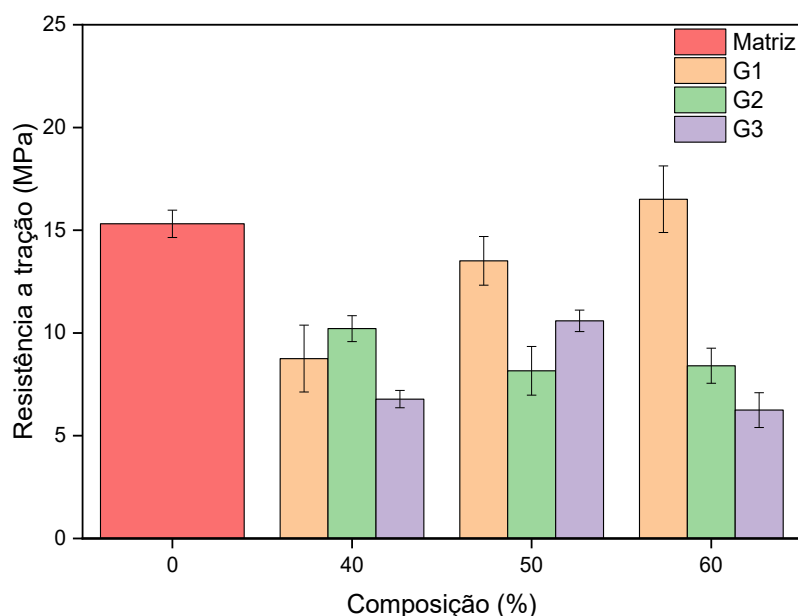
Fonte: Autoria própria, 2026.

Em relação ao módulo de Young, a matriz pura de PUOM apresentou $0,73 \pm 0,09$ GPa. Para as composições 40G1, 50G1 e 60G1, os valores foram de $0,92 \pm 0,06$, $1,43 \pm 0,23$ e $1,27 \pm 0,24$ GPa, respectivamente. As composições 40G2, 50G2 e 60G2 registraram módulos de $0,86 \pm 0,24$, $1,03 \pm 0,21$ e $1,08 \pm 0,15$ GPa. Já para 40G3, 50G3 e 60G3, os valores foram de $1,00 \pm 0,11$, $1,80 \pm 0,15$ e $1,43 \pm 0,08$ GPa, respectivamente.

O aumento consistente do módulo de Young em todas as composições com aço, independentemente da faixa granulométrica, indica um incremento na rigidez do material. Este resultado é esperado, uma vez que as partículas restringem o movimento das cadeias poliméricas, elevando a rigidez de compósitos (Bokobza, 2023). Tais achados reforçam que a adição de particulados de aço à matriz altera o comportamento do material de

predominantemente dúctil para um caráter mais frágil e rígido (Barczewski et al., 2019; Faria et al., 2020b; Konovalov et al., 2023; Weng et al., 2024; Zhang et al., 2021). Essa mudança é consistente com a redução observada nas deformações das composições estudadas. A Figura 40 apresenta graficamente o comparativo de cada faixa volumétrica com os diferentes tamanhos de grãos do estudo.

Figura 40 – gráfico comparativo de resistência a tração.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Observa-se que as composições com G1 tendem a apresentar melhor resistência à tração, atribuída aos particulados menores. Essas partículas mais finas (G1) parecem exercer um efeito de preenchimento progressivo, possivelmente devido à maior área superficial específica, o que pode favorecer a molhabilidade pela resina de poliuretano e a formação de uma interface mais coesa em altas concentrações (Kuan et al., 2021; Ramesh et al., 2022; Wong et al., 2025). As partículas intermediárias (G2) estabilizam a degradação, mas sem recuperação da resistência, um comportamento consistente com a capacidade de partículas de tamanho médio em limitar a propagação de danos sem, contudo, promover uma redistribuição eficiente de tensões (García et al., 2025; Siraj et al., 2022). Por outro lado, as partículas grossas (G3) introduzem a maior heterogeneidade estrutural, resultando em alta dispersão dos resultados e nos menores valores absolutos de resistência. Isso pode ser atribuído à maior concentração de tensões na interface

partícula-matriz e à redução da homogeneidade da microestrutura do compósito (García et al., 2025; Kaya et al., 2024; Ramesh et al., 2022).

De forma geral, apesar de conferir rigidez à matriz de PUOM, a natureza lignocelulósica e o tamanho dos particulados de açaí geralmente não promovem um reforço significativo para o material quando submetido a cargas de tração (Lendvai, 2023). Evidências sugerem que o aumento excessivo da fração de partículas lignocelulósicas pode levar à aglomeração, limitando a formação efetiva de redes de transferência de carga e, consequentemente, reduzindo a eficiência no reforço das propriedades mecânicas. Tais partículas podem, inclusive, atuar como iniciadores de propagação de trinca, um comportamento semelhante ao observado em outros sistemas compósitos com distribuição inadequada de reforços (Dias et al., 2025; Barragán et al., 2024). Além disso, a dispersão inadequada das partículas e a presença de zonas de concentração de tensões podem contribuir para o comportamento observado, impactando negativamente as propriedades mecânicas globais do compósito. Esse efeito é mais pronunciado com particulados maiores, enquanto particulados menores podem, em certas condições, resultar no aumento da resistência à tração (Kuan et al., 2021) como exemplificado pela composição 60G1, a única a superar a matriz pura.

A norma ABNT NBR 14810 solicita ensaio de tração perpendicular e superficial, para validação dos painéis particulados, entretanto, na pesquisa optou-se por utilizar a tração uniaxial a fim de caracterização das formulações propostas, por isso a comparação direta dos resultados de tração não pode ser utilizada em função desta norma, porém estudos prévios encontrados na literatura reportam alguns valores para compósitos semelhantes. (Gonçalves et al., 2021b) reportaram resistência à tração de 9,9 MPa para compósitos de COPU com 20 wt% de partículas de resíduo de café. (Konovalov; Saprykina; Zuev, 2023b) obtiveram 3,7 MPa para compósitos com 30 wt% de particulado de bétula. Cardoso et al. (Cardoso et al., 2025b) reportaram valores inferiores a 2 MPa para compósitos contendo 50–70 wt% de fibras de coco moídas. Com base nisso podemos destacar as composições de 50G1, 60G1, 40G2 e 50G3 como resultados promissores de resistência a tração.

A Tabela 14 apresenta uma comparação entre os principais resultados de resistência à tração obtidos neste estudo e valores reportados na literatura para compósitos poliméricos reforçados com resíduos lignocelulósicos. Para evitar a repetição dos dados já apresentados anteriormente, foram selecionadas a matriz pura de PUOM e as composições com melhor desempenho em cada faixa granulométrica.

Tabela 14 – Comparação da melhor resistência à tração obtida neste estudo com valores reportados na literatura

Referência	Reforço / carga utilizada	Composição / condição	Resistência à tração (MPa)
Este estudo	Sem particulado	PUOM	15,31 ± 0,66
Este estudo	Particulado de caroço de açaí	60G1	16,51 ± 1,62
Gonçalves et al. (2021b)	Partículas de resíduo de café	20 wt%	9,9
Konovalov, Saprykina e Zuev (2023b)	Particulado de bétula	30 wt%	3,7
Cardoso et al. (2025b)	Fibras de coco moídas	50–70 wt%	< 2,00

4.2.2.1 Validação estatística do ensaio de tração

A análise estatística dos resultados de tração foi realizada inicialmente para cada granulometria de forma separada, avaliando-se o efeito da fração volumétrica sobre a resistência à tração, o módulo de Young e a deformação. Posteriormente, realizou-se uma análise conjunta da resistência à tração, considerando os efeitos da granulometria, da fração volumétrica e da interação entre esses fatores. Os resultados da ANOVA e do teste de Tukey são apresentados nas Tabelas 15 a 23.

4.2.2.1.1 ANOVA fator único e teste Tukey para composições com G1

Tabela 15 – ANOVA para as propriedades obtidas no ensaio de tração para G1.

Resistência a tração.						
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	278,8755	3	92,9585	52,19156	1,37E-11	2,946685
Dentro dos grupos	49,87086	28	1,781102			
Total	328,7464	31				
Módulo de Young.						
Entre grupos	2,45651	3	0,818837	26,05387	2,97E-08	2,946685
Dentro dos grupos	0,880001	28	0,031429			
Total	3,33651	31				

Deformação.						
Entre grupos	0,08648	3	0,028827	138,6424	6,63E-17	2,946685
Dentro dos grupos	0,005822	28	0,000208			
Total	0,092301	31				

Fonte: Autoria própria, 2026.

Os resultados da ANOVA mostraram que os valores de F calculado foram superiores ao F crítico e os valores de p permaneceram abaixo do nível de significância de 0,05 para todas as propriedades avaliadas. Dessa forma, rejeitou-se a hipótese nula, confirmando-se a existência de diferenças significativas entre as médias das formulações com G1. Para identificar quais grupos diferiram entre si, aplicou-se o teste de Tukey, apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 – Tukey para as propriedades em tração para G1.

Composição	PUOM	40G1	50G1	60G1
Resistencia a tração/d.m.s = 2,180				
PUOM	0,00	6,56	1,80	1,19
40G1	6,56	0,00	4,76	7,75
50G1	1,80	4,76	0,00	3,00
60G1	1,19	7,75	3,00	0,00
Módulo de elasticidade/d.m.s =0,290				
PUOM	0,000	0,182	0,698	0,537
40G1	0,182	0,000	0,516	0,355
50G1	0,698	0,516	0,000	0,161
60G1	0,537	0,355	0,161	0,000
Deformação/d.m.s =0,0236				
PUOM	0,000	0,125	0,120	0,114
40G1	0,125	0,000	0,005	0,011
50G1	0,120	0,005	0,000	0,007
60G1	0,114	0,011	0,007	0,000

Fonte: Autoria própria, 2026.

O teste de Tukey indicou diferenças mínimas significativas (DMS) de 2,180 MPa para a resistência à tração, 0,290 GPa para o módulo de Young e 0,0236 mm/mm para a deformação.

Para a resistência à tração, a composição 40G1 apresentou redução significativa em relação à matriz pura e às formulações 50G1 e 60G1. As composições 50G1 e 60G1 apresentaram comportamento estatisticamente equivalente ao PUOM, embora 60G1 tenha alcançado a maior média do grupo.

Quanto ao módulo de Young, 50G1 e 60G1 apresentaram valores significativamente superiores aos da matriz pura, mas não diferiram entre si. Para a deformação, todas as

composições reforçadas apresentaram redução significativa em relação ao PUOM, sendo estatisticamente equivalentes entre si. Esses resultados demonstram que os particulados G1 aumentaram a rigidez e reduziram a capacidade deformacional dos compósitos, principalmente nas maiores frações volumétricas.

4.2.2.1.2 ANOVA fator único e teste Tukey para composições com G2

Tabela 17 – ANOVA para as propriedades obtidas no ensaio de tração para G2.

Resistência a tração.						
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	264,8608	3	88,28695	118,8412	4,93E-16	2,946685
Dentro dos grupos	20,80115	28	0,742898			
Total	285,662	31				
Módulo de Young.						
Entre grupos	0,62239	3	0,207463	6,388966	0,001952	2,946685
Dentro dos grupos	0,90922	28	0,032472			
Total	1,531611	31				
Deformação.						
Entre grupos	0,62239	3	0,207463	6,388966	0,001952	2,946685
Dentro dos grupos	0,90922	28	0,032472			
Total	1,531611	31				

Fonte: Autoria própria, 2026.

Os resultados da ANOVA indicaram efeito significativo da fração volumétrica sobre as propriedades avaliadas, portanto, rejeitou-se a hipótese nula e aplicou-se o teste de Tukey, conforme apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 – Tukey para as propriedades em tração para G2.

Composição	PUOM	40G2	50G2	60G2
Resistencia a tração/d.m.s = 1,408				
PUOM	0,00	5,10	7,15	6,91
40G2	5,10	0,00	2,05	1,81
50G2	7,15	2,05	0,00	0,25
60G2	6,91	1,81	0,25	0,00
Módulo de elasticidade/d.m.s =0,294				
PUOM	0,000	0,126	0,299	0,351
40G2	0,126	0,000	0,173	0,224
50G2	0,299	0,173	0,000	0,052
60G2	0,351	0,224	0,052	0,000
Deformação/d.m.s =0,023				
PUOM	0,000	0,116	0,122	0,122
40G2	0,116	0,000	0,005	0,006
50G2	0,122	0,005	0,000	0,000
60G2	0,122	0,006	0,000	0,000

Fonte: Autoria própria, 2026.

O teste de Tukey indicou diferenças mínimas significativas (DMS) de 1,408 MPa para a resistência à tração, 0,294 GPa para o módulo de Young e 0,023 mm/mm para a deformação.

Para a resistência à tração, todas as composições com G2 apresentaram redução significativa em relação à matriz pura. A composição 40G2 também diferiu de 50G2 e 60G2, enquanto estas não diferiram entre si, indicando estabilização da resistência nas maiores frações volumétricas.

Em relação ao módulo de Young, apenas 60G2 diferiu significativamente da matriz pura, enquanto as composições reforçadas não apresentaram diferenças entre si. Para a deformação, todas as formulações com G2 apresentaram redução significativa em relação ao PUOM, mas foram estatisticamente equivalentes entre si. Assim, a incorporação de G2 reduziu a capacidade deformacional do material, enquanto o aumento da rigidez ocorreu de forma mais discreta.

4.2.2.1.3 ANOVA fator único e teste Tukey para composições com G3

Tabela 19 – ANOVA para as propriedades obtidas no ensaio de tração para G3.

Resistência a tração						
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	421,8652	3	140,6217	350,3749	2,68E-22	2,946685
Dentro dos grupos	11,2377	28	0,401346			
Total	433,1029	31				
Módulo de elasticidade						
Entre grupos	5,360681	3	1,786894	152,9763	1,82E-17	2,946685
Dentro dos grupos	0,327064	28	0,011681			
Total	5,687745	31				
Deformação						
Entre grupos	0,098148	3	0,032716	164,2993	7,1E-18	2,946685
Dentro dos grupos	0,005575	28	0,000199			
Total	0,103724	31				

Fonte: Autoria própria, 2026.

Novamente os resultados da ANOVA indicaram efeito significativo da fração volumétrica sobre as propriedades avaliadas, portanto, rejeitou-se a hipótese nula e aplicou-se o teste de Tukey. A Tabela 20 apresenta os resultados do teste de Tukey.

Tabela 20 – Tukey para as propriedades em tração para G3.

Composição	PUOM	40G3	50G3	60G3
Resistencia a tração/d.m.s =1,035				
PUOM	0,00	8,53	4,72	9,06
40G3	8,53	0,00	3,81	0,53
50G3	4,72	3,81	0,00	4,34
60G3	9,06	0,53	4,34	0,00
Módulo de elasticidade/d.m.s =0,177				
PUOM	0,000	0,261	1,069	0,698
40G3	0,261	0,000	0,808	0,437
50G3	1,069	0,808	0,000	0,371
60G3	0,698	0,437	0,371	0,000
Deformação/d.m.s =0,0230				
PUOM	0,000	0,119	0,132	0,131
40G3	0,119	0,000	0,013	0,012
50G3	0,132	0,013	0,000	0,001
60G3	0,131	0,012	0,001	0,000

Fonte: Autoria própria, 2026.

O teste de Tukey indicou diferenças mínimas significativas (DMS) de 1,035 MPa para a resistência à tração, 0,177 GPa para o módulo de Young e 0,0230 mm/mm para a deformação.

Para a resistência à tração, todas as composições com G3 apresentaram redução significativa em relação à matriz pura. A formulação 50G3 apresentou resistência superior a 40G3 e 60G3, enquanto estas não diferiram entre si, evidenciando um comportamento não linear com o aumento da fração volumétrica.

Quanto ao módulo de Young, todas as formulações com G3 diferiram significativamente da matriz pura e entre si, demonstrando que a incorporação dos particulados alterou a rigidez dos compósitos. Para a deformação, todas as composições reforçadas apresentaram redução significativa em relação ao PUOM, mas não diferiram entre si. Dessa forma, os particulados G3 tornaram os compósitos menos deformáveis, embora não tenham promovido melhoria na resistência à tração.

4.2.2.1.4 ANOVA fator duplo com repetição

Para a análise conjunta dos fatores, foi realizada uma ANOVA de dois fatores com repetição, considerando a granulometria e a fração volumétrica dos particulados. Essa análise, aplicada apenas à resistência à tração, permitiu verificar os efeitos individuais desses fatores e a interação entre eles, conforme apresentado na Tabela 21.

Tabela 21 – Anova bifatorial com repetição para resistência a tração.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	64,8817899	2	32,4408949	28,1376	1,9E-09	3,14281
Colunas	340,857218	2	170,428609	147,821	1,6E-24	3,14281
Interações	289,561235	4	72,3903087	62,7877	2,7E-21	2,51767
Dentro	72,6351339	63	1,15293863			
Total	767,935377	71				

Fonte: Autoria própria, 2026.

A ANOVA bifatorial com repetição mostrou que tanto a granulometria quanto a fração volumétrica têm efeito estatisticamente significativo sobre a resistência à tração, pois os valores de F para amostra, colunas e interação foram superiores aos respectivos F crítico e os valores

de p ficaram abaixo de 0,05. Em termos práticos, isso indica que, em média, G1, G2 e G3 não apresentam a mesma resistência, assim como as frações de 40%, 50% e 60% também não são equivalentes.

A interação significativa entre granulometria e fração volumétrica revela que o efeito de variar a fração de particulados depende da granulometria considerada, e vice-versa. Portanto, a resistência à tração deve ser interpretada a partir da combinação específica entre fração volumétrica e tamanho de partícula, e não pela análise isolada de cada fator. A Tabela 22 apresenta o teste de Tukey para $k=3$.

Tabela 22 – Tukey para $k=3$ da resistência a tração.

Tukey de dois fatores com repetição para a resistência a tração para $k=3$ / D.M.S = 1,29			
	G1	G2	G3
G1	0,00	4,00	5,05
G2	4,00	0,00	1,05
G3	5,05	1,05	0,00

Fonte: Autoria própria, 2026.

O teste de Tukey com $k = 3$, utilizando uma DMS de 1,29 MPa, demonstrou que a granulometria G1 apresentou resistência média significativamente superior às granulometrias G2 e G3. Por outro lado, G2 e G3 não diferiram significativamente entre si. Esses resultados indicam que, considerando conjuntamente as frações volumétricas estudadas, as partículas mais finas proporcionaram o melhor desempenho médio em tração.

Para comparar individualmente as nove combinações entre granulometria e fração volumétrica, aplicou-se o teste de Tukey com $k = 9$ e DMS de 1,77 MPa, conforme apresentado na Tabela 23.

Tabela 23 – Tukey para resistência a tração de $k=9$.

Tukey de dois fatores com repetição para a resistência a tração para $k=9$ / D.M.S = 1,77									
	40G1	40G2	40G3	50G1	50G2	50G3	60G1	60G2	60G3
40G1	0,00	1,46	1,97	4,76	0,59	1,84	7,75	0,35	2,51
40G2	1,46	0,00	3,43	3,30	2,05	0,38	6,30	1,81	3,96
40G3	1,97	3,43	0,00	6,73	1,38	3,81	9,73	1,63	0,53
50G1	4,76	3,30	6,73	0,00	5,35	2,92	3,00	5,11	7,26
50G2	0,59	2,05	1,38	5,35	0,00	2,43	8,35	0,25	1,91
50G3	1,84	0,38	3,81	2,92	2,43	0,00	5,92	2,18	4,34
60G1	7,75	6,30	9,73	3,00	8,35	5,92	0,00	8,10	10,26
60G2	0,35	1,81	1,63	5,11	0,25	2,18	8,10	0,00	2,16
60G3	2,51	3,96	0,53	7,26	1,91	4,34	10,26	2,16	0,00

Fonte: Autoria própria, 2026.

A composição 60G1 apresentou a maior resistência à tração e diferiu significativamente de todas as demais formulações, destacando-se como a combinação de melhor desempenho. Considerando também o valor médio da matriz pura, 60G1 foi a única composição reforçada que apresentou resistência numericamente superior ao PUOM.

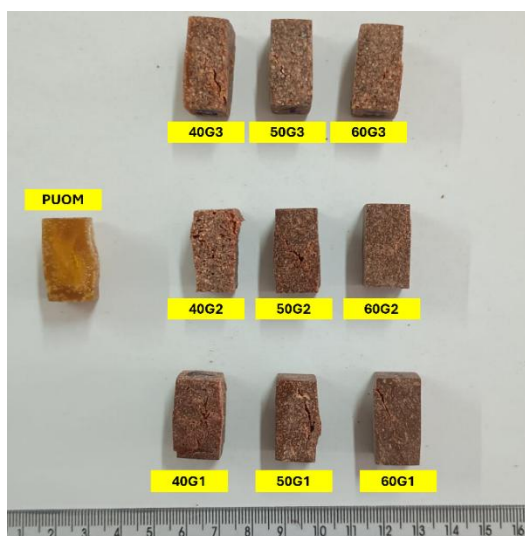
As composições 40G3 e 60G3 integraram o grupo de menor desempenho e não diferiram estatisticamente entre si. A formulação 50G3 apresentou comportamento intermediário dentro da granulometria G3, diferindo de 40G3 e 60G3.

O teste também mostrou que 50G2 e 60G2 foram estatisticamente equivalentes, indicando estabilização da resistência nas maiores frações volumétricas dessa granulometria. De modo geral, os resultados confirmaram a superioridade da composição 60G1 e evidenciaram que o desempenho em tração depende da combinação entre o tamanho das partículas e sua fração volumétrica.

4.2.3 Ensaio de compressão dos compósitos produzidos

O ensaio de compressão foi realizado de acordo com a norma ASTM D695-23, utilizando corpos de prova com dimensões de $12,7 \times 12,7 \times 25,4$ mm. A Figura 41 apresenta os aspectos visuais dos corpos de prova após o ensaio de compressão.

Figura 41 – Aspectos dos corpos de provas pós ensaio de compressão.



Fonte: Autoria própria, 2026.

A Tabela 24 apresenta o resumo das propriedades obtidas no ensaio de compressão, incluindo resistência à compressão, deformação e módulo de compressão dos compósitos produzidos com as diferentes frações volumétricas e faixas granulométricas.

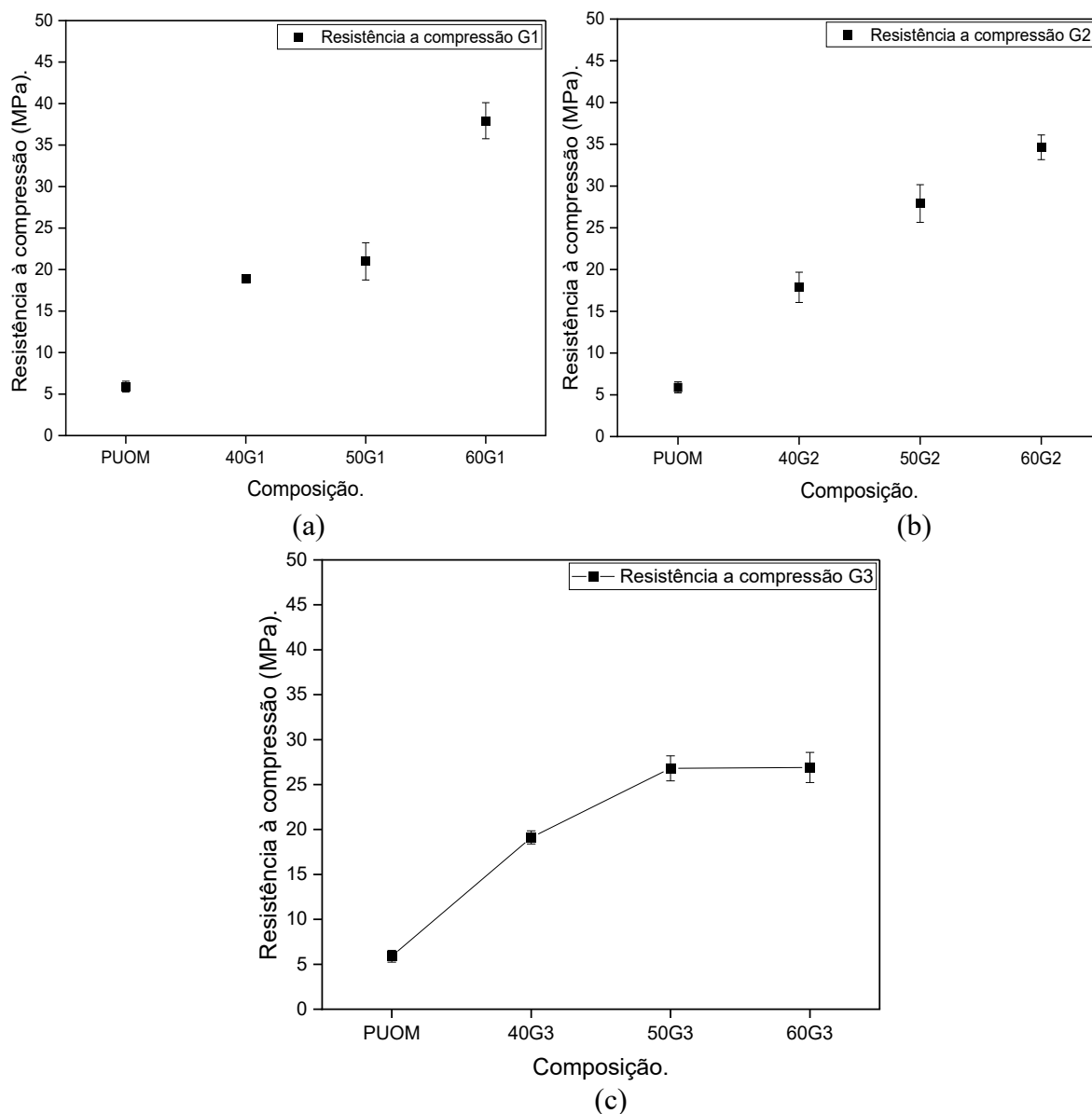
Tabela 24 – Resumo das propriedades obtidas no ensaio de compressão.

Composição	Resistência a compressão (MPa)	Deformação (mm/mm)	Módulo de compressão (GPa)
PUOM	5,89 ± 0,66	0,153 ± 0,071	0,12 ± 0,01
Granulometria 1			
40G1	18,89 ± 0,51	0,210 ± 0,020	0,35 ± 0,06
50G1	20,99 ± 2,24	0,135 ± 0,019	0,47 ± 0,08
60G1	37,94 ± 2,17	0,167 ± 0,008	0,68 ± 0,08
Granulometria 2			
40G2	17,87 ± 1,81	0,316 ± 0,082	0,34 ± 0,05
50G2	27,90 ± 2,26	0,187 ± 0,009	0,68 ± 0,06
60G2	34,64 ± 1,48	0,168 ± 0,003	0,65 ± 0,05
Granulometria 3			
40G3	19,12 ± 0,73	0,169 ± 0,016	0,15 ± 0,02
50G3	26,81 ± 1,40	0,110 ± 0,005	0,64 ± 0,08
60G3	26,90 ± 1,68	0,104 ± 0,013	0,72 ± 0,06

Fonte: Autoria própria, 2026.

Seguindo o mesmo critério de apresentação adotado anteriormente, os resultados foram inicialmente organizados por faixa granulométrica, a fim de facilitar a análise individual de cada grupo. A comparação geral entre as composições será discutida posteriormente por meio dos gráficos comparativos e da análise conjunta dos valores médios. A Figura 42 apresenta os gráficos de resistência à compressão dos compósitos produzidos, organizados de acordo com as faixas granulométricas G1, G2 e G3.

Figura 42 – Resultados de resistência a compressão: a) composições estudadas com G1; b) composições estudadas com G2; c) composições estudadas com G3



Fonte: Autoria própria, 2026.

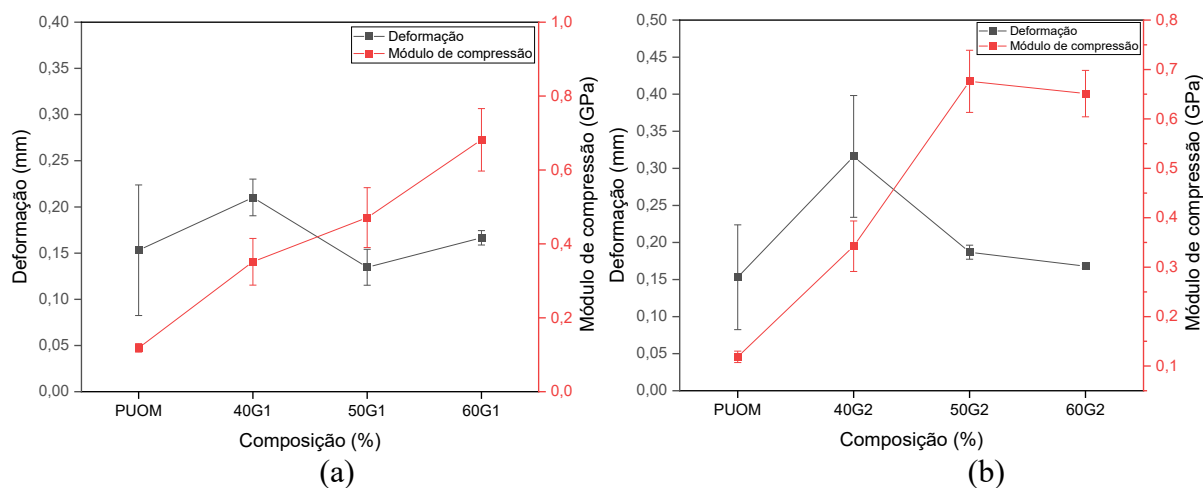
A partir dos resultados, a resistência à compressão da matriz de PUOM é de $5,89 \pm 0,66$ MPa. Para as composições 40G1, 50G1 e 60G1, os resultados de resistência são de $18,89 \pm 0,51$ MPa, $20,99 \pm 2,24$ MPa e $37,94 \pm 2,17$ MPa, respectivamente, representando ganhos de resistência equivalentes a 221%, 256% e 544% quando comparadas à matriz pura de poliuretano de mamona. Esse ganho imediato e robusto indica que as partículas de menor granulometria estabelecem uma interação eficiente com a matriz de poliuretano de mamona. A partícula fina,

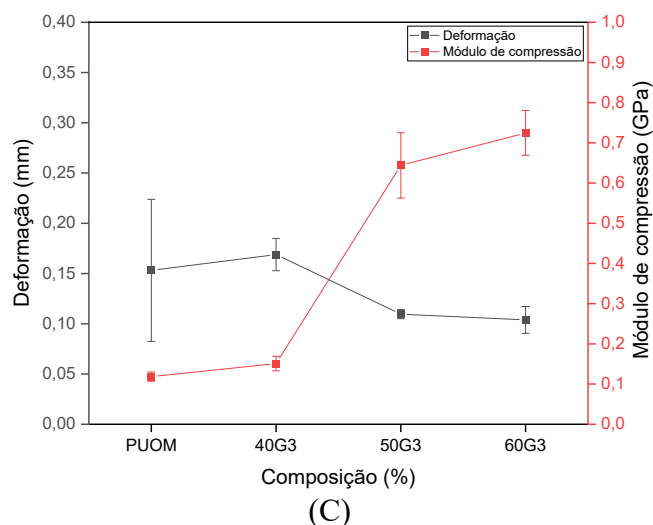
em alta concentração, parece criar uma rede de reforço densa e eficiente sob compressão, onde a maior área superficial específica favorece a transferência de carga entre matriz e reforço.

Para os compósitos com granulometria 2, os resultados de resistência para 40G2, 50G2 e 60G2 foram de $17,87 \pm 1,81$ MPa, $27,90 \pm 2,26$ MPa e $34,64 \pm 1,48$ MPa, respectivamente, o que representou um ganho de 203%, 374% e 488% na resistência à compressão em relação ao material sem reforço. Na faixa granulométrica intermediária, a eficiência do reforço não decai com o aumento da fração. Isso pode indicar que o tamanho intermediário das partículas permite uma distribuição espacial equilibrada ao longo de todas as frações ensaiadas.

Para os compósitos com granulometria 3, os resultados de resistência para 40G3, 50G3 e 60G3 foram de $19,12 \pm 0,73$ MPa, $26,81 \pm 1,40$ MPa e $26,90 \pm 1,68$ MPa, respectivamente, o que representou um ganho de 225%, 355% e 357% em relação ao PUOM. Na faixa granulométrica 3, também não há uma queda de resistência para os compósitos produzidos; entretanto, os ganhos de resistência máximos são inferiores aos dos particulados intermediários e finos. A figura 43 apresenta a curva dos módulos e deformações obtidas neste ensaio.

Figura 43 – Resultados de deformação e módulo de compressão a) composições estudadas com G1; b) composições estudadas com G2; c) composições estudadas com G3.



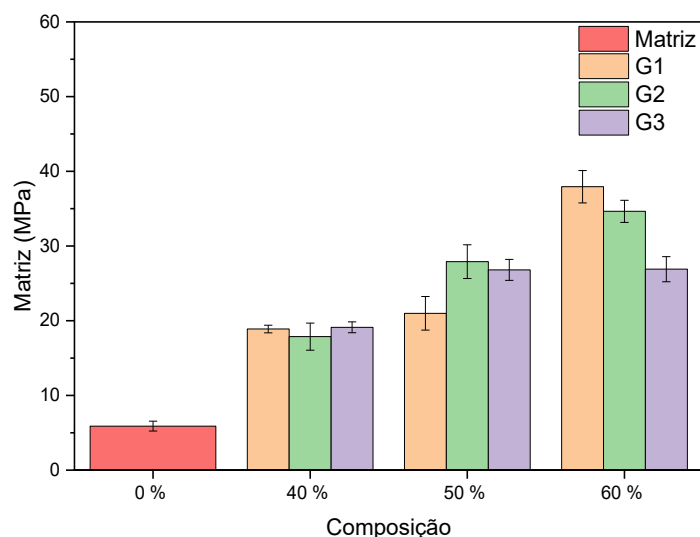


(C)
Fonte: Autoria própria, 2026.

De acordo com a Figura 43 e os dados da Tabela 24 o valor do módulo de compressão da matriz é de $0,12 \pm 0,01$ GPa. Para as composições 40G1, 50G1 e 60G1, os valores de módulo foram de $0,35 \pm 0,06$ GPa, $0,47 \pm 0,08$ GPa e $0,68 \pm 0,08$ GPa, respectivamente, indicando um ganho na rigidez do material, o que é confirmado pela diminuição da deformação que o material suporta. Para as composições 40G2, 50G2 e 60G2, os valores de módulo foram de $0,34 \pm 0,05$ GPa, $0,68 \pm 0,06$ GPa e $0,65 \pm 0,05$ GPa, respectivamente, o que também indica o aumento da rigidez do material e, conseqüentemente, é confirmado pela diminuição da deformação das formulações. Para as composições 40G3, 50G3 e 60G3, os valores são de $0,15 \pm 0,02$ GPa, $0,64 \pm 0,08$ GPa e $0,72 \pm 0,06$ GPa, respectivamente, apresentando um comportamento semelhante ao das outras faixas granulométricas.

Para um comparativo entre os tipos de grãos e a resistência à compressão, a Figura 44 apresenta graficamente a resistência à compressão de cada faixa volumétrica com os diferentes tamanhos de grãos do estudo.

Figura 44 – Gráfico comparativo de resistência a compressão dos compósitos produzidos.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Com base na Figura 43 pode-se observar que, para cada faixa volumétrica, um tipo de grão se destacou nos resultados. Nas composições com 40% em volume, a composição com G3 obteve o melhor resultado; entretanto, considerando os máximos e mínimos do desvio padrão, notamos que as resistências estão dentro da mesma faixa. Nas composições com 50% em volume, o melhor resultado foi para G2; entretanto, dentro dos máximos e mínimos, as composições com G2 e G3 estão dentro da mesma faixa de resistência. Por fim, para as composições com 60% em volume, a composição com G1 foi a que obteve o melhor resultado de resistência; entretanto, dentro dos máximos e mínimos, as composições com G1 e G2 estão dentro da mesma faixa de resistência. Todas as composições tiveram seus valores de resistência aumentando à medida que a fração volumétrica de particulados também aumentava, dentro do que foi proposto no estudo, não se atingiu a saturação da resistência à compressão, sugerindo que esse valor, está acima de frações volumétricas de 60%.

Nos compósitos particulados, os modos de falha sob carregamento de tração e compressão diferem significativamente devido à influência combinada da interface matriz-partícula, da geometria e da distribuição das partículas (Zhou et al., 2024). Mecanismos como descolamento interfacial, nucleação de microfissuras na matriz e fratura das partículas podem ocorrer sob diferentes tipos de carregamento, refletindo a complexidade dos modos de ruptura e indicando que a resposta mecânica não é idêntica entre os dois regimes de solicitação (Cheng;

Huang; Zhang, 2025). Além disso, características microestruturais como o tamanho e a distribuição das partículas influenciam diretamente o início e a propagação de fraturas, uma vez que tais falhas se iniciam na interface partícula-matriz e evoluem conforme a interação de microdefeitos presentes no material (García et al., 2025).

O contraste entre os resultados de tração e compressão pode ser explicado pela natureza distinta dos mecanismos de transferência de carga em cada regime. Sob compressão, as partículas atuam como elementos de suporte que redistribuem e transmitem cargas, sendo o contato mecânico entre partículas e matriz suficiente para conferir rigidez ao sistema (Mashabela; Maringa; Dzogbewu, 2022). A natureza rígida e a alta resistência à compressão intrínseca das partículas lignocelulósicas permitem que elas suportem e distribuam eficientemente as cargas compressivas, restringindo a deformação da matriz polimérica e aumentando a rigidez geral do compósito (Kuan et al., 2021). Contribui ainda para o aumento da resistência à compressão a melhor compactação do material com a matriz, conforme relatado (Figueiredo; Serra; Souza, 2022) e Maamoun et al. (Maamoun; El-Wakil; El-Basheer, 2022). Sob tração, por outro lado, a qualidade da interface torna-se muito mais crítica, pois a carga precisa ser transferida por adesão entre as fases. Uma interface partícula-matriz deficiente compromete diretamente essa transferência de tensão, resultando em redução da resistência à tração do compósito (Goda; Padayodi; Raoelison, 2024; Kuan et al., 2021; Mohammed et al., 2022).

Na literatura, a resistência à compressão da matriz de poliuretano depende da morfologia que pode ser mais aberta, como espumas conforme relatado em (Soares et al., 2024), ou mais rígida conforme relatado em (Filho et al., 2025), a mesma resina do presente estudo. Desta forma, os resultados mecânicos desse material podem variar amplamente em função do tipo de pré-polímero e da estrutura final obtida. A resistência à compressão de poliuretanos à base de óleo de mamona reportada na literatura varia tipicamente entre 0,24 e 0,44 MPa (Balieiro, 2023; Kim; Jin; Choi, 2024; Oliveira et al., 2022; Soares et al., 2024), podendo atingir valores mais elevados, em torno de 1,4 MPa, dependendo da formulação e das condições de cura (Rabello; Ribeiro, 2022). Nesse contexto, a incorporação de particulados surge como uma estratégia eficaz para melhorar o desempenho mecânico sob compressão. Todas as composições obtiveram resultados promissores, com destaque para 60G. De forma geral, os compósitos são promissores para a utilização em revestimentos que não fiquem submetidos a cargas compressivas, ou seja, revestimentos em paredes. A tabela 25 apresenta um resumo acerca da comparação dos resultados.

Tabela 25 – Comparação da melhor resistência à compressão obtida neste estudo com valores reportados na literatura.

Referência	Reforço / carga utilizada	Composição / condição	Resistência à compressão (MPa)
Este estudo	Particulado de caroço de açaí	60G1	37,94 ± 2,17
Este estudo	Sem particulado	Matriz pura	5,89 ± 0,66
Balieiro (2023); Kim, Jin e Choi (2024); Oliveira et al. (2022); Soares et al. (2024)	Formulações variadas de PUOM	Diferentes formulações	0,24–0,44
Rabello e Ribeiro (2022)	Formulação específica e condições de cura distintas	Diferentes formulações	1,4

4.2.3.1 Tratamento estatístico

A análise estatística do ensaio de compressão avaliou, inicialmente, o efeito da fração volumétrica em cada granulometria e, posteriormente, a influência conjunta da granulometria, da fração volumétrica e da interação entre esses fatores sobre a resistência à compressão. Os resultados são apresentados nas Tabelas 26 a 34. ANOVA fator único e teste Tukey para composições com G1.

4.2.3.1.1 ANOVA fator único e teste Tukey para composições com G1

Tabela 26: ANOVA para as propriedades obtidas no ensaio de compressão para G1

Resistência a compressão						
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	4157,147	3	1385,716	531,3817	8,96E-25	2,946685
Dentro dos grupos	73,01727	28	2,60776			
Total	4230,164	31				
Módulo de compressão						
Entre grupos	1,326377	3	0,442126	99,13545	5,07E-15	2,946685
Dentro dos grupos	0,124875	28	0,00446			

Total	1,451252	31				
Deformação						
Entre grupos	0,024886	3	0,008295	5,694653	0,003566	2,946685
Dentro dos grupos	0,040787	28	0,001457			
Total	0,065672	31				

Fonte: Autoria própria, 2026.

A ANOVA confirmou diferenças significativas entre as composições com G3. Assim, aplicou-se o teste de Tukey, apresentado na Tabela 27.

Tabela 27 – Tukey para as propriedades em compressão para G1.

Composição	PUOM	40G1	50G1	60G1
Resistencia a compressão/d.m.s =2,638				
PUOM	0,00	13,00	15,11	32,05
40G1	13,00	0,00	2,10	19,05
50G1	15,11	2,10	0,00	16,94
60G1	32,05	19,05	16,94	0,00
Módulo de compressão/d.m.s =0,109				
PUOM	0,000	0,233	0,353	0,563
40G1	0,233	0,000	0,119	0,330
50G1	0,353	0,119	0,000	0,211
60G1	0,563	0,330	0,211	0,000
Deformação/d.m.s =0,062				
PUOM	0,000	0,057	0,018	0,013
40G1	0,057	0,000	0,076	0,044
50G1	0,018	0,076	0,000	0,032
60G1	0,013	0,044	0,032	0,000

Fonte: Autoria própria, 2026.

O teste de Tukey foi aplicado com diferenças mínimas significativas (DMS) de 2,638 MPa para a resistência à compressão, 0,109 GPa para o módulo de compressão e 0,062 mm/mm para a deformação.

Para a resistência à compressão, todas as composições com G1 apresentaram valores significativamente superior à matriz pura. A composição 60G1 apresentou o melhor desempenho e diferiu das demais, enquanto 40G1 e 50G1 não diferiram entre si, indicando que a fração de 40% já promoveu ganho expressivo de resistência.

O módulo de compressão aumentou significativamente com a incorporação dos particulados, com diferenças entre todas as composições. Para a deformação, apenas 40G1 e

50G1 diferiram entre si, indicando que a adição de G1 não alterou de forma consistente a capacidade deformacional do material sob compressão.

4.2.3.1.2 ANOVA fator único e teste Tukey para composições com G2

Tabela 28 – ANOVA para as propriedades obtidas no ensaio de compressão para G2.

Resistência a compressão						
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	3764,484	3	1254,828	455,7923	7,37E-24	2,946685
Dentro dos grupos	77,08596	28	2,75307			
Total	3841,57	31				
Módulo de compressão						
Entre grupos	1,703975	3	0,567992	255,4974	1,94E-20	2,946685
Dentro dos grupos	0,062246	28	0,002223			
Total	1,766221	31				
Deformação						
Entre grupos	0,133827	3	0,044609	15,06818	4,98E-06	2,946685
Dentro dos grupos	0,082893	28	0,00296			
Total	0,21672	31				

Fonte: Autoria própria, 2026.

A ANOVA confirmou diferenças significativas entre as composições com G3. Assim, aplicou-se o teste de Tukey, apresentado na Tabela 29

Tabela 29 – Tukey para as propriedades em compressão para G2.

Composição	PUOM	40G2	50G2	60G2
Resistencia a compressão/d.m.s =2,710				
PUOM	0,00	11,99	22,01	28,75
40G2	11,99	0,00	10,03	16,77
50G2	22,01	10,03	0,00	6,74
60G2	28,75	16,77	6,74	0,00
Módulo de compressão/d.m.s =0,077				
PUOM	0,000	0,224	0,557	0,533
40G2	0,224	0,000	0,334	0,309
50G2	0,557	0,334	0,000	0,025
60G2	0,533	0,309	0,025	0,000
Deformação/d.m.s =0,089				

PUOM	0,000	0,163	0,034	0,015
40G2	0,163	0,000	0,129	0,148
50G2	0,034	0,129	0,000	0,019
60G2	0,015	0,148	0,019	0,000

Fonte: Autoria própria, 2026.

O teste de Tukey foi aplicado com diferenças mínimas significativas (DMS) de 2,710 MPa para a resistência à compressão, 0,077 GPa para o módulo de compressão e 0,089 mm/mm para a deformação.

Todas as composições com G2 apresentaram resistência à compressão significativamente superior à matriz pura. Além disso, 40G2, 50G2 e 60G2 diferiram entre si, evidenciando aumento progressivo da resistência com a elevação da fração volumétrica.

No módulo de compressão, a matriz pura diferiu de todas as composições, enquanto 50G2 e 60G2 foram estatisticamente equivalentes, sugerindo estabilização da rigidez nas maiores frações. Para a deformação, 40G2 diferiu da matriz pura, de 50G2 e de 60G2, enquanto 50G2 e 60G2 não diferiram entre si.

4.2.3.1.3 ANOVA fator único e teste Tukey para composições com G3

Nesta etapa, a ANOVA de fator único foi utilizada para responder se a fração volumétrica de particulados exerce efeito significativo sobre as propriedades mecânicas obtidas no ensaio de compressão, mantendo fixo o tamanho de partícula G3. A Tabela 30 apresenta a análise de variância (ANOVA) da caracterização mecânica em compressão para os compósitos produzidos com G3.

Tabela 30 – ANOVA para as propriedades obtidas no ensaio de compressão para G3.

Resistência a compressão						
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2347,454	3	782,4847	546,2834	6,13E-25	2,946685
Dentro dos grupos	40,1066	28	1,432379			
Total	2387,561	31				
Módulo de compressão						
Entre grupos	2,446225	3	0,815408	319,7879	9,3E-22	2,946685

Dentro dos grupos	0,071396	28	0,00255			
Total	2,517621	31				
Deformação						
Entre grupos	0,0247	3	0,008233	6,04029	0,002634	2,946685
Dentro dos grupos	0,038166	28	0,001363			
Total	0,062866	31				

Fonte: Autoria própria, 2026.

A ANOVA confirmou diferenças significativas entre as composições com G3. Assim, aplicou-se o teste de Tukey, apresentado na Tabela 31.

Tabela 31 – Tukey para propriedades de compressão G3.

Composição	PUOM	40G3	50G3	60G3
Resistencia a compressão/d.m.s =1,955				
PUOM	0,00	13,23	20,92	21,01
40G3	13,23	0,00	7,69	7,78
50G3	20,92	7,69	0,00	0,10
60G3	21,01	7,78	0,10	0,00
Módulo de compressão/d.m.s =0,082				
PUOM	0,000	0,032	0,525	0,606
40G3	0,032	0,000	0,493	0,574
50G3	0,525	0,493	0,000	0,081
60G3	0,606	0,574	0,081	0,000
Deformação/d.m.s =0,060				
PUOM	0,000	0,016	0,044	0,049
40G3	0,016	0,000	0,059	0,065
50G3	0,044	0,059	0,000	0,006
60G3	0,049	0,065	0,006	0,000

Fonte: Autoria própria, 2026.

O teste de Tukey foi aplicado com diferenças mínimas significativas (DMS) de 1,955 para resistência à compressão, 0,082 para módulo de compressão e 0,060 para deformação.

Para as composições com G3, todas as frações volumétricas apresentaram resistência à compressão significativamente superior à matriz pura. A composição 40G3 apresentou menor

resistência que 50G3 e 60G3, enquanto estas não diferiram entre si, indicando estabilização do ganho nas maiores frações.

No módulo de compressão, apenas 50G3 e 60G3 diferiram significativamente da matriz pura, enquanto 40G3 permaneceu estatisticamente equivalente à PUOM. Além disso, 50G3 e 60G3 não diferiram entre si, sugerindo que os maiores ganhos de rigidez ocorrem nas frações mais elevadas. Para a deformação, apenas 40G3 e 60G3 apresentaram diferença significativa, indicando baixa sensibilidade dessa propriedade à incorporação e ao aumento da fração volumétrica de G3.

4.2.3.1.4 ANOVA de fator duplo com repetição

Para a análise conjunta dos fatores, foi realizada uma ANOVA de dois fatores com repetição, considerando a granulometria e a fração volumétrica dos particulados. Essa análise, aplicada apenas à resistência à compressão, permitiu verificar os efeitos individuais desses fatores e a interação entre eles, conforme apresentado na Tabela 32.

Tabela 32 – Anova bifatorial com repetição para resistência a compressão.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	2541,169085	2	1270,584542	442,1158	8,33E-38	3,142809
Colunas	79,40593144	2	39,70296572	13,81514	1,06E-05	3,142809
Interações	661,6489529	4	165,4122382	57,55726	2,36E-20	2,51767
Dentro	181,0539909	63	2,873872871			
Total	3463,27796	71				

Fonte: Autoria própria, 2026.

A ANOVA bifatorial indicou que a granulometria, a fração volumétrica e a interação entre esses fatores exerceram efeito estatisticamente significativo sobre a resistência à compressão, uma vez que os valores de F calculado foram superiores aos respectivos valores de F crítico e os valores de p ficaram abaixo de 0,05.

A interação significativa demonstra que o efeito da fração volumétrica depende da granulometria utilizada e que o efeito da granulometria varia conforme a quantidade de particulados incorporada. Portanto, a resistência à compressão deve ser interpretada com base

na combinação específica entre esses fatores. Para avaliar o efeito médio da granulometria, aplicou-se o teste de Tukey com $k = 3$, apresentado na Tabela 33.

Tabela 33 – Tukey para $k=3$ da resistência a compressão.

TUKEY DE DOIS FATORES PARA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO PARA $K=3$ /D.M.S = 2,04

	G1	G2	G3
G1	0,00	0,87	1,67
G2	0,87	0,00	2,53
G3	1,67	2,53	0,00

Fonte: Autoria própria, 2026.

O teste de Tukey com $k = 3$, utilizando uma DMS de 2,04 MPa, mostrou que G3 apresentou resistência média significativamente superior a G2. A granulometria G1, por sua vez, não diferiu significativamente de G2 nem de G3, indicando um comportamento intermediário.

Para comparar individualmente as nove combinações entre granulometria e fração volumétrica, aplicou-se o teste de Tukey com $k = 9$ e DMS de 2,79 MPa, conforme apresentado na Tabela 34.

Tabela 34 – Tukey para $k=9$ da resistência a compressão.

TUKEY DE DOIS FATORES COM REPETIÇÃO PARA A RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO PARA $K=9$ /D.M.S = 2,79

	40G1	40G2	40G3	50G1	50G2	50G3	60G1	60G2	60G3
40G1	0,00	1,02	0,23	2,10	9,01	7,92	19,05	15,75	8,01
40G2	1,02	0,00	1,25	3,12	10,03	8,93	20,06	16,77	9,03
40G3	0,23	1,25	0,00	1,87	8,78	7,69	18,82	15,52	7,78
50G1	2,10	3,12	1,87	0,00	6,91	5,81	16,94	13,65	5,91
50G2	9,01	10,03	8,78	6,91	0,00	1,10	10,04	6,74	1,00
50G3	7,92	8,93	7,69	5,81	1,10	0,00	11,13	7,84	0,10
60G1	19,05	20,06	18,82	16,94	10,04	11,13	0,00	3,29	11,04
60G2	15,75	16,77	15,52	13,65	6,74	7,84	3,29	0,00	7,74
60G3	8,01	9,03	7,78	5,91	1,00	0,10	11,04	7,74	0,00

Fonte: Autoria própria, 2026.

As composições 40G1, 40G2 e 40G3 não apresentaram diferenças significativas entre si, indicando que, na fração volumétrica de 40%, a granulometria não exerceu influência

relevante sobre a resistência à compressão. As combinações 50G2, 50G3 e 60G3 também foram estatisticamente equivalentes, caracterizando uma faixa de desempenho semelhante.

A composição 50G1 não diferiu das formulações com 40% de particulados, mas apresentou resistência superior a 50G2 e 50G3. A composição 60G1 apresentou o maior valor de resistência à compressão e diferiu significativamente da maioria das demais formulações. A composição 60G2 também apresentou desempenho elevado, porém inferior ao de 60G1.

De modo geral, os resultados confirmaram que a resistência à compressão depende da interação entre granulometria e fração volumétrica. Embora G3 tenha apresentado desempenho médio superior a G2, a maior resistência foi obtida para 60G1, demonstrando que a formulação de melhor desempenho resulta da combinação de elevada fração volumétrica com partículas finas.

4.2.4 Ensaio de flexão (dobramento) dos compósitos produzidos

O ensaio de flexão foi realizado de acordo com a norma ASTM D790-17, utilizando corpos de prova com dimensões de $6,4 \times 12,7 \times 127$ mm. A Figura 45 apresenta os aspectos visuais dos corpos de prova após o ensaio de dobramento.

Figura 45 – Corpos de provas após o ensaio de dobramento.



Fonte: Autoria própria, 2026.

A Tabela 35 apresenta o resumo das propriedades obtidas no ensaio de dobramento, incluindo resistência ao dobramento, deformação e módulo de corda dos compósitos produzidos com diferentes frações volumétricas e faixas granulométricas.

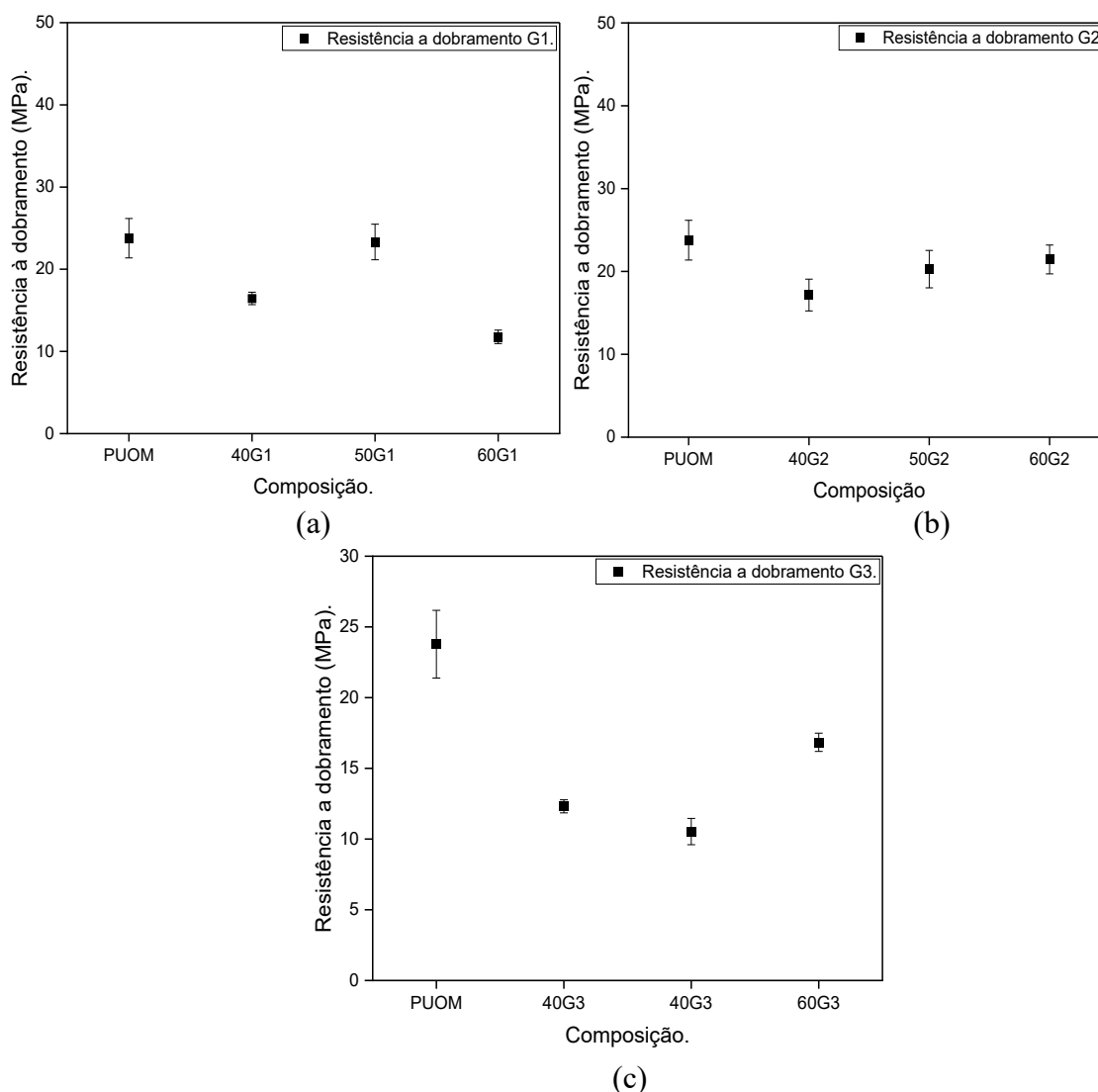
Tabela 35 – Tabela de resumo das propriedades obtidas no ensaio de dobramento.

Composição	Resistência a dobramento (MPa)	Deformação (mm/mm)	Módulo de corda (GPa)
PUOM	$23,78 \pm 2,39$	$0,147 \pm 0,030$	$0,28 \pm 0,09$
Granulometria 1			
40G1	$16,44 \pm 0,76$	$0,030 \pm 0,003$	$0,51 \pm 0,05$
50G1	$23,32 \pm 2,17$	$0,029 \pm 0,010$	$0,75 \pm 0,06$
60G1	$11,77 \pm 0,83$	$0,038 \pm 0,010$	$0,50 \pm 0,11$
Granulometria 2			
40G2	$17,16 \pm 1,92$	$0,028 \pm 0,013$	$0,40 \pm 0,19$
50G2	$20,29 \pm 2,25$	$0,024 \pm 0,004$	$1,12 \pm 0,14$
60G2	$21,45 \pm 1,75$	$0,029 \pm 0,007$	$1,26 \pm 0,19$
Granulometria 3			
40G3	$12,31 \pm 0,47$	$0,107 \pm 0,017$	$0,28 \pm 0,05$
50G3	$10,53 \pm 0,93$	$0,058 \pm 0,014$	$0,30 \pm 0,07$
60G3	$16,48 \pm 0,64$	$0,027 \pm 0,001$	$0,97 \pm 0,10$

Fonte: Autoria própria, 2026.

Seguindo o mesmo critério de apresentação adotado nos ensaios anteriores, os resultados foram inicialmente organizados por faixa granulométrica, permitindo avaliar o comportamento de cada grupo em função da fração volumétrica de açaí. A comparação geral entre as composições será discutida posteriormente, a partir dos gráficos comparativos e da análise conjunta dos valores médios. A Figura 46 apresenta os gráficos de resistência a dobramento dos compósitos ensaiados.

Figura 46 – Gráficos de resistências a dobramento dos compósitos.



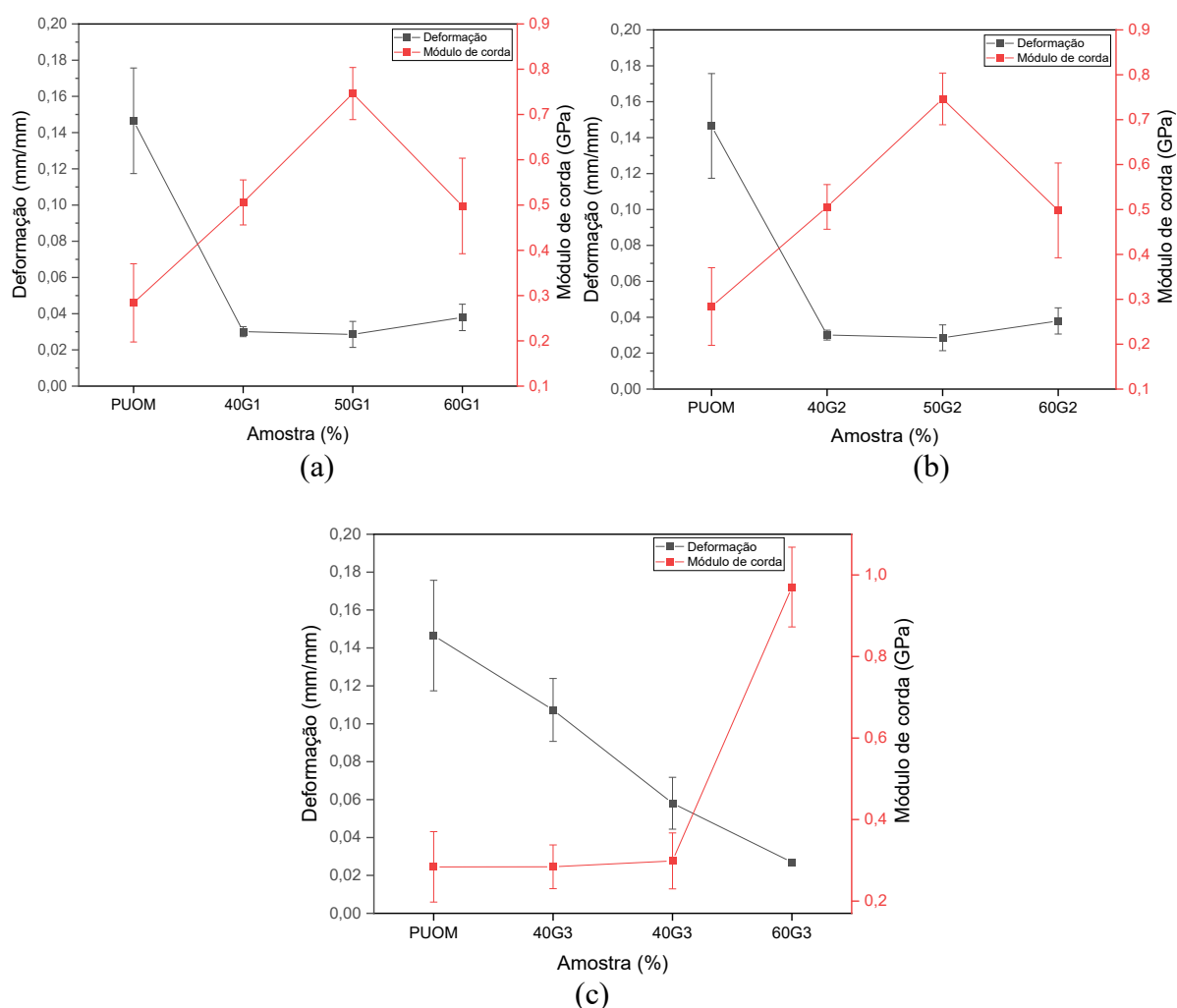
Fonte: Autoria própria, 2026.

Com os resultados obtidos no ensaio de dobramento, o valor de resistência para a matriz de PUOM foi de $23,78 \pm 2,39$ MPa. Para as composições 40G1, 50G1 e 60G1, os resultados de resistência foram de $16,44 \pm 0,76$ MPa, $23,32 \pm 2,17$ MPa e $11,77 \pm 0,83$ MPa, respectivamente. Isso representa quedas na resistência à dobramento de 31%, 2% e 51%, em comparação com a matriz pura. É notável que a composição 50G1 manteve a resistência à dobramento em um nível muito próximo ao da matriz pura, indicando uma performance robusta para essa fração de particulados finos.

Para as composições 40G2, 50G2 e 60G2, os resultados de resistência foram de $17,16 \pm 1,92$ MPa, $20,29 \pm 2,25$ MPa e $21,45 \pm 1,75$ MPa, representando quedas de 28%, 15% e 10%, respectivamente, na resistência ao dobramento em comparação com a matriz pura.

Por fim, para as composições 40G3, 50G3 e 60G3, os resultados de resistência ao dobramento foram de $12,31 \pm 0,47$ MPa, $10,53 \pm 0,93$ MPa e $16,48 \pm 0,64$ MPa, representando quedas de 48%, 56% e 31%, respectivamente. Este comportamento de redução da resistência à dobramento para a maioria dos compósitos contrasta com os ganhos de resistência observados em alguns compósitos sob compressão, sugerindo que os mecanismos de falha e a eficácia do reforço particulado são distintos dependendo do tipo de carregamento aplicado. A Figura 47 apresenta os gráficos das curvas de deformação e módulo de corda dos compósitos produzidos.

Figura 47 – Gráficos de deformação x módulo corda dos compósitos.



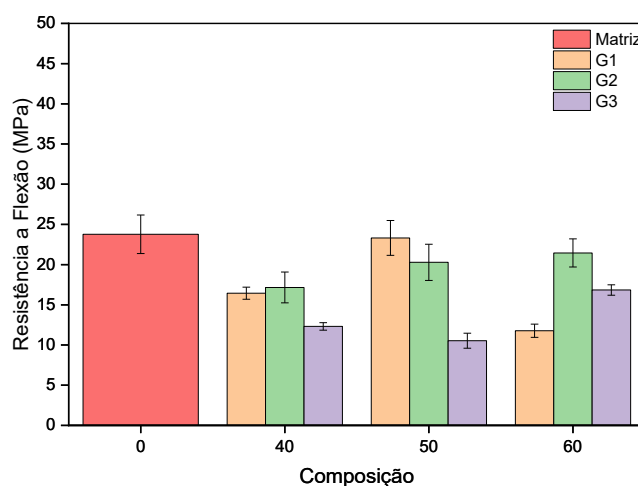
Fonte: Autoria própria, 2026.

De acordo com a Figura 46, o módulo de corda da matriz pura é de $0,28 \pm 0,09$ GPa. Para as composições 40G1, 50G1 e 60G1, os valores foram de $0,51 \pm 0,05$ GPa, $0,75 \pm 0,06$

GPa e $0,50 \pm 0,11$ GPa, respectivamente. Para as composições 40G2, 50G2 e 60G2, os valores foram de $0,40 \pm 0,19$ GPa, $1,12 \pm 0,14$ GPa e $1,26 \pm 0,19$ GPa, respectivamente. Por fim, o mesmo comportamento de aumento do módulo foi identificado nas composições 40G3, 50G3 e 60G3, com valores de $0,28 \pm 0,05$ GPa, $0,30 \pm 0,07$ GPa e $0,97 \pm 0,10$ GPa, respectivamente.

Em todas as composições, houve um aumento gradativo do módulo de corda, demonstrando que a inserção dos particulados aumenta a rigidez do material. Este resultado é também observado em estudos que exploram a utilização de resíduos agroindustriais como reforço em compósitos poliméricos, onde a incorporação de partículas naturais promoveu melhorias na rigidez estrutural dos materiais resultantes (Irawan et al., 2024; R et al., 2023). Tal fato é confirmado pela diminuição da deformação dos compósitos produzidos. Essa perda de ductilidade é típica quando a matriz polimérica (fase mais deformável) é substituída de forma gradual por uma fase mais rígida de particulados, comportamento já descrito em outros painéis reforçados com partículas ou serragem (Bispo et al., 2022; Luo; He; Wang, 2025; Panzera et al., 2021). O aumento consistente do módulo de corda em todas as composições reforçadas, mesmo naquelas que apresentaram queda de resistência, ressalta a capacidade dos particulados de açaí em conferir maior rigidez ao material. Isso é particularmente relevante para aplicações onde a deformação sob carga é um fator crítico, e onde a rigidez é mais valorizada do que a resistência máxima à dobramento. A Figura 48 apresenta os comparativos dos valores de resistência a compressão dos compósitos produzidos.

Figura 48 – Gráfico comparativo de resistência a dobramento dos compósitos produzidos.



Fonte: Autoria própria, 2026.

A adição de partículas de açaí, de forma geral e independentemente da granulometria, tendeu a reduzir a resistência à dobras. Este é um comportamento clássico em compósitos com matriz polimérica flexível e reforço particulado sem tratamento superficial otimizado (Almeida et al., 2024).

O comportamento dos compósitos com G1 foi instável, com oscilações que sugerem que partículas muito finas, devido à sua alta área superficial e, sem tratamento adequado, podem criar zonas de concentração de tensão heterogêneas. G2 apresentou o comportamento mais estável entre os três níveis de granulometria. Isso indica que, nessa faixa granulométrica, o particulado conseguiu se distribuir de forma mais homogênea na matriz de PU, e houve uma tendência de acomodação progressiva do sistema com o aumento do teor de reforço. Os desvios padrão menores ao longo da série reforçam essa estabilidade. Este grupo apresentou o melhor desempenho global entre os compósitos reforçados.

Por fim, em G3, partículas de maior dimensão tendem a introduzir descontinuidades volumétricas mais pronunciadas na matriz, atuando como concentradores de tensão de maior intensidade e apresentando menor área de interface efetiva por unidade de volume em comparação com frações mais finas. A recuperação da resistência em 60G3 é um resultado que merece atenção e será mais bem explicado com a análise da fração de vazios do compósito. Essas quedas de resistência para a maioria dos compósitos, comparadas à resistência da matriz, sugerem que, nesses teores, o particulado atua predominantemente como enchimento, com transferência de carga limitada entre matriz e partículas.

Esse comportamento é comum em compósitos de poliuretano reforçado com particulados, especialmente quando há uma interface frágil entre a fase lignocelulósica e a matriz polimérica (Júnior et al., 2023b; Protzek et al., 2022). O comportamento de "recuperação da resistência" em algumas composições, como 50G1, 60G2 e 60G3, é semelhante ao observado em alguns painéis reforçados com fibras curtas de coco, nos quais o aumento do teor de reforço levou inicialmente a uma redução da resistência à dobras e, apenas em teores mais elevados, resultou em uma recuperação parcial dessa resistência (Bispo et al., 2022). A "recuperação da resistência" observada em composições como 50G1, 60G2 e 60G3 é um fenômeno que merece investigação mais aprofundada. Pode indicar que, a partir de um certo teor de particulados, a distribuição e o empacotamento das partículas atingem uma configuração mais favorável, ou que a matriz polimérica, apesar de sua flexibilidade, consegue interagir de

forma mais eficiente com o reforço, mesmo sem tratamento superficial, mitigando os efeitos negativos da interface frágil

Segundo (Gaby Filho et al., 2025) existem três causas que podem reduzir a resistência desses painéis. A primeira é a baixa eficiência do resíduo particulado do açaí como reforço, o que afeta a resistência e o módulo de corda. A segunda é a variação nas densidades devido à impregnação (conforme observado nas validações de densidade prática das amostras), ou seja, regiões com pouca resina e alto vazio, que reduzem a resistência do material e induzem à ruptura rápida. Por fim, a terceira causa reside no processo de fabricação, onde pode haver um espalhamento irregular da resina, levando ao acúmulo em determinadas regiões e tornando o material anisotrópico.

A Tabela 36 apresenta uma comparação entre os resultados de dobramento/flexão obtidos neste estudo e valores reportados na literatura para painéis e compósitos lignocelulósicos. Para essa comparação, foram selecionadas as composições 50G1, por apresentar a maior resistência ao dobramento entre os compósitos produzidos, e 60G2, por apresentar o maior módulo de corda. Dessa forma, a tabela permite contextualizar tanto o melhor desempenho em resistência quanto o melhor desempenho em rigidez dos compósitos PUOM/açaí, considerando parâmetros diretamente associados ao comportamento em flexão.

Tabela 36 – Comparação dos resultados de dobramento/flexão deste estudo com painéis lignocelulósicos reportados na literatura.

Referência	Material / painel avaliado	Condição / composição	MOR / resistência ao dobramento (MPa)	MOE / módulo de elasticidade (MPa)
Este estudo	Compósito PUOM/açaí	PUOM	23,78 ± 2,39	280 ± 90
Este estudo	Compósito PUOM/açaí	50G1	23,32 ± 2,17	750 ± 60
Este estudo	Compósito PUOM/açaí	60G2	21,45 ± 1,75	1260 ± 190
Bispo et al. (2022)	Painéis particulados	F100 P0 E0	16,7	1841
Bispo et al. (2022)	Painéis particulados	F50 P25 E25	19,4	2033
Bispo et al. (2022)	Painéis particulados	F0 P50 E50	21,79	2924
Luo, He e Wang (2025)	Painéis de partículas de palha de arroz	Sem tratamento	7,58 ± 0,81	1223,5 ± 128,7
Luo, He e Wang (2025)	Painéis de partículas de palha de arroz	Melhor condição de pré-tratamento	12,87 ± 1,54	1865,3 ± 297,6
Panzer et al. (2021)	Painéis reforçados com partículas/serragem	8% de adesivo	19,11	2212
Panzer et al. (2021)	Painéis reforçados com partículas/serragem	12% de adesivo	23,28	2543

Panzer et al. (2021)	Painéis reforçados com partículas/serragem	15% de adesivo	24,63	2675
-----------------------------	--	----------------	-------	------

Observa-se que a resistência ao dobramento dos compósitos desenvolvidos neste estudo apresentou valores próximos ou superiores aos reportados em parte da literatura. A composição 50G1, por exemplo, apresentou resistência de $23,32 \pm 2,17$ MPa, valor próximo ao reportado por Panzer et al. (2021) para painéis com 12% de adesivo e superior aos valores apresentados por Bispo et al. (2022) e Luo, He e Wang (2025) em algumas condições. Entretanto, os valores de módulo de corda obtidos neste estudo foram inferiores aos módulos de elasticidade reportados para painéis particulados convencionais, indicando que, embora os compósitos PUOM/açaí apresentem resistência ao dobramento compatível com materiais lignocelulósicos, ainda possuem menor rigidez em comparação a painéis produzidos com maiores níveis de compactação, adesivos ou tratamentos específicos.

Esse comportamento reforça que a incorporação dos particulados de açaí aumentou a rigidez em relação à matriz pura de PUOM, como observado pelo aumento do módulo de corda nas formulações reforçadas. No entanto, a matriz de poliuretano de mamona ainda confere maior flexibilidade ao sistema quando comparada a painéis particulados convencionais, o que explica os menores valores de módulo mesmo em formulações com maior fração volumétrica de reforço.

A Tabela 37 apresenta um resumo do desempenho das formulações no ensaio de dobramento, considerando a resistência ao dobramento, o módulo de corda e o atendimento aos requisitos normativos utilizados como referência. Para a ABNT NBR 14810-2:2024, considerou-se o requisito mínimo de MOR igual a 11 MPa e MOE igual a 1,8 GPa para painéis com espessura na faixa de 6 a 13 mm. Para a ABNT NBR 14715-1:2021, considerou-se o requisito mínimo de resistência ao dobramento igual ou superior a 3,5 MPa.

Tabela 37 – Resumo do desempenho em dobramento dos compósitos produzidos em relação aos requisitos normativos.

Composição	Resistência ao dobramento (MPa)	Módulo de corda (GPa)	Atende MOR ≥ 11 MPa?	Atende MOE $\geq 1,8$ GPa?	Atende NBR 14715-1 $\geq 3,5$ MPa?
PUOM	$23,78 \pm 2,39$	$0,28 \pm 0,09$	Sim	Não	Sim
40G1	$16,44 \pm 0,76$	$0,51 \pm 0,05$	Sim	Não	Sim
50G1	$23,32 \pm 2,17$	$0,75 \pm 0,06$	Sim	Não	Sim
60G1	$11,77 \pm 0,83$	$0,50 \pm 0,11$	Sim	Não	Sim
40G2	$17,16 \pm 1,92$	$0,40 \pm 0,19$	Sim	Não	Sim
50G2	$20,29 \pm 2,25$	$1,12 \pm 0,14$	Sim	Não	Sim
60G2	$21,45 \pm 1,75$	$1,26 \pm 0,19$	Sim	Não	Sim
40G3	$12,31 \pm 0,47$	$0,28 \pm 0,05$	Sim	Não	Sim
50G3	$10,53 \pm 0,93$	$0,30 \pm 0,07$	Não	Não	Sim
60G3	$16,48 \pm 0,64$	$0,97 \pm 0,10$	Sim	Não	Sim

Fonte: Autoria própria, 2026.

Observa-se que, com exceção da composição 50G3, todas as formulações atenderam ao requisito mínimo de resistência ao dobramento estabelecido pela ABNT NBR 14810-2:2024 para painéis na faixa de espessura avaliada. Entretanto, nenhuma das composições atingiu o requisito mínimo de módulo de elasticidade de 1,8 GPa, indicando que, embora os compósitos apresentem resistência ao dobramento compatível com a aplicação em painéis, ainda apresentam limitação quanto à rigidez exigida por essa norma. Por outro lado, todas as formulações atenderam ao requisito mínimo de dobramento indicado pela ABNT NBR 14715-1:2021, reforçando o potencial de aplicação dos compósitos como materiais de revestimento não estrutural.

4.2.4.1 Validação estatística

A análise estatística do ensaio de dobramento avaliou, inicialmente, o efeito da fração volumétrica em cada granulometria e, posteriormente, a influência conjunta da granulometria, da fração volumétrica e da interação entre esses fatores sobre a resistência ao dobramento. Os resultados da ANOVA e do teste de Tukey são apresentados nas Tabelas 38 a 46.

4.2.4.1.1 ANOVA fator único e teste Tukey para composições com G1

Tabela 38 – ANOVA para as propriedades obtidas no ensaio de dobramento para G1

Resistência a dobramento						
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	800,7105	3	266,9035	91,46309	1,41E-14	2,946685
Dentro dos grupos	81,70835	28	2,918155			
Total	882,4189	31				
Módulo de corda						
Entre grupos	1,463994	3	0,487998	109,7297	1,38E-15	2,946685
Dentro dos grupos	0,124524	28	0,004447			
Total	1,588518	31				
Deformação						
Entre grupos	0,533658	3	0,177886	57,93951	3,96E-12	2,946685
Dentro dos grupos	0,085966	28	0,00307			
Total	0,619624	31				

Fonte: Autoria própria, 2026.

A ANOVA confirmou diferenças significativas entre as composições com G1. Assim, aplicou-se o teste de Tukey, apresentado na Tabela 39.

Tabela 39 – Tukey para as propriedades em dobramento para G1.

Composição	PUOM	40G1	50G1	60G1
Resistencia a dobramento/d.m.s =2,790				
PUOM	0,00	7,33	0,46	12,00
40G1	7,33	0,00	6,87	4,67
50G1	0,46	6,87	0,00	11,54
60G1	12,00	4,67	11,54	0,00
Módulo de corda/d.m.s =0,109				
PUOM	0,000	0,359	0,600	0,351
40G1	0,359	0,000	0,241	0,008
50G1	0,600	0,241	0,000	0,248
60G1	0,351	0,008	0,248	0,000
Deformação/d.m.s =0,091				
PUOM	0,0000	0,2554	0,0146	0,2460
40G1	0,2554	0,0000	0,2700	0,0094
50G1	0,0146	0,2700	0,0000	0,2606
60G1	0,2460	0,0094	0,2606	0,0000

Fonte: Autoria própria, 2026.

O teste de Tukey foi aplicado com diferenças mínimas significativas (DMS) de 2,790, 0,109 e 0,091 para resistência à dobramento, módulo de corda e deformação, respectivamente.

Para a resistência à dobramento, a matriz pura não apresentou diferença significativa em relação à composição 50G1, indicando que a adição de 50% de particulados G1 manteve a resistência ao dobramento em um nível comparável ao do material sem reforço. Em contraste, 40G1 e 60G1 diferiram significativamente da matriz e entre si, com 60G1 apresentando a menor resistência, um comportamento que pode ser associado ao elevado índice de vazios.

No que se refere ao módulo de corda, o teste demonstrou que 50G1 se destacou como a composição de maior rigidez dentro de G1, diferindo significativamente de todas as outras condições. A combinação de manutenção da resistência e o maior módulo de corda em 50G1 sugere uma otimização da interação partícula-matriz para essa concentração e granulometria sob dobramento.

Para a deformação, a matriz pura não diferiu significativamente de 50G1, indicando que essa fração não alterou de forma relevante a capacidade deformacional. Contudo, 40G1 e 60G1 diferiram significativamente da matriz e de 50G1, mas não entre si, sugerindo que ambas as frações promovem uma redução similar na deformação em comparação com a matriz pura e a composição 50G1. Esses achados confirmam que a adição do reforço de particulados G1 impacta significativamente as propriedades mecânicas do compósito, tornando-o mais rígido e, em geral, menos deformável, com a composição 50G1 apresentando um equilíbrio notável entre resistência e rigidez.

4.2.4.1.2 ANOVA fator único e teste Tukey para composições com G2

Nesta etapa, a ANOVA de fator único foi utilizada para responder se a fração volumétrica de particulados exerce efeito significativo sobre as propriedades mecânicas obtidas no ensaio de dobramento, mantendo fixo o tamanho de partícula G2. A Tabela 40 apresenta a análise de variância (ANOVA) da caracterização mecânica em dobramento para os compósitos produzidos com G2.

Tabela 40 – ANOVA para as propriedades obtidas no ensaio de dobramento para G2

Resistência a dobramento						
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	181,9913	3	60,66375	13,84946	1,01E-05	2,946685
Dentro dos grupos	122,6463	28	4,380224			
Total	304,6375	31				
Módulo de corda						
Entre grupos	7,092388	3	2,364129	103,5972	2,89E-15	2,946685
Dentro dos grupos	0,638971	28	0,02282			
Total	7,731358	31				
Deformação						
Entre grupos	0,396634	3	0,132211	68,89325	4,84E-13	2,946685
Dentro dos grupos	0,053734	28	0,001919			
Total	0,450368	31				

Fonte: Autoria própria, 2026.

A ANOVA também indicou diferenças significativas entre as composições com G2. Os resultados do teste de Tukey são apresentados na Tabela 41.

Tabela 41 – Tukey para as propriedades em dobramento para G2.

Composição	PUOM	40G2	50G2	60G2
Resistencia a dobramento/d.m.s =3,419				
PUOM	0,00	6,62	3,49	2,33
40G2	6,62	0,00	3,13	4,29
50G2	3,49	3,13	0,00	1,16
60G2	2,33	4,29	1,16	0,00
Módulo de corda/d.m.s =0,023				
PUOM	0,000	0,251	0,972	1,117
40G2	0,251	0,000	0,721	0,866
50G2	0,972	0,721	0,000	0,144
60G2	1,117	0,866	0,144	0,000
Deformação/d.m.s =0,072				
PUOM	0,0000	0,2557	0,2603	0,2552
40G2	0,2557	0,0000	0,0046	0,0006
50G2	0,2603	0,0046	0,0000	0,0052
60G2	0,2552	0,0006	0,0052	0,0000

Fonte: Autoria própria, 2026.

Entre grupos	2,788067	3	0,929356	150,8446	2,19E-17	2,946685
Dentro dos grupos	0,172508	28	0,006161			
Total	2,960576	31				

Fonte: Autoria própria, 2026.

A ANOVA confirmou diferenças significativas entre as composições com G3. Assim, aplicou-se o teste de Tukey, apresentado na Tabela 43.

Tabela 43 – Tukey para as propriedades em dobramento para G3.

Composição	PUOM	40G3	50G3	60G3
Resistencia a dobramento/d.m.s =2,194				
PUOM	0,00	11,46	13,24	6,93
40G3	11,46	0,00	1,78	4,53
50G3	13,24	1,78	0,00	6,31
60G3	6,93	4,53	6,31	0,00
Módulo de corda/d.m.s =0,030				
PUOM	0,000	0,039	0,088	0,120
40G3	0,039	0,000	0,049	0,080
50G3	0,088	0,049	0,000	0,031
60G3	0,120	0,080	0,031	0,000
Deformação/d.m.s =0,1282				
PUOM	0,0000	0,0002	0,0146	0,6865
40G3	0,0002	0,0000	0,0144	0,6863
50G3	0,0146	0,0144	0,0000	0,6719
60G3	0,6865	0,6863	0,6719	0,0000

Fonte: Autoria própria, 2026.

O teste de Tukey foi aplicado com DMS de 2,194 MPa, 0,030 GPa e 0,1282 mm/mm para resistência à dobramento, módulo de corda e deformação, respectivamente.

Para a resistência à flexão, a matriz pura diferiu significativamente de todas as composições com particulados G3. As composições 40G3 e 50G3 não diferiram entre si, ambas apresentando os menores valores de resistência dentro do grupo. A composição 60G3, por sua vez, diferiu significativamente de 40G3 e 50G3, refletindo uma recuperação parcial da resistência, um comportamento que pode ser associado à redução da fração de vazios nessa composição.

No que se refere ao módulo de corda, o teste demonstrou que todas as frações volumétricas de G3 produziram rigidez estatisticamente distinta entre si, com aumento

consistente do módulo a cada incremento de fração volumétrica. Este achado confirma que a incorporação de particulados de granulometria G3 aumenta consistentemente a rigidez do material sob flexão, com cada aumento de fração volumétrica resultando em um material mais rígido.

Para a deformação, a matriz pura não diferiu significativamente de 40G3 e 50G3, enquanto 60G3 diferiu significativamente de todas as demais composições. Este comportamento, onde 60G3 se mostra significativamente menos deformável, é um indicativo direto da maior rigidez e menor fração de vazios alcançadas nessa composição. Esses resultados confirmam que a adição de particulados G3 impacta significativamente as propriedades mecânicas do compósito, tornando-o mais rígido e, em geral, menos deformável, com a composição 60G3 apresentando uma recuperação de resistência e uma redução acentuada na deformação.

4.2.4.1.4 ANOVA de fator duplo com repetição

Para a análise conjunta dos fatores, foi realizada uma ANOVA de dois fatores com repetição, considerando a granulometria e a fração volumétrica dos particulados. Essa análise, aplicada apenas à resistência ao dobramento, permitiu verificar os efeitos individuais desses fatores e a interação entre eles, conforme apresentado na Tabela 44.

Tabela 44 – Anova bifatorial com repetição para resistência a dobramento.

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Amostra	90,10521754	2	45,05260877	21,06741	9,87E-08	3,142809
Colunas	500,7253294	2	250,3626647	117,0741	6,03E-22	3,142809
Interações	697,5875596	4	174,3968899	81,55113	3,36E-24	2,51767
Dentro	134,7253437	63	2,138497518			
Total	1423,14345	71				

Fonte: Autoria própria, 2026.

A ANOVA bifatorial indicou que a granulometria, a fração volumétrica e a interação entre esses fatores exerceram efeito estatisticamente significativo sobre a resistência ao dobramento. Dessa forma, a resistência deve ser interpretada considerando a combinação entre

granulometria e fração volumétrica. Para avaliar o efeito médio da granulometria, aplicou-se o teste de Tukey com $k = 3$, apresentado na Tabela 45.

Tabela 45 – Tukey para $k=3$ da resistência a dobramento.

TUKEY DE DOIS FATORES PARA A RESISTÊNCIA A DOBRAMENTO PARA $K=3$ /D.M.S = 1,76

	G1	G2	G3
G1	0,00	2,45	3,95
G2	2,45	0,00	6,40
G3	3,95	6,40	0,00

Fonte: Autoria própria, 2026.

O teste de Tukey com $k = 3$, utilizando uma DMS de 1,76 MPa, mostrou que todas as granulometrias diferiram significativamente entre si. A granulometria G2 apresentou a maior resistência média, seguida por G1 e G3, confirmando que partículas de tamanho intermediário proporcionaram o melhor desempenho médio em dobramento. Para comparar individualmente as nove combinações entre granulometria e fração volumétrica, aplicou-se o teste de Tukey com $k = 9$, conforme apresentado na Tabela 46.

Tabela 46 – Tukey para $k=9$ da resistência a dobramento.

TUKEY DE DOIS FATORES COM REPETIÇÃO PARA A RESISTÊNCIA A FLEXÃO PARA $K=9$ /D.M.S = 2,41

	40G1	40G2	40G3	50G1	50G2	50G3	60G1	60G2	60G3
40G1	0,00	0,71	4,13	6,87	3,84	5,91	4,67	5,01	0,40
40G2	0,71	0,00	4,84	6,16	3,13	6,62	5,38	4,29	0,32
40G3	4,13	4,84	0,00	11,00	7,97	1,78	0,54	9,14	4,53
50G1	6,87	6,16	11,00	0,00	3,03	12,78	11,54	1,87	6,48
50G2	3,84	3,13	7,97	3,03	0,00	9,75	8,51	1,16	3,44
50G3	5,91	6,62	1,78	12,78	9,75	0,00	1,24	10,92	6,31
60G1	4,67	5,38	0,54	11,54	8,51	1,24	0,00	9,68	5,07
60G2	5,01	4,29	9,14	1,87	1,16	10,92	9,68	0,00	4,61
60%G3	0,40	0,32	4,53	6,48	3,44	6,31	5,07	4,61	0,00

Fonte: Autoria própria, 2026.

Para uma compreensão detalhada da interação entre fração volumétrica e granulometria, e para identificar as combinações específicas com desempenho estatisticamente distinto, foi aplicado o teste de Tukey com $k=9$, utilizando um DMS de 2,41 MPa.

Os resultados deste teste confirmaram que as composições 50G2 e 60G2 operaram em níveis estatisticamente equivalentes e representaram o melhor desempenho entre todos os compósitos reforçados, diferindo significativamente das composições com G3 e de 60G1. Este é um resultado chave, indicando que, para aplicações que demandam alta resistência ao dobramento, as granulometrias intermediárias em frações volumétricas elevadas são as mais promissoras.

Em contraste, o par 40G3 e 50G3 consolidou-se como o de menor resistência do conjunto, não diferindo entre si, mas diferindo significativamente de todas as composições com G1 e G2. A composição 60G3 ocupou uma posição intermediária, diferindo de 40G3 e 50G3, mas não alcançando os níveis das melhores composições com G2.

O grupo formado por 40G1, 40G2 e 40G3 não se comportou de forma homogênea, com 40G3 diferindo significativamente de 40G1 e 40G2, que por sua vez não diferiram entre si. Isso sugere que, na fração de 40%, a granulometria G3 tem um impacto mais negativo na resistência à flexão em comparação com G1 e G2.

Em síntese, o teste de Tukey para $k=9$ reforça a complexidade da interação entre a fração volumétrica e a granulometria, destacando a superioridade das composições 50G2 e 60G2 e a fragilidade das composições com G3 em frações volumétricas mais baixas, fornecendo um mapa claro das combinações ótimas e subótimas para a resistência à flexão.

4.2.5 Ensaio de impacto Izod

O ensaio de impacto Izod foi realizado com o objetivo de avaliar a capacidade dos compósitos de absorver energia sob carregamento dinâmico. A Tabela 47 apresenta o resumo dos resultados obtidos no ensaio de impacto Izod para os compósitos produzidos, expressos em energia de impacto por unidade de comprimento (J/m).

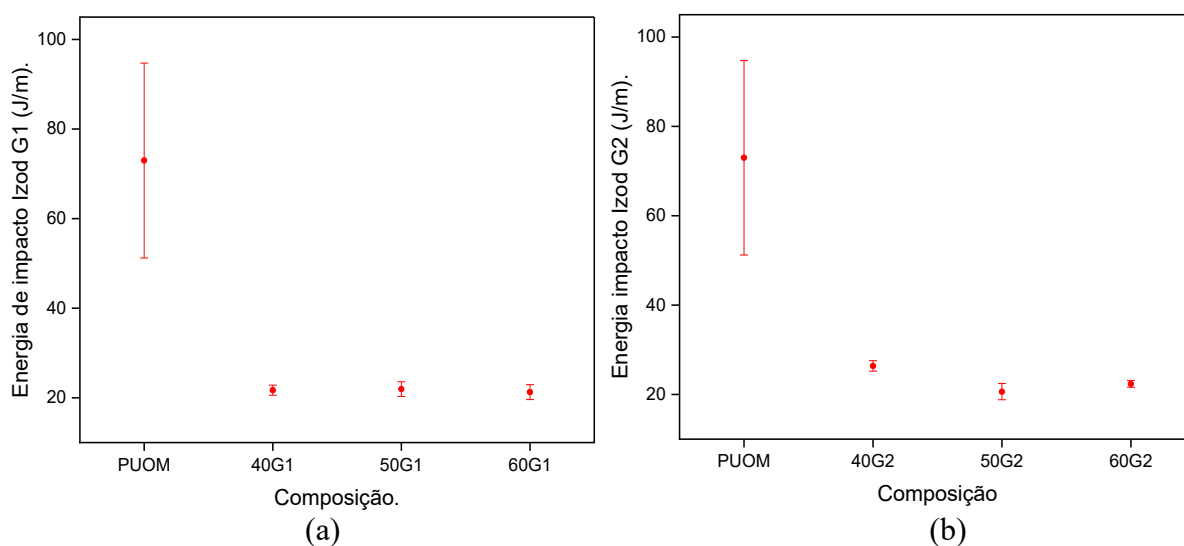
Tabela 47 – Tabela de resumo do impacto Izod realizado.

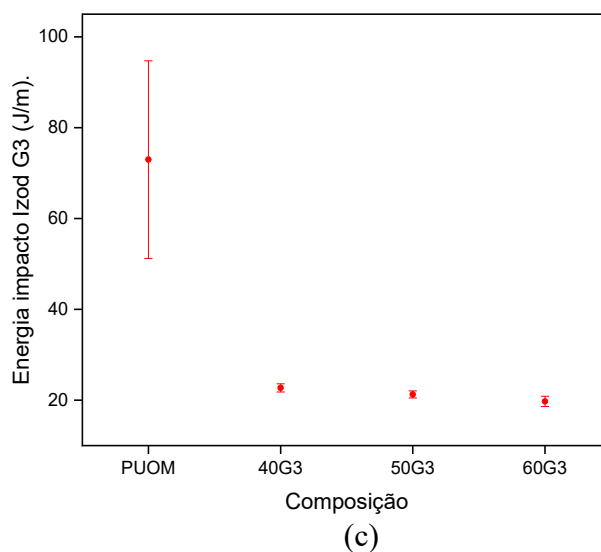
Granulometria 1	
Composição	Energia Impacto Izod (J/m)
PUOM	$72,98 \pm 21,76$
40G1	$21,69 \pm 1,13$
50G1	$21,93 \pm 1,64$
60G1	$21,27 \pm 1,66$
Granulometria 2	
PUOM	$72,98 \pm 21,76$
40G2	$26,38 \pm 1,18$
50G2	$20,63 \pm 1,81$
60G2	$22,38 \pm 0,77$
Granulometria 3	
PUOM	$72,98 \pm 21,76$
40G3	$22,71 \pm 0,90$
50G3	$21,26 \pm 0,78$
60G3	$19,72 \pm 1,12$

Fonte: Autoria própria, 2026.

Seguindo o mesmo critério de apresentação adotado nos ensaios anteriores, os resultados foram inicialmente organizados por faixa granulométrica, permitindo avaliar o comportamento de cada grupo em função da fração volumétrica de açaí. A comparação geral entre as composições será discutida posteriormente, a partir dos gráficos comparativos e da análise conjunta dos valores médios. A Figura 49 apresenta os gráficos de energia de impacto Izod dos compósitos produzidos, organizados de acordo com as faixas granulométricas G1, G2 e G3.

Figura 49 – Gráficos de energia Izod dos compósitos.

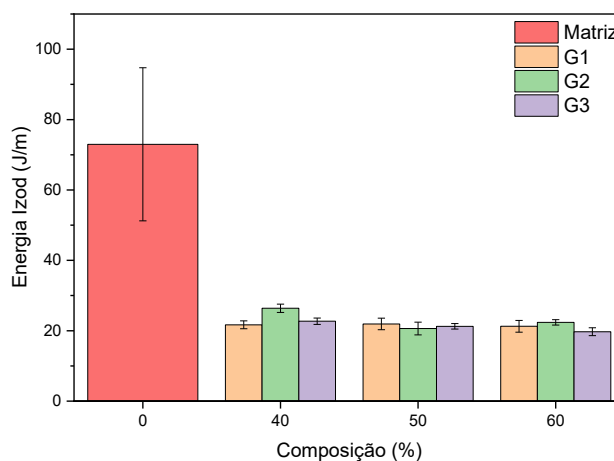




Fonte: Autoria própria, 2026.

A matriz pura de PUOM apresentou resistência ao impacto Izod de $72,98 \pm 21,76$ J/m. Para os compósitos 40G1, 50G1 e 60G1, os valores de energia Izod foram de $21,69 \pm 1,13$, $21,93 \pm 1,64$ e $21,27 \pm 1,66$ J/m. Esses valores representam aproximadamente uma diminuição de 70% na tenacidade do material, quando comparado a matriz pura. Para os compósitos 40G2, 50G2 e 60G2, os valores de energia Izod foram de $26,31 \pm 1,18$, $20,63 \pm 1,81$ e $22,38 \pm 0,77$ J/m causando redução da tenacidade na faixa dos 64 a 72%. Por fim, para 40G3, 50G3 e 60G3 os valores de energia Izod foram de $22,71 \pm 0,90$, $21,26 \pm 0,78$ e $19,72 \pm 1,12$ J/m indicando uma redução na tenacidade na faixa de 69 a 73%. A Figura 50 apresenta os comparativos dos valores de resistência a compressão dos compósitos produzidos.

Figura 50 – Gráfico comparativo de energia a impacto Izod dos compósitos produzidos.



Fonte: Autoria própria, 2026.

No ensaio de impacto pelo método Izod, é possível observar o mesmo comportamento, para todos as granulometrias, onde a resistência ao impacto diminui com o aumento da fração volumétrica do resíduo de açaí na matriz. Esse comportamento é condizente com o observado por (Júnior et al., 2023c), em (Carvalho et al., 2022) e em (Júnior et al., 2023b).

Esse comportamento é decorrente de a matriz de poliuretano de mamona apresentar comportamento elastômero; quando se adicionam particulados de açaí, o material transiciona para um material mais rígido. Esse aumento na rigidez, embora beneficie certas propriedades estruturais, pode impactar negativamente a capacidade de absorção de energia sob carregamento dinâmico, uma vez que formulações mais flexíveis, como a própria matriz de PUOM, tendem a possuir um desempenho superior em absorção de impacto em compósitos (Cruz et al., 2022; Dos Santos et al., 2025).

4.2.5.1 Validação estatística

A análise estatística da energia de impacto Izod foi realizada inicialmente para cada granulometria de forma separada e, posteriormente, por meio de uma análise conjunta dos efeitos da granulometria, da fração volumétrica e da interação entre esses fatores. Os resultados da ANOVA e do teste de Tukey são apresentados nas Tabelas 48 a 56.

4.2.5.1.1 ANOVA fator único e teste Tukey para composições com G1

Tabela 48 – ANOVA para energia de impacto Izod de G1.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	15823,39	3	5274,464	43,93153	1,02E-10	2,946685
Dentro dos grupos	3361,708	28	120,061			
Total	19185,1	31				

Fonte: Autoria própria, 2026.

A ANOVA confirmou diferenças significativas entre as composições com G1. Assim, aplicou-se o teste de Tukey, apresentado na Tabela 49.

Tabela 49 – Tukey para energia de impacto Izod de G1.

Composição	PUOM	40G1	50G1	60G1
Energia Izod/d.m.s =17,898				
PUOM	0,00	51,29	51,05	51,71
40G1	51,29	0,00	0,24	0,42
50G1	51,05	0,24	0,00	0,66
60G1	51,71	0,42	0,66	0,00

Fonte: Autoria própria, 2026.

O teste de Tukey para energia de impacto Izod, com diferença mínima significativa (DMS) de 17,898, revelou as distinções estatísticas entre as composições com granulometria G1. A matriz pura diferiu significativamente de todas as composições com adição de particulados (40G1, 50G1 e 60G1), indicando que a incorporação de particulados de açaí altera de forma significativa a resistência ao impacto do material, resultando em uma drástica redução da tenacidade. Por outro lado, não houve diferença significativa entre as composições 40G1, 50G1 e 60G1. Este comportamento indica que, após a adição de particulados G1, a energia de impacto tende a se estabilizar, independentemente do aumento da fração volumétrica, sugerindo saturação dessa propriedade com a incorporação do reforço.

4.2.5.1.2 ANOVA fator único e teste Tukey para composições com G2

Nesta etapa, a ANOVA de fator único foi utilizada para responder se a variação da fração volumétrica de particulados de açaí exerce um efeito estatisticamente significativo sobre a energia de impacto Izod dos compósitos de PUOM, mantendo fixa a granulometria G2.

Tabela 50 – ANOVA para energia de impacto Izod de G2.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	15049,32	3	5016,439	41,90938	1,75E-10	2,946685
Dentro dos grupos	3351,524	28	119,6973			
Total	18400,84	31				

Fonte: Autoria própria, 2026.

A ANOVA também indicou diferenças significativas entre as composições com G2. Os resultados do teste de Tukey são apresentados na Tabela 51.

Tabela 51 – Tukey para energia de impacto Izod de G2.

Composição	PUOM	40G2	50G2	60G2
Energia Izod/d.m.s =17,871				
PUOM	0,00	46,60	52,35	50,60
40G2	46,60	0,00	5,75	4,01
50G2	52,35	5,75	0,00	1,75
60G2	50,60	4,01	1,75	0,00

Fonte: Autoria própria, 2026.

O teste de Tukey para energia de impacto Izod, com diferença mínima significativa (DMS) de 17,871, demonstrou as distinções estatísticas entre as composições com granulometria G2. A matriz pura diferiu significativamente de todas as composições com adição de particulados (40G2, 50G2 e 60G2), evidenciando que a incorporação de particulados de açaí promove uma alteração significativa na resistência ao impacto do material, com uma redução acentuada da tenacidade. Por outro lado, não houve diferença significativa entre as composições 40G2, 50G2 e 60G2. Este resultado indica que, após a inserção dos particulados G2, a energia de impacto tende a apresentar comportamento semelhante entre os compósitos, independentemente do aumento da fração volumétrica, sugerindo estabilização dessa propriedade com a adição do reforço.

4.2.5.1.3 ANOVA fator único e teste Tukey para composições com G3

Tabela 52 – ANOVA para energia de impacto Izod de G3.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	16103,01	3	5367,67	45,08719	7,57E-11	2,946685
Dentro dos grupos	3333,424	28	119,0509			
Total	19436,43	31				

Fonte: Autoria própria, 2026.

A ANOVA confirmou diferenças significativas entre as composições com G3. Assim, aplicou-se o teste de Tukey, apresentado na Tabela 53.

Tabela 53 – Tukey para energia de impacto Izod de G3.

Composição	PUOM	40G3	50G3	60G3
Energia Izod/d.m.s =17,822				
PUOM	0,00	50,27	51,72	53,26
40G3	50,27	0,00	1,45	2,99
50G3	51,72	1,45	0,00	1,53
60G3	53,26	2,99	1,53	0,00

Fonte: Autoria própria, 2026.

O teste de Tukey para energia de impacto Izod, com diferença mínima significativa (DMS) de 17,822, evidenciou as distinções estatísticas entre as composições com granulometria G3. A matriz pura diferiu significativamente de todas as composições com adição de particulados G3, confirmando que a incorporação dos particulados de açaí altera de forma significativa a resistência ao impacto do material, resultando em uma redução substancial da tenacidade. Por outro lado, não houve diferença significativa entre as composições 40G3, 50G3 e 60G3. Este resultado indica que, após a inserção dos particulados G3, a energia de impacto tende a permanecer em um mesmo patamar entre os compósitos avaliados, evidenciando uma tendência de estabilização dessa propriedade.

4.2.5.1.4 ANOVA de fator duplo com repetição

A ANOVA de fator duplo foi aplicado apenas para energia de impacto Izod e está descrita na Tabela 54.

Tabela 54 – Anova bifatorial com repetição para energia de impacto Izod.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	92,2575514	2	46,1287757	28,2436	1,8E-09	3,14281
Colunas	48,1258041	2	24,062902	14,7331	5,6E-06	3,14281
Interações	84,4881975	4	21,1220494	12,9325	9,6E-08	2,51767
Dentro	102,894721	63	1,63324954			
Total	327,766274	71				

Fonte: Autoria própria, 2026.

A ANOVA bifatorial indicou que a granulometria, a fração volumétrica e a interação entre esses fatores exerceram efeito estatisticamente significativo sobre a energia de impacto Izod. Para avaliar o efeito médio da granulometria, aplicou-se o teste de Tukey com $k = 3$, apresentado na Tabela 55.

Tabela 55 – Tukey $k=3$ para energia de impacto Izod.

Tukey de dois fatores com repetição para energia Izod para $k=3$ /D.M.S = 1,54			
	G1	G2	G3
G1	0,00	1,50	0,40
G2	1,50	0,00	1,90
G3	0,40	1,90	0,00

Fonte: Autoria própria, 2026.

O teste de Tukey com $k = 3$, utilizando uma DMS de 1,54 J/m, mostrou que G1 e G3 não diferiram significativamente entre si, enquanto ambas diferiram de G2. Em média, a granulometria G2 apresentou a maior energia de impacto Izod. Para comparar individualmente as nove combinações entre granulometria e fração volumétrica, aplicou-se o teste de Tukey com $k = 9$, conforme apresentado na Tabela 56.

Tabela 56 – Tukey k=9 para energia de impacto Izod.

Tukey de dois fatores com repetição para energia Izod para k = 9 /D.M.S = 2,11									
	40G1	40G2	40G3	50G1	50G2	50G3	60G1	60G2	60G3
40G1	0,00	4,69	1,02	0,24	1,06	0,43	0,42	0,69	1,97
40G2	4,69	0,00	3,67	4,46	5,75	5,13	5,11	4,01	6,66
40G3	1,02	3,67	0,00	0,79	2,08	1,45	1,44	0,34	2,99
50G1	0,24	4,46	0,79	0,00	1,30	0,67	0,66	0,45	2,20
50G2	1,06	5,75	2,08	1,30	0,00	0,63	0,64	1,75	0,90
50G3	0,43	5,13	1,45	0,67	0,63	0,00	0,01	1,12	1,53
60G1	0,42	5,11	1,44	0,66	0,64	0,01	0,00	1,11	1,55
60G2	0,69	4,01	0,34	0,45	1,75	1,12	1,11	0,00	2,65
60G3	1,97	6,66	2,99	2,20	0,90	1,53	1,55	2,65	0,00

Fonte: Autoria própria, 2026.

Para uma compreensão detalhada da interação entre fração volumétrica e granulometria, e para identificar as combinações específicas com desempenho estatisticamente distinto, foi aplicado o teste de Tukey com k=9, utilizando um DMS de 2,11 J/m.

Os resultados deste teste confirmaram que a composição 40G2 se destacou como a de maior energia de impacto entre todos os compósitos reforçados, diferindo significativamente de todas as demais combinações. Este é um resultado chave, indicando que, para a tenacidade ao impacto, a combinação de 40% de particulados com granulometria G2 é a mais promissora.

As composições restantes (40G1, 40G3, 50G1, 50G2, 50G3, 60G1, 60G2 e 60G3) operaram em níveis estatisticamente equivalentes entre si, formando um patamar comum de energia de impacto. Embora a incorporação de particulados de açaí reduza drasticamente a tenacidade em relação à matriz pura, dentro do universo dos compósitos reforçados, a variação da fração volumétrica e da granulometria, nas condições estudadas, não é suficiente para promover diferenciação significativa na energia de impacto Izod entre a maioria das composições, com a notável exceção da 40G2.

Em síntese, o teste de Tukey para k=9 reforça a complexidade da interação entre a fração volumétrica e a granulometria, destacando a superioridade da composição 40G2 e a estabilização da tenacidade em um patamar inferior para as demais combinações de compósitos.

4.2.6 Ensaio de Dureza Shore D

O ensaio de dureza Shore D foi realizado com o objetivo de avaliar a resistência superficial dos compósitos à penetração, permitindo verificar a influência da fração volumétrica e da granulometria dos particulados de açaí na rigidez superficial do material. A Tabela 57 apresenta o resumo dos resultados de dureza Shore D obtidos para os compósitos produzidos.

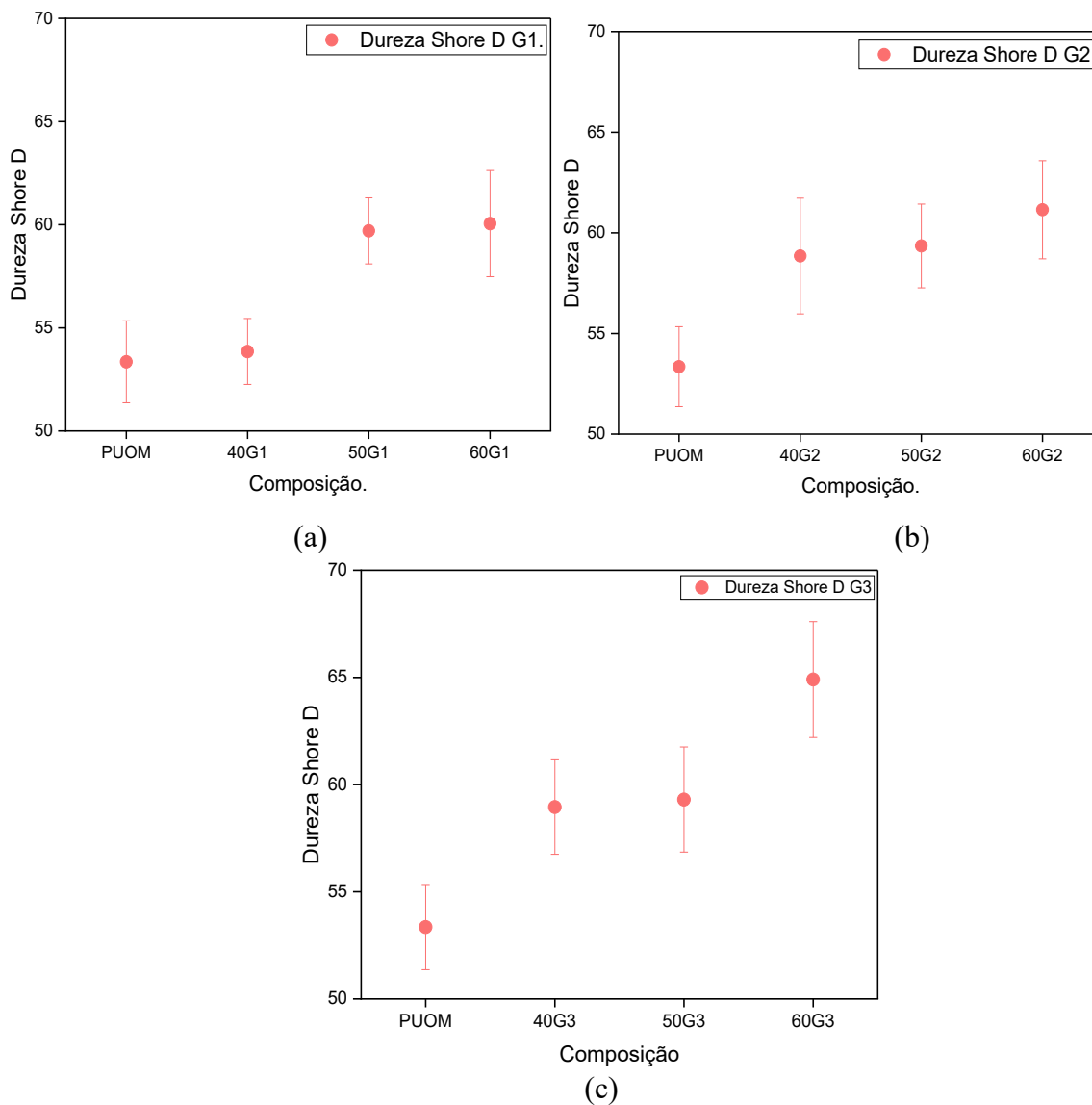
Tabela 57 – Tabela de resumo da dureza Shore D dos compósitos produzidos.

Granulometria 1	
Composição	Dureza Shore D.
PUOM	53,35 ± 1,99
40G1	53,85 ± 1,60
50G1	59,7 ± 1,60
60G1	60,05 ± 2,58
Granulometria 2	
PUOM	53,35 ± 1,99
40G2	58,85 ± 2,88
50G2	59,35 ± 2,08
60G2	61,15 ± 2,44
Granulometria 3	
PUOM	53,35 ± 1,99
40G3	58,95 ± 2,20
50G3	59,3 ± 2,45
60G3	64,9 ± 2,71

Fonte: Autoria própria, 2026.

Seguindo o mesmo critério de apresentação adotado nos ensaios anteriores, os resultados foram inicialmente organizados por faixa granulométrica, permitindo avaliar o comportamento de cada grupo em função da fração volumétrica de açaí. A comparação geral entre as composições será discutida posteriormente, a partir dos gráficos comparativos e da análise conjunta dos valores médios. A Figura 51 apresenta os gráficos de dureza Shore D dos compósitos produzidos, organizados de acordo com as faixas granulométricas G1, G2 e G3.

Figura 51 – Gráficos de dureza Shore D dos compósitos: a) composições com G1; b) composições com G2; c) composições com G3.

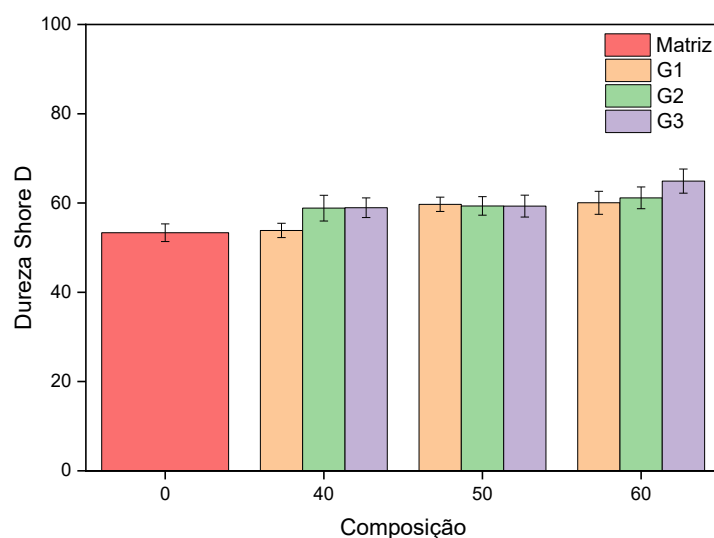


Fonte: Autoria própria, 2026.

A matriz pura de PUOM apresentou dureza Shore D de $53,35 \pm 1,99$, sendo utilizada como referência para análise das demais composições. Na formulação 40G1, o valor obtido foi de $53,85 \pm 1,60$, o que representa um aumento discreto de aproximadamente 1% em relação à matriz pura. Para a composição 50G1, a dureza alcançou $59,7 \pm 1,60$, correspondendo a um acréscimo de cerca de 12% quando comparado ao PUOM. Por fim, na formulação 60G1, o valor registrado foi de $60,05 \pm 2,58$, indicando um aumento aproximado de 13% na dureza Shore D em relação ao material sem reforço. A imagem 52 apresenta os comparativos dos

resultados de dureza Shore D para os compósitos produzidos com diferentes faixas granulométricas.

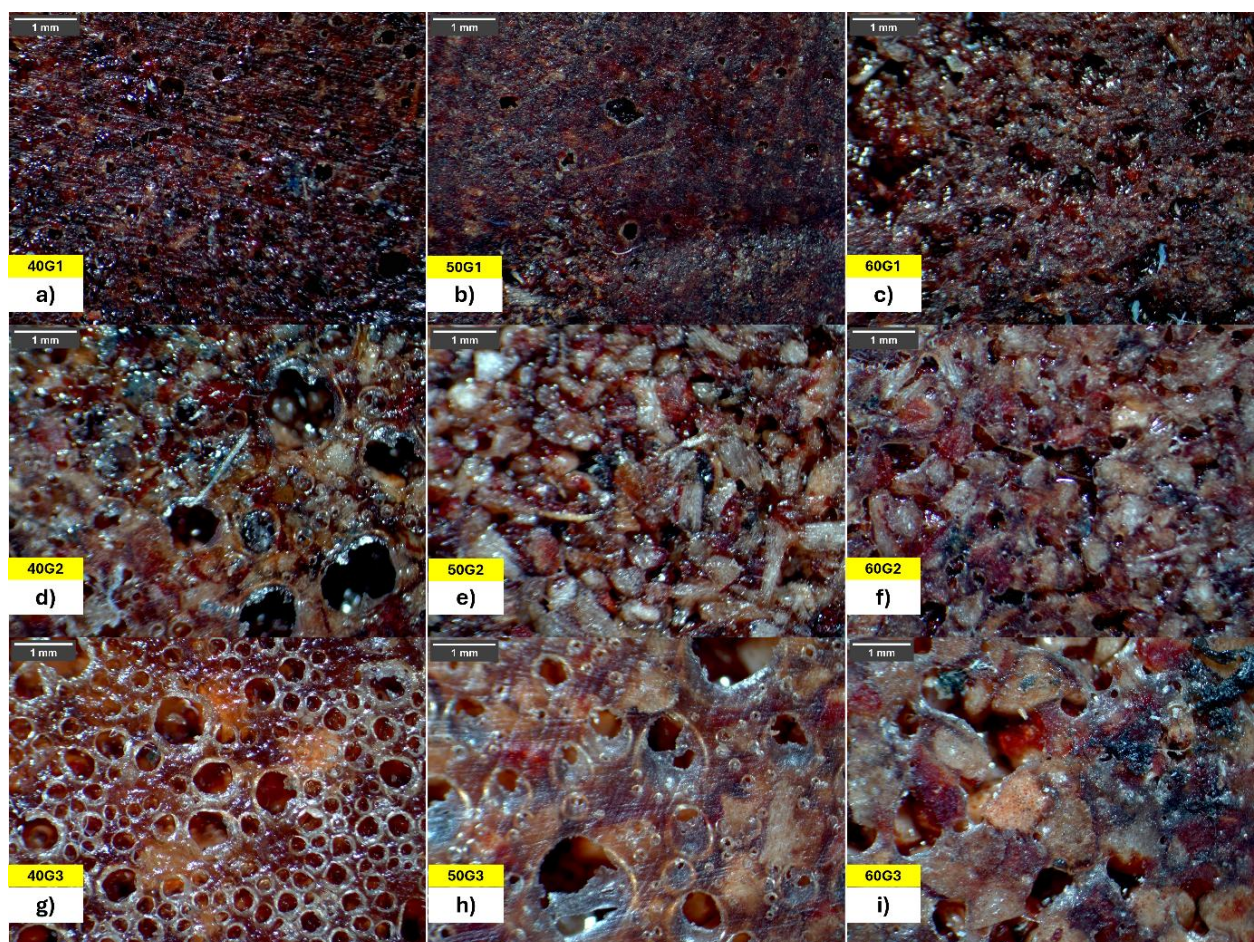
Figura 52 – Gráfico comparativo de dureza Shore D.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Os resultados previstos eram de um aumento na dureza do material à medida que é inserido partículas como reforço conforme relatado em Barczewski et al., (2019), (Nelson et al., (2013) e Konovalov et al., (2023a). Graticamente essa diferença é notada de forma mínima quando se trabalha olhando o estudo macro, essa pequena variação no aumento pode ser atrelada ao fato da superfície dos compósitos possuírem porosidades, o que dificulta a constância do ensaio de dureza shore D. A Figura 53 apresenta essas falhas nas superfícies.

Figura 53 – Superfície dos compósitos ensaiados em dureza Shore D.



Fonte: Autoria própria, 2026.

4.2.6.1 Validação estatística

A análise estatística da dureza Shore D foi realizada inicialmente para cada granulometria de forma separada e, posteriormente, por meio de uma análise conjunta dos efeitos da granulometria, da fração volumétrica e da interação entre esses fatores. Os resultados da ANOVA e do teste de Tukey são apresentados nas Tabelas 58 a 66.

4.2.6.1.1 ANOVA fator único e teste Tukey para composições com G1

Tabela 58 – ANOVA para as propriedades obtidas no ensaio de Dureza Shore D para G1

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	395,6188	3	131,8729	33,58037	1,56E-10	2,866266
Dentro dos grupos	141,375	36	3,927083			
Total	536,9938	39				

Fonte: Autoria própria, 2026.

A ANOVA confirmou diferenças significativas entre as composições com G1. Assim, aplicou-se o teste de Tukey, apresentado na Tabela 59.

Tabela 59 – ANOVA para ensaio de Dureza Shore D para G1

Dureza/d.m.s =2,989				
Composição	PUOM	40G1	50G1	60G1
PUOM	0,000	0,500	6,350	6,700
40G1	0,500	0,000	5,850	6,200
50G1	6,350	5,850	0,000	0,350
60G1	6,700	6,200	0,350	0,000

Fonte: Autoria própria, 2026.

O teste de Tukey para dureza, com diferença mínima significativa (DMS) de 2,989, revelou as distinções estatísticas entre as composições com granulometria G1. A matriz pura não apresentou diferença significativa em relação à composição 40G1, indicando que a adição de 40% de particulados G1 não alterou de forma relevante a dureza. No entanto, a matriz pura diferiu significativamente das composições 50G1 e 60G1, as quais, por sua vez, não apresentaram diferença significativa entre si. A composição 40G1 também diferiu significativamente de 50G1 e 60G1. Esses achados confirmam que a incorporação de maiores teores de particulados G1 (50% e 60%) promove um aumento significativo da dureza do material, com uma tendência de estabilização dessa propriedade em frações volumétricas mais elevadas.

4.2.6.1.2 ANOVA fator único e teste Tukey para composições com G2

Nesta etapa, a ANOVA de fator único foi utilizada para responder se a variação da fração volumétrica de particulados de açaí exerce um efeito estatisticamente significativo sobre a dureza Shore D dos compósitos de PUOM, mantendo fixa a granulometria G2.

Tabela 60 – ANOVA para as propriedades obtidas no ensaio de dureza Shore D para G2.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	339,675	3	113,225	20,11895	7,9E-08	2,866266
Dentro dos grupos	202,6	36	5,627778			
Total	542,275	39				

Fonte: Autoria própria, 2026.

A ANOVA também indicou diferenças significativas entre as composições com G2. Os resultados do teste de Tukey são apresentados na Tabela 61.

Tabela 61 – ANOVA para ensaio de Dureza Shore D para G2

Dureza/d.m.s =3,578					
Composição	PUOM	40G2	50G2	60G2	
PUOM	0,000	5,500	6,000	7,800	
40G2	5,500	0,000	0,500	2,300	
50G2	6,000	0,500	0,000	1,800	
60G2	7,800	2,300	1,800	0,000	

Fonte: Autoria própria, 2026.

O teste de Tukey para dureza, com diferença mínima significativa (DMS) de 3,578, revelou as distinções estatísticas entre as composições com granulometria. A matriz pura diferiu significativamente de todas as composições com adição de particulados (40G2, 50G2 e 60G2), indicando que a incorporação de particulados G2, em qualquer fração volumétrica testada, promove um aumento relevante na dureza do material. Por outro lado, não houve diferença significativa entre as composições 40G2, 50G2 e 60G2. Este resultado demonstra que, após a inserção dos particulados G2, a dureza tende a se estabilizar entre os compósitos,

independentemente do aumento da fração volumétrica, evidenciando uma tendência de saturação dessa propriedade com a adição do reforço.

4.2.6.1.3 ANOVA fator único e teste Tukey para composições com G3

Nesta etapa, a ANOVA de fator único foi utilizada para responder se a variação da fração volumétrica de particulados de açaí exerce um efeito estatisticamente significativo sobre a dureza Shore D dos compósitos de PUOM, mantendo fixa a granulometria G3.

Tabela 62 – ANOVA para as propriedades obtidas no ensaio de Dureza Shore D para G3

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	667,625	3	222,5417	40,20828	1,39E-11	2,866266
Dentro dos grupos	199,25	36	5,534722			
Total	866,875	39				

Fonte: Autoria própria, 2026.

A ANOVA confirmou diferenças significativas entre as composições com G3. Assim, aplicou-se o teste de Tukey, apresentado na Tabela 63.

Tabela 63 – ANOVA para ensaio de Dureza Shore D para G3

Dureza/d.m.s =3,549				
Composição	PUOM	40G3	50G3	60G3
PUOM	0	5,6	5,95	11,55
40G3	5,6	0	0,35	5,95
50G3	5,95	0,35	0	5,6
60G3	11,55	5,95	5,6	0

Fonte: Autoria própria, 2026.

O teste de Tukey para dureza, com diferença mínima significativa (DMS) de 3,549, revelou as distinções estatísticas entre as composições com granulometria G3. A matriz pura diferiu significativamente de todas as composições com adição de particulados G3, indicando

que a incorporação de particulados G3, em qualquer fração volumétrica testada, promove um aumento significativo na dureza do material. Observou-se que não houve diferença significativa entre as composições 40G3 e 50G3. No entanto, a composição 60G3 diferiu significativamente de todas as demais, destacando-se como a condição de maior dureza. Esses achados confirmam que a dureza do material aumenta com a incorporação de particulados G3, apresentando um comportamento semelhante entre as composições intermediárias e um aumento mais pronunciado na composição com maior teor de reforço.

4.2.6.1.4 ANOVA de fator duplo com repetição

Para a análise conjunta dos fatores, foi realizada uma ANOVA de dois fatores com repetição, considerando a granulometria e a fração volumétrica dos particulados. Essa análise, aplicada apenas à dureza Shore D, permitiu verificar os efeitos individuais desses fatores e a interação entre eles, conforme apresentado na Tabela 64.

Tabela 64 – Anova bifatorial com repetição para dureza Shore D.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	348,616667	2	174,308333	32,3348	4,8E-11	3,10931
Colunas	154,116667	2	77,0583333	14,2946	4,8E-06	3,10931
Interações	146,216667	4	36,5541667	6,78092	9,3E-05	2,48444
Dentro	436,65	81	5,39074074			
Total	1085,6	89				

Fonte: Autoria própria, 2026.

A ANOVA bifatorial indicou que a granulometria, a fração volumétrica e a interação entre esses fatores exerceram efeito estatisticamente significativo sobre a dureza Shore D. Dessa forma, a dureza deve ser interpretada considerando a combinação entre granulometria e fração volumétrica. Para avaliar o efeito médio da granulometria, aplicou-se o teste de Tukey com $k = 3$, apresentado na Tabela 65.

Tabela 65 – Tukey para k=3 de dureza Shore D.

TUKEY DE DOIS FATORES PARA A DUREZA SHORE D K=3 /D.M.S = 2,50

	G1	G2	G3
G1	0,00	1,92	3,18
G2	1,92	0,00	1,27
G3	3,18	1,27	0,00

Fonte: Autoria própria, 2026.

O teste de Tukey com $k = 3$, utilizando uma DMS de 2,50, mostrou que G1 e G2 não diferiram significativamente entre si, assim como G2 e G3. Apenas o par G1/G3 apresentou diferença significativa, com G3 exibindo a maior dureza média. Para comparar individualmente as nove combinações entre granulometria e fração volumétrica, aplicou-se o teste de Tukey com $k = 9$, conforme apresentado na Tabela 66.

Tabela 66 – Tukey para k=9 de dureza Shore D.

TUKEY DE DOIS FATORES COM REPETIÇÃO PARA DUREZA SHORE D PARA K= 9 /D.M.S = 3,52

	40G1	40G2	40G3	50G1	50G2	50G3	60G1	60G2	60G3
40G1	0,00	5,00	5,10	5,85	5,50	5,45	6,20	7,30	11,05
40G2	5,00	0,00	0,10	0,85	0,50	0,45	1,20	2,30	6,05
40G3	5,10	0,10	0,00	0,75	0,40	0,35	1,10	2,20	5,95
50G1	5,85	0,85	0,75	0,00	0,35	0,40	0,35	1,45	5,20
50G2	5,50	0,50	0,40	0,35	0,00	0,05	0,70	1,80	5,55
50G3	5,45	0,45	0,35	0,40	0,05	0,00	0,75	1,85	5,60
60G1	6,20	1,20	1,10	0,35	0,70	0,75	0,00	1,10	4,85
60G2	7,30	2,30	2,20	1,45	1,80	1,85	1,10	0,00	3,75
60G3	11,05	6,05	5,95	5,20	5,55	5,60	4,85	3,75	0,00

Fonte: Autoria própria, 2026.

Para uma compreensão detalhada da interação entre fração volumétrica e granulometria, e para identificar as combinações específicas com desempenho estatisticamente distinto, foi aplicado o teste de Tukey com $k=9$, utilizando um DMS de 3,52.

Os resultados deste teste revelaram dois extremos bem definidos no conjunto. A composição 40G1 apresentou a menor dureza, diferindo significativamente de todas as demais composições, consolidando-se como a condição de menor desempenho em dureza Shore D. No extremo oposto, 60G3 destacou-se como a composição de maior dureza, diferindo significativamente de todas as outras nove combinações, incluindo 60G1 e 60G2. Este resultado

reforça que o efeito combinado da maior fração volumétrica (60%) com a granulometria mais grossa (G3) representa a condição mais favorável para o incremento dessa propriedade.

As composições intermediárias, que incluem 40G2, 40G3, 50G1, 50G2, 50G3, 60G1 e 60G2, operaram em níveis estatisticamente equivalentes entre si, formando um patamar comum de dureza situado entre os dois extremos identificados. Em síntese, o teste de Tukey para $k=9$ reforça a complexidade da interação entre a fração volumétrica e a granulometria, destacando a superioridade da composição 60G3 e a fragilidade da 40G1, fornecendo um mapa claro das combinações ótimas e subótimas para a dureza Shore D.

4.2.7 Densidade prática e fração de vazios

As densidades dos compósitos foram calculadas adaptando-se os procedimentos da norma ABNT NBR 14810-2:2024, utilizando corpos de prova com dimensões de $12 \times 12 \times 3$ mm. Inicialmente, em função das diferentes espessuras das placas, foram realizados ensaios de tração, compressão e flexão com seis corpos de prova para cada formulação, e de cada corpo de prova fraturado foi seccionado um segmento de $12 \times 12 \times 3$ mm para determinação da densidade prática e da fração de vazios associadas àquele ensaio específico. Em seguida, para a definição da densidade prática e da fração de vazios de cada formulação como um todo, foram considerados os 18 corpos de prova (6 de tração, 6 de compressão e 6 de flexão), conforme apresentado na Tabela 67.

Nesta seção, os resultados de densidade prática e fração de vazios são utilizados com caráter predominantemente explicativo, para auxiliar na interpretação do desempenho mecânico observado nos ensaios de tração, compressão e flexão, e não como variáveis-alvo de tratamento estatístico formal (ANOVA e teste de Tukey).

Tabela 67 – Valores de densidade prática e frações de vazios para tração.

Amostra	Densidade teórica (g/cm ³)	Densidade prática (g/cm ³)	F. vazios
PUOM	1,09	0,96 ± 0,04	11,70 ± 0,04
Granulometria 1			
40G1	1,19	0,93 ± 0,02	21,91 ± 1,92
50G1	1,22	1,12 ± 0,04	7,99 ± 3,05
60G1	1,25	1,13 ± 0,04	9,63 ± 3,45
Granulometria 2			
40G2	1,19	0,87 ± 0,02	26,61 ± 1,42
50G2	1,22	0,84 ± 0,08	30,72 ± 6,26
60G2	1,25	0,90 ± 0,01	28,28 ± 1,09
Granulometria 3			
40G3	1,20	0,79 ± 0,01	33,80 ± 1,11
50G3	1,23	0,98 ± 0,03	19,99 ± 2,28
60G3	1,26	0,93 ± 0,03	25,55 ± 2,25

Fonte: Autoria própria, 2026.

A matriz pura de PUOM exibiu uma densidade prática de $0,96 \pm 0,04$ g/cm³ e uma fração de vazios de $11,70 \pm 0,04\%$.

Para os compósitos 40G1, 50G1 e 60G1, os valores de densidade prática foram de $0,93 \pm 0,02$, $1,12 \pm 0,04$ e $1,13 \pm 0,04$ g/cm³, respectivamente. Com exceção do 40G1, o aumento na densidade prática é o comportamento mais esperado, dada a densidade mais elevada dos particulados de açaí incorporados à matriz. A fração de vazios para esses mesmos compósitos foi de $21,91 \pm 1,92\%$, $7,99 \pm 3,05\%$ e $9,63 \pm 3,45\%$. A alta fração de vazios observada em 40G1 explica sua densidade prática mais baixa e, consequentemente, a redução na resistência à tração, uma vez que a presença de bolhas diminui a seção transversal efetiva do material.

No caso dos compósitos 40G2, 50G2 e 60G2, as densidades práticas registradas foram de $0,87 \pm 0,02$, $0,84 \pm 0,08$ e $0,90 \pm 0,01$ g/cm³, respectivamente, todas inferiores ao valor de referência da matriz pura. Essa baixa densidade é explicada pelo elevado índice de fração de vazios. Os valores de fração de vazios para esses compósitos foram de $26,61 \pm 1,42\%$, $30,72 \pm 6,26\%$ e $28,28 \pm 1,09\%$. Tais índices elevados não apenas comprometem a estrutura, mas também resultam em um material mais leve. A relativa "linearidade" observada na curva de resistência à tração para G2 pode ser parcialmente explicada pela consistência dos valores de fração de vazios, que se mantêm em patamares próximos entre os máximos e mínimos.

Por fim, para os compósitos 40G3, 50G3 e 60G3, os valores de densidade prática foram de $0,79 \pm 0,01$, $0,98 \pm 0,03$ e $0,93 \pm 0,03$ g/cm³, respectivamente, também abaixo da referência da matriz. As frações de vazios correspondentes foram de $33,80 \pm 1,11\%$, $19,99 \pm 2,28\%$ e

25,55 ± 2,25%, o que justifica as baixas densidades práticas desses compósitos. É notável que tanto 40G3 quanto 60G3 apresentam um alto índice de fração de vazios, o que pode ser o principal responsável pela acentuada queda de resistência observada na curva da Figura 39 (c). Esses resultados reforçam que, em tração, a presença de vazios desempenha papel decisivo na redução da resistência dos compósitos, em especial nas formulações com G2 e G3, nas quais a fração de vazios se manteve sistematicamente em patamares elevados.

Para compressão também foi cortado um pedaço de 12 x 12 x 3 mm dos cps fraturados para a realização do teste para obter densidade prática e fração de vazios. A Tabela 68 apresenta a densidade teórica, densidade prática e fração de vazios calculados para os corpos de provas em compressão.

Tabela 68 – Valores de densidade prática e frações de vazios para compressão.

Amostra	Densidade teórica (g/cm ³)	Densidade prática (g/cm ³)	F. vazios(%)
PUOM	1,09	0,98 ± 0,04	10,55 ± 3,22
Granulometria 1			
40G1	1,19	0,72 ± 0,02	39,66 ± 1,57
50G1	1,22	0,85 ± 0,02	30,45 ± 1,93
60G1	1,25	0,97 ± 0,02	22,38 ± 1,78
Granulometria 2			
40G2	1,19	0,84 ± 0,10	29,06 ± 8,24
50G2	1,22	0,90 ± 0,02	26,14 ± 1,91
60G2	1,25	1,02 ± 0,03	18,65 ± 2,78
Granulometria 3			
40G3	1,20	0,91 ± 0,03	23,75 ± 2,39
50G3	1,23	0,95 ± 0,04	22,75 ± 3,31
60G3	1,26	0,94 ± 0,02	24,87 ± 1,64

Fonte: Autoria própria, 2026.

A matriz pura de PUOM apresentou densidade prática de 0,98 ± 0,04 g/cm³ e uma fração de vazios de 10,55 ± 3,22%. Para os compósitos 40G1, 50G1 e 60G1, os valores de densidade prática foram de 0,72 ± 0,02 g/cm³, 0,85 ± 0,02 g/cm³ e 0,97 ± 0,02 g/cm³, respectivamente. Todos esses valores ficaram abaixo da densidade prática da matriz de PUOM (0,98 g/cm³), embora 60G1 esteja muito próximo. Enquanto os valores de fração de vazios foram de 39,66 ± 1,57%, 30,45 ± 1,93% e 22,38 ± 1,78%, respectivamente. Essa redução progressiva na fração de vazios para G1, onde na fração volumétrica de 60%, houve o menor resultado de fração de vazios para essa faixa granulométrica, explica o excelente desempenho em compressão observado para esta granulometria, pois uma menor porosidade geralmente se traduz em maior

capacidade de suporte de carga e uma melhor seção transversal para suportar as cargas que o material é submetido.

Para os compósitos 40G2, 50G2 e 60G2, os valores de densidade prática foram de $0,84 \pm 0,10 \text{ g/cm}^3$, $0,90 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ e $1,02 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. Estes apresentaram o comportamento padrão de aumento de densidade à medida que se adicionam cargas de açai, sendo que apenas em 60G2 a densidade foi superior à da matriz de PUOM ($0,98 \text{ g/cm}^3$). Para a fração de vazios, os valores foram de $29,06 \pm 8,24\%$, $26,14 \pm 1,91\%$ e $18,65 \pm 2,78\%$, respectivamente. O comportamento de diminuição é consistente com o fator de preenchimento de vazios já explicado para G1. A diminuição da fração de vazios em G2, atingindo $18,65\%$ em 60G2, também se alinha com o aumento da resistência à compressão para esta granulometria, reforçando a importância da compactação para as propriedades mecânicas.

Por fim, para os compósitos 40G3, 50G3 e 60G3, a densidade prática foi de $0,91 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$, $0,95 \pm 0,04 \text{ g/cm}^3$ e $0,94 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$, respectivamente, valores que se mantiveram próximos da densidade prática da matriz de PUOM. Enquanto a fração de vazios dos compósitos foi de $23,75 \pm 2,39\%$, $22,75 \pm 3,31\%$ e $24,87 \pm 1,64\%$, respectivamente. Nas composições de G3, a fração de vazios foi a única que permaneceu relativamente estável, sem grandes diferenças ou quedas significativas, indicando que grãos maiores podem não preencher esses vazios de forma tão eficiente quanto os menores, mantendo o índice de vazios em um patamar semelhante. A estabilidade da fração de vazios em G3, sem a redução significativa observada nas outras granulometrias, pode ser um dos fatores limitantes para que os ganhos de resistência à compressão máximos para G3 sejam inferiores aos de G1 e G2, uma vez que a presença de vazios atua como concentrador de tensões e reduz a área efetiva de suporte. A comparação entre densidade prática, fração de vazios e resistência à compressão mostra que, para G1 e G2, o aumento da densidade prática e a redução da fração de vazios acompanham diretamente o aumento de resistência, ao passo que, em G3, a fração de vazios praticamente constante limita os ganhos compressivos em relação às granulometrias mais finas.

Para flexão também foi cortado um pedaço de $12 \times 12 \times 3 \text{ mm}$ dos cps fraturados para a realização do teste para obter densidade prática e fração de vazios. A Tabela 69 apresenta a densidade teórica, densidade prática e fração de vazios calculados para os corpos de provas testados em flexão.

Tabela 69 – Valores de densidade prática e frações de vazios para flexão.

Amostra	Densidade teórica (g/cm ³)	Densidade prática (g/cm ³)	F. vazios(%)
PUOM	1,09	0,99 ± 0,02	8,83 ± 1,60
Granulometria 1			
40G1	1,19	0,88 ± 0,01	26,00 ± 1,24
50G1	1,22	1,10 ± 0,01	9,85 ± 0,81
60G1	1,25	0,78 ± 0,03	37,66 ± 2,26
Granulometria 2			
40G2	1,19	1,06 ± 0,01	11,23 ± 0,84
50G2	1,22	1,02 ± 0,03	16,39 ± 2,09
60G2	1,25	1,07 ± 0,03	14,15 ± 2,34
Granulometria 3			
40G3	1,20	0,76 ± 0,02	36,68 ± 1,67
50G3	1,23	0,86 ± 0,12	29,59 ± 9,64
60G3	1,26	1,02 ± 0,03	18,75 ± 2,22

Fonte: Autoria própria, 2026.

A matriz pura de PUOM apresentou densidade prática de $0,99 \pm 0,02$ g/cm³, com uma fração de vazios de $8,83 \pm 1,60\%$. Para os compósitos 40G1, 50G1 e 60G1, os valores de densidade prática foram de $0,88 \pm 0,01$ g/cm³, $1,10 \pm 0,01$ g/cm³ e $0,78 \pm 0,03$ g/cm³, respectivamente. As frações de vazios correspondentes foram de $26,00 \pm 1,24\%$, $9,85 \pm 0,81\%$ e $37,66 \pm 2,26\%$. O alto índice de vazios em 60G1 explica a acentuada queda de resistência à flexão observada nessa composição, conforme discutido na seção 4.2.4, reforçando a correlação direta entre a microestrutura e o desempenho mecânico.

Para os compósitos 40G2, 50G2 e 60G2, os valores de densidade prática foram de $1,06 \pm 0,01$ g/cm³, $1,02 \pm 0,03$ g/cm³ e $1,07 \pm 0,03$ g/cm³, respectivamente. As frações de vazios desses compósitos foram de $11,23 \pm 0,84\%$, $16,39 \pm 2,09\%$ e $14,15 \pm 2,34\%$. Por fim, para os compósitos 40G3, 50G3 e 60G3, as densidades práticas foram de $0,76 \pm 0,02$ g/cm³, $0,86 \pm 0,12$ g/cm³ e $1,02 \pm 0,03$ g/cm³, respectivamente. As frações de vazios foram de $36,68 \pm 1,67\%$, $29,59 \pm 9,64\%$ e $18,75 \pm 2,22\%$, respectivamente. É notável que, para G3, a fração de vazios diminui progressivamente com o aumento da fração volumétrica de particulados, o que pode explicar a recuperação da resistência à flexão observada em 60G3 na seção anterior. Dessa forma, a análise de densidade prática e fração de vazios em flexão confirma que as quedas abruptas de resistência em composições como 60G1, bem como a recuperação parcial em 60G3, estão intimamente associadas à variação do teor de vazios, reforçando o papel da microestrutura na resposta flexional dos compósitos.

De forma geral, pela análise conjunta dos resultados de densidade prática e fração de vazios nos ensaios de tração, compressão e flexão, é possível concluir que a fração de vazios

influencia diretamente a densidade prática e, por consequência, o desempenho mecânico dos compósitos. Em compósitos poliméricos, a formação de vazios é um problema típico que degrada as propriedades físicas e mecânicas do material, limitando suas aplicações em setores estruturais (Amjad; et al., 2024).

Os vazios diminuem a capacidade efetiva de suporte de carga da matriz polimérica, enfraquecendo, conseqüentemente, a eficiência do reforço incorporado (Elmasry; Azoti; Elmarakbi, 2023). Portanto, o controle adequado do teor de vazios é fundamental para garantir uniformidade, densidade e desempenho mecânico satisfatórios em condições operacionais (Elkolali et al., 2022).

Essa elevada fração de vazios nos compósitos pode ser atribuída a dois fatores principais. Primeiramente, a produção de dióxido de carbono (CO_2) durante a reação de cura do PUOM (Kaur et al., 2022; Protzek et al., 2022). Em segundo lugar, a natureza hidrofílica dos materiais lignocelulósicos, como os particulados de açaí, mesmo após a secagem, pode agravar a formação de bolhas, conseqüentemente elevando a fração de vazios na matriz de poliuretano, conforme documentado (Cardoso et al., 2025c).

A redução na fração de vazios em compósitos, com a faixas granulométricas menores, e com o aumento da carga de particulados pode estar relacionada ao preenchimento dessas lacunas (vazios) pelos particulados, promovendo uma melhor compactação da matriz polimérica (Rabelo Aparício et al., 2024; Seibel et al., 2021). A consistência dessa observação em diferentes tipos de ensaio mecânico (tração, compressão e flexão) reforça a importância crítica do controle da microestrutura e da minimização de vazios para otimizar o desempenho de compósitos reforçados com particulados de açaí utilizando a matriz de Poliuretano obtida de mamona.

Para a definição da fração de vazios das formulações, foi utilizado os 18 corpos de prova de cada formulação, seis de tração, seis de compressão e 6 de flexão. A Tabela 70 apresenta a densidade teórica, densidade prática e fração de vazios calculados para cada formulação estudada.

Tabela 70 – Valores de densidade prática e frações de vazios dos compósitos.

Amostra	Densidade teórica (g/cm³)	Densidade prática (g/cm³)	F. vazios(%)
PUOM	1,09	0,98 ± 0,03	10,36 ± 3,17
Granulometria 1			
40G1	1,19	0,84 ± 0,09	29,19 ± 7,95
50G1	1,22	1,03 ± 0,13	16,10 ± 10,66
60G1	1,25	0,96 ± 0,15	23,22 ± 12,04
Granulometria 2			
40G2	1,19	0,92 ± 0,11	22,30 ± 9,31
50G2	1,22	0,92 ± 0,09	24,42 ± 7,19
60G2	1,25	0,99 ± 0,08	20,36 ± 6,40
Granulometria 3			
40G3	1,20	0,82 ± 0,07	31,40 ± 5,95
50G3	1,23	0,93 ± 0,09	24,11 ± 7,02
60G3	1,26	0,97 ± 0,05	23,06 ± 3,69

Fonte: Autoria própria, 2026.

Observando a Tabela 70, é perceptível o quanto a fração de vazios é elevada nas formulações dos compósitos. Associado ao modo de fabricação adotado, isso indica que, embora o processo de moldagem em placa seja simples, ele não é o mais eficiente para a minimização de vazios e pode ser considerado pouco otimizado para a produção de painéis com baixa porosidade.

Com base nos resultados obtidos, se observa que os painéis possuem densidades na faixa de 0,82 a 1,03 g/cm³. Que de acordo com a norma ABNT NBR 14810-2: 2024, painéis produzidos com densidades entre 0,55 e 0,75 g/cm³ é considerado painéis particulados de média densidade, consequentemente como todas as densidades obtidas das formulações foram superiores, podemos classificar todos os painéis como painéis particulados de alta densidade.

4.2.8 Absorção de água

O estudo de absorção de água seguiu os padrões da norma ASTM D570-22. O ensaio foi realizado para se obter o valor de absorção de água ao final de 24 horas para os compósitos produzidos. A Tabela 71 apresenta os valores de absorção ao final de 24 horas e da porosidade aparente acessível à água.

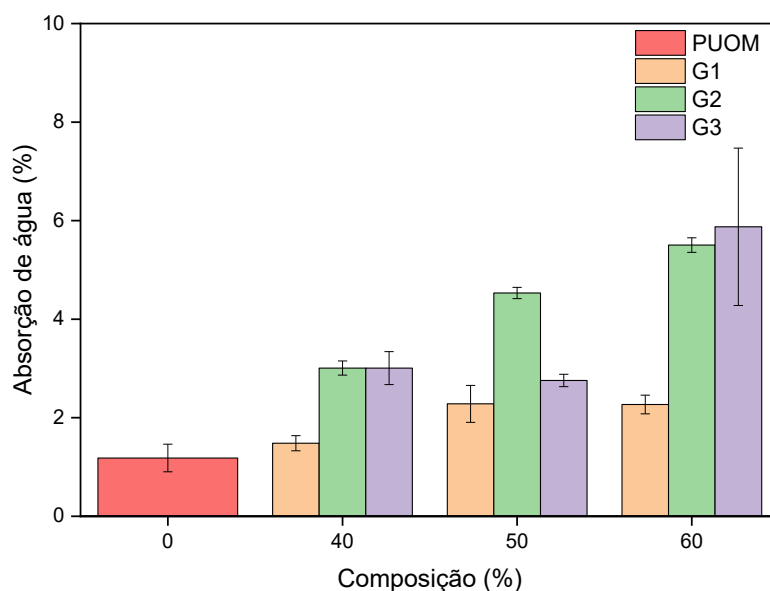
Tabela 71 – Tabela de absorção de água e porosidade aparente ao final de 24 horas

Composição	Absorção de água em 24 hrs (%)	Porosidade aparente acessível à água (%)
PUOM	$1,18 \pm 0,28$	$1,20 \pm 0,28$
Granulometria 1		
40G1	$1,48 \pm 0,15$	$1,42 \pm 0,15$
50G1	$2,28 \pm 0,37$	$2,51 \pm 0,46$
60G1	$2,26 \pm 0,18$	$2,66 \pm 0,23$
Granulometria 2		
40G2	$3,00 \pm 0,14$	$2,87 \pm 0,19$
50G2	$4,53 \pm 0,11$	$4,50 \pm 0,33$
60G2	$5,50 \pm 0,15$	$5,74 \pm 0,19$
Granulometria 3		
40G3	$3,00 \pm 0,33$	$2,67 \pm 0,36$
50G3	$2,75 \pm 0,12$	$2,82 \pm 0,14$
60G3	$5,87 \pm 1,59$	$5,89 \pm 1,70$

Fonte: Autoria própria, 2026.

A figura 54 apresenta o gráfico comparativo de absorção de água após 24 horas.

Figura 54 – Comparativo de absorção de água dos compósitos produzidos.



Fonte: Autoria própria, 2026.

A porosidade aparente acessível à água apresentou comportamento coerente com os resultados de absorção, uma vez que ambas as propriedades estão relacionadas ao volume de água incorporado pelos corpos de prova após 24 h de imersão. Enquanto a absorção de água expressa o ganho de massa em relação à massa seca inicial, a porosidade aparente acessível à

água estima o volume de água absorvido em relação ao volume geométrico do corpo de prova. Dessa forma, os valores próximos entre absorção e porosidade aparente indicam que parte significativa da água absorvida está associada a vazios, descontinuidades superficiais, caminhos preferenciais de difusão e regiões de interface matriz/particulado acessíveis à água.

O valor de absorção da matriz pura (PUOM) foi de $1,18 \pm 0,28\%$, refletindo o caráter predominantemente hidrofóbico do poliuretano de mamona. Esse comportamento está associado à presença de longas cadeias hidrofóbicas, que contribuem para a resistência à hidrólise (Fagnani *et al.*, 2022), confirmando que maiores teores de resina tendem a reduzir a absorção de água pelo material (Cardoso *et al.*, 2025c).

A adição de partículas de açaí, independentemente da granulometria, elevou a absorção de água em todas as composições, comportamento esperado dado o caráter higroscópico das partículas lignocelulósicas, ricas em celulose, hemicelulose e lignina, que possuem grupos hidroxila livres com alta afinidade por moléculas de água. Esse comportamento está ligado à natureza hidrofílica dos materiais lignocelulósicos, que facilitam a absorção de umidade através de ligações de hidrogênio (Camillo *et al.*, 2023; Cardoso *et al.*, 2025c), e esse aumento proporcional de absorção com o incremento das cargas de reforço natural segue o comportamento de Fick (Abdel-Hamid *et al.*, 2019). A absorção de água da resina pode ainda ser relacionada às bolhas geradas no processo exotérmico de cura da resina (Camillo *et al.*, 2023; Faria *et al.*, 2020a).

Para as composições 40G1, 50G1 e 60G1 os valores foram de $1,48 \pm 0,15$, $2,28 \pm 0,37$ e $2,26 \pm 0,18$. Para os compósitos 40G2, 50G2 e 60G2 os valores de absorção foram de $3,00 \pm 0,14$, $4,53 \pm 0,11$ e $5,50 \pm 0,15$. Por fim para os compósitos 40G3, 50G3 e 60G3 os valores de absorção foram iguais a $3,00 \pm 0,33$, $2,75 \pm 0,12$ e $5,87 \pm 1,59$.

O presente estudo apresenta valores menores de absorção quando comparado aos de Faria *et al.*, (2020a), cujos valores para 24 horas foram superiores a 7% em todas as composições estudadas de compósitos com PUOM e fibra curtas de coco (30, 50, 65 e 75%). De forma semelhante, Seibel *et al.* (2021) obteve o menor valor de absorção na faixa de 6% de em compósitos de PUOM com mistura de madeira e pó de borracha. Os valores obtidos com essas formulações indicam um potencial de aplicabilidade em áreas mais úmidas graças a relativa baixa absorção dos materiais.

Considerando os requisitos das normas utilizadas como referência, observa-se que a ABNT NBR 14715 estabelece valor máximo de absorção de água de 5%, enquanto a ABNT NBR 9781 estabelece limite igual ou inferior a 6%. Já a ABNT NBR 14810 admite valores de

absorção inferiores a 30%. Dessa forma, a maioria das formulações apresentou comportamento compatível com os limites avaliados, indicando potencial de aplicação em ambientes sujeitos à umidade moderada. Entretanto, as composições 60G2 e 60G3 apresentaram valores próximos ou superiores ao limite de 5% adotado pela ABNT NBR 14715, devendo ser analisadas com maior cautela para aplicações em condições de maior exposição à água.

4.2.8.1 Validação estatística

A análise estatística da absorção de água em 24 horas foi realizada inicialmente para cada granulometria de forma separada e, posteriormente, por meio da avaliação conjunta dos efeitos da granulometria, da fração volumétrica e da interação entre esses fatores. Os resultados da ANOVA e do teste de Tukey são apresentados nas Tabelas 72 a 80.

4.2.8.1.1 ANOVA fator único para absorção de água em 24 horas G1

Nesta etapa, a ANOVA de fator único foi utilizada para responder se a variação da fração volumétrica de particulados de açaí exerce um efeito estatisticamente significativo sobre a absorção de água dos compósitos, mantendo fixa a granulometria G1.

Tabela 72 – ANOVA para absorção de água em 24 horas das composições com G1.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	5,59805	3	1,86602	26,771	3,3E-07	3,09839
Dentro dos grupos	1,39406	20	0,0697			
Total	6,9921	23				

Fonte: Autoria própria, 2026.

A ANOVA confirmou diferenças significativas entre as composições com G1. Assim, aplicou-se o teste de Tukey, apresentado na Tabela 73.

Tabela 73 – Tukey para absorção de água em 24 horas G1.

Absorção de água (24 hrs) /d.m.s = 0,50				
Composição	PUOM	40G1	50G1	60G1
PUOM	0,00	0,30	1,10	1,09
40G1	0,30	0,00	0,80	0,79
50G1	1,10	0,80	0,00	0,01
60G1	1,09	0,79	0,01	0,00

Fonte: Autoria própria, 2026.

O teste de Tukey, com DMS de 0,50, revela que a matriz pura e a composição 40G1 não diferiram significativamente entre si, indicando que a menor fração volumétrica de partículas finas não altera de forma relevante a absorção de água em relação ao material sem reforço. As composições 50G1 e 60G1, por sua vez, diferiram significativamente tanto da matriz pura quanto de 40G1, porém não diferiram entre si, sugerindo que a absorção de água se estabiliza a partir de 50% de fração volumétrica para essa granulometria.

4.2.8.1.2 ANOVA fator único e teste Tukey para composições com G2

Nesta etapa, a ANOVA de fator único foi utilizada para responder se a variação da fração volumétrica de particulados de açaí exerce um efeito estatisticamente significativo sobre a absorção de água dos compósitos de PUOM, mantendo fixa a granulometria G2.

Tabela 74 – ANOVA para absorção de água em 24 horas G2

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	64,0544043	3	21,3515	637,201	5,2E-20	3,09839
Dentro dos grupos	0,67016425	20	0,03351			
Total	64,7245686	23				

Fonte: Autoria própria, 2026.

A ANOVA confirmou diferenças significativas entre as composições com G3. Assim, aplicou-se o teste de Tukey, apresentado na Tabela 75.

Tabela 75 – Tukey para absorção de água em 24 horas G2

Absorção de água (24 hrs) /d.m.s = 0,35				
Composição	PUOM	40G2	50G2	60G2
PUOM	0,00	1,83	3,35	4,32
40G2	1,83	0,00	1,52	2,50
50G2	3,35	1,52	0,00	0,97
60G2	4,32	2,50	0,97	0,00

Fonte: Autoria própria, 2026.

O teste de Tukey, com DMS de 0,35%, revela que todas as composições diferiram significativamente entre si, incluindo a matriz pura, 40G2, 50G2 e 60G2. Esse resultado indica que para a granulometria intermediária o aumento da fração volumétrica promove incremento progressivo e estatisticamente relevante na absorção de água, sem sinais de estabilização dentro da faixa avaliada.

4.2.8.1.3 ANOVA fator único e teste Tukey para composições com G3

Nesta etapa, a ANOVA de fator único foi utilizada para responder se a variação da fração volumétrica de particulados de açaí exerce um efeito estatisticamente significativo sobre a absorção de água dos compósitos de PUOM, mantendo fixa a granulometria G3.

Tabela 76 – ANOVA para absorção de água em 24 horas G3

ANOVA						
Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	68,8172014	3	22,9391	33,3445	5,6E-08	3,09839
Dentro dos grupos	13,758837	20	0,68794			
Total	82,5760384	23				

Fonte: Autoria própria, 2026.

A ANOVA confirmou diferenças significativas entre as composições com G3. Assim, aplicou-se o teste de Tukey, apresentado na Tabela 77.

Tabela 77 – Tukey para absorção de água em 24 horas G3

Absorção de água (24 hrs) /d.m.s = 1,564				
Composição	PUOM	40G3	50G3	60G3
PUOM	0,000	1,825	1,559	4,692
40G3	1,825	0,000	0,266	2,867
50G3	1,559	0,266	0,000	3,133
60G3	4,692	2,867	3,133	0,000

Fonte: Autoria própria, 2026.

O teste de Tukey, com DMS de 1,564%, revela que a matriz pura não diferiu significativamente de 50G3, enquanto apresentou diferença significativa em relação a 40G3 e 60G3. Isso indica que, na faixa de 50% em volume, a granulometria grossa não promoveu aumento relevante de absorção em relação ao material sem reforço, ao passo que, nas frações de 40% e, principalmente, de 60%, o efeito do particulado G3 torna-se mais pronunciado. A composição 60G3 diferiu significativamente de todas as demais, apresentando a maior absorção de água do grupo, o que sugere que o impacto da granulometria grossa sobre essa propriedade se torna expressivo apenas na maior fração volumétrica avaliada.

4.2.8.1.4 ANOVA fator duplo com repetição

Para a análise conjunta dos fatores, foi realizada uma ANOVA de dois fatores com repetição, considerando a granulometria e a fração volumétrica dos particulados. Essa análise permitiu verificar os efeitos individuais desses fatores e a interação entre eles sobre a absorção de água em 24 horas, conforme apresentado na Tabela 78.

Tabela 78 – Anova bifatorial com repetição para absorção de água.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	39,16906171	2	19,58453085	60,1845	1,91E-13	3,204317
Colunas	54,93115413	2	27,46557707	84,40345	5,91E-16	3,204317
Interações	18,52924868	4	4,63231217	14,23539	1,39E-07	2,578739
Dentro	14,64337004	45	0,325408223			
Total	127,2728346	53				

Fonte: Autoria própria, 2026.

A ANOVA bifatorial indicou que a granulometria, a fração volumétrica e a interação entre esses fatores exerceram efeito estatisticamente significativo sobre a absorção de água. Dessa forma, essa propriedade deve ser interpretada considerando a combinação entre o tamanho e a quantidade de particulados. Para avaliar o efeito médio da granulometria, aplicou-se o teste de Tukey com $k = 3$, apresentado na Tabela 79.

Tabela 79 – Teste de Tukey com $k = 3$ para absorção de água em 24 horas.

Tukey de dois fatores para absorção de água $k=3$ /D.M.S = 3,43			
	G1	G2	G3
G1	0,00	2,34	1,86
G2	2,34	0,00	0,47
G3	1,86	0,47	0,00

Fonte: Autoria própria, 2026.

O teste de Tukey com $k = 3$, utilizando uma DMS de 3,43%, mostrou que as granulometrias G1, G2 e G3 não diferiram significativamente entre si quanto à absorção média de água. Para comparar individualmente as nove combinações entre granulometria e fração volumétrica, aplicou-se o teste de Tukey com $k = 9$, conforme apresentado na Tabela 80.

Tabela 80 – Teste de Tukey com $k = 9$ para absorção de água em 24 horas.

TUKEY DE DOIS FATORES COM REPETIÇÃO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA EM 24 HRS
PARA $K=9$ /D.M.S = 1,06

	40G1	40G2	40G3	50G1	50G2	50G3	60G1	60G2	60G3
40G1	0,00	1,53	1,52	0,80	3,05	1,26	0,79	4,02	4,39
40G2	1,53	0,00	0,00	0,73	1,52	0,27	0,74	2,50	2,87
40G3	1,52	0,00	0,00	0,73	1,52	0,27	0,74	2,50	2,87
50G1	0,80	0,73	0,73	0,00	2,25	0,46	0,01	3,22	3,59
50G2	3,05	1,52	1,52	2,25	0,00	1,79	2,26	0,97	1,34
50G3	1,26	0,27	0,27	0,46	1,79	0,00	0,47	2,76	3,13
60G1	0,79	0,74	0,74	0,01	2,26	0,47	0,00	3,24	3,61
60G2	4,02	2,50	2,50	3,22	0,97	2,76	3,24	0,00	0,37
60G3	4,39	2,87	2,87	3,59	1,34	3,13	3,61	0,37	0,00

Fonte: Autoria própria, 2026.

Para o Tukey com $k=9$ e DMS de 1,06%, a comparação global entre todas as combinações aponta as composições com granulometria fina, 40G1, 50G1 e 60G1, como as de menor absorção de água do conjunto, operando em níveis estatisticamente equivalentes entre si. No extremo oposto, 60G2 e 60G3 apresentaram as maiores absorções, diferindo significativamente das composições com G1. Esses resultados indicam que a granulometria fina, independentemente da fração volumétrica utilizada, representa a condição mais favorável para a resistência à absorção de água nos compósitos avaliados.

4.2.9 Flamabilidade

O ensaio de flamabilidade foi realizado com o objetivo de avaliar o comportamento dos compósitos frente à propagação da chama, por meio da determinação da taxa de queima. Esse parâmetro é relevante para a análise do potencial de aplicação dos materiais produzidos, uma vez que menores taxas de queima indicam menor velocidade de propagação da chama ao longo do corpo de prova. A Tabela 81 apresenta os valores médios de taxa de queima obtidos para a matriz pura de PUOM e para os compósitos produzidos com diferentes frações volumétricas e faixas granulométricas de particulado de açaí.

Tabela 81 – Taxa de queima dos compósitos produzidos no ensaio de flamabilidade.

Granulometria 1	
Composição	Taxa de queima (mm/s)
PUOM	$25,88 \pm 2,91$
40G1	$15,27 \pm 4,39$
50G1	$15,62 \pm 2,54$
60G1	$10,37 \pm 1,86$
Granulometria 2	
PUOM	$25,88 \pm 2,91$
40G2	$18,59 \pm 3,14$
50G2	$17,72 \pm 2,53$
60G2	$17,29 \pm 1,77$
Granulometria 3	
PUOM	$25,88 \pm 2,91$
40G3	$24,48 \pm 7,74$
50G3	$24,45 \pm 3,07$
60G3	$17,80 \pm 4,82$

Fonte: Autoria própria, 2026.

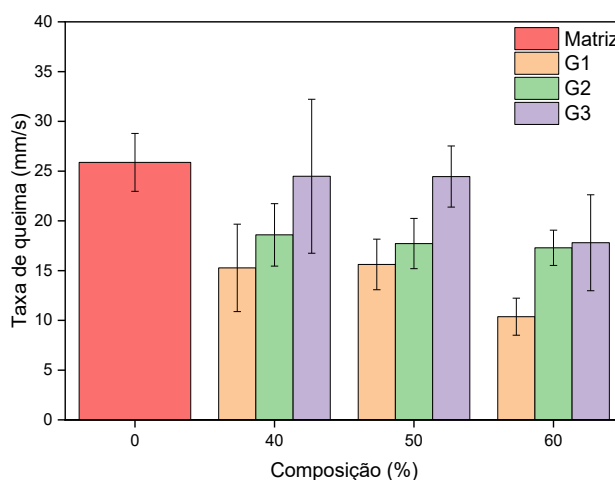
O ensaio de flamabilidade avalia a taxa de queima dos compósitos, sendo um parâmetro relevante para aplicações onde a resistência ao fogo é um requisito de desempenho. A matriz pura de PUOM apresentou taxa de queima de $25,88 \pm 2,91$ mm/s.

Para os compósitos 40G1, 50G1 e 60G1, os valores de taxa de queima foram de $15,27 \pm 4,39$, $15,62 \pm 2,54$ e $10,37 \pm 1,86$ mm/s, esses valores representam uma redução de 41, 40 e 60% respectivamente, na taxa de queima quando comparadas a matriz pura.

Para os compósitos 40G2, 50G2 e 60G2 os valores de taxa foram de $18,59 \pm 3,14$, $17,72 \pm 2,53$ mm/s, esses valores representam uma diminuição de 28, 31 e 33% na taxa de queima quando comparadas ao material sem particulado de açaí.

Por fim para os compósitos 40G3, 50G3 e 60G3, os valores de taxa de queima foram de $24,48 \pm 7,74$, $24,45 \pm 3,07$ e $17,80 \pm 4,82$ mm/s, que representam uma diminuição na taxa de queima igual a 5,4, 5,5 e 31% respectivamente, quando comparada a taxa do PUOM. A figura 55 apresenta o gráfico comparativo de taxa de queima dos compósitos produzidos.

Figura 55 – Gráfico comparativo de taxa de queima.



Fonte: Autoria própria, 2026.

De forma geral, a adição do reforço particulado de açaí reduziu a taxa de queima em relação à matriz pura em praticamente todas as composições, indicando que as partículas de açaí exercem um efeito retardante sobre a propagação da chama. Esse comportamento é característico de reforços lignocelulósicos, que ao serem expostos ao fogo tendem a formar uma camada carbonizada superficial que atua como barreira física, reduzindo o fluxo de calor e a liberação de voláteis combustíveis para a chama (Morsy et al., 2025). A reação de desidratação da celulose promove a formação de carvão e liberação de água, reduzindo a quantidade de gases inflamáveis disponíveis para a combustão, de modo que a camada de carvão formada atua como

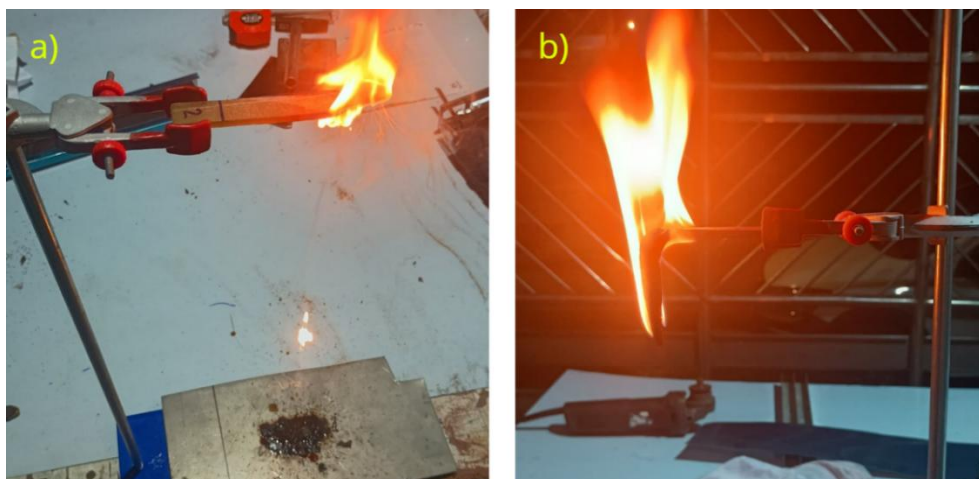
barreira protetora, inibindo a transmissão de calor para a matriz polimérica subjacente (Andrzejewski; Michałowski, 2022).

Outro fato relevante é que a queima da matriz pura causa gotejamentos, comportamento mais comum em polímeros termoplásticos e que pode propagar o fogo. A incorporação de partículas de açaí à matriz suprimiu esse gotejamento, sugerindo uma transição para um mecanismo de queima mais carbonizante. A presença de cargas lignocelulósicas em matrizes poliméricas contribui para a formação de resíduos carbonizados e barreiras físicas, reduzindo o gotejamento, dificultando a transferência de calor e massa e, consequentemente, melhorando a resistência ao fogo e retardando a propagação das chamas (Alves *et al.*, 2018; Cardoso *et al.*, 2025d; Dong; Xia; Xu, 2024; Gatos *et al.*, 2024; Mustafayeva *et al.*, 2026).

Comparando os três grupos, fica evidente que a granulometria dos particulados influenciam de forma significativa a eficiência do efeito retardante de chama. G1 se destaca como o grupo de melhor desempenho, com redução crescente e mais expressiva da taxa de queima, enquanto G2 oferece comportamento estável e moderado, e G3 demonstra efeito retardante praticamente nulo nos teores mais baixos, tornando-se relevante apenas em 60%. Esses resultados sugerem que partículas mais finas, por sua maior área superficial e melhor distribuição na matriz, são mais eficazes na formação da camada protetora carbonizada que retarda a propagação da chama nos compósitos de PUOM e açaí.

Consequentemente essa redução na taxa de queima e o desaparecimento do gotejamento que a matriz causa, o material apresenta potencial de uso para revestimentos. A Figura 56 apresenta o comportamento de queima.

Figura 56 – Comportamento de queima: a) matriz pura; b) compósito.



Fonte: Autoria própria, 2026.

4.2.9.1 Validação estatística (ANOVA e Tukey)

A análise estatística da taxa de queima foi realizada inicialmente para cada granulometria de forma separada e, posteriormente, por meio da avaliação conjunta dos efeitos da granulometria, da fração volumétrica e da interação entre esses fatores. Os resultados são apresentados nas Tabelas 82 a 89.

4.2.9.1.1 ANOVA fator único e teste Tukey para composições com G1

Nesta etapa, a ANOVA de fator único foi utilizada para responder se a variação da fração volumétrica de particulados de açaí exerce um efeito estatisticamente significativo sobre flamabilidade dos compósitos de PUOM, mantendo fixa a granulometria G1.

Tabela 82 – ANOVA para flamabilidade dos compósitos de G1.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	638,0112	3	212,6704	22,59436	5,38E-06	3,238872
Dentro dos grupos	150,6007	16	9,412545			
Total	788,6119	19				

Fonte: Autoria própria, 2026.

A ANOVA confirmou diferenças significativas entre as composições com G1. Assim, aplicou-se o teste de Tukey, apresentado na Tabela 83.

Tabela 83 – Tukey para flamabilidade dos compósitos de G1.

Taxa de queima/d.m.s =5,94				
Composição	PUOM	40G1	50G1	60G1
PUOM	0,00	10,61	10,26	15,51
40G1	10,61	0,00	0,35	4,90
50G1	10,26	0,35	0,00	5,25
60G1	15,51	4,90	5,25	0,00

Fonte: Autoria própria, 2026.

O teste de Tukey, com DMS de 5,94 mm/s, revela que todas as composições com G1 diferiram significativamente da matriz pura, confirmando que a adição de partículas finas reduz a taxa de queima de forma estatisticamente relevante, independentemente da fração volumétrica utilizada. Entre as composições com particulado, 40G1, 50G1 e 60G1 não diferiram significativamente entre si, indicando que o efeito retardante se estabelece já na menor fração volumétrica (40%) e se mantém em um patamar semelhante até 60%, sem diferenças estatísticas internas dentro do grupo G1. Ainda assim, do ponto de vista numérico, 60G1 apresentou a menor taxa média de queima, sugerindo um leve benefício adicional na condição de maior fração de reforço, embora esse ganho não seja estatisticamente significativo em relação a 40G1 e 50G1.

4.2.9.1.2 ANOVA fator único e teste Tukey para composições com G2

Nesta etapa, a ANOVA de fator único foi utilizada para responder se a variação da fração volumétrica de particulados de açaí exerce um efeito estatisticamente significativo sobre flamabilidade dos compósitos de PUOM, mantendo fixa a granulometria G2.

Tabela 84 – ANOVA para flamabilidade dos compósitos de G2.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	245,2448	3	81,74827	11,75349	0,000256	3,238872
Dentro dos grupos	111,2837	16	6,955232			
Total	356,5285	19				

Fonte: Autoria própria, 2026.

A ANOVA também indicou diferenças significativas entre as composições com G2. Os resultados do teste de Tukey são apresentados na Tabela 85.

Tabela 85 – Tukey para flamabilidade dos compósitos de G2.

Taxa de queima/d.m.s =5,11				
Composição	PUOM	40G2	50G2	60G2
PUOM	0,00	7,29	8,16	8,59
40G2	7,29	0,00	0,87	1,30
50G2	8,16	0,87	0,00	0,43
60G2	8,59	1,30	0,43	0,00

Fonte: Autoria própria, 2026.

O teste de Tukey, com DMS de 5,11 mm/s, mostrou que todas as composições com G2 diferiram significativamente da matriz pura, confirmando que a incorporação dessa granulometria reduziu a taxa de queima. Entretanto, 40G2, 50G2 e 60G2 não diferiram entre si, indicando que o efeito retardante se estabeleceu na menor fração volumétrica e permaneceu estatisticamente estável com o aumento do teor de particulados, comportamento semelhante ao observado para G1.

4.2.9.1.3 ANOVA fator único e teste Tukey para composições com G3

Nesta etapa, a ANOVA de fator único foi utilizada para responder se a variação da fração volumétrica de particulados de aço exerce um efeito estatisticamente significativo sobre flamabilidade dos compósitos de PUOM, mantendo fixa a granulometria G3

Tabela 86 – ANOVA para flamabilidade dos compósitos de G3.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	197,8117	3	65,93725	2,611445	0,087162	3,238872
Dentro dos grupos	403,9893	16	25,24933			
Total	601,8011	19				

Fonte: Autoria própria, 2026.

A ANOVA não identificou diferenças significativas entre as composições com G3, pois o valor de F calculado foi inferior ao F crítico e o valor de p foi superior a 0,05. Portanto, não se rejeitou a hipótese nula e não foi necessário aplicar o teste de Tukey.

4.2.9.1.4 ANOVA fator duplo com repetição

Para a análise conjunta dos fatores, foi realizada uma ANOVA de dois fatores com repetição, considerando a granulometria e a fração volumétrica dos particulados. Essa análise permitiu avaliar os efeitos individuais desses fatores e a interação entre eles sobre a taxa de queima, conforme apresentado na Tabela 87.

Tabela 87 – ANOVA para flamabilidade dos compósitos

ANOVA							
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	
Amostra	176,7795981	2	88,38979904	5,636044	0,007423	3,259446	
Colunas	540,5731639	2	270,2865819	17,23442	5,62E-06	3,259446	
Interações	61,866897	4	15,46672425	0,986213	0,427391	2,633532	
Dentro	564,5862567	36	15,68295158				
Total	1343,805916	44					

Fonte: Autoria própria, 2026.

A ANOVA bifatorial indicou efeitos significativos da granulometria e da fração volumétrica sobre a taxa de queima. Entretanto, a interação entre esses fatores não foi significativa, demonstrando que seus efeitos ocorreram de forma independente. Para avaliar o efeito médio da granulometria, aplicou-se o teste de Tukey com $k = 3$, apresentado na Tabela 88.

Tabela 88 – Tukey de flamabilidade para os compósitos com $k=3$

Tukey de dois fatores para flamabilidade $k=3$ /D.M.S = 3,43			
	G1	G2	G3
G1	0,00	4,12	8,49
G2	4,12	0,00	4,37
G3	8,49	4,37	0,00

Fonte: Autoria própria, 2026.

O teste de Tukey com $k = 3$, utilizando uma DMS de 3,43 mm/s, mostrou que todas as granulometrias diferiram significativamente entre si. G1 apresentou a menor taxa média de queima, seguida por G2 e G3, indicando maior eficiência das partículas finas na redução da

flamabilidade. Para comparar individualmente as nove combinações entre granulometria e fração volumétrica, aplicou-se o teste de Tukey com $k = 9$, conforme apresentado na Tabela 89.

Tabela 89 – Tukey de flamabilidade para os compósitos com $k=9$
TUKEY DE DOIS FATORES COM REPETIÇÃO DA TAXA DE QUEIMA PARA $K=9$ /D.M.S = 8,43

	40G1	40G2	40G3	50G1	50G2	50G3	60G1	60G2	60G3
40G1	0,00	3,32	9,21	0,35	2,45	9,18	4,90	2,02	2,53
40G2	3,32	0,00	5,89	2,97	0,87	5,85	8,22	1,30	0,79
40G3	9,21	5,89	0,00	8,86	6,76	0,03	14,11	7,19	6,68
50G1	0,35	2,97	8,86	0,00	2,10	8,83	5,25	1,67	2,18
50G2	2,45	0,87	6,76	2,10	0,00	6,72	7,35	0,43	0,08
50G3	9,18	5,85	0,03	8,83	6,72	0,00	14,08	7,15	6,65
60G1	4,90	8,22	14,11	5,25	7,35	14,08	0,00	6,92	7,43
60G2	2,02	1,30	7,19	1,67	0,43	7,15	6,92	0,00	0,50
60G3	2,53	0,79	6,68	2,18	0,08	6,65	7,43	0,50	0,00

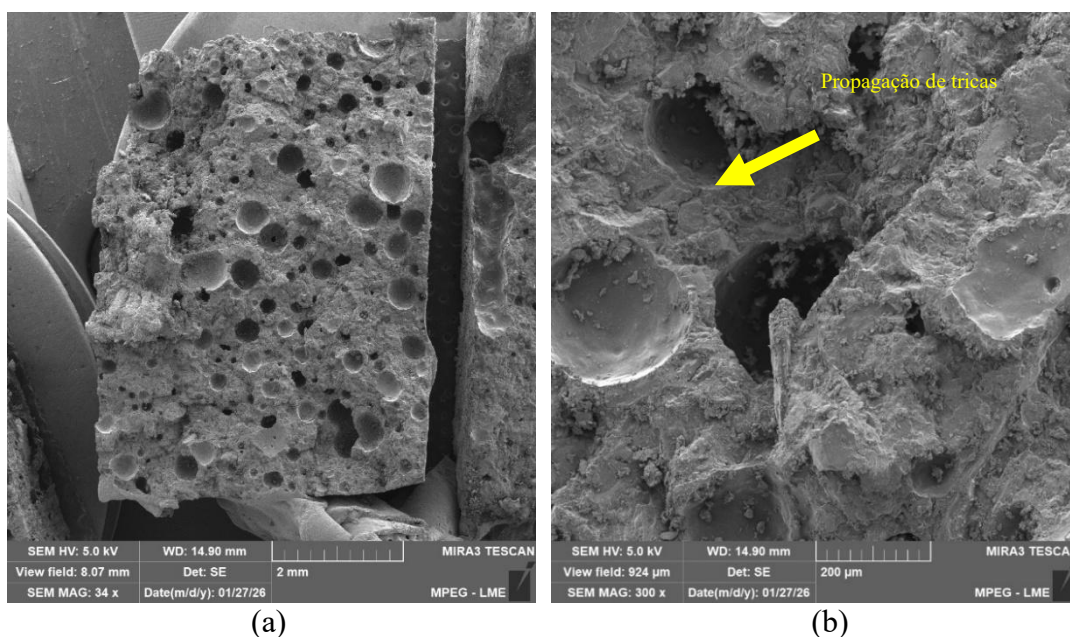
Fonte: Autoria própria, 2026.

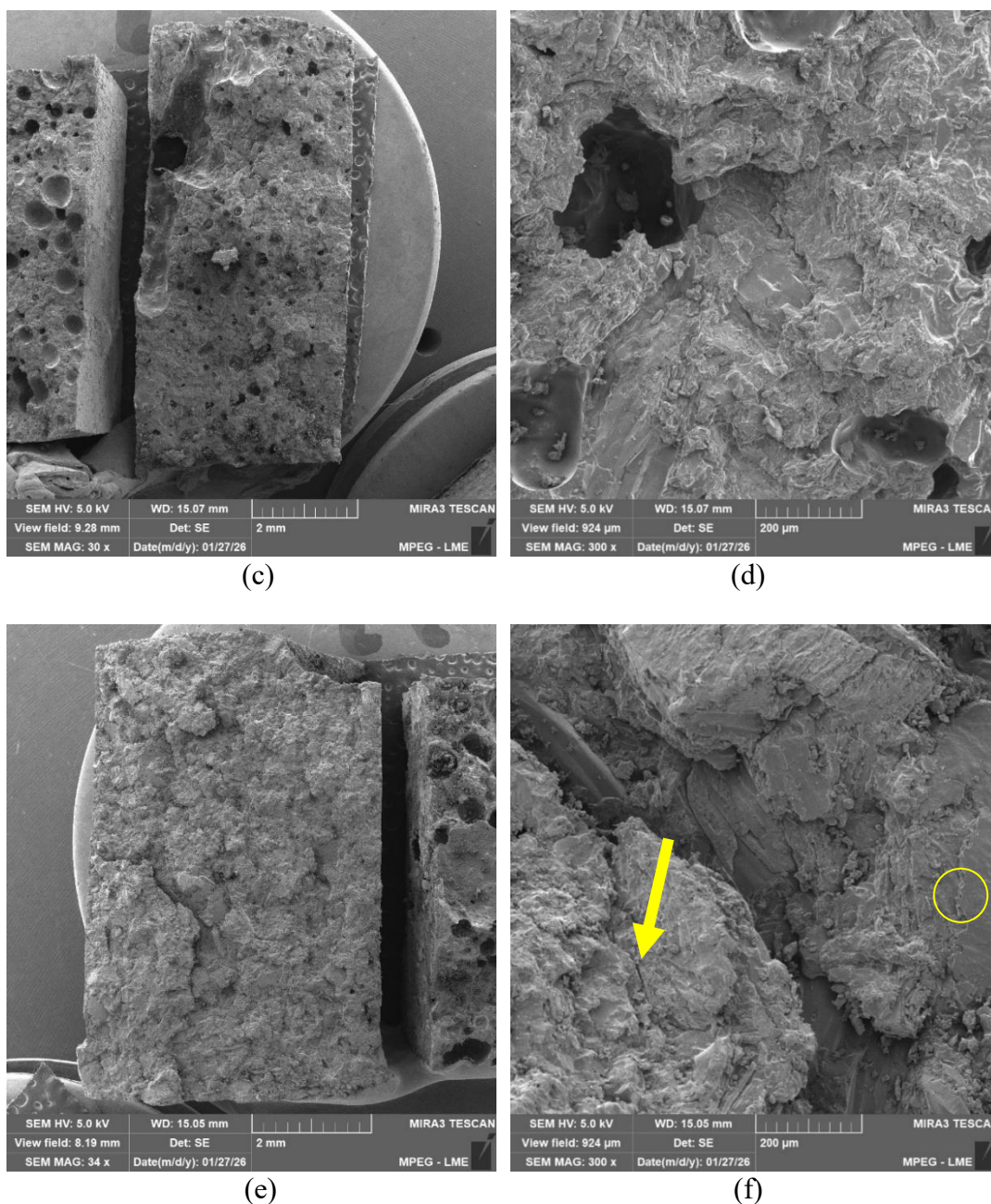
Para o teste de Tukey com $k = 9$ e DMS de 8,43 mm/s, a análise das combinações fração volumétrica $\times$ granulometria mostrou diferenças mais pontuais. Na fração de 40%, as composições 40G1 e 40G2 não diferiram significativamente entre si, enquanto 40G1 apresentou taxa de queima significativamente menor que 40G3; já 40G2 e 40G3 foram estatisticamente equivalentes. Na fração de 50%, 50G1 e 50G2 também não diferiram entre si, mas 50G1 apresentou taxa de queima significativamente menor que 50G3, ao passo que 50G2 e 50G3 permaneceram equivalentes. Na fração de 60%, nenhuma das três combinações (60G1, 60G2 e 60G3) diferiu significativamente entre si, indicando que, nesse teor de reforço, a influência da granulometria sobre a taxa de queima se torna estatisticamente irrelevante. De modo geral, os resultados sugerem que a granulometria fina (G1) é ligeiramente mais eficiente em reduzir a taxa de queima em frações de 40% e 50%, enquanto em 60% todas as granulometrias produzem níveis semelhantes de flamabilidade.

4.3 Análise morfológica da região de fratura dos compósitos por microscopia eletrônica de varredura

A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada com o objetivo de avaliar os aspectos morfológicos das regiões analisadas dos compósitos após os ensaios mecânicos de tração, compressão, flexão/dobramento e impacto Izod. Essa análise permitiu identificar a presença de vazios, bolhas, propagação de trincas, falhas interfaciais, segregação de particulados e características associadas aos mecanismos de fratura dos compósitos produzidos. A Figura 57 apresenta as regiões de fratura dos compósitos produzidos com G1 após o ensaio de tração.

Figura 57 – Análises por MEV das regiões de fratura dos compósitos após ensaio de tração: a) 40G1; b) 40G1 ampliado 300x; c) 50G1; d) 50G1 ampliado 300x; e) 60G1; f) 60G1 ampliado 300x.





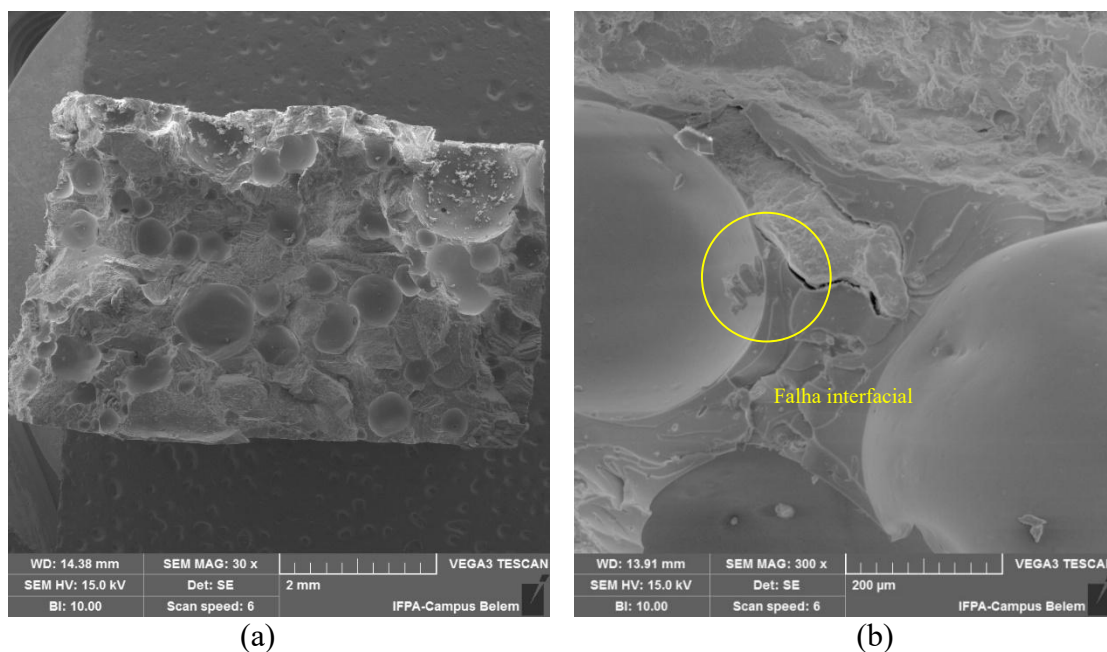
Fonte: Autoria própria, 2026.

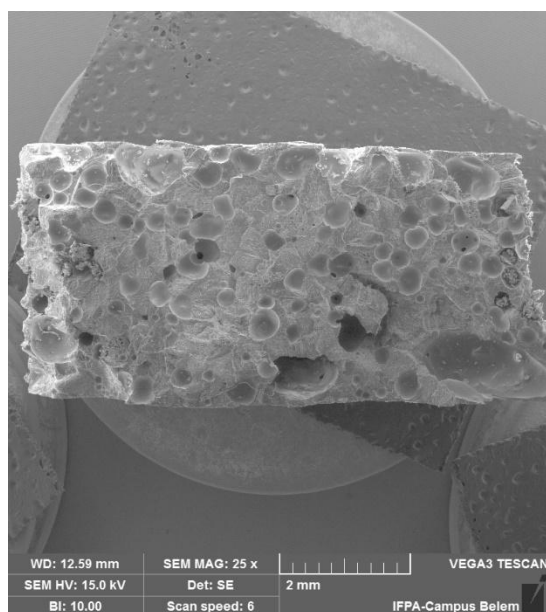
Na Figura 57(a), observa-se grande quantidade de bolhas de ar e vazios na região de fratura da composição 40G1. A topografia da fratura apresenta irregularidades, em vez de uma superfície plana, sugerindo que a fratura do material ocorre predominantemente de forma intergranular. Na Figura 57(b), observa-se a propagação de trincas na direção dos vazios. Essa alta concentração de vazios em 40G1 é consistente com a baixa resistência à tração observada para esta composição, uma vez que a redução da área efetiva de suporte de carga e a facilitação da iniciação de trincas contribuem para o desempenho mecânico inferior.

Nas Figuras 57(c) e 57(d), também é possível observar bolhas e vazios na matriz. Segundo Wang e Sun (2024) o mecanismo de fratura mais adequado para descrever essa morfologia é o do tipo fratura dúctil coesiva da matriz, caracterizada pela deformação plástica localizada e pela formação de relevos irregulares na superfície de fratura, típicos de materiais que dissipam energia antes da ruptura. As regiões com aspecto em “placas” destacadas são consistentes com o escoamento e rasgamento da matriz elastomérica durante a propagação da trinca, fenômeno frequentemente descrito na literatura como fratura por rasgamento em elastômeros.

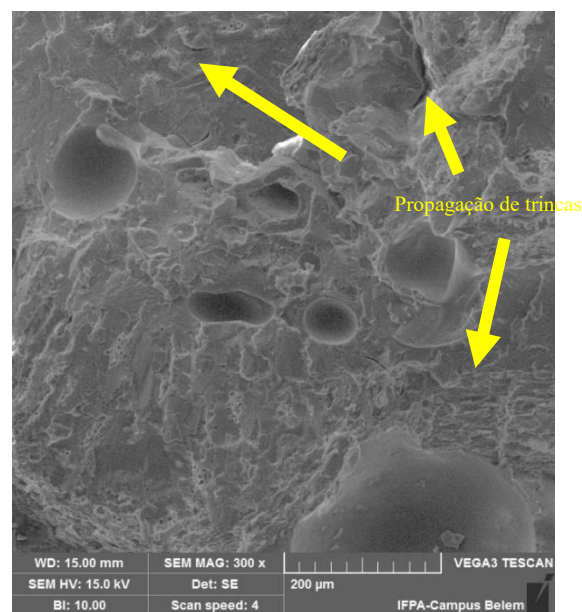
Na Figura 57(e), observa-se que o volume de bolhas é consideravelmente inferior ao das composições anteriores. Esse comportamento pode estar associado à melhor compactação dos particulados na matriz, na qual os particulados acabam preenchendo parte dos vazios provenientes do processo de cura e da moldagem do material. Esse volume reduzido de bolhas, particularmente notável em composições como 50G1 e 60G1, pode ter contribuído para a melhoria da resistência à tração observada nessas frações volumétricas. A Figura 58 apresenta as regiões de fratura dos compósitos produzidos com G2 após o ensaio de tração.

Figura 58 – Análises por MEV das regiões de fratura dos compósitos após ensaio de tração: a) 40G2; b) 40G2 ampliado 300x; c) 50G2; d) 50G2 ampliado 300x; e) 60G2; f) 60G2 ampliado 300x.

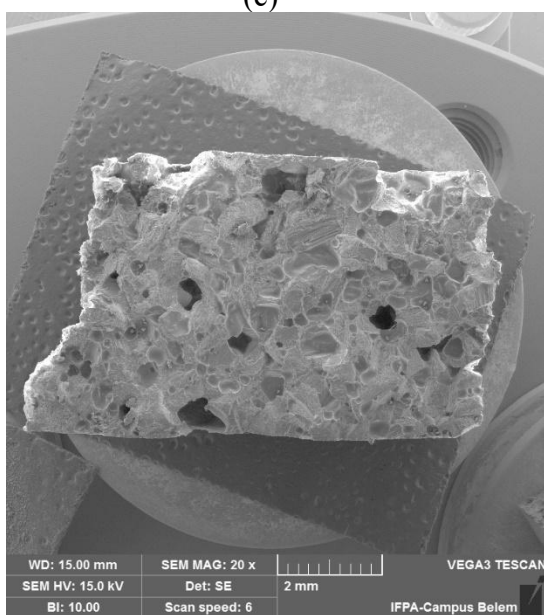




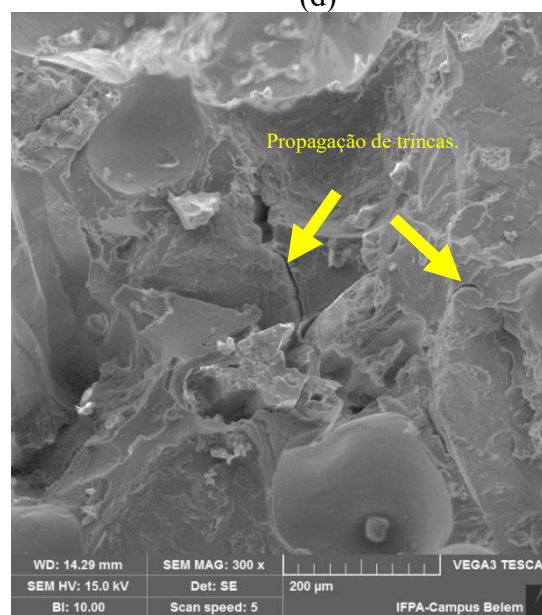
(c)



(d)



(e)



(f)

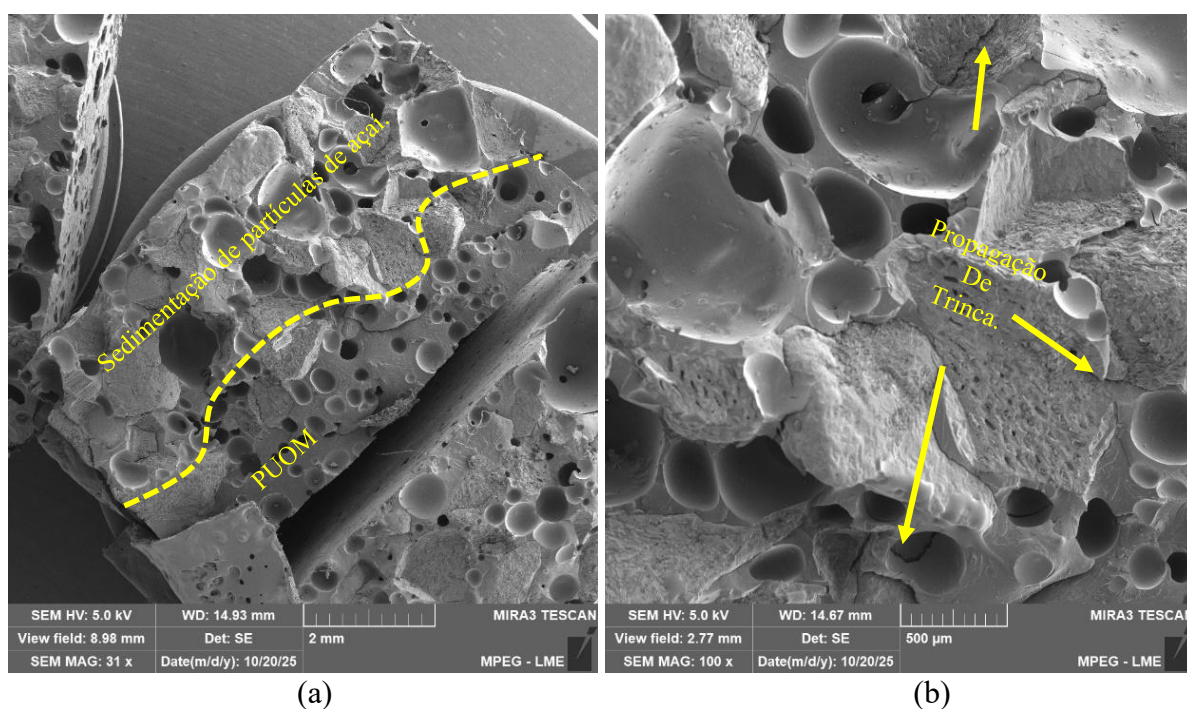
Fonte: Autoria própria, 2026.

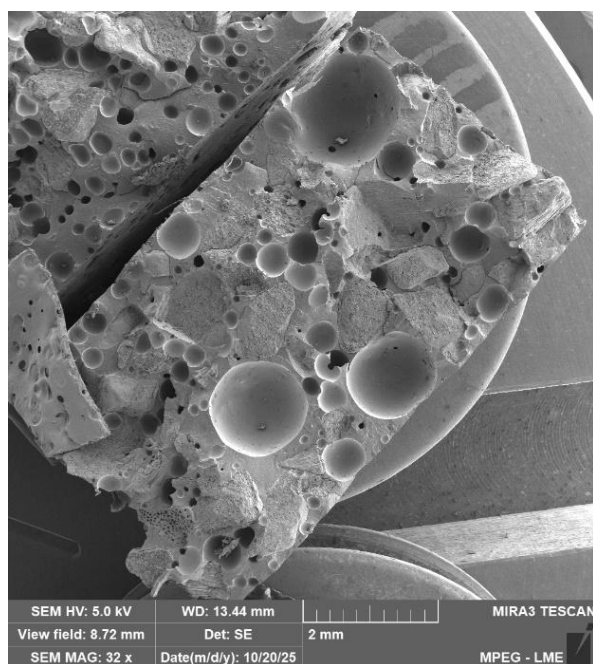
Nas Figuras 58(a), 58(c) e 58(e), observa-se a região transversal das fraturas dos compósitos 40G2, 50G2 e 60G2, respectivamente. É possível notar a presença de bolhas na seção transversal do material, as quais contribuem para a fragilidade dos compósitos. Na Figura 58(b), observa-se falha interfacial entre o particulado de açaí e a matriz. Essa falha interfacial é um fator crítico para a redução da resistência à tração nas composições com G2, uma vez que a transferência de carga entre o reforço e a matriz é comprometida, impedindo que os particulados atuem efetivamente como reforço.

Nas Figuras 58(d) e 58(f), é possível observar a propagação de trincas na matriz. Nos compósitos com G2, também é notória a topografia mais tridimensional das fraturas, indicando fratura predominantemente intergranular, com propagação ao redor dos particulados de açaí.

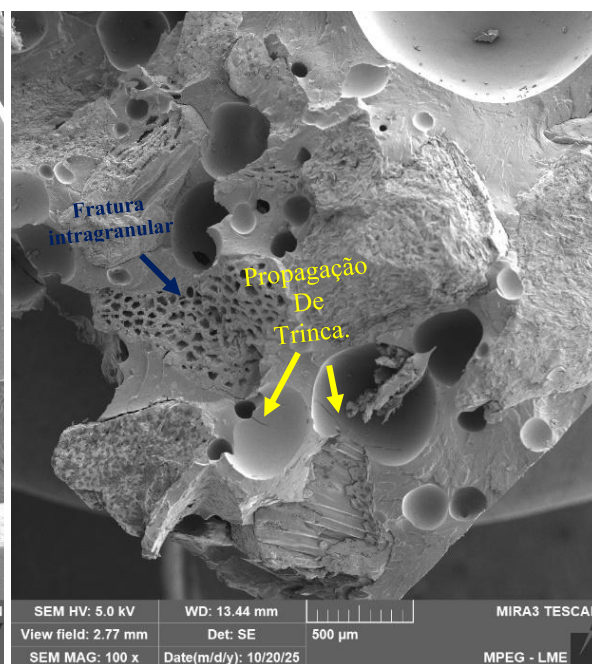
A combinação da elevada fração de vazios, da falha interfacial e da fratura predominantemente intergranular nos compósitos G2 explica o comportamento de degradação da resistência à tração e a linearidade observada nas curvas de tensão-deformação, uma vez que as partículas de tamanho intermediário não promoveram reforço eficaz. A Figura 59 apresenta as regiões de fratura dos compósitos produzidos com G3 após o ensaio de tração.

Figura 59 – Análises por MEV das regiões de fratura dos compósitos após ensaio de tração: a) 40G3; b) 40G3 ampliado 300x; c) 50G3; d) 50G3 ampliado 300x; e) 60G3; f) 60G3 ampliado 300x.

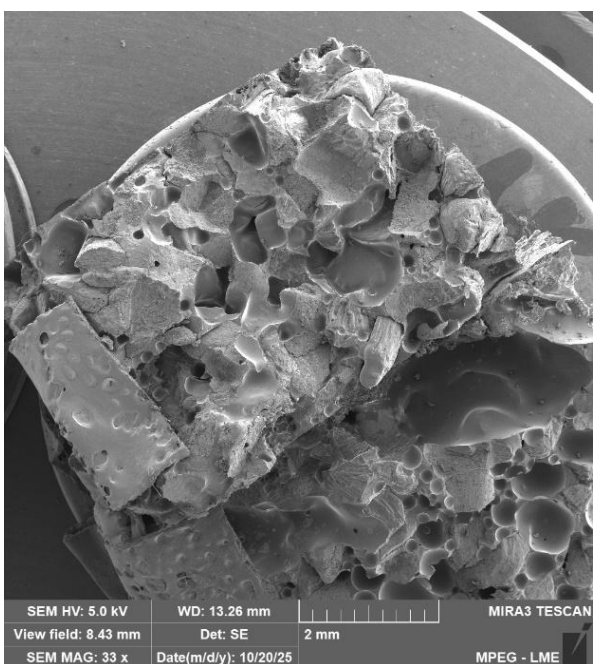




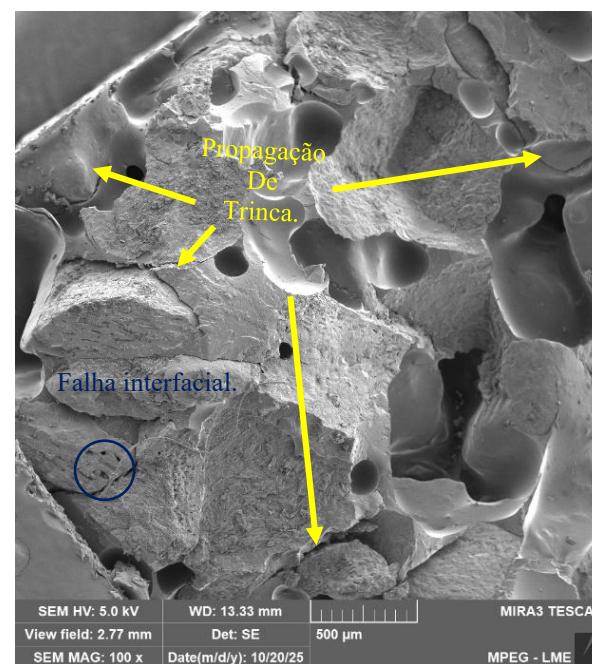
(c)



(d)



(e)



(f)

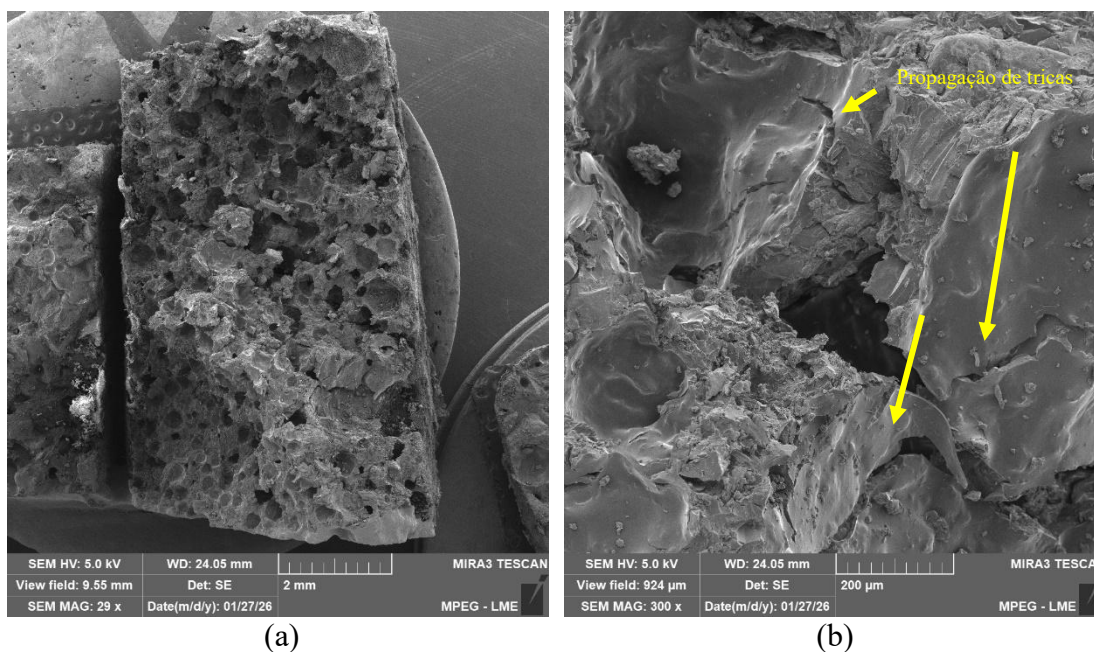
Fonte: Autoria própria, 2026.

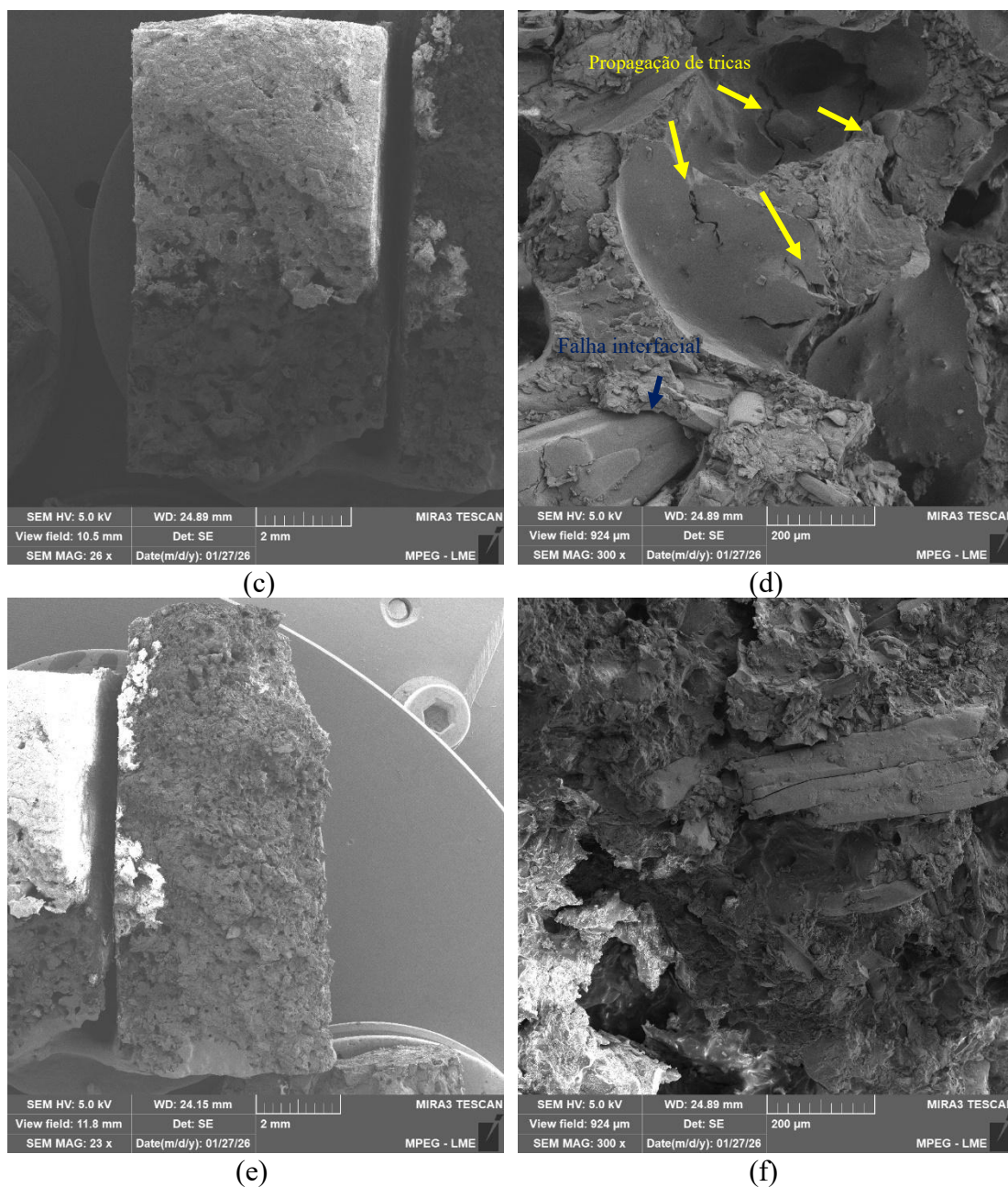
As Figuras 59(a), 59(c) e 59(e) apresentam a região de fratura dos compósitos, nas quais se observam bolhas de ar ao longo da seção e uma topografia tridimensional mais evidente, associada ao aumento do tamanho dos particulados.

Na Figura 59(a), também é possível observar segregação dos particulados de açaí no compósito. Essa segregação compromete a homogeneidade microestrutural do material, fazendo com que ele apresente comportamento heterogêneo entre diferentes regiões, com áreas mais ricas em particulado e outras predominantemente constituídas pela matriz. Esse comportamento contribui para explicar a queda abrupta de resistência em 40G3. A segregação e a consequente heterogeneidade microestrutural são fatores importantes para a alta variabilidade e o comportamento menos previsível da resistência à tração observados nas composições com G3, conforme discutido anteriormente.

Nas Figuras 59(b), 59(d) e 59(f), observam-se aspectos relacionados à propagação de trincas, falhas interfaciais e vazios presentes nos compósitos. A presença de partículas de maior dimensão, característica da granulometria G3, tende a intensificar a ocorrência de falhas interfaciais. Além disso, na Figura 59(d), é possível observar uma fratura intragranular; entretanto, pelo fato de ela aparecer com baixa frequência nas seções de fratura, não deve ser considerada como característica predominante de fratura deste material. A Figura 60 apresenta as regiões analisadas dos compósitos produzidos com G1 após o ensaio de compressão.

Figura 60 – Análises por MEV das regiões dos compósitos após ensaio de compressão: a) 40G1; b) 40G1 ampliado 300x; c) 50G1; d) 50G1 ampliado 300x; e) 60G1; f) 60G1 ampliado 300x.

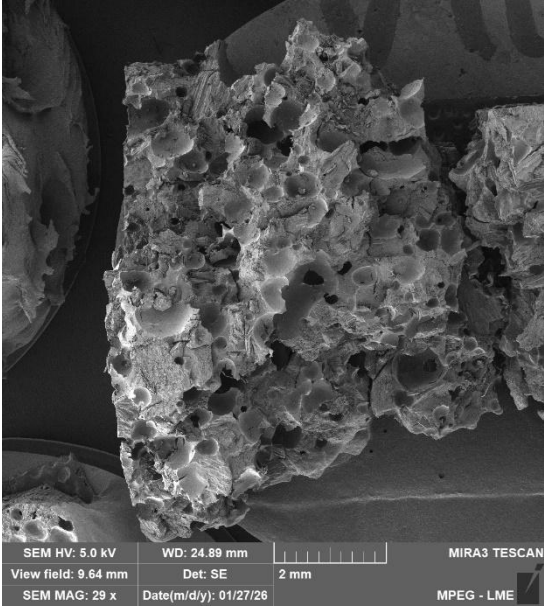




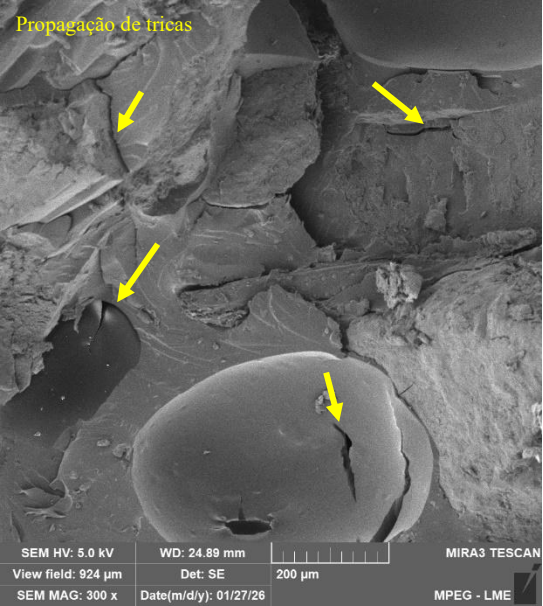
Fonte: Autoria própria, 2026.

Nas Figuras 60(a), 60(c) e 60(e), observa-se a seção transversal dos compósitos G1. Assim como observado nas análises por MEV dos compósitos após o ensaio de tração, é notável a presença de vazios e bolhas na seção transversal. Nas Figuras 60(b) e 60(d), observa-se a propagação de trincas na matriz. Na Figura 60(f), a presença de vazios também é visível, porém com tamanho aparentemente menor. A Figura 61 apresenta as regiões analisadas dos compósitos produzidos com G2 após o ensaio de compressão.

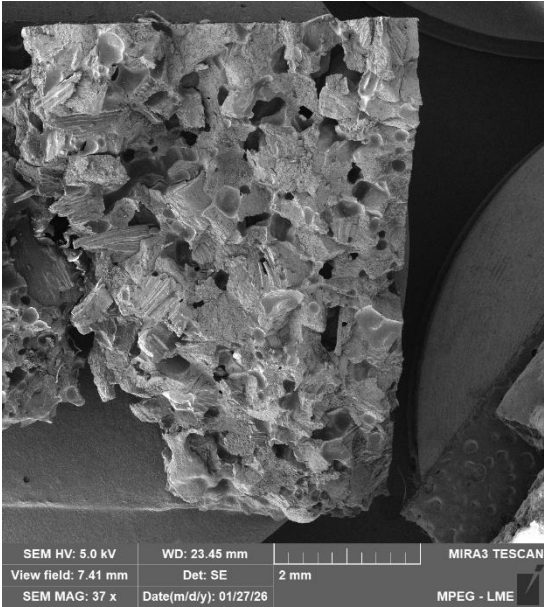
Figura 61 – Análises por MEV das regiões dos compósitos após ensaio de compressão: a) 40G2; b) 40G2 ampliado 300x; c) 50G2; d) 50G2 ampliado 300x; e) 60G2; f) 60G2 ampliado 300x.



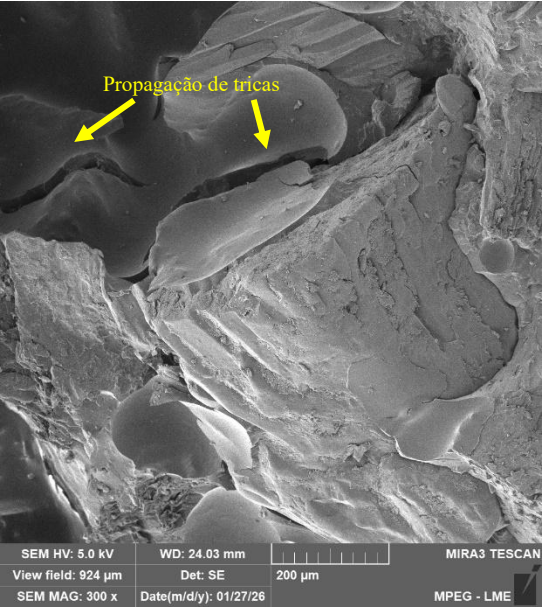
(a)



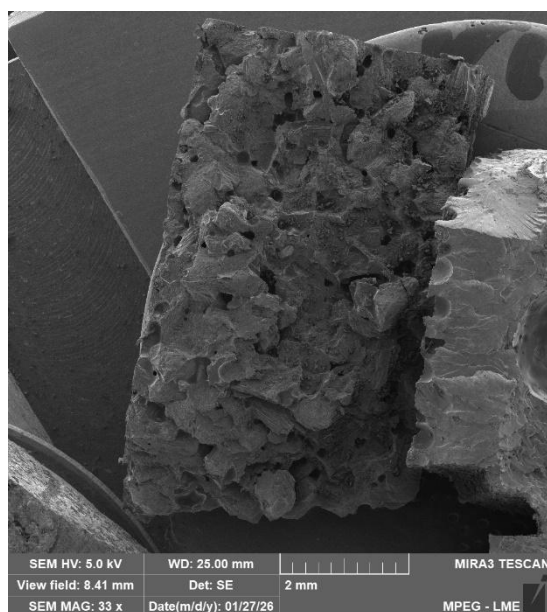
(b)



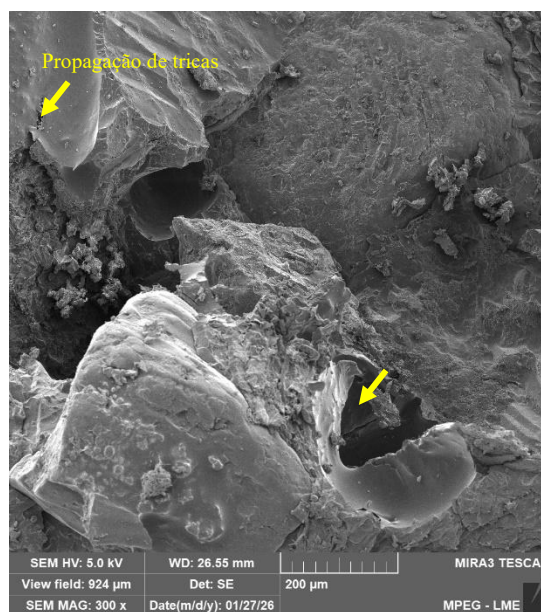
(c)



(d)



(e)

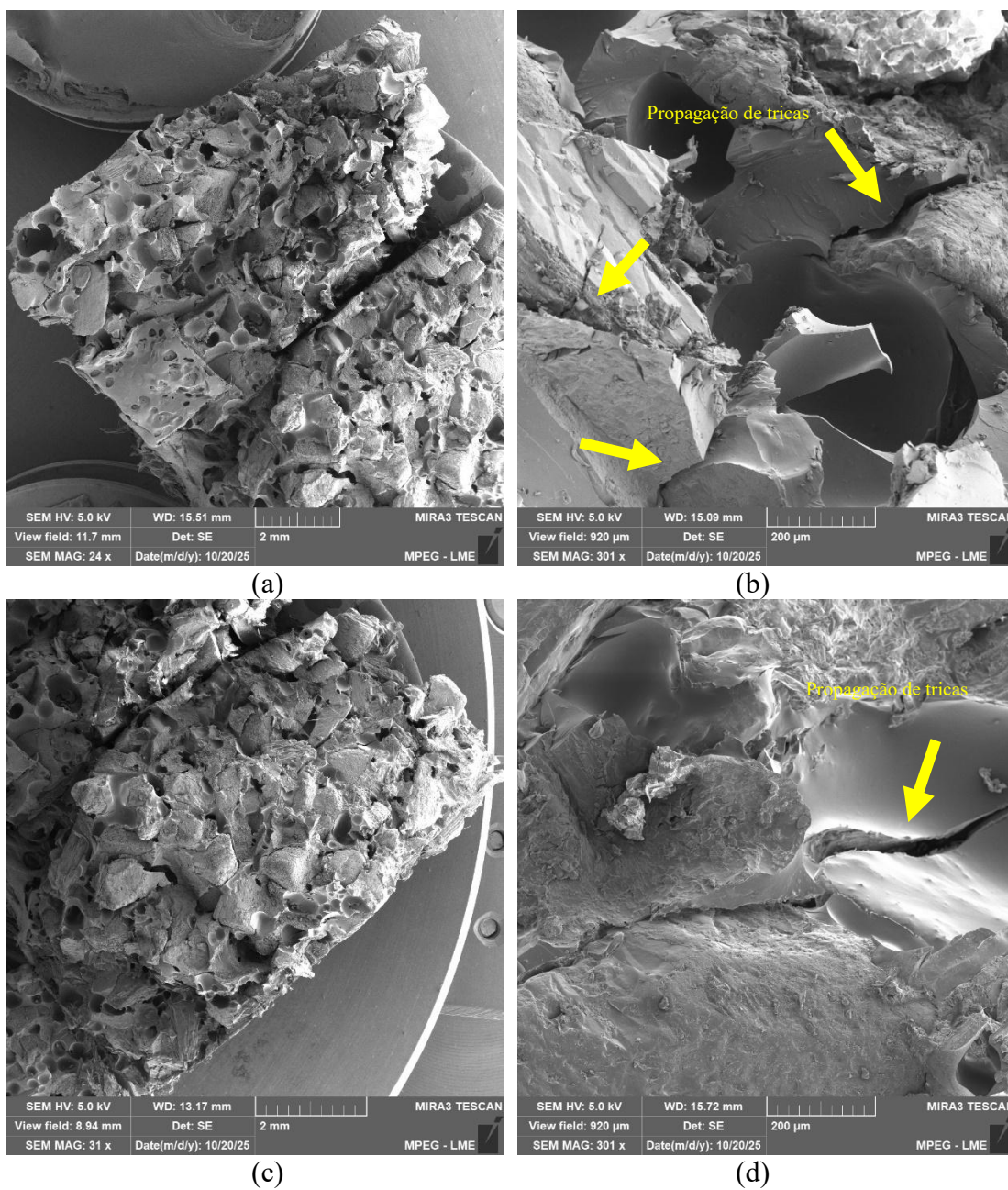


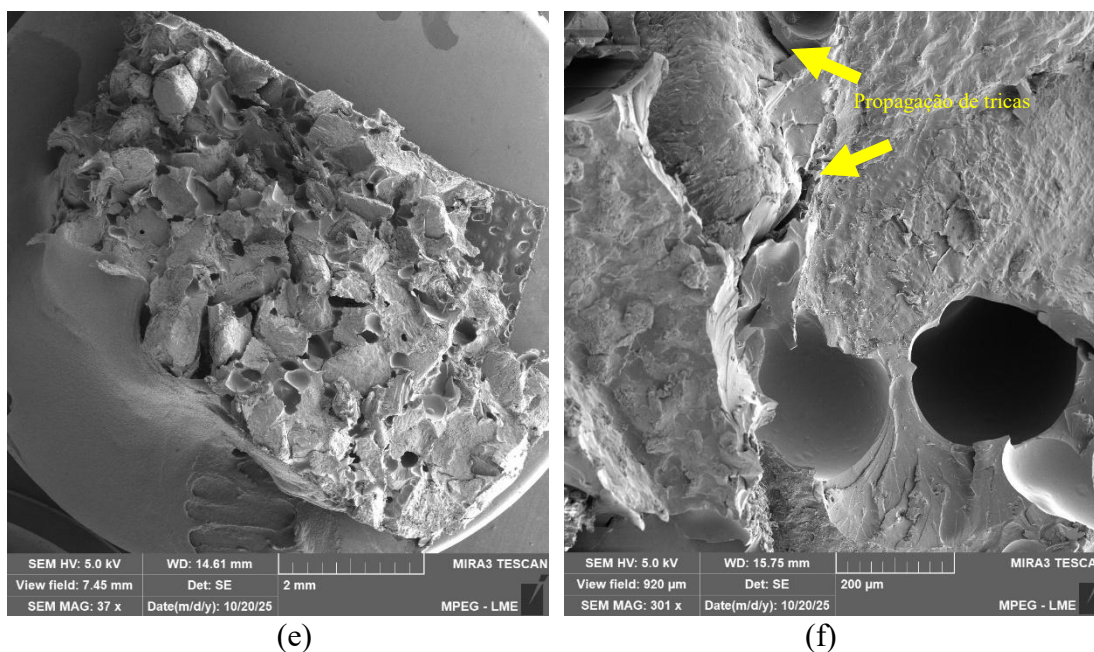
(f)

Fonte: Autoria própria, 2026.

Nas Figuras 61(a), 61(c) e 61(e), observa-se a seção transversal dos compósitos G2. Diferentemente das composições com G1, a partir da granulometria G2 os particulados aparecem de forma mais destacada nas micrografias. Nas Figuras 61(b), 61(d) e 61(f), observa-se a propagação de trincas na matriz. A Figura 62 apresenta as regiões analisadas dos compósitos produzidos com G3 após o ensaio de compressão.

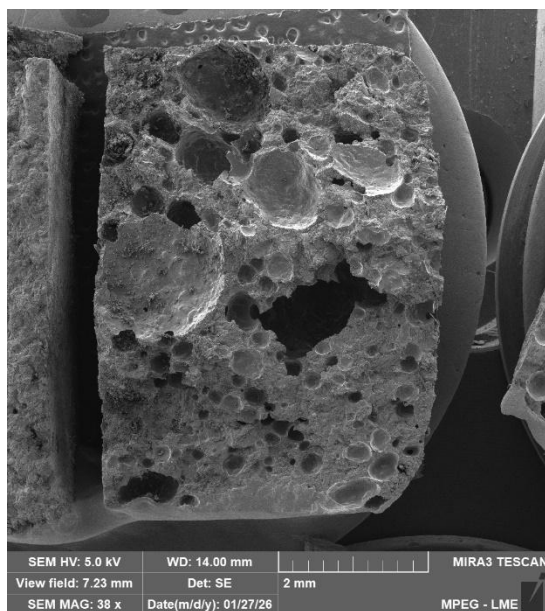
Figura 62 – Análises por MEV das regiões dos compósitos após ensaio de compressão: a) 40G3; b) 40G3 ampliado 300x; c) 50G3; d) 50G3 ampliado 300x; e) 60G3; f) 60G3 ampliado 300x.



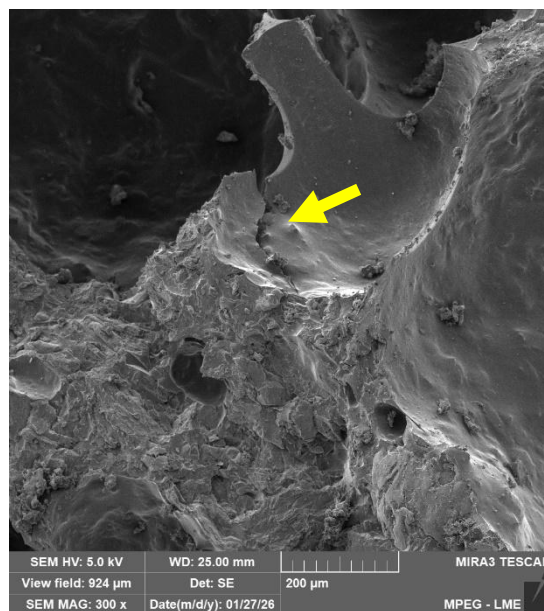


Nas Figuras 62(a), 62(c) e 62(e), observa-se a seção transversal dos compósitos produzidos com G3. Nas Figuras 62(b), 62(d) e 62(f), é possível observar a propagação de trincas na matriz. Na Figura 62(d), verifica-se a trinca se propagando ao redor do particulado e prosseguindo pela matriz, reforçando a predominância de fraturas intergranulares. A Figura 63 apresenta as regiões analisadas dos compósitos produzidos com G1 após o ensaio de flexão/dobramento.

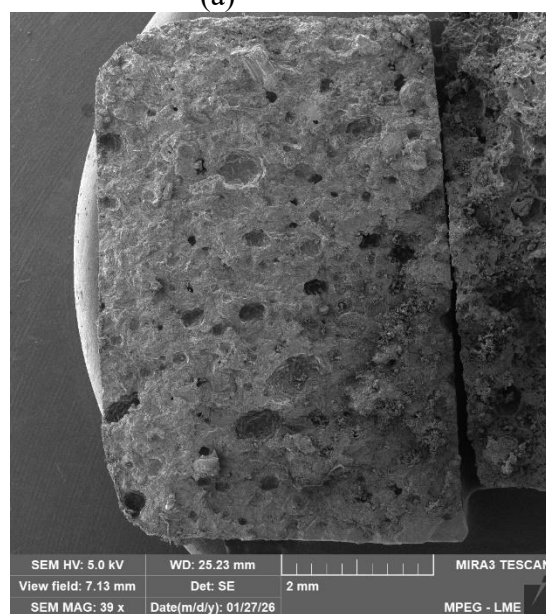
Figura 63 – Análises por MEV das regiões dos compósitos após ensaio de flexão/dobramento: a) 40G1; b) 40G1 ampliado 300x; c) 50G1; d) 50G1 ampliado 300x; e) 60G1; f) 60G1 ampliado 300x.



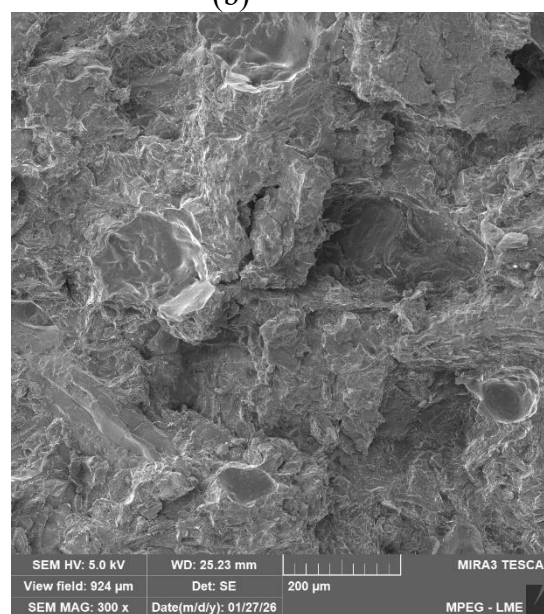
(a)



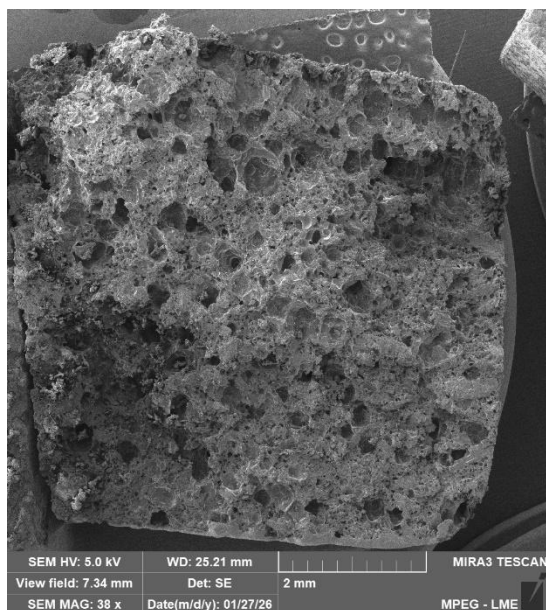
(b)



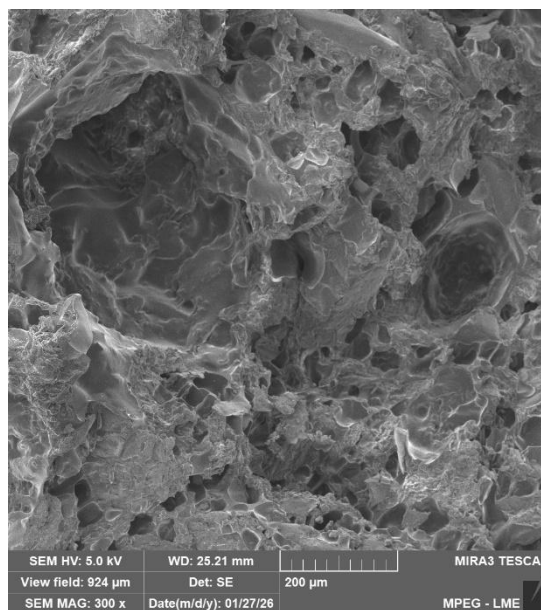
(c)



(d)



(e)

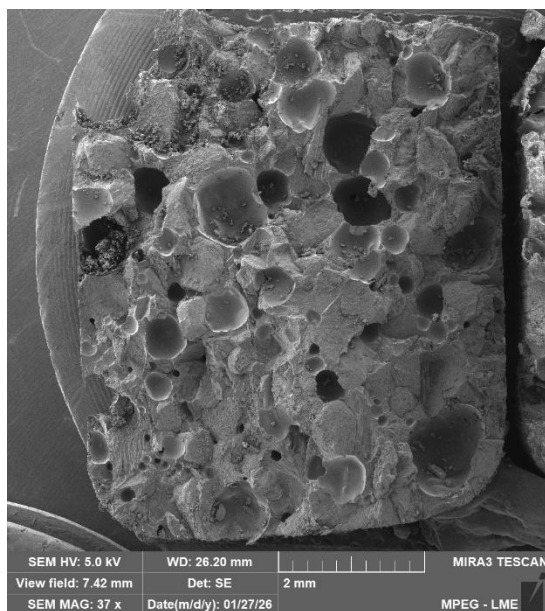


(f)

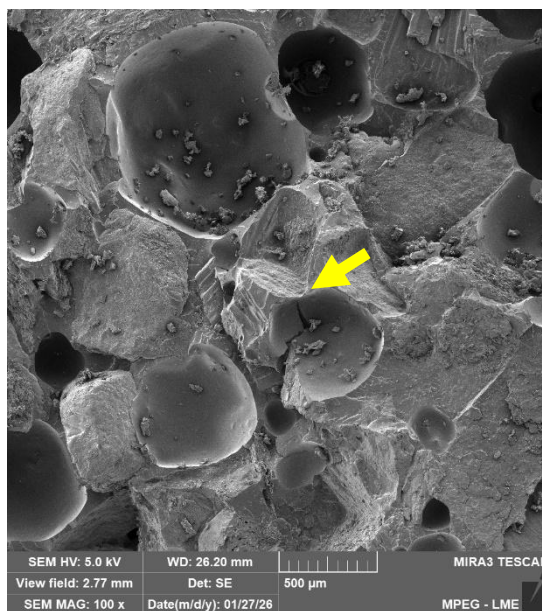
Fonte: Autoria própria, 2026.

Nas Figuras 63(a), 63(c) e 63(e), observa-se a seção transversal dos compósitos produzidos com G1. Nas Figuras 63(b), 63(d) e 63(f), observa-se que as falhas nos compósitos estão associadas à presença de bolhas e vazios. Na Figura 63(e), observa-se que a composição 60G1, no ensaio de flexão/dobramento, não apresentou compactação adequada dos particulados, resultando em maior concentração de vazios. Esse comportamento contribuiu para a redução da resistência ao dobramento nessa composição, o que é confirmado pelo valor de $37,66 \pm 2,26\%$ obtido no ensaio de fração de vazios. A Figura 64 apresenta as regiões analisadas dos compósitos produzidos com G2 após o ensaio de flexão/dobramento.

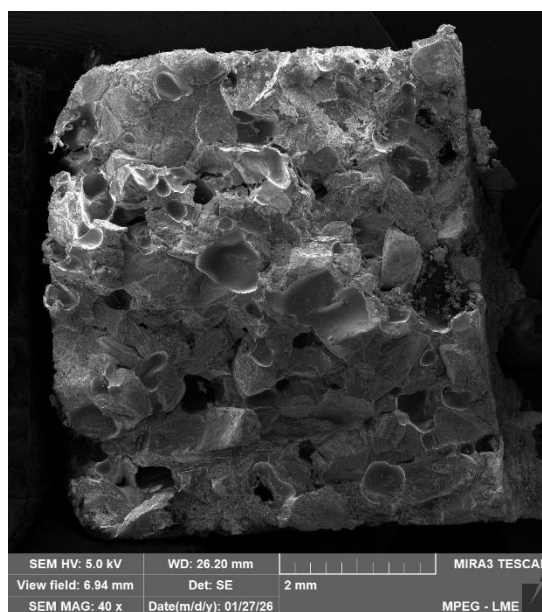
Figura 64 – Análises por MEV das regiões dos compósitos após ensaio de flexão/dobramento: a) 40G2; b) 40G2 ampliado 300x; c) 50G2; d) 50G2 ampliado 300x; e) 60G2; f) 60G2 ampliado 300x.



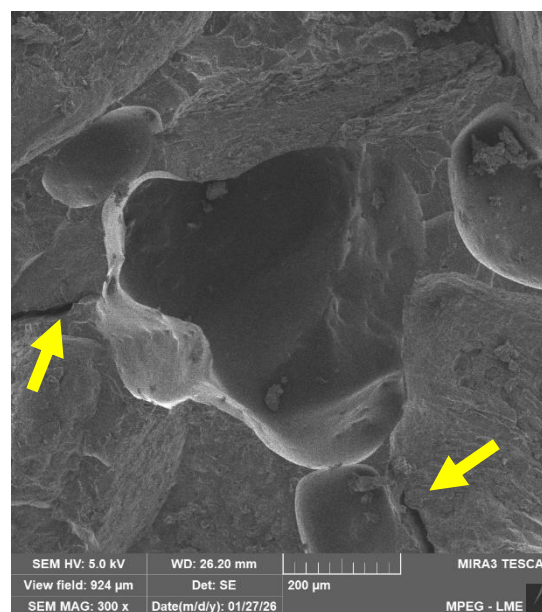
(a)



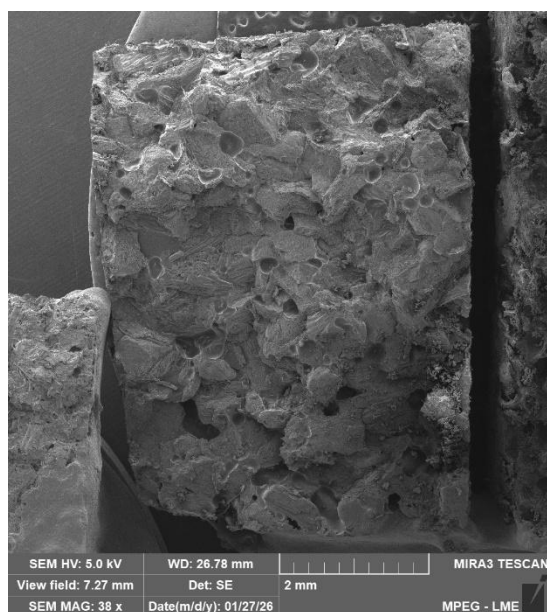
(b)



(c)



(d)



(e)

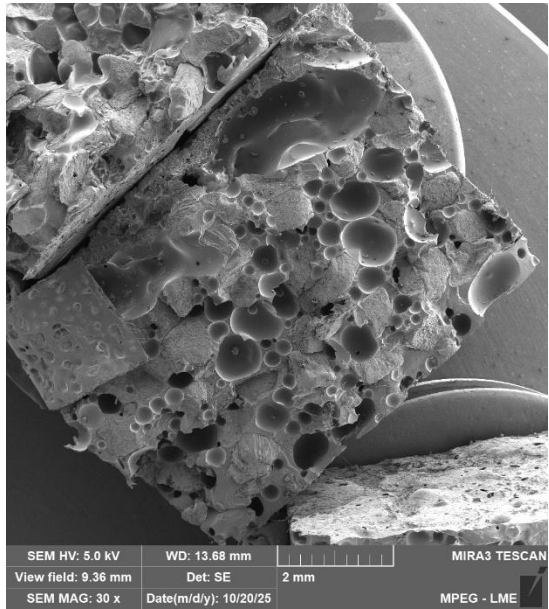


(f)

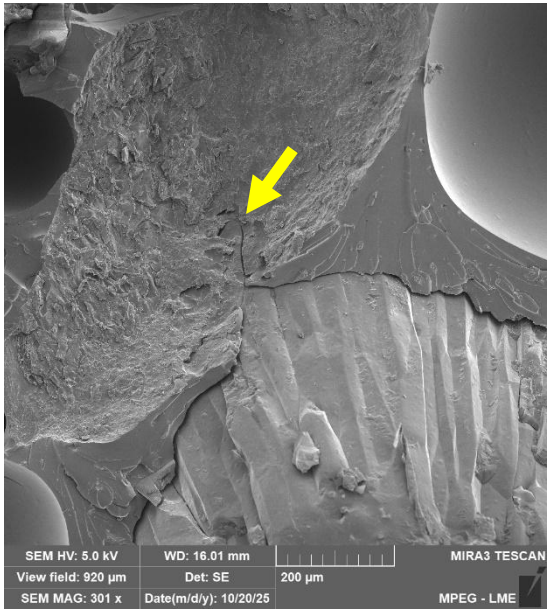
Fonte: Autoria própria, 2026.

Nas Figuras 64(a), 64(c) e 64(e), observa-se a seção transversal dos compósitos produzidos com G2. De modo semelhante ao observado nos demais ensaios, os particulados aparecem com maior visibilidade nas composições que utilizam as granulometrias G2 e G3. Nas Figuras 64(c) e 64(d), observa-se a propagação de trincas, enquanto nas Figuras 64(e) e 64(f) é possível observar bolhas e vazios. A Figura 65 apresenta as regiões analisadas dos compósitos produzidos com G3 após o ensaio de flexão/dobramento.

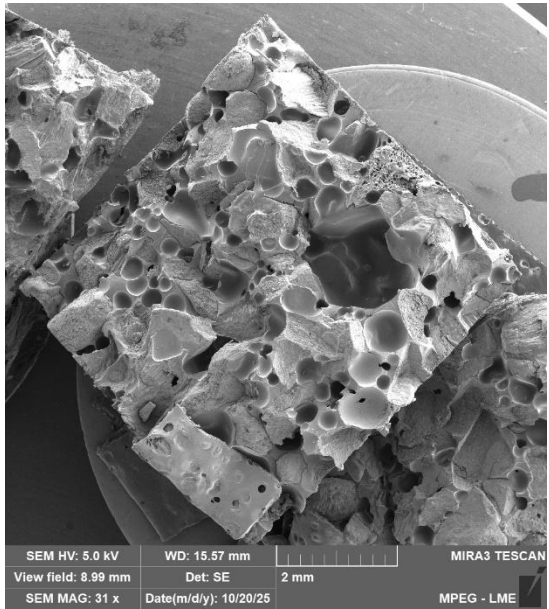
Figura 65 – Análises por MEV das regiões dos compósitos após ensaio de flexão/dobramento: a) 40G3; b) 40G3 ampliado 300x; c) 50G3; d) 50G3 ampliado 300x; e) 60G3; f) 60G3 ampliado 300x.



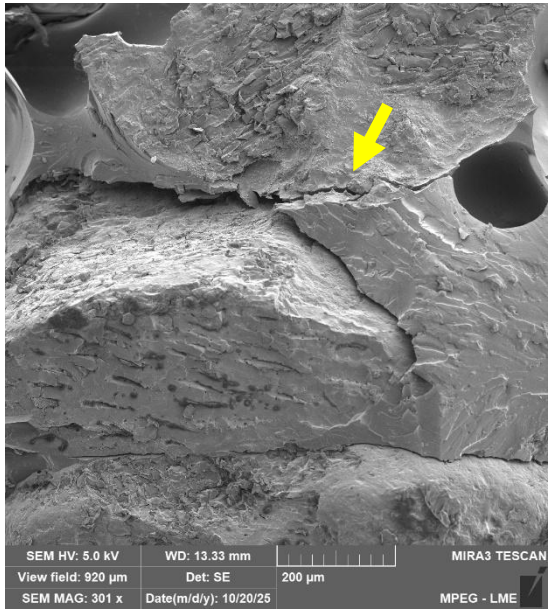
(a)



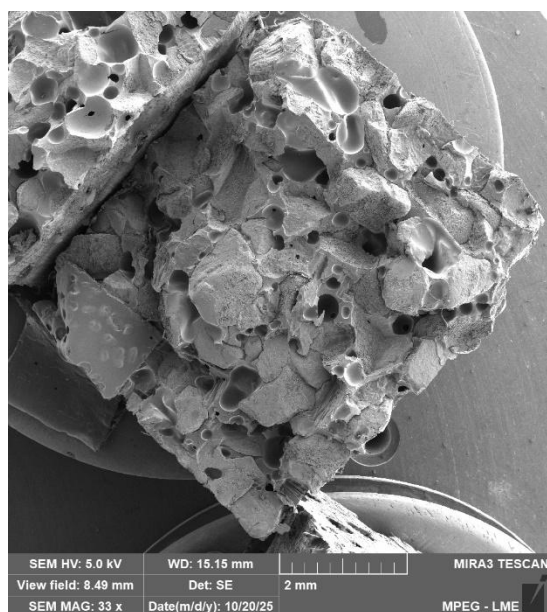
(b)



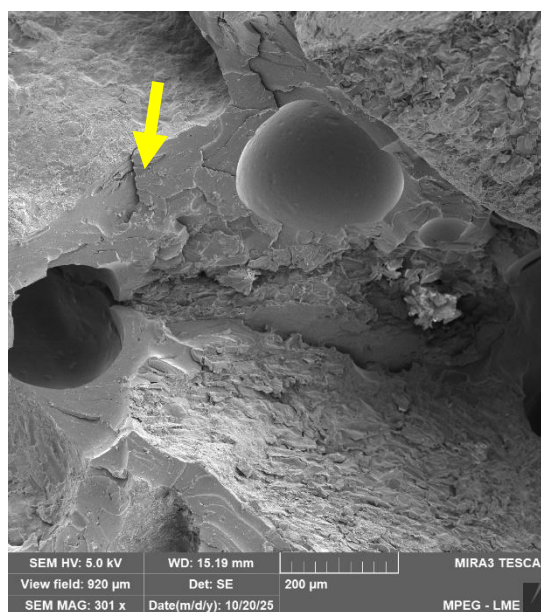
(c)



(d)



(e)

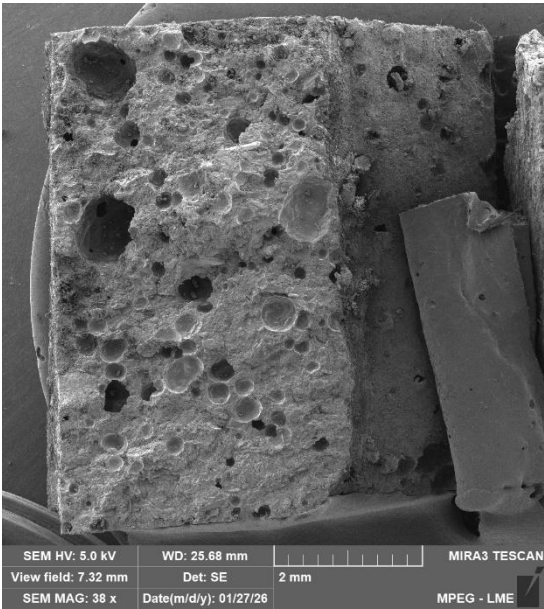


(f)

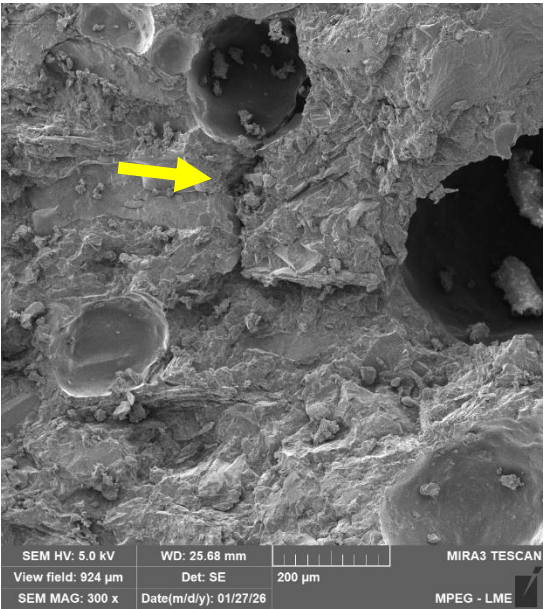
Fonte: Autoria própria, 2026.

Nas Figuras 65(a), 65(c) e 65(e), observa-se a seção transversal dos compósitos produzidos com G3. Nas Figuras 65(c), 65(d) e 65(f), observa-se propagação de trincas e possíveis falhas interfaciais entre os particulados e a matriz. A Figura 66 apresenta as regiões de fratura dos compósitos produzidos com G1 após o ensaio de impacto Izod.

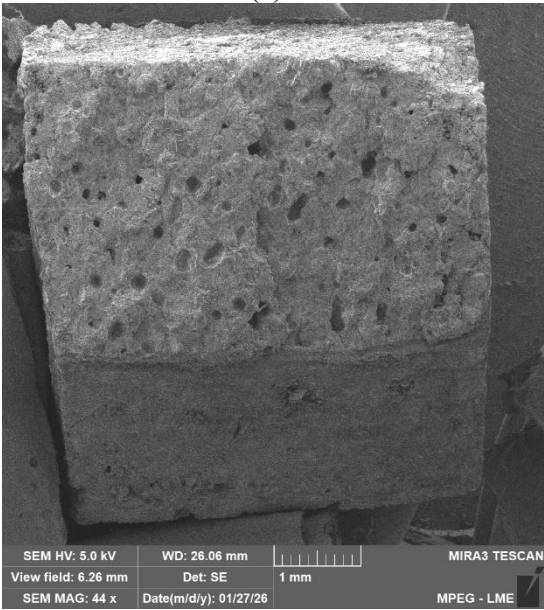
Figura 66 – Análises por MEV das regiões de fratura dos compósitos após ensaio de impacto Izod: a) 40G1; b) 40G1 ampliado 300x; c) 50G1; d) 50G1 ampliado 300x; e) 60G1; f) 60G1 ampliado 300x.



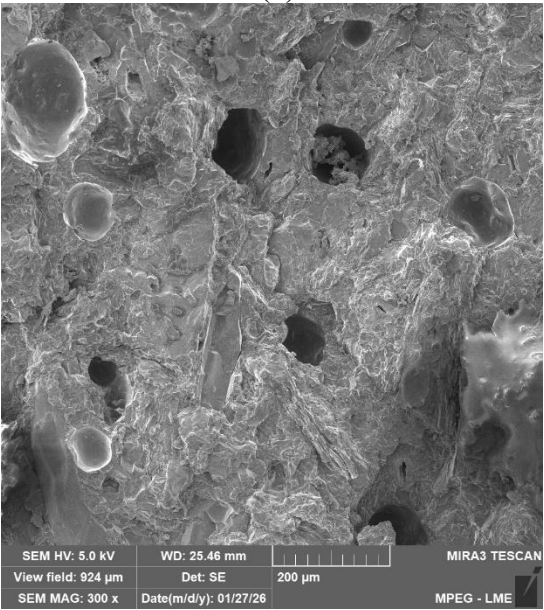
(a)



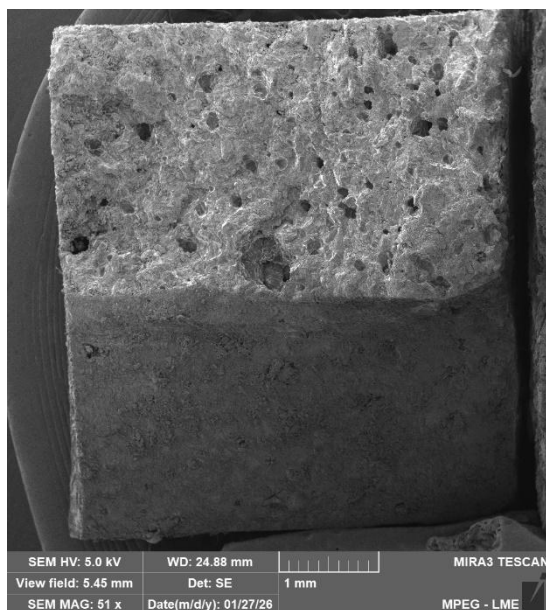
(b)



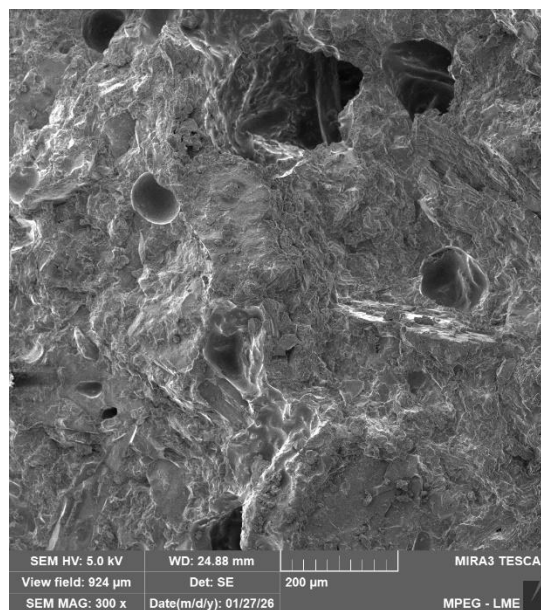
(c)



(d)



(e)

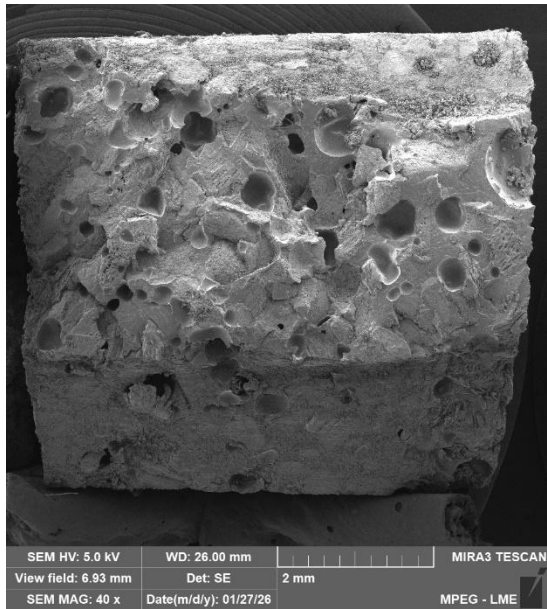


(f)

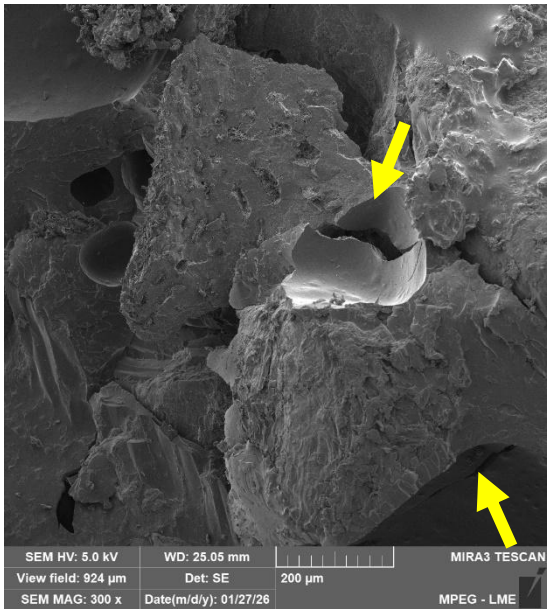
Fonte: Autoria própria, 2026.

Nas Figuras 66(a), 66(c) e 66(e), observa-se a seção transversal dos compósitos produzidos com G1. Na Figura 66(c), observa-se propagação de trincas, enquanto nas Figuras 66(d) e 66(f) a fratura ocorre majoritariamente associada à presença de bolhas e vazios. A Figura 67 apresenta as regiões de fratura dos compósitos produzidos com G2 após o ensaio de impacto Izod.

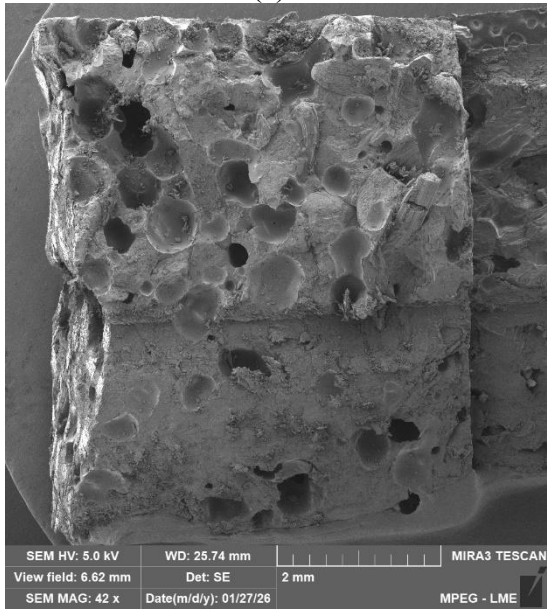
Figura 67 – Análises por MEV das regiões de fratura dos compósitos após ensaio de impacto Izod: a) 40G2; b) 40G2 ampliado 300x; c) 50G2; d) 50G2 ampliado 300x; e) 60G2; f) 60G2 ampliado 300x.



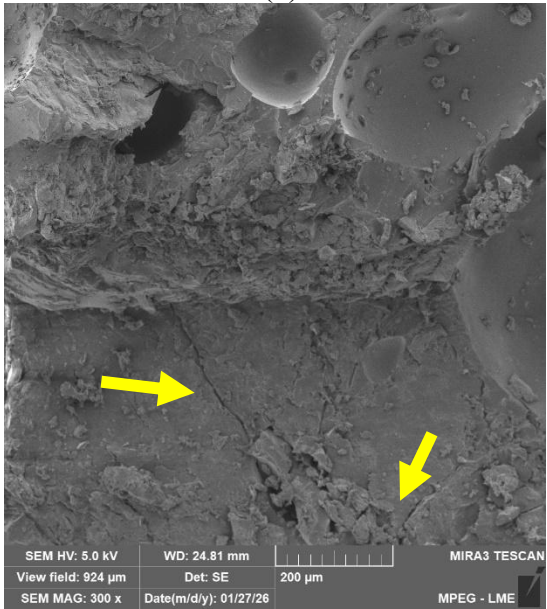
(a)



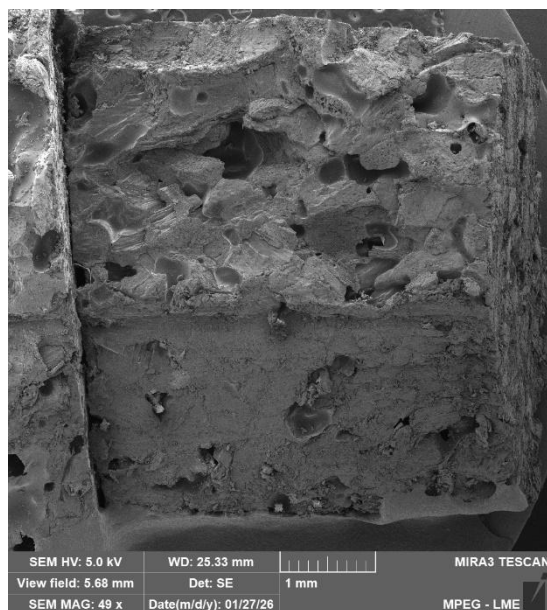
(b)



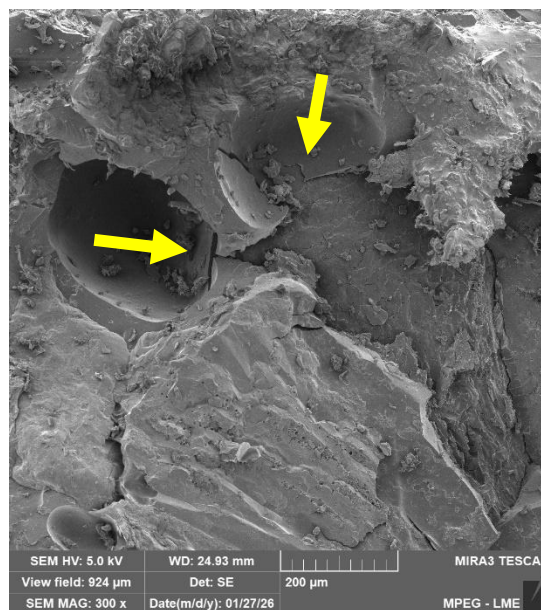
(c)



(d)



(e)

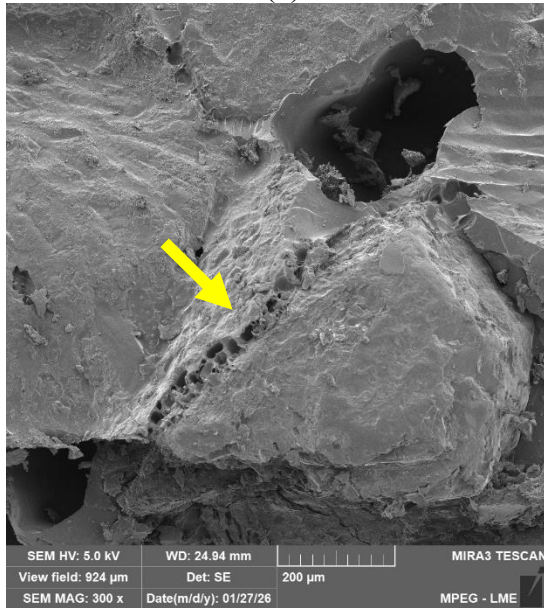
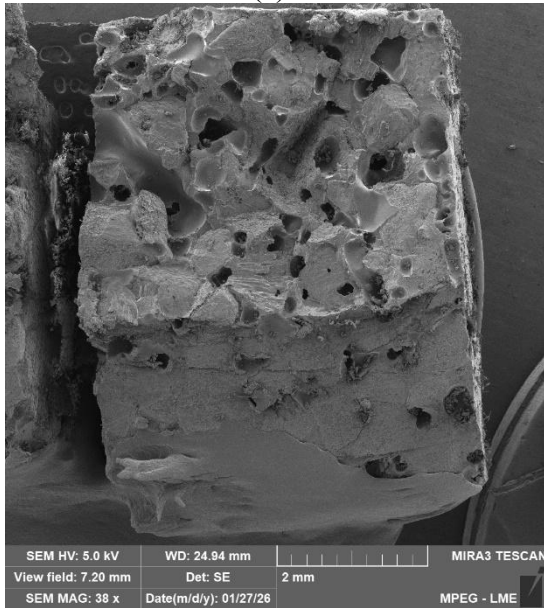
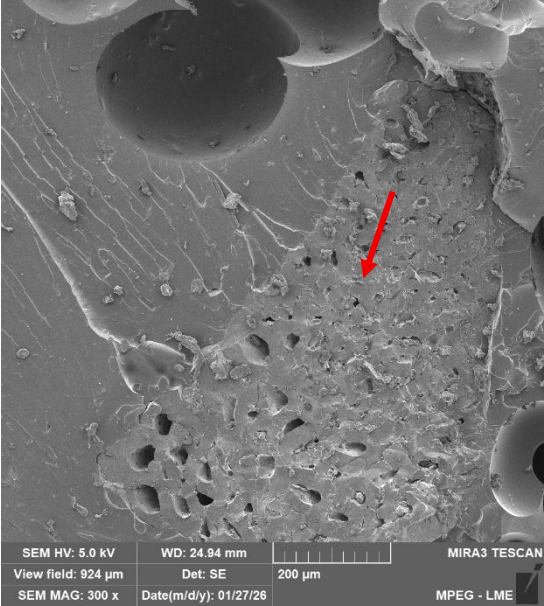
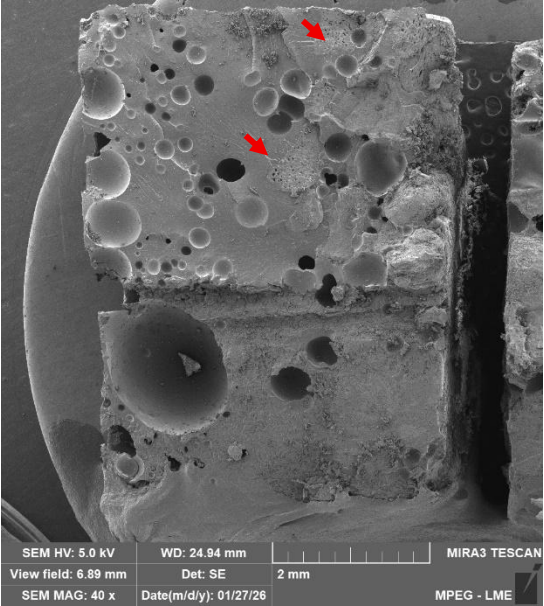


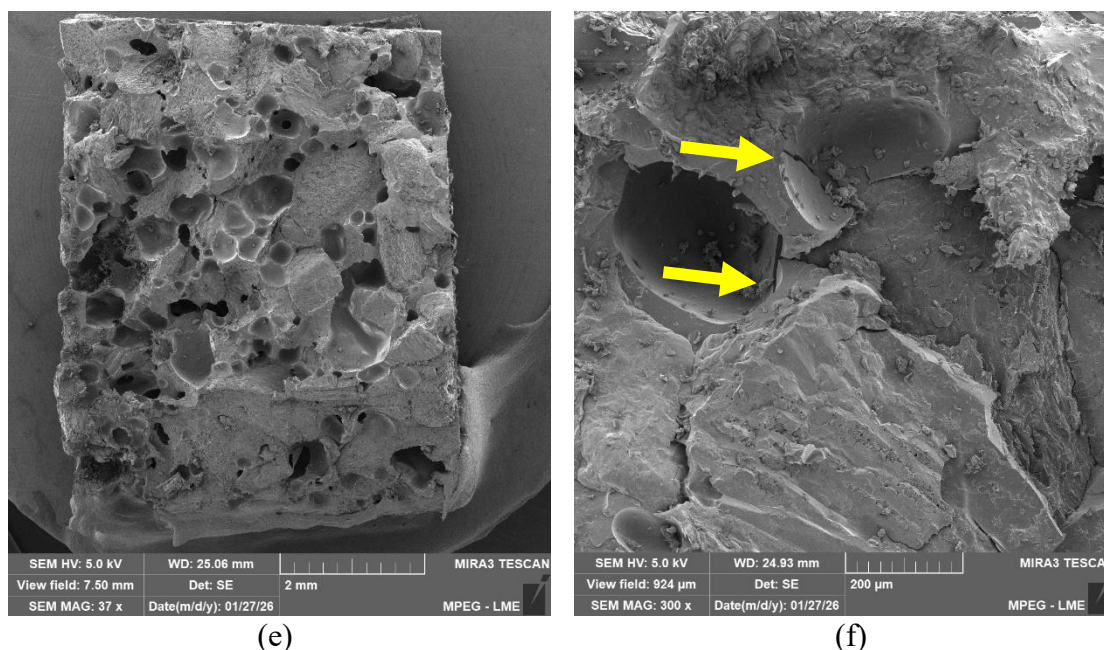
(f)

Fonte: Autoria própria, 2026.

Nas Figuras 67(a), 67(c) e 67(e), observa-se a seção transversal dos compósitos produzidos com G2. Nas Figuras 67(c), 67(d) e 67(f), observa-se a presença de vazios e a propagação de trincas na matriz. A Figura 68 apresenta as regiões de fratura dos compósitos produzidos com G3 após o ensaio de impacto Izod.

Figura 68 – Análises por MEV das regiões de fratura dos compósitos após ensaio de impacto Izod: a) 40G3; b) 40G3 ampliado 300x; c) 50G3; d) 50G3 ampliado 300x; e) 60G3; f) 60G3 ampliado 300x.





Fonte: Autoria própria, 2026.

Nas Figuras 68(a), 68(c) e 68(e), observa-se a seção transversal dos compósitos produzidos com G3. Na Figura 68(a), é possível observar particulados de açaí fraturados na matriz, deixando a região de fratura com aspecto mais linear e menos tridimensional. Na Figura 68(b), observa-se o aspecto do particulado fraturado. Na Figura 68(d), verifica-se o descolamento entre matriz e particulado, enquanto na Figura 68(f) observa-se a presença de vazios e a propagação de trincas na matriz.

De modo geral, as análises fractográficas dos compósitos revelam que, nas seções transversais dos compósitos ensaiados em tração, compressão, flexão e impacto Izod, há predominância de bolha e vazios nos compósitos. Esses defeitos são formados durante o processo de cura, em decorrência da liberação CO_2 gerada pela reação do pré-polímero com a umidade residual dos materiais lignocelulósicos. Isso forma vazios que reduzem a área útil de seção transversal e atuam como concentradores de tensão, contribuindo para fragilização estrutural do material (Hyde et al., 2020; Olszewski et al., 2022). Além disso, observa-se a predominância de fraturas intergranulares, uma vez na maioria das evidências observadas, poucas são as aparições de partículas fraturadas. Dessa forma, todas as superfícies de fratura dos compósitos produzidos apresentam elevada rugosidade, associada tanto à presença das bolhas quanto à distribuição dos particulados de açaí na matriz.

4.4 Análises de aplicabilidade

4.4.1 Viabilidade de aplicação e condições

A viabilidade de aplicação dos compósitos de poliuretano de mamona (PUOM) reforçados com particulados de açaí, para uso como revestimentos de parede, foi avaliada com base nos resultados de caracterização física, mecânica e de flamabilidade. Considerando a ausência de uma norma específica para o material desenvolvido, foram utilizadas como referência as normas ABNT NBR 14810-2, ABNT NBR 14715-1 e ABNT NBR 9781, que estabelecem requisitos para materiais aplicados em painéis, chapas e componentes cimentícios.

Os resultados indicaram potencial de aplicação dos compósitos em ambientes internos, especialmente como revestimentos de parede. A absorção de água em 24 h variou de $1,18 \pm 0,28\%$ para o PUOM a $5,87 \pm 1,59\%$ para 60G3, enquanto a porosidade aparente acessível à água variou de $1,20 \pm 0,28\%$ a $5,89 \pm 1,70\%$. Esses valores indicam baixa absorção relativa, mesmo com a presença dos particulados lignocelulósicos. Todas as formulações atenderam ao limite de 6% utilizado como referência pela ABNT NBR 9781, enquanto a maioria também permaneceu abaixo do limite de 5% considerado na ABNT NBR 14715-1, com exceção das composições 60G2 e 60G3.

Do ponto de vista mecânico, os compósitos apresentaram aumento expressivo na resistência à compressão em relação à matriz pura. Enquanto o PUOM apresentou $5,89 \pm 0,66$ MPa, os compósitos variaram de $17,87 \pm 1,81$ MPa a $37,94 \pm 2,17$ MPa, com destaque para a composição 60G1. No ensaio de dobramento, os valores variaram de $10,53 \pm 0,93$ MPa a $23,32 \pm 2,17$ MPa. Considerando o requisito mínimo de 11 MPa de MOR da ABNT NBR 14810-2 para painéis na faixa de espessura avaliada, apenas a composição 50G3 não atingiu esse limite. Entretanto, nenhuma formulação atingiu o requisito de 1,8 GPa para MOE, indicando limitação quanto à rigidez para aplicações normativas mais exigentes.

Os resultados complementares também reforçam o potencial de aplicação como revestimento não estrutural. A dureza Shore D aumentou com a incorporação dos particulados, alcançando até $64,90 \pm 2,71$ em 60G3, indicando maior rigidez superficial. A resistência ao impacto Izod dos compósitos, embora inferior à matriz pura, permaneceu entre $19,72 \pm 1,12$ J/m e $26,38 \pm 1,18$ J/m, podendo ser compatível com aplicações sem elevada solicitação dinâmica. Além disso, a taxa de queima foi reduzida em todas as formulações em relação ao

PUOM, com destaque para 60G1, que apresentou $10,37 \pm 1,86$ mm/s frente a $25,88 \pm 2,91$ mm/s da matriz pura.

Dessa forma, a aplicação mais promissora para os compósitos desenvolvidos é como revestimento interno de parede, especialmente em situações nas quais sejam desejáveis baixa absorção de água, boa resistência ao dobramento, rigidez superficial e menor propagação de chama. As composições 50G1, 60G1, 50G2 e 60G2 se destacam como as mais promissoras por apresentarem melhor equilíbrio entre desempenho mecânico e comportamento físico. Contudo, a elevada fração de vazios em algumas formulações e o não atendimento ao requisito de MOE da ABNT NBR 14810-2 indicam que, neste estágio, os compósitos não devem ser indicados para aplicações estruturais ou externas sem estudos adicionais de durabilidade e otimização do processamento.

4.4.2 Formulação ideal do estudo

Com base nos resultados obtidos nos ensaios físicos, mecânicos e de flamabilidade, foi elaborada uma síntese das formulações com melhor desempenho, relacionando suas propriedades de destaque com os requisitos de serviço mais relevantes para a aplicação proposta. A Tabela 90 apresenta essa correlação, permitindo identificar de forma objetiva as formulações mais adequadas conforme a exigência funcional do componente.

Tabela 90 – Síntese das formulações de destaque e dos requisitos de serviço associados à aplicação proposta.

Formulação	Destaque	Valores	Aplicação indicada
60G1	Melhor balanço geral entre resistência mecânica, baixa absorção e menor taxa de queima	Tração: $16,51 \pm 1,62$ MPa; Compressão: $37,94 \pm 2,17$ MPa; Taxa de queima: $10,37 \pm 1,86$ mm/s; Absorção: $2,26 \pm 0,18\%$	Indicada para revestimentos internos de parede, divisórias e painéis não estruturais, onde se busca resistência mecânica, menor propagação de chama e estabilidade em umidade moderada.
50G1	Maior resistência ao dobramento entre os compósitos	Dobramento: $23,32 \pm 2,17$ MPa; Módulo de corda: $0,75 \pm 0,06$ GPa	Indicada para painéis e revestimentos sujeitos a esforços de flexão/dobramento.
60G2	Maior módulo de corda entre os compósitos	Módulo de corda: $1,26 \pm 0,19$ GPa; Dobramento: $21,45 \pm 1,75$ MPa	Indicada para aplicações que priorizam maior rigidez e menor deformação em serviço.
60G3	Maior dureza superficial	Dureza Shore D: $64,90 \pm 2,71$	Indicada para superfícies que demandam maior resistência à indentação e maior rigidez superficial.

40G2	Melhor desempenho ao impacto entre os compósitos reforçados	Impacto Izod: $26,38 \pm 1,18$ J/m	Indicada para componentes não estruturais com solicitação dinâmica moderada.
-------------	---	------------------------------------	--

Fonte: Autoria própria, 2026.

De forma geral, observa-se que a formulação 60G1 apresentou o melhor equilíbrio entre as propriedades avaliadas, sendo a mais indicada para a aplicação principal proposta neste estudo, isto é, revestimento interno de parede. As formulações 50G1, 60G2, 60G3 e 40G2 também se destacaram em requisitos específicos de serviço, demonstrando que a escolha da composição mais adequada depende da propriedade priorizada na aplicação final.

5 CONCLUSÃO

Os principais resultados e contribuições do estudo podem ser sintetizados nos seguintes pontos:

- A análise morfológica revelou a natureza irregular dos particulados, com variações de tamanho conforme a granulometria.
- A caracterização térmica indicou degradação progressiva dos particulados de caroço de açaí; contudo, os principais eventos de perda de massa ocorreram acima das temperaturas empregadas no processamento dos compósitos de PUOM, evidenciando compatibilidade térmica com a rota de fabricação adotada.
- A análise química por FTIR confirmou a composição lignocelulósica dos particulados, com a presença de grupos funcionais característicos de celulose, hemicelulose e lignina. O FTIR revelou também que houve a mistura adequada dos particulados com a matriz de PUOM.
- A densidade prática dos compósitos revelou que todas as formulações dos painéis são consideradas de alta densidade. A fração de vazios foi um fator significativo, com as formulações de 40% de particulados (40G1, 40G2, 40G3) geralmente apresentando os maiores índices, impactando negativamente as propriedades mecânicas.
- Resistência à Tração: A formulação 60G1 (60% de particulados finos) apresentou o melhor desempenho, com $16,51 \pm 1,62$ MPa, superando a matriz pura.
- Resistência à Compressão: Houve um aprimoramento consistente em todas as formulações reforçadas, com a 60G1 atingindo $37,94 \pm 2,17$ MPa, representando um ganho de 544% em relação à matriz pura.
- Resistência à Flexão: As formulações 50G2 e 60G2 (particulados intermediários) exibiram os melhores resultados, com a 60G2 alcançando $21,45 \pm 1,75$ MPa, indicando alta rigidez.
- Módulos de Elasticidade: Os módulos de Young (tração), compressão e corda (flexão) foram significativamente aumentadas com a adição dos particulados, evidenciando o incremento da rigidez dos compósitos.
- Tenacidade ao Impacto (Izod): Houve uma redução geral da tenacidade, com exceção da 40G2, que se destacou com $26,38 \pm 1,18$ J/m, sendo a de maior energia de impacto entre os compósitos reforçados.

- Dureza Shore D: A dureza aumentou com a incorporação dos particulados, sendo a 60G3 (particulados grossos) a de maior dureza, com $64,9 \pm 2,71$.
- Absorção de Água: Todas as composições reforçadas apresentaram aumento na absorção de água em comparação com a matriz pura, devido ao caráter higroscópico dos particulados, mas os valores obtidos (ex: 40G1 com $1,48 \pm 0,15\%$) ainda se enquadram nos limites de normas para certas aplicações.
- Flamabilidade: A adição dos particulados reduziu a taxa de queima em praticamente todas as composições, com a 60G1 apresentando a maior redução ($10,37 \pm 1,86$ mm/s, 60% de diminuição) e suprimindo o gotejamento da matriz pura.
- As análises fractográficas revelaram a predominância de bolhas e vazios nas superfícies de fratura de todos os compósitos, atribuídos à liberação de CO_2 durante a cura e à umidade residual dos particulados. Esses defeitos atuaram como concentradores de tensão.
- Observou-se a predominância de fraturas intergranulares, indicando uma adesão interfacial limitada entre o reforço e a matriz, onde as trincas tendem a contornar os particulados em vez de fraturá-los.

As principais limitações do estudo residem na elevada porosidade e na adesão interfacial limitada, que impactaram negativamente as propriedades mecânicas, especialmente a tenacidade ao impacto.

6 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para a continuidade e o aprimoramento deste trabalho, recomenda-se a realização das seguintes etapas futuras:

- Otimizar o processo de fabricação dos compósitos, buscando reduzir a formação de vazios, melhorar a dispersão dos particulados e aumentar a homogeneidade das placas produzidas.
- Realizar ensaios de durabilidade e envelhecimento acelerado, visando avaliar o comportamento dos compósitos sob ação de umidade, temperatura, radiação e ciclos ambientais.
- Confeccionar compósitos para tração e compressão com frações volumétricas acima de 60% de volume de partículas de açai.
- Realizar análise dinâmico-mecânica (DMA), a fim de investigar as propriedades viscoelásticas dos compósitos e determinar a temperatura de transição vítrea.
- Realizar análises térmicas dos compósitos, como TGA/DTG e DSC, para avaliar o comportamento de degradação térmica, estabilidade relativa e possíveis alterações associadas à incorporação dos particulados.
- Testar os compósitos em formato de painéis de revestimento, em condições reais ou simuladas de aplicação, avaliando desempenho dimensional, resistência superficial e comportamento em serviço.
- Realizar ensaios complementares de usinagem, fixação e arrancamento de parafuso, considerando a possível aplicação dos materiais como painéis.
- Avaliar o desempenho dos compósitos quanto ao isolamento térmico e acústico, visando ampliar as possibilidades de aplicação em sistemas de revestimento.
- Desenvolver uma análise de viabilidade econômica para produção em escala industrial, considerando custo das matérias-primas, produtividade do processo, consumo energético e aproveitamento do resíduo de açai.
- Realizar uma Análise de Ciclo de Vida (ACV), com o objetivo de quantificar os impactos ambientais associados à produção dos compósitos e comparar seu desempenho ambiental com materiais convencionais.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-HAMID, S. M. S.; AL-QABANDI, O. A.; N.A.S., Elminshawy.; BASSYOUNI, M.; ZOROMBA, M. S.; ABDEL-AZIZ, M. H.; MIRA, H.; Y., E. Fabrication and Characterization of Microcellular Polyurethane Sisal Biocomposites. **Molecules**, v. 24, n. 24, p. 4585, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules24244585>

ABDULKADIR, S. A.; MUKTARI, S.; ZAKARI, Y. I.; OKPANACHI, C. B.; MOHAMMED, I. A.; YUSUF, O. L.; OJOBO, L. O. The Effect of Ground Rubber Tire (GRT) Filler Particle Size on the Morphological, Thermal and Mechanical Properties of Waste High-Density Polyethylene (rHDPE). **UMYU Scientifica**, v. 4, n. 3, p. 223–231, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.56919/usci.2543.022>

ABNT, A. B. de N. T. **ABNT NBR 14810-2 NBR14810-2 Painéis de partículas**. Rio de Janeiro, Brazil: [s. n.], 2024. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/confea/pnm.aspx?Q=N3h3MjRVVGp4MjVvQURGOEFwNnJuRUJUaWdHSHNOcTROcEp6UWViTk5XWT0=>. Acesso em: 4 maio. 2026.

ABNT NBR 14715-1:2021, A. B. de N. T. **ABNT NBR 14715-1:2021 – Chapas de gesso para drywall – Parte 1: Requisitos**. [S. l.: s. n.]. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/confea/pnm.aspx?Q=aEVNYVBjc1RGSE1URUxrNUw0a0hGL0ZLRC84RDFGRTdTUUJjS015eEZtRT0=>. Acesso em: 4 maio. 2026.

ABREMA. PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL 2025. *In*: 2025. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/panorama/>. Acesso em: 18 abr. 2026.

ABREU, F. P.; JOSÉ RIBEIRO PADILHA, R.; MARIA VINHAS, G.; RAMOS LUIZ, M.; COSTA DE SOUZA, N.; MEDEIROS BASTOS DE ALMEIDA, Y. Development of hydrophobic polyurethane/castor oil biocomposites with agroindustrial residues for sorption of oils and organic solvents. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 581, p. 442–454, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.07.091>

ALMEIDA, L. M.; RIOS DA SILVA, A. C.; DUARTE LOPES, F. P.; SIMONASSI, N. T.; MONTEIRO, S. N.; CANDIDO, V. S. Caranan fibers (*Mauritiella armata*) and new reinforcements of polyester composites with natural fibers functionalized with graphene oxide and their application potential. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 34, p. 2232–2252, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.12.233>

ALMEIDA, V. H. M.; JESUS, R. M.; SANTANA, G. M.; PEREIRA, T. B. Polylactic Acid Polymer Matrix (Pla) Biocomposites with Plant Fibers for Manufacturing 3D Printing Filaments: A Review. **Journal of Composites Science**, v. 8, n. 2, p. 66, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jcs8020066>

AL-OQLA, F. M.; HAYAJNEH, M. T. Influential reinforcement parameters, elemental mapping, topological analysis and mechanical performance of lignocellulosic date palm/epoxy composites for improved sustainable materials. **Heliyon**, v. 10, n. 18, p. e37944, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37944>

ALSUWAIT, R. B.; SOUIYAH, M.; MOMOHJIMOH, I.; GANIYU, S. A.; BAKARE, A. O. Recent Development in the Processing, Properties, and Applications of Epoxy-Based Natural

Fiber Polymer Biocomposites. **Polymers**, v. 15, n. 1, p. 145, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym15010145>

ALVES, A. M.; ARAÚJO, A. P. M. de; AGRAWAL, P.; CAVALCANTI, S. N.; ARIMATEIA, R. R.; FREITAS, N. L. de; MÉLO, T. J. A. de. Influência da alumina sintetizada por reação de combustão nas propriedades de compósitos com matriz de polipropileno. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, p. e12230, 2018. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S1517-707620180004.0564>

AMIN, N.; SHABBIR, M. S.; PAN, Y.; ASIF, M. Beyond Growth: The Triple Green Strategy (Green Energy, Green Innovation, and Green Finance) for Sustainable Emissions Reduction in BRICS Countries. **Sustainable Development**, v. 33, n. 4, p. 5566–5586, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/sd.3411>

AMJAD, A.; ANJANG, A.; ABIDIN, M. S. Z. Effect of nanofiller concentration on the density and void content of natural fiber-reinforced epoxy composites. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 14, n. 7, p. 8661–8660, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02839-w>

ANDRADE, C. J. de; DE OLIVEIRA DIAS, A. R.; FIGUEIREDO, S. N.; DOS SANTOS ROSA, A. C. F.; DE SOUSA BARROS, I.; ALVES, A. T.; DE LIMA SILVA, S. M.; DE CARVALHO, L. H.; BARBOSA, R.; ALVES, T. S. Biodegradable composites filled with agro-industrial waste and fertilizers for filament production and application in active manufacturing. **Polymer Composites**, v. 46, n. 7, p. 6522–6535, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pc.29375>

ANDRZEJEWSKI, J.; MICHAŁOWSKI, S. Development of a New Type of Flame Retarded Biocomposite Reinforced with a Biocarbon/Basalt Fiber System: A Comparative Study between Poly(lactic Acid) and Polypropylene. **Polymers**, v. 14, n. 19, p. 4086, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym14194086>

ARAÚJO, S. S.; SANTOS, G. T. A.; TOLOSA, G. R.; HIRANOBE, C. T.; BUDEMBERG, E. R.; CABRERA, F. C.; SILVA, M. J. D.; PAIM, L. L.; JOB, A. E.; SANTOS, R. J. D. Acai Residue as an Ecologic Filler to Reinforcement of Natural Rubber Biocomposites. **Materials Research**, v. 26, n. suppl 1, p. e20220505, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2022-0505>

ARAVINTH, K.; RAMAKRISHNAN, T.; TAMILARASAN, V. D.; VEERAMANIKANDAN, K. A brief review on plant fibres composites: Extraction, chemical treatment and fibre orientation. **Materials Today: Proceedings**, v. 62, p. 2005–2009, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.291>

ARIAS, B. G. Curva de rotura para la eliminación de diisocianato 2,4-tolueno por adsorción mediante carbón activo en entornos laborales. v. 71, n. 278, p. 45–55, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.4321/s0465-546x2025000100004>

ASTM D256. **Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics**. ASTM International, , [s. d.]. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/D0256-23E01>. Acesso em: 24 nov. 2024.

ASTM D570-22. **Test Method for Water Absorption of Plastics**. ASTM International, , [s. d.]. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/D0570-22>. Acesso em: 24 nov. 2024.

ASTM D695-23. **Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics**. ASTM International, , [s. d.]. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/D0695-23>. Acesso em: 30 out. 2024.

ASTM D790-17. **D790 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**. [s. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://store.astm.org/d0790-17.html>. Acesso em: 4 maio. 2026.

ASTM D2240-15(2021). **Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness**. [s. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.astm.org/astm-license-agreement>. Acesso em: 4 maio. 2026.

ASTM D3039-17. **Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. ASTM International, , [s. d.]. Disponível em: https://doi.org/10.1520/D3039_D3039M-17. Acesso em: 31 jul. 2025.

AZEVEDO, A.; DE MATOS, P.; MARVILA, M.; SAKATA, R.; SILVESTRO, L.; GLEIZE, P.; BRITO, J. D. Rheology, Hydration, and Microstructure of Portland Cement Pastes Produced with Ground Açaí Fibers. **Applied Sciences**, v. 11, n. 7, p. 3036, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app11073036>

BABU, N. K.; MENSAH, R. A.; SHANMUGAM, V.; RASHEDI, A.; ATHIMOOLAM, P.; ASEER, J. R.; DAS, O. Self-reinforced polymer composites: An opportunity to recycle plastic wastes and their future trends. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 139, n. 46, p. e53143, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/app.53143>

BAI, L.; CAO, C.; XIAO, L.; CHENG, H.; LIU, Z.; SUN, X.; XIAO, Q.; YANG, S.; LIN, G.; QIAN, Q.; CHEN, Q. Structure insight into the interfacial effect of fiber-low density polyethylene composites by the combination of experiment and finite element simulation. **Polymer Testing**, v. 111, p. 107597, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107597>

BALIEIRO, L. C. de S. Revalorização dos resíduos provenientes da casca de noz macadâmia como enchimento em compósito de poliuretano derivado do óleo de mamona. 2023. Disponível em: <https://www.bdt.d.uerj.br:8443/handle/1/19835>. Acesso em: 11 maio. 2025.

BARBOSA, A. D. M.; MACHADO DOS SANTOS, G.; MEDEIROS DE MELO, G. M.; LITAIF, H. A.; MARTORANO, L. G.; GIACON, V. M. Evaluation of the use of açaí seed residue as reinforcement in polymeric composite. **Polymers and Polymer Composites**, v. 30, p. 096639112211083, 2022 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/09663911221108307>

BARBOSA, A. D. M.; REBELO, V. S. M.; MARTORANO, L. G.; GIACON, V. M. Caracterização de partículas de açaí visando seu potencial uso na construção civil. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 3, p. e12435, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620190003.0750>

BARBOSA, K. S. L.; CARNEIRO, M. de S.; SOUZA, J. A. da S.; COSTA, D. da S.; COSTA, D. S. da; MÂCEDO, E. N. Resíduos de mármore e granito em materiais compósitos: relação da granulometria nas propriedades mecânicas. **Conjecturas**, v. 22, n. 2, p. 1319–1331, 2022 b. Disponível em: <https://doi.org/10.53660/CONJ-833-F04>

BARCZEWSKI, M.; SAŁASIŃSKA, K.; SZULC, J. Application of sunflower husk, hazelnut shell and walnut shell as waste agricultural fillers for epoxy-based composites: A study into mechanical behavior related to structural and rheological properties. **Polymer Testing**, v. 75, p. 1–11, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.01.017>

BARROS, S. de S.; OLIVEIRA, E. da S.; JR, W. A. G. P.; ROSAS, A. L. G.; FREITAS, A. E. M. de; LIRA, M. S. de F.; CALDERARO, F. L.; SARON, C.; FREITAS, F. A. de. Sementes de açaí (*Euterpe precatoria* Mart.) como uma nova fonte alternativa de celulose: Extração e caracterização. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, p. e31110716661–e31110716661, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i7.16661>

BAYE, T. M.; MEKONONE, S. T. Particle concentration and size effect on mechanical properties of natural-hydroxyapatite reinforced high-density polyethylene composite. **Polymers and Polymer Composites**, v. 33, p. 09663911241313175, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/09663911241313175>

BISPO, R. A. *et al.* Production and evaluation of particleboards made of coconut fibers, pine, and eucalyptus using bicomponent polyurethane-castor oil resin. **BioResources**, v. 17, n. 3, p. 3944–3951, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.15376/biores.17.3.3944-3951>

BOKOBZA, L. Elastomer Nanocomposites: Effect of Filler–Matrix and Filler–Filler Interactions. **Polymers**, v. 15, n. 13, p. 2900, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym15132900>

BRASIL.; LEI NO 12305, DE 02 DE AGOSTO DE 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a lei n 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.** [s. l.], [s. d.]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 18 abr. 2026.

BRZESKA, J.; PIOTROWSKA-KIRSCHLING, A. A Brief Introduction to the Polyurethanes According to the Principles of Green Chemistry. **Processes**, v. 9, n. 11, p. 1929, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr9111929>

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K.; AGUIAR, J. B. de; AGUIAR, J. M. de; RUBERT, J. B. **Elementos de Máquinas de Shigley.** [S. l.]: AMGH, 2021.

CAMILLO, M. D. O. UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS. 2023.

CAMILLO, M. D. O.; GONÇALVES, B. M. M.; CANDIDO, V. S.; DIAS, L. D. C.; MOULIN, J. C.; MONTEIRO, S. N.; OLIVEIRA, M. P. Assessment of Hydrothermal Treatment Effects on Coir Fibers for Incorporation into Polyurethane Matrix Biocomposites Derived from Castor Oil. **Polymers**, v. 15, n. 23, p. 4614, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym15234614>

CARDOSO, E.; ESCÓCIO, V.; INFANTE, C.; PACHECO, E. Multicriteria Decision Analysis of the Influence of Natural Fibers on the Flexibility of Renewable Polyurethane Composites. **Materials**, v. 18, n. 7, p. 1610, 2025 a. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma18071610>

CARDOSO, E.; ESCÓCIO, V.; INFANTE, C.; PACHECO, E. Multicriteria Decision Analysis of the Influence of Natural Fibers on the Flexibility of Renewable Polyurethane Composites. **Materials**, v. 18, n. 7, p. 1610, 2025 b. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma18071610>

CARDOSO, E.; ESCÓCIO, V.; INFANTE, C.; PACHECO, E. Multicriteria Decision Analysis of the Influence of Natural Fibers on the Flexibility of Renewable Polyurethane Composites. **Materials**, v. 18, n. 7, p. 1610, 2025 c. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma18071610>

CARDOSO, E.; ESCÓCIO, V.; INFANTE, C.; PACHECO, E. Multicriteria Decision Analysis of the Influence of Natural Fibers on the Flexibility of Renewable Polyurethane Composites. **Materials**, v. 18, n. 7, p. 1610, 2025 d. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma18071610>

CARVALHO, J. P. R. G. de; SIMONASSI, N. T.; LOPES, F. P. D.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. Novel Sustainable Castor Oil-Based Polyurethane Biocomposites Reinforced with Piassava Fiber Powder Waste for High-Performance Coating Floor. **Sustainability**, v. 14, n. 9, p. 5082, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su14095082>

CASTRO, D. A. R. de *et al.* Fractional Distillation of Bio-Oil Produced by Pyrolysis of Açaí (*Euterpe oleracea*) Seeds. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5772/intechopen.79546>. Acesso em: 2 nov. 2025.

CAVALCANTI, D.; BANEJA, M.; NETO, J.; LIMA, R. Comparative analysis of the mechanical and thermal properties of polyester and epoxy natural fibre-reinforced hybrid composites. **Journal of Composite Materials**, v. 55, n. 12, p. 1683–1692, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0021998320976811>

CERAULO, M.; BOTTA, L.; SANFILIPPO, C.; RANGAPPA, S. M.; SIENGCHIN, S.; FIORE, V. Mater-Bi-Based Biocomposites Reinforced with Lemongrass: A Comparison Between Leaf- and Culm-Derived Particles. **Polymers**, v. 17, n. 21, p. 2909, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym17212909>

CHEN, Y.-H.; WU, C.-H.; CHEN, Y.-C. Optimized condition for eco-friendly wood composites manufactured from castor oil-based polyurethane. **Construction and Building Materials**, v. 306, p. 124789, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124789>

CHWASTOWSKI, J.; STAROŃ, P. Influence of *Saccharomyces cerevisiae* yeast cells immobilized on *Cocos nucifera* fibers for the adsorption of Pb(II) ions. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 632, p. 127735, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127735>

COSME, G. M.; CORDEIRO, T. C.; CARVALHO, E. A. D.; LOPES, F. P. D.; SIMONASSI, N. T.; MONTEIRO, S. N. VEGETABLE POLYURETHANE RESIN BIOCOMPOSITES WITH TITICA VINE FIBER TEXTILE REINFORCEMENT: A REVIEW. **Journal of Engineering Research**, v. 4, n. 16, p. 2–7, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.22533/at.ed.3174162407064>

CRUZ, J. A. da; KERCHE, E. F.; BIANCHI, O.; MANES, A.; AMICO, S. C. Castor Oil-Based Polyurethane/S2 Glass/Aramid Hybrid Composites Manufactured by Vacuum Infusion. **Polymers**, v. 14, n. 23, p. 5150, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym14235150>

CRUZ, O. M.; DIAS, M. C.; OLIVEIRA, D. N. P. S. de; SILVA, M. G. da; SOUZA, T. M. de; MENDES, L. M.; MATOS, L. C.; BUFALINO, L. Characterization of raw and thermochemically-treated mesocarp fibers of *Oenocarpus bataua*, an Amazon palm. **CERNE**, v. 29, p. e, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/01047760202329013219>

CULP, J. T.; SUI, L.; GOODMAN, A.; LUEBKE, D. Carbon dioxide (CO₂) absorption behavior of mixed matrix polymer composites containing a flexible coordination polymer. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 393, p. 278–285, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2012.10.050>

CUNHA, J. D. S. C. D.; NASCIMENTO, L. F. C.; LUZ, F. S. D.; GARCIA FILHO, F. D. C.; OLIVEIRA, M. S.; MONTEIRO, S. N. Titica Vine Fiber (*Heteropsis flexuosa*): A Hidden Amazon Fiber with Potential Applications as Reinforcement in Polymer Matrix Composites. **Journal of Composites Science**, v. 6, n. 9, p. 251, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jcs6090251>

D20 COMMITTEE. **Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement**. ASTM International, , [s. d.]. Disponível em: <https://doi.org/10.1520/D0792-20>. Acesso em: 19 fev. 2026.

DEMOSTHENES, L. C. D. C.; NASCIMENTO, L. F. C.; MONTEIRO, S. N.; COSTA, U. O.; GARCIA FILHO, F. D. C.; LUZ, F. S. D.; OLIVEIRA, M. S.; RAMOS, F. J. H. T. V.; PEREIRA, A. C.; BRAGA, F. O. Thermal and structural characterization of buriti fibers and their relevance in fabric reinforced composites. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 1, p. 115–123, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.036>

DIAS, J. O.; SIQUEIRA, R. D.; COELHO, B. F.; CONCEIÇÃO, A. O. Analysis of the Mechanical Properties of Polymer Composites Reinforced with Charcoal Particulate. **Materials**, v. 18, n. 12, p. 2746, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma18122746>

DOLBACHIAN, L.; HARIZI, W.; ABOURA, Z. Structural Health Monitoring (SHM) Study of Polymer Matrix Composite (PMC) Materials Using Nonlinear Vibration Methods Based on Embedded Piezoelectric Transducers. **Sensors**, v. 23, n. 7, p. 3667, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s23073667>

DONG, M.; XIA, W.; XU, T. Development of a Sustainable Biobased Flame-Retardant Microcapsule and Its Flame-Retarding Mechanism on Asphalt Combustion. **Langmuir**, v. 40, n. 2, p. 1425–1438, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c03085>

DOS SANTOS, J. C.; DA SILVA, R. J.; CHRISTOFORO, A. L.; FREIRE, R. T. S.; TARPANI, J. R.; SCARPA, F.; PANZERA, T. H. Impact performance of egg-box core sandwich panels made from sisal fibers and castor-oil-based polymer. **Polymer Composites**, v. 46, n. 6, p. 4958–4966, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pc.29123>

EGBO, M. K. A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering. **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**, v. 33, n. 8, p. 557–568, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.07.007>

EL HAMRI, A.; MOUHIB, Y.; OURMICHE, A.; CHIGR, M.; EL MANSOURI, N.-E. Study of the Effect of Cedar Sawdust Content on Physical and Mechanical Properties of Cement Boards. **Molecules**, v. 29, n. 18, p. 4399, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules29184399>

ELKOLALI, M.; NOGUEIRA, L. P.; RØNNING, P. O.; ALCOCER, A. Void Content Determination of Carbon Fiber Reinforced Polymers: A Comparison between Destructive and Non-Destructive Methods. **Polymers**, v. 14, n. 6, p. 1212, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym14061212>

ELLENBERGER, A.; POLLI, M. L.; CRISTINA DE AZEVEDO, E.; PEREIRA DE PAULA, C. R. Drilling of banana stem fibers and polyurethane derived from castor oil composite. **Journal of Composite Materials**, v. 57, n. 17, p. 2773–2788, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/00219983231178283>

ELMASRY, A.; AZOTI, W.; ELMARAKBI, A. Modelling and design of hierarchical fibre-graphene nanoplatelets reinforced elasto-viscoplastic polymer matrix composites to improve crashworthiness and energy absorption. **Composite Structures**, v. 310, p. 116605, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116605>

EXPÓSITO, J. J. V.; PICAZO CAMILO, E.; PEREA TOLEDO, G. E.; CORPAS IGLESIAS, F. A. Valorization of Olive Tree Pruning and By-Products from the Truck Industry in the Manufacture of Low-Environmental-Impact Particleboard. **Materials**, v. 18, n. 14, p. 3258, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma18143258>

FAGNANI, D. E.; JEHANNO, C.; SARDON, H.; MCNEIL, A. J. Sustainable Green Polymerizations and End-of-Life Treatment of Polymers. **Macromolecular Rapid Communications**, v. 43, n. 13, p. 2200446, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/marc.202200446>

FARIA, D. L.; JÚNIOR, L. M.; DE ALMEIDA MESQUITA, R. G.; JÚNIOR, M. G.; PIRES, N. J.; MENDES, L. M.; JUNIOR, J. B. G. Production of castor oil-based polyurethane resin composites reinforced with coconut husk fibres. **Journal of Polymer Research**, v. 27, n. 9, p. 249, 2020 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10965-020-02238-7>

FARIA, D. L.; JÚNIOR, L. M.; DE ALMEIDA MESQUITA, R. G.; JÚNIOR, M. G.; PIRES, N. J.; MENDES, L. M.; JUNIOR, J. B. G. Production of castor oil-based polyurethane resin composites reinforced with coconut husk fibres. **Journal of Polymer Research**, v. 27, n. 9, p. 249, 2020 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10965-020-02238-7>

FARIA, D. L.; JÚNIOR, L. M.; DE ALMEIDA MESQUITA, R. G.; JÚNIOR, M. G.; PIRES, N. J.; MENDES, L. M.; JUNIOR, J. B. G. Production of castor oil-based polyurethane resin composites reinforced with coconut husk fibres. **Journal of Polymer Research**, v. 27, n. 9, p. 1–13, 2020 c. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10965-020-02238-7>

FELIPPE, J. N. de O. *et al.* Do lixo ao LAB – polímeros biodegradáveis e compósitos bio-based de resíduos industriais e agroindustriais como novos caminhos sustentáveis para a engenharia. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 23, n. 12, p. e12550–e12550, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/oelv23n12-047>

FIGUEIREDO, H. C. N.; SERRA, J. C. V.; SOUZA, M. V. R. e. Obtaining and characterizing biodegradable composites from agroenergetic residues. **Revista Acta Ambiental Catarinense**, v. 19, n. 1, p. 01–13, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.24021/raac.v19i1.5466>

FILHO, J. B. G.; RIBEIRO, M. M.; SILVA, D. S.; JUNIO, R. F. P.; ARAÚJO, J. D. R. M.; RAMOS, R. P. B.; MONTEIRO, S. N.; RODRIGUES, J. D. S. Development and Characterization of Laminated Composites from Açaí Residues and Castor Oil-Based Polyurethane Matrix. **Polymers**, v. 17, n. 23, p. 3219, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym17233219>

FUNATSU, T.; TAKANOHASHI, H.; FUJII, S. Mechanical Properties of Waterborne Polyurethane Latex Film Formed From Acrylic and Blocked Polyisocyanate Particles. **Journal of Applied Polymer Science**, v. n/a, n. n/a, p. e70455, [s. d.]. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/app.70455>

GABY FILHO, J. B.; RIBEIRO, M. M.; SILVA, D. S.; JUNIO, R. F. P.; ARAÚJO, J. D. R. M.; RAMOS, R. P. B.; MONTEIRO, S. N.; RODRIGUES, J. D. S. Development and Characterization of Laminated Composites from Açaí Residues and Castor Oil-Based Polyurethane Matrix. **Polymers**, v. 17, n. 23, p. 3219, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym17233219>

GARCÍA, I. G.; JUSTO, J.; ZURITA VAN-DINTER, A.; MANTIČ, V. Particle size effect on the strength of particle-reinforced composites. Experimental analysis and comparison with the coupled criterion. **Comptes Rendus. Mécanique**, v. 353, n. G1, p. 627–646, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.5802/crmeca.293>

GATOS, K. G.; APOSTOLOPOULOS, N.; PATSIDIS, A. C.; PSARRAS, G. C. Effect of Carbonate Mineral Fillers on the Dielectric Properties and Fire Resistance of Polar and Non-Polar Halogen-Free Flame-Retardant Polymer Compounds. **Journal of Composites Science**, v. 8, n. 12, p. 529, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jcs8120529>

GAVA, M.; MÜZEL, S. D.; DE LIMA, L. R.; BARBOSA, J. C.; GARCIA, J. N.; FERREIRA, B. S.; SERVOLO FILHO, H. J.; BERNARDES, M. S.; DE ARAUJO, V. A. Production of Particleboards from Hevea brasiliensis Clones and Castor Oil-based Polyurethane Resin. **BioResources**, v. 10, n. 4, p. 6896–6905, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.15376/biores.10.4.6896-6905>

GEDAM, V.; LODHA, R.; MISHRA, T. K.; DIXIT, A.; DAVE, A. “Generating a eco friendly reinforced composite using human hair and analyzing it for commercial use”. **Materials Today: Proceedings**, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.10.084>. Acesso em: 10 out. 2024.

GHARIB, J.; PANG, S.; HOLLAND, D. Synthesis and characterisation of polyurethane made from pyrolysis bio-oil of pine wood. **European Polymer Journal**, v. 133, p. 109725, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.109725>

GIEROBA, B.; KALISZ, G.; KRYSA, M.; KHALAVKA, M.; PRZEKORA, A. Application of Vibrational Spectroscopic Techniques in the Study of the Natural Polysaccharides and Their Cross-Linking Process. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, n. 3, p. 2630, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijms24032630>

GŁOWIŃSKA, E.; DATTA, J.; PARCHETA, P. Effect of sisal fiber filler on thermal properties of bio-based polyurethane composites. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 130, n. 1, p. 113–122, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10973-017-6293-5>

GODA, I.; PADAYODI, E.; RAOELISON, R. N. Enhancing fiber/matrix interface adhesion in polymer composites: Mechanical characterization methods and progress in interface modification. **Journal of Composite Materials**, v. 58, n. 29, p. 3077–3110, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/00219983241283958>

GONÇALVES, B.; CAMILLO, M.; OLIVEIRA, M.; CARREIRA, L.; MOULIN, J.; FANTUZZI NETO, H.; DE OLIVEIRA, B.; PEREIRA, A.; MONTEIRO, S. Surface Treatments of Coffee Husk Fiber Waste for Effective Incorporation into Polymer Biocomposites. **Polymers**, v. 13, n. 19, p. 3428, 2021 a. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym13193428>

GONÇALVES, B.; CAMILLO, M.; OLIVEIRA, M.; CARREIRA, L.; MOULIN, J.; FANTUZZI NETO, H.; DE OLIVEIRA, B.; PEREIRA, A.; MONTEIRO, S. Surface Treatments of Coffee Husk Fiber Waste for Effective Incorporation into Polymer Biocomposites. **Polymers**, v. 13, n. 19, p. 3428, 2021 b. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym13193428>

GONÇALVES, J. V.; SUELA, J.; SILVA, M. V. D.; BIANCHI, R. F.; COSTA, C. C. D. Conductive Amazon açai/polyaniline composite fiber: fabrication and properties. **Polímeros**, v. 33, n. 4, p. e20230037, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-1428.20220075>

GUDAYU, A. D.; STEUERNAGEL, L.; MEINERS, D.; GIDEON, R. Characterization of the dynamic mechanical properties of sisal fiber reinforced PET composites; Effect of fiber loading and fiber surface modification. **Polymers and Polymer Composites**, v. 29, n. 9_suppl, p. S719–S728, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/09663911211023032>

GUERREIRO, L. H. H.; BAIA, A. C. F.; ASSUNÇÃO, F. P. D. C.; RODRIGUES, G. D. O.; E OLIVEIRA, R. L.; JUNIOR, S. D.; PEREIRA, A. M.; DE SOUSA, E. M. P.; MACHADO, N. T.; DE CASTRO, D. A. R.; SANTOS, M. C. Investigation of the Adsorption Process of Biochar Açai (Euterpea oleracea Mart.) Seeds Produced by Pyrolysis. **Energies**, v. 15, n. 17, p. 6234, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15176234>

HADIDI, M.; AGHABABAEI, F.; GONZALEZ-SERRANO, D. J.; GOKSEN, G.; TRIF, M.; MCCLEMENTS, D. J.; MORENO, A. Plant-based proteins from agro-industrial waste and by-products: Towards a more circular economy. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 261, p. 129576, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129576>

HAMEED, A. M.; ALI, H. A. Using Wheat and Barely Legs for Manufacturing Multi-Applications Composite Material. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1795, n. 1, p. 012044, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1795/1/012044>

HAQUE, S. M.; ARDILA-REY, J. A.; UMAR, Y.; MAS'UD, A. A.; MUHAMMAD-SUKKI, F.; JUME, B. H.; RAHMAN, H.; BANI, N. A. Application and Suitability of Polymeric Materials as Insulators in Electrical Equipment. **Energies**, v. 14, n. 10, p. 2758, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en14102758>

HELLMEISTER, V.; BARBIRATO, G. H. A.; LOPES JUNIOR, W. E.; SANTOS, V. dos; FIORELLI, J. Evaluation of Balsa wood (*Ochroma pyramidale*) waste and OSB panels with castor oil polyurethane resin. **International Wood Products Journal**, v. 12, n. 4, p. 266–276, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/20426445.2021.1977519>

HIDAYAT, W.; APRILLIANA, N.; ASMARA, S.; BAKRI, S.; HIDAYATI, S.; BANUWA, I. S.; LUBIS, M. A. R.; ISWANTO, A. H. Performance of eco-friendly particleboard from agro-industrial residues bonded with formaldehyde-free natural rubber latex adhesive for interior applications. **Polymer Composites**, v. 43, n. 4, p. 2222–2233, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pc.26535>

HIMANSHU, K. R.; KUMAR, S.; SHARMA, H.; HIMANSHU, K. R.; KUMAR, S.; SHARMA, H. Mechanical strength analysis of bio composite made by using micro powder made of *Prosopis cineraria* wood. **International Journal of Science and Research Archive**, v. 13, n. 1, p. 1877–1883, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2024.13.1.1829>

HSISSOU, R.; SEGHIRI, R.; BENZEKRI, Z.; HILALI, M.; RAFIK, M.; ELHARFI, A. Polymer composite materials: A comprehensive review. **Composite Structures**, v. 262, p. 113640, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113640>

HUANG, S.; FU, Q.; YAN, L.; KASAL, B. Characterization of interfacial properties between fibre and polymer matrix in composite materials – A critical review. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 13, p. 1441–1484, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.076>

HUO, S.; NI, L.; SHAH, S. A. A. Renewable energy dynamics in BRICS: Assessing economic growth, carbon emissions, and public health benefits. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 17, n. 2, p. 025902, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/5.0239553>

HYDE, A.; HE, J.; CUI, X.; LUA, J.; LIU, L. Effects of microvoids on strength of unidirectional fiber-reinforced composite materials. **Composites Part B: Engineering**, v. 187, p. 107844, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107844>

IGREJA, W.; DA SILVA MARTINS, L.; DE ALMEIDA, R.; DE OLIVEIRA, J.; LOPES, A.; CHISTÉ, R. Açai Seeds (*Euterpe oleracea* Mart) Are Agroindustrial Waste with High Potential to Produce Low-Cost Substrates after Acid Hydrolysis. **Molecules**, v. 28, n. 18, p. 6661, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules28186661>

IRAWAN, A. P.; SIREGAR, J. P.; CIONITA, T.; FITRIYANA, D. F.; ALIAS, A.; RUSIYANTO, R.; JAAFAR, J.; PRAYITNO, P.; ISMAIL, R.; BAYUSENO, A. P.; JANVEKAR, A. A. *Elaeocarpus ganitrus* (rudraksha) seeds as a potential sustainable reinforcement for polymer matrix composites. **Polymer Composites**, v. 45, n. 5, p. 4662–4669, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pc.28088>

JAKUBOWSKA, P.; BORKOWSKI, G.; BRZĄKALSKI, D.; SZTORCH, B.; KŁOZIŃSKI, A.; PRZEKOP, R. E. The Accelerated Aging Impact on Mechanical and Thermal Properties of Polypropylene Composites with Sedimentary Rock Opoka-Hybrid Natural Filler. **Materials**, v. 15, n. 1, p. 338, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma15010338>

JÚNIOR, J. N. D. O.; PERISSÉ DUARTE LOPES, F.; TONINI SIMONASSI, N.; SOUZA, D.; NEVES MONTEIRO, S.; FONTES VIEIRA, C. M. Evaluation of the physical properties of composite panels with eucalyptus sawdust waste and castor oil-based polyurethane. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 23, p. 1084–1093, 2023 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.066>

JÚNIOR, J. N. de O.; LOPES, F. P. D.; SIMONASSI, N. T.; LOPERA, H. A. C.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. Ecofriendly panels for building with eucalyptus sawdust and vegetal polyurethane resin: A mechanical evaluation. **Case Studies in Construction Materials**, v. 18, p. e01839, 2023 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01839>

JÚNIOR, J. N. de O.; VELASCO, D. C. R.; SIMONASSI, N. T.; LOPES, F. P. D.; VIEIRA, C. M. F. MECHANICAL EVALUATION OF CASTOR OIL BASED POLYURETHANE BIOCOMPOSITES REINFORCED BY EUCALYPTUS WOOD RESIDUE. **InterSciencePlace**, v. 18, n. 1, 2023 c. Disponível em: <https://www.interscienceplace.org/index.php/isp/article/view/508>. Acesso em: 23 fev. 2026.

JUNIOR, S. V. Aproveitamento de resíduos agroindustriais: uma abordagem sustentável. 2020. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1126255>. Acesso em: 18 abr. 2026.

KALIZHANOVA, A.; KOZBAKOVA, A.; ERALIEVA, B.; KUNELBAYEV, M.; AITKULOV, Z. RESEARCH AND ANALYSIS OF THE PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS. DEFINITION AND CLASSIFICATION OF COMPOSITE MATERIALS. **Вестник КазАТК**, v. 128, n. 5, p. 131–140, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.52166/1609-1817-2023-128-5-131-140>

KANG, C.; XU, J.; XU, C.; REN, S.; ZHANG, J. Poly(Butylene Terephthalate) Filled with Sb₂O₃ Nanoparticles: Effects of Particle Surface Treatment, Particle Size, Particle Morphology and Particle Loading on Mechanical Properties of Composites. **Integrated Ferroelectrics**, v. 210, n. 1, p. 141–159, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10584587.2020.1728855>

KAREM, M. R.; SALIH, A. I. Synthesis and characterization of epoxy and natural fiber composite material. **Materials Today: Proceedings**, v. 61, p. 925–929, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.101>

KARTHIK, K.; RAJAMANI, D.; MANIMARAN, A.; UDAYA PRAKASH, J. Wear behaviour of hybrid polymer matrix composites using Taguchi technique. **Materials Today: Proceedings**, v. 33, International Conference on Nanotechnology: Ideas, Innovation and Industries, p. 3186–3190, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.133>

KAUR, R.; SINGH, P.; TANWAR, S.; VARSHNEY, G.; YADAV, S. Assessment of Bio-Based Polyurethanes: Perspective on Applications and Bio-Degradation. **Macromol**, v. 2, n. 3, p. 284–314, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/macromol2030019>

KAYA, A. İ.; YALÇIN, Ö. Ü.; AYDEMİR, D. Effects of cellulose micro and nanocrystals on the mechanical, thermal, morphological, and structural properties of rigid polyurethanes. **BioResources**, v. 19, n. 2, p. 2842–2862, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.15376/biores.19.2.2842-2862>

KAZEMI, M.; FAISAL KABIR, S.; FINI, E. H. State of the art in recycling waste thermoplastics and thermosets and their applications in construction. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 174, p. 105776, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105776>

KHALID, M. Y.; AL RASHID, A.; ARIF, Z. U.; AHMED, W.; ARSHAD, H.; ZAIDI, A. A. Natural fiber reinforced composites: Sustainable materials for emerging applications. **Results in Engineering**, v. 11, p. 100263, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100263>

KHAN, F.; HOSSAIN, N.; MIM, J. J.; RAHMAN, S. M.; IQBAL, Md. J.; BILLAH, M.; CHOWDHURY, M. A. Advances of composite materials in automobile applications – A review. **Journal of Engineering Research**, p. S2307187724000440, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.02.017>

KIBET, T.; TUIGONG, D., R.; MAUBE, O.; MWASIAGI, J. I. Mechanical properties of particleboard made from leather shavings and waste papers. **Cogent Engineering**, v. 9, n. 1, p. 2076350, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2076350>

KIM, H. J.; JIN, X.; CHOI, J. W. Investigation of bio-based rigid polyurethane foams synthesized with lignin and castor oil. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 13490, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64318-8>

KONOVALOV, D. S.; SAPRYKINA, N. N.; ZUEV, V. V. High-Performance Castor Oil-Based Polyurethane Composites Reinforced by Birch Wood Fibers. **Applied Sciences**, v. 13, n. 14, p. 8258, 2023 a. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app13148258>

KONOVALOV, D. S.; SAPRYKINA, N. N.; ZUEV, V. V. High-Performance Castor Oil-Based Polyurethane Composites Reinforced by Birch Wood Fibers. **Applied Sciences**, v. 13, n. 14, p. 8258, 2023 b. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app13148258>

KOODALINGAM, B.; SENTHILKUMAR, P.; RAJESH BABU, S. Study of mechanical properties of the polymer matrix composite materials using pistachio shells. **Materials Today: Proceedings**, v. 33, International Conference on Nanotechnology: Ideas, Innovation and Industries, p. 2912–2916, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.876>

KUAN, H. T. N.; TAN, M. Y.; SHEN, Y.; YAHYA, Mohd. Y. Mechanical properties of particulate organic natural filler-reinforced polymer composite: A review. **Composites and Advanced Materials**, v. 30, p. 26349833211007502, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/26349833211007502>

KUMAR, S.; MANNA, A.; DANG, R. A review on applications of natural Fiber-Reinforced composites (NFRCS). **Materials Today: Proceedings**, v. 50, p. 1632–1636, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.131>

LANDONI, M.; BERTAGNON, G.; GHIDOLI, M.; CASSANI, E.; ADANI, F.; PILU, R. Opportunities and Challenges of Castor Bean (*Ricinus communis* L.) Genetic Improvement. **Agronomy**, v. 13, n. 8, p. 2076, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy13082076>

LAZARINI, R. G.; MARCONCINI, J. M. Sugarcane bagasse fibers at high contents in thermoplastic composites: A novel approach using agro-industrial residue via thermokinetic mixing. **Polymer Composites**, v. 42, n. 9, p. 4860–4871, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pc.26195>

LEE, C. H.; KHALINA, A.; LEE, S. H. Importance of Interfacial Adhesion Condition on Characterization of Plant-Fiber-Reinforced Polymer Composites: A Review. **Polymers**, v. 13, n. 3, p. 438, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym13030438>

LEE, Y. J.; LEE, D. Y.; LEE, T.-J.; KIM, H. J. Cellulose I crystallinity estimation using a combination of infrared spectroscopy and machine learning approaches. **Carbohydrate Polymers**, v. 368, p. 124210, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.124210>

LEITE-BARBOSA, O.; PINTO, C. C. de O.; LEITE-DA-SILVA, J. M.; DE AGUIAR, E. M. M. M.; VEIGA-JUNIOR, V. F. Polymer Composites Reinforced with Residues from Amazonian Agro-Extractivism and Timber Industries: A Sustainable Approach to Enhancing Material Properties and Promoting Bioeconomy. **Polymers**, v. 16, n. 23, p. 3282, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym16233282>

LENDVAI, L. Lignocellulosic agro-residue/polylactic acid (PLA) biocomposites: Rapeseed straw as a sustainable filler. **Cleaner Materials**, v. 9, p. 100196, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100196>

LI, Z.; WANG, P.; SHAN, Q.; JIANG, Y.; WEI, H.; TAN, J. The Particle Shape of WC Governing the Fracture Mechanism of Particle Reinforced Iron Matrix Composites. **Materials**, v. 11, n. 6, p. 984, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma11060984>

LLAMAS, J. A. D. la T.; FÉLIX, B. I. L.; GARCÍA, F. M. G.; LÓPEZ-ROBLES, J. R. Iberoamerican Journal of Science Measurement and Communication. 2025. Disponível em: <https://ijsmc.pro-metrics.org>. Acesso em: 18 abr. 2026.

LLIDÓ BARRAGÁN, A.; CALLE SALAS, A. de la; PARRES GARCÍA, F.; CRESPO AMORÓS, J. E. Valorization of Cellulosic Waste from Artichoke for Incorporation into Biodegradable Polylactic Acid Matrices. **Polymers**, v. 16, n. 19, p. 2778, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym16192778>

LUO, P.; HE, Y.; WANG, T. Production of Particleboards from Steam-pretreated Rice Straw and Castor Oil-based Polyurethane Resin. 2025.

M R RAMESH. Statistical Analysis of Tamil Nadu's Contributions to Sustainable and Green Energy: A Model for Renewable Energy Transition. **International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology**, 2025.

MAAMOUN, A.; EL-WAKIL, A.; EL-BASHEER, T. M. Enhancement of the mechanical and acoustical properties of flexible polyurethane foam/waste seashell composites for industrial applications. **Journal of Cellular Plastics**, v. 58, n. 4, p. 645–662, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0021955X221088392>

MAKRI, H.; ROKBI, M.; MEDDAH, M.; BELAYACHI, N.; KHALDOUNE, A. Extraction and characterization of novel lignocellulosic fibers from *Centaurea hyalolepis* plant as a potential reinforcement for composite materials. **Journal of Composite Materials**, v. 57, n. 21, p. 3317–3330, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/00219983231184020>

MARCHI, B. Z.; OLIVEIRA, M. S.; BEZERRA, W. B. A.; DE SOUSA, T. G.; CANDIDO, V. S.; DA SILVA, A. C. R.; MONTEIRO, S. N. Ubim Fiber (*Geonoma baculífera*): A Less Known Brazilian Amazon Natural Fiber for Engineering Applications. **Sustainability**, v. 14, n. 1, p. 421, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su14010421>

MARTINS, G. R.; GUEDES, D.; MARQUES DE PAULA, U. L.; DE OLIVEIRA, M. do S. P.; LUTTERBACH, M. T. S.; REZNIK, L. Y.; SÉRVULO, E. F. C.; ALVIANO, C. S.; RIBEIRO DA SILVA, A. J.; ALVIANO, D. S. Açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) Seed Extracts from Different Varieties: A Source of Proanthocyanidins and Eco-Friendly Corrosion Inhibition Activity. **Molecules**, v. 26, n. 11, p. 3433, 2021 a. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules26113433>

MARTINS, L. S.; SILVA, N. G. S.; CLARO, A. M.; AMARAL, N. C.; BARUD, H. S.; MULINARI, D. R. Insight on açaí seed biomass economy and waste cooking oil: Eco-sorbent castor oil-based. **Journal of Environmental Management**, v. 293, p. 112803, 2021 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112803>

MASHABELA, M.; MARINGA, M.; DZOGBEWU, T. Nanoparticulate reinforced composites and their application to additively manufactured Ti6Al4V for use in the aerospace sector. **Manufacturing Review**, v. 9, p. 29, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/mfreview/2022027>

MATHEUS, J. R. V.; SATORIVA, J. M.; BARONE, A. S.; ANDRADE, C. J. de; FAI, A. E. C. Filmes biodegradáveis e agentes de reforço vegetais: Um enfoque em estudos brasileiros sob a ótica da economia circular. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 9, p. e49210918278–e49210918278, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i9.18278>

MBOZO'O, M. P. N.; B. KENGNE; TCHAWÉ, M. T.; BODE, R. O. S.; NONGA, J.-F. R. A. Development and Characterization of a Composite Material with a Polymer Matrix Reinforced by Sawdust from Cassava and Plantain Peelings. **Asian Journal of Applied Science and Technology**, v. 08, n. 03, p. 43–59, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.38177/ajast.2024.8305>

MELO, P. S.; SELANI, M. M.; GONÇALVES, R. H.; PAULINO, J. D. O.; MASSARIOLI, A. P.; ALENCAR, S. M. D. Açaí seeds: An unexplored agro-industrial residue as a potential source of lipids, fibers, and antioxidant phenolic compounds. **Industrial Crops and Products**, v. 161, p. 113204, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113204>

MOHAMMED, M.; RASIDI, M.; MOHAMMED, A.; RAHMAN, R.; OSMAN, A.; ADAM, T.; BETAR, B.; DAHHAM, O. Interfacial bonding mechanisms of natural fibre-matrix composites: An overview. **BioResources**, v. 17, n. 4, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.15376/biores.17.4.Mohammed>. Acesso em: 23 mar. 2026.

MONTEIRO, G. P.; MARVILA, M. T.; PEDROTI, L. G.; DE BRITO, J.; DE AZEVEDO, A. R. G. Evaluation of coating mortars with addition of açai seed (*Euterpe oleracea* Mart.) in different processing conditions. **Journal of Building Engineering**, v. 83, p. 108459, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108459>

MORALES, M.; ATENCIO MARTINEZ, C.; MARANON, A.; HERNANDEZ, C.; MICHAUD, V.; PORRAS, A. Development and Characterization of Rice Husk and Recycled Polypropylene Composite Filaments for 3D Printing. **Polymers**, v. 13, n. 7, p. 1066, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym13071066>

MORSY, A.; KANDIL, S.; EWAIS, H. A.; ABDEL-SALAM, A. H.; MOHAMED, A. Eco-conscious flame retardants for enhanced fire resistance in natural fiber reinforced polymers composite: A review bio-based, and industry implications. **Chemosphere**, v. 377, p. 144360, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144360>

MÜLLER, M.; VALAŠEK, P.; TICHÝ, M.; RUGGIERO, A.; D'AMATO, R. Investigation on Polymer Composite Materials Wear Reinforced by Microparticles of *Jatropha Curcas* L. Waste. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 638, n. 1, p. 012011, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/638/1/012011>

MURTHY, B. V.; AURADI, V.; NAGARAL, M.; VATNALMATH, M.; NAMDEV, N.; ANJINAPPA, C.; PATIL, S.; RAZAK, A.; ALSABHAN, A. H.; ALAM, S.; QAMAR, M. O. Al2014–Alumina Aerospace Composites: Particle Size Impacts on Microstructure, Mechanical, Fractography, and Wear Characteristics. **ACS Omega**, v. 8, n. 14, p. 13444–13455, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01163>

MUSTAFAYEVA, F.; KAKHRAMANOV, N.; ALLAHVERDIYEVA, K.; BABAYEVA, T.; ASHUROVA, N. Fire-resistant polymer composites based on mineral fillers. **RSC Advances**, v. 16, n. 7, p. 6257–6287, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D5RA09525E>

MÜZEL, S.; BONHIN, E. P.; GUIMARÃES, N. M.; GUIDI, E. S. Application of the Finite Element Method in the Analysis of Composite Materials: A Review. **Polymers**, v. 12, n. 4, p. 818, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym12040818>

NAGABUSHANAM, M.; DEVADE, K.; ARAVIND REDDY, G.; NAGARAJ GOUD, B.; SAYED, R. M.; SOOD, S.; SONIA, P. Advance biomedical engineering – A fundamental review of composite materials and its applications. **Materials Today: Proceedings**, p. S2214785323044863, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.216>

NAIK, B.; KUMAR, V.; RIZWANUDDIN, S.; CHAUHAN, M.; GUPTA, A. K.; RUSTAGI, S.; KUMAR, V.; GUPTA, S. Agro-industrial waste: a cost-effective and eco-friendly substrate to produce amylase. **Food Production, Processing and Nutrition**, v. 5, n. 1, p. 1–12, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s43014-023-00143-2>

NASCIMENTO, D. da C. B. Avaliação microestrutural e mecânica das fibras de cotia e dos compósitos de matriz poliéster. 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufpa.br/items/3b20a953-6be5-4b9a-86d2-a274dd6c4d76>. Acesso em: 1 maio. 2026.

NASCIMENTO, W. M. O. do. Açaí *Euterpe oleracea* Mart. 2008. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/660769>. Acesso em: 5 out. 2024.

NASUTION, H.; KOSASIH, K.; MAULIDA; AL FATH, M. T. Properties of unsaturated polyester composite filled with cellulose from peanut shell (*Arachis hypogea* L.): the effect of filler content and compatibilizer addition. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 801, n. 1, p. 012083, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/801/1/012083>

NAYAK, K. C.; RANE, K. K.; DATE, P. P.; SRIVATSAN, T. S. Synthesis of an Aluminum Alloy Metal Matrix Composite Using Powder Metallurgy: Role of Sintering Parameters. **Applied Sciences**, v. 12, n. 17, p. 8843, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app12178843>

NEDJIMI, B. Analytical determination of some mineral and trace elements in medicinal Castor plant (*Ricinus communis* L.) by instrumental neutron activation analysis. **Journal of Trace Elements and Minerals**, v. 2, p. 100024, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jtemin.2022.100024>

NELSON, P. M.; NASCIMENTO, E. M.; NISGOSKI, S.; MAGALHÃES, W. L. E.; C. NETO, S.; AZEVEDO, E. C. Caracterização física e térmica de compósito de poliuretano derivado de óleo de mamona associado com partículas de bambu. **Polímeros**, v. 23, p. 201–205, 2013. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.4322/S0104-14282013005000007>

NETO, L. S. G. Utilização de fibras naturais como reforço de materiais compósitos poliméricos. **Brazilian Journal of Development**, v. 9, n. 12, p. 30815–30824, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv9n12-016>

NEVES, A. C. C.; LOPES, F. P. D.; SIMONASSI, N. T.; VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. Properties of Luffa Cylindrica Mats Reinforced Castor Oil-Based Polyurethane Composite as an Alternative for Oriented Strand Board. **Polymers**, v. 14, n. 24, p. 5533, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym14245533>

NIENDORF, K.; RAEYMAEKERS, B. Combining ultrasound directed self-assembly and stereolithography to fabricate engineered polymer matrix composite materials with anisotropic electrical conductivity. **Composites Part B: Engineering**, v. 223, p. 109096, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109096>

Objetivos de Desenvolvimento Sustentável | As Nações Unidas no Brasil. . [s. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 18 abr. 2026.

OLIVEIRA, B. P.; BALIEIRO, L. C. S.; MAIA, L. S.; ZANINI, N. C.; TEIXEIRA, E. J. O.; DA CONCEIÇÃO, M. O. T.; MEDEIROS, S. F.; MULINARI, D. R. Eco-friendly polyurethane foams based on castor polyol reinforced with açaí residues for building insulation. **Journal of**

Material Cycles and Waste Management, v. 24, n. 2, p. 553–568, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01341-1>

OLSZEWSKI, A.; KOSMELA, P.; PISZCZYK, Ł. Synthesis and characterization of biopolyols through biomass liquefaction of wood shavings and their application in the preparation of polyurethane wood composites. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 80, n. 1, p. 57–74, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01755-6>

ORTIZ-BARAJAS, D. L.; ARÉVALO-PRADA, J. A.; FENOLLAR, O.; RUEDA-ORDÓÑEZ, Y. J.; TORRES-GINER, S. Torrefaction of Coffee Husk Flour for the Development of Injection-Molded Green Composite Pieces of Polylactide with High Sustainability. **Applied Sciences**, v. 10, n. 18, p. 6468, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app10186468>

PĄCZKOWSKI, P.; PUSZKA, A.; GAWDZIK, B. Effect of Eco-Friendly Peanut Shell Powder on the Chemical Resistance, Physical, Thermal, and Thermomechanical Properties of Unsaturated Polyester Resin Composites. **Polymers**, v. 13, n. 21, p. 3690, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym13213690>

PANZERA, T. H.; AQUINO, V. B. D. M.; RODRIGUES, E. F. C.; PIETROBON, I. M.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. Determination of the adhesive content of medium density particleboards produced with bio-based polymer. *In*: 2021, **Journal of Building Material Science**. [S. l.: s. n.] Disponível em: <https://doi.org/10.30564/jbms.v1i2.2551>. Acesso em: 24 nov. 2025.

PARDINI, L. C.; NETO, F. L. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Blucher, 2016. (2). *E-book*. Disponível em: <https://www.blucher.com.br>. Acesso em: 2 jul. 2026.

PARFAIT, Z. E.; MARCEL, N. P.; DIDINE, N. E.; WIRYIKFU, N. C.; FABIEN, B. E.; VALERY, N. A. C.; ATEBA, A. Elaboration and Characterization of Composite Materials Reinforced by Papaya Trunk Fibers (<i>Carica papaya</i>) and Particles of the Hulls of the Kernels of the Winged Fruits (<i>Canarium schweinfurthii</i>) with Polyester Matrix. **Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering**, v. 08, n. 05, p. 341–352, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/jmmce.2020.85021>

PEĆZEK, E.; PAMUŁA, R.; BIAŁOWIEC, A. Recycled Waste as Polyurethane Additives or Fillers: Mini-Review. **Materials**, v. 17, n. 5, p. 1013, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma17051013>

PINHEIRO, M. A.; RIBEIRO, M. M.; ROSA, D. L. S.; NASCIMENTO, D. D. C. B.; DA SILVA, A. C. R.; DOS REIS, M. A. L.; MONTEIRO, S. N.; CANDIDO, V. S. Periquiteira (*Cochlospermum orinocense*): A Promising Amazon Fiber for Application in Composite Materials. **Polymers**, v. 15, n. 9, p. 2120, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym15092120>

PINTO, J. M. B.; SILVA, D. S.; FUJIYAMA, R. T. CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DO CIPÓ TIMBÓ-AÇU POR MEV, EDS E DRX. *In*: CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS: PRINCÍPIOS E FUNDAMENTOS EM PESQUISA 2022, **Anais [...]**. : Editora Científica Digital, 2022.p. 20–34. Disponível em:

<https://www.editoracientifica.com.br/artigos/caracterizacao-das-fibras-do-cipo-timbo-acu-por-mev-eds-e-drx>. Acesso em: 20 nov. 2025.

POLETTI, M.; ZATTERA, A. J. Materials produced from plant biomass: part III: degradation kinetics and hydrogen bonding in lignin. **Materials Research**, v. 16, p. 1065–1070, 2013. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S1516-14392013005000112>

PROTZEK, G. R.; Esteves Magalhães, Washington Luiz; Berti, Lucas Freitas; AND AZEVEDO, E. C. On Mechanical Behavior of Pine Nut Shell and Polyurethane Derived from Castor Oil Green Composite. **Journal of Natural Fibers**, v. 19, n. 14, p. 7454–7469, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1947936>

PRUDENTE, P. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO. 2024.

R, N. S.; THIAGAMANI, S. M. K.; P, S.; M, S.; YAGNA, S. N. B.; HOSSEIN, E.-K.; M, M.; RANGAPPA, S. M.; SIENGCHIN, S. Isolation and characterization of agro-waste biomass sapodilla seeds as reinforcement in potential polymer composite applications. **Heliyon**, v. 9, n. 7, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17760>. Acesso em: 24 mar. 2026.

RABELLO, L. G.; RIBEIRO, R. C. D. C. Bio-based polyurethane resin: An ecological binder for a novel class of building materials-composites. **Materials Letters**, v. 311, p. 131566, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.131566>

RABELO APARÍCIO, R.; MACHADO DOS SANTOS, G.; SIQUEIRA MAGALHÃES REBELO, V.; MANSANARES GIACON, V.; GOMES DA SILVA, C. Performance of castor oil polyurethane resin in composite with the piassava fibers residue from the Amazon. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 6669, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54000-4>

RAHIM, N. L. *et al.* Development of Eco-friendly Particleboard Composite using Fly Ash. **E3S Web of Conferences**, v. 589, p. 04002, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202458904002>

RAJAONARIVONY, R. K.; ROUAU, X.; FABRE, C.; MAYER-LAIGLE, C. Properties of biomass powders resulting from the fine comminution of lignocellulosic feedstocks by three types of ball-mill set-up. **Open Research Europe**, v. 1, p. 125, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.12688/openreseurope.14017.2>

RAMAKRISHNAN, T.; MOHAN GIFT, M. D.; CHITRADEVI, S.; JEGAN, R.; HENCY JOSE, P. S.; NAGARAJA, H. n.; SHARMA, R.; SELVAKUMAR, P.; HAILEGIORGIS, S. M. Study of Numerous Resins Used in Polymer Matrix Composite Materials. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2022, n. 1, p. 1088926, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2022/1088926>

RAMESH, M.; JAFREY DANIEL JAMES, D.; SATHISH KUMAR, G.; VIJAYAN, V.; RAJA NARAYANAN, S.; TEKLEMARIAM, A. Synthesis and Characterization of Banana and Pineapple Reinforced Hybrid Polymer Composite for Reducing Environmental Pollution. **Bioinorganic Chemistry and Applications**, v. 2022, n. 1, p. 6344179, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2022/6344179>

REIS, R.; GARCIA FILHO, F.; NUNES, L.; CANDIDO, V.; SILVA, A.; MONTEIRO, S. Impact Resistance of Epoxy Composites Reinforced with Amazon Guaruman Fiber: A Brief Report. **Polymers**, v. 13, n. 14, p. 2264, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym13142264>

ROCHA, T. M. S.; MIRANDA, L. F. R.; PARCHEN, C. F. A. Influência da composição granulométrica das partículas de resíduos de madeira nas propriedades de compósitos minerais: parte 1 - cimento-madeira. **Ambiente Construído**, v. 19, p. 113–126, 2019. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/s1668-86212019000300328>

ROSA, D. L. S.; NASCIMENTO, D. da C. B.; DUARTE LOPES, F. P.; SIMONASSI, N. T.; MONTEIRO, S. N.; RIOS DA SILVA, A. C.; SCARPINI CANDIDO, V. Matamata (*Lecythis idatimon*): A novel lighter cost-effective amazonian fiber for eco-friendly composite applications in furniture design. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 38, p. 4027–4048, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.08.221>

SAMAL, S.; BLANCO, I. Investigation of Dispersion, Interfacial Adhesion of Isotropic and Anisotropic Filler in Polymer Composite. **Applied Sciences**, v. 11, n. 18, p. 8561, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app11188561>

SANTOS, A. J. G.; RIBEIRO, M. M.; CORRÊA, A. de C.; RODRIGUES, J. da S.; SILVA, D. S.; JUNIO, R. F. P.; MONTEIRO, S. N. Investigation of the Flexural and Tensile Properties of Hybrid Polyester Composites Reinforced with Bamboo Fibers and Red Mud Waste. **Polymers**, v. 17, n. 8, p. 1060, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym17081060>

SANTOS, L. O. D.; SILVA, A. V. S.; CONCONI, C. C.; GOMES, E. D. B.; BIZZO, W. A.; CRUZ, G. Thermal degradation of açaí seeds and potential application in thermochemical processes. **Revista Produção e Desenvolvimento**, v. 7, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.32358/rpd.2021.v7.531>. Acesso em: 5 out. 2024.

SANTOS, V. O.; QUEIROZ, L. S.; ARAUJO, R. O.; RIBEIRO, F. C. P.; GUIMARÃES, M. N.; DA COSTA, C. E. F.; CHAAR, J. S.; DE SOUZA, L. K. C. Pyrolysis of acai seed biomass: Kinetics and thermodynamic parameters using thermogravimetric analysis. **Bioresource Technology Reports**, v. 12, p. 100553, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100553>

SEGAL, L.; CREELY, J. J.; MARTINJR, A. E.; CONRAD, C. M. An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose Using the X-Ray Diffractometer. **Textile Research Journal**, v. 29, n. 10, p. 786–794, 1959. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/004051755902901003>

SEIBEL, R. K.; ZIMMER, A.; FIORIO, R. Development and characterization of novel castor oil-based polyurethane composites containing wood sawdust and rubber tire powder. **Polymers and Polymer Composites**, v. 29, n. 7, p. 876–887, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0966391120939666>

SETTE, S. dos S. K.; SILVA, L. L.; FIORI, M. A.; DALCANTON, F.; MELLO, J. M. M. de; BAUERMAN, N. Benefícios da produção e utilização de polímeros biodegradáveis em relação ao polímero convencionais: uma revisão de literatura. **REVISTA DELOS**, v. 17, n. 51, p. 325–342, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/rdelosv17.n51-019>

SILVA, D. S.; AGUILERA, L. dos S.; JUNIO, R. F. P.; MONTEIRO, S. N.; DA SILVA, M. H. P. Mechanical Properties of Raffia Fiber Fabric (*Raphia vinifera*)-Reinforced Epoxy Matrix Composites. **Journal of Composites Science**, v. 9, n. 9, p. 504, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jcs9090504>

SILVA, E. C.; DA SILVA, A. F.; DA RODRIGUES, Y. S.; JÚNIOR, D. S. C.; DE OLIVEIRA, L. M.; BIONDO, M. M.; FELIX, P. H. C.; SALES, H. B. E.; SANCHES, E. A. Eco-composites Based on High-Impact Polystyrene (HIPS) and Amazon Açai (*Euterpe oleracea*) Fibers: Influence of NaOH Treatment on Its Structural, Thermal, and Mechanical Properties. **Mechanics of Composite Materials**, v. 59, n. 1, p. 147–158, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11029-023-10087-w>

SINGH, D. K.; VAIDYA, A.; THOMAS, V.; THEODORE, M.; KORE, S.; VAIDYA, U. Finite Element Modeling of the Fiber-Matrix Interface in Polymer Composites. **Journal of Composites Science**, v. 4, n. 2, p. 58, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jcs4020058>

SIRAJ, S.; AL-MARZOUQI, A. H.; IQBAL, M. Z.; AHMED, W. Impact of Micro Silica Filler Particle Size on Mechanical Properties of Polymeric Based Composite Material. **Polymers**, v. 14, n. 22, p. 4830, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym14224830>

SOARES, L. F.; SANTOS, J. C. dos; FREITAS, V. A. A. de; PEREIRA, R. B. D.; HALLAK PANZERA, T.; SCARPA, F. Castor-oil biobased foam: the effect of the composition on the physical and mechanical properties via a statistical mixture design. **RSC Sustainability**, v. 2, n. 4, p. 975–987, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D3SU00374D>

STĂNESCU, M. M.; BOLCU, A. A Study of the Mechanical Properties in Composite Materials with a Dammar Based Hybrid Matrix and Reinforcement from Crushed Shells of Sunflower Seeds. **Polymers**, v. 14, n. 3, p. 392, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym14030392>

SULTANA, N.; HASAN, M.; HABIB, A.; SAIFULLAH, A.; AZIM, A. Y. M. A.; ALIMUZZAMAN, S.; SARKER, F. Short Jute Fiber Preform Reinforced Polypropylene Thermoplastic Composite: Experimental Investigation and Its Theoretical Stiffness Prediction. **ACS Omega**, v. 8, n. 27, p. 24311–24322, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01533>

SZADKOWSKI, B.; ŚLIWKA-KASZYŃSKA, M.; MARZEC, A. Improving compatibility between coffee or black tea ground wastes and polymer matrix via silane treatment for production sustainable biofillers. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 13554, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97980-7>

Tabela 289: Quantidade produzida e valor da produção na extração vegetal, por tipo de produto extrativo. [s. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/289#resultado>. Acesso em: 5 out. 2024.

TANG, H.; ROGOV, A. B.; SOUTIS, C.; YEROKHIN, A. Fabrication, interfacial and flexural properties of a polymer composite reinforced by γ -Al₂O₃/Al fibres. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 169, p. 107502, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107502>

TAO, P.; LI, J.; LI, J.; SHANG, S.; SONG, Z. Enhanced performance of rosin-based epoxy composites mixed with carbon nanotubes and cork powders from oriental oak bark. **Industrial Crops and Products**, v. 158, p. 113051, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113051>

TAVARES, F. F. da C.; ALMEIDA, M. D. C. de; SILVA, J. A. P. da; ARAÚJO, L. L.; CARDOZO, N. S. M.; SANTANA, R. M. C. Thermal treatment of açaí (*Euterpe oleracea*) fiber for composite reinforcement. **Polímeros**, v. 30, p. e2020003, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-1428.09819>

TAVARES, S. S.; DE MENDONÇA NEUBA, L.; LOPERA, H. C.; MONTEIRO, S. N.; MEYERS, M. A. The embira bark fiber: a sustainable Amazon tape. **Advanced Composites and Hybrid Materials**, v. 8, n. 2, p. 184, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42114-024-01170-4>

THAMIZH SELVAN, R.; VISHAKH RAJA, P.; MANGAL, P.; MOHAN, N.; BHOWMIK, S. Recycling technology of epoxy glass fiber and epoxy carbon fiber composites used in aerospace vehicles. **Journal of Composite Materials**, v. 55, n. 23, p. 3281–3292, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/00219983211011532>

TRAM, M.; SUŁKOWSKA, K.; JAROSZ, A.; NOWAKOWSKI, A. Mechanical Properties of Composite Made from Bottom Ash Fractions of Municipal Waste Incineration Plant Products. **Materials**, v. 18, n. 23, p. 5302, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma18235302>

TSAI, C.-H.; TSAI, W.-T.; KUO, L.-A. Effect of Post-Washing on Textural Characteristics of Carbon Materials Derived from Pineapple Peel Biomass. **Materials**, v. 16, n. 24, p. 7529, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma16247529>

UNDERWRITERS LABORATORIES. UL 94 - Tests for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances. 7th ed. Northbrook: UL Standards, 2023.

VICTORIA AGBAKWURU; PETER OFUJE OBIDI; OJONIMI SEGUN SALIHU; OGWU CHINELO MARYJANE. The role of renewable energy in achieving sustainable development goals. **International Journal of Engineering Research Updates**, v. 7, n. 2, p. 013–027, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.53430/ijeru.2024.7.2.0046>

WANG, T.; YANG, W.; ZHANG, J. Experimental Studies on Mechanical Properties and Microscopic Mechanism of Marble Waste Powder Cement Cementitious Materials. **Crystals**, v. 12, n. 6, p. 868, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/cryst12060868>

WANG, X.; SUN, J. Engineering of Reversibly Cross-Linked Elastomers Toward Flexible and Recyclable Elastomer/Carbon Fiber Composites with Extraordinary Tearing Resistance. **Advanced Materials**, v. 36, n. 35, p. 2406252, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/adma.202406252>

WANG, Z.; FAN, J.; GUO, X.; JI, J.; SUN, Z. Enhanced permittivity of negative permittivity middle-layer sandwich polymer matrix composites through conductive filling with flake MAX phase ceramics. **RSC Advances**, v. 10, n. 45, p. 27025–27032, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D0RA03493B>

WENG, F.; JIAN, K.; YI, Y.; ZHANG, P.; KORANTENG, E.; HUANG, Q.; LIU, J.; ZENG, G. Eco-Friendly Castor Oil-Based Composite with High Clam Shell Powder Content. **Polymers**, v. 16, n. 23, p. 3232, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym16233232>

WIJESINGHE, W. P. S. L.; MANTILAKA, P.; RUPARATHNA, K.; RAJAPAKSHE, S.; THILAKARATHNA, G. Filler matrix interfaces of inorganic/biopolymer composites and their applications. *In: [S. l.: s. n.]*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102665-6.00004-2>

WONG, D.; DEBNATH, S.; YEK, H. Y.; JUAN, N.; ANWAR, M.; DAVIES, I. J. The influence of water hyacinth particle size on the tensile strength and microhardness performance: 2024 International Conference on Energy Transition and Exhibition. **Proceedings of the International Conference on Energy Transition and Exhibition, ICETe 2024**, Lecture Notes in Mechanical Engineering, p. 73–83, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-96-5059-0_8

YACOB, N.; YUSOF, M. R.; MOHAMED, A. Z.; BADRI, K. Changes in crystallinity of sago palm (*Metroxylon sago* spp.) waste during cellulose extraction. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 1308, n. 1, p. 012014, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1308/1/012014>

ZANINI, N. C.; DE SOUZA, A. G.; BARBOSA, R. F.; ROSA, D. S.; MULINARI, D. R. Eco-friendly composites of polyurethane and sheath palm residues. **Journal of Cellular Plastics**, v. 58, n. 1, p. 139–158, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0021955X20987150>

ZHANG, B.; WAN, L. Development of sustainable polyurethane materials: a study on the synthesis, properties, and biodegradation of castor oil-based biopolymers. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 30, p. e20250579, 2025. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2025-0579>

ZHANG, P.; WENG, F.; KORANTENG, E.; GUO, D.; CAO, P.; WU, Q. Effect of special structure of clam shell powder on structure and properties of castor oil-based composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 138, n. 10, p. 49963, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/app.49963>

ZHANG, Z.; NI, N.; XU, Y. Effects of Different Polyols with Functions on the Properties of Polyester Polyol-Based Polyurethane Coatings. **Coatings**, v. 15, n. 1, p. 61, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/coatings15010061>

ZHAO, X.; ZHANG, Z.; PANG, J.; SU, L. Preparation of carbon fibre-reinforced composite panels from epoxy resin matrix of nano lignin polyol particles. **Journal of Cleaner Production**, v. 428, p. 139170, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139170>

ZHOU, Y.; HUANG, Z.-M.; WANG, J.-X.; WANG, Y. Tensile strength of particle reinforced composite with interfacial debonding. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 303, p. 110110, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2024.110110>