



**RESÍDUOS DE FRUTOS DE BABAÇU E MACAÚBA NA PRODUÇÃO
DE COMPÓSITOS COM MATRIZ POLIMÉRICA DE PP E PEAD**

ROSSANA CORTELINI DA ROSA

**DOUTORADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA-UnB**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

ROSSANA CORTELINI DA ROSA

**RESÍDUOS DE FRUTOS DE BABAÇU E MACAÚBA NA PRODUÇÃO
DE COMPÓSITOS COM MATRIZ POLIMÉRICA DE PP E PEAD**

ORIENTADOR: Dr. CLAÚDIO HENRIQUE SOARES DEL MENEZZI

BRASÍLIA, DF, FEVEREIRO DE 2025.

**Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Cr

Cortelini da Rosa, Rossana
RESÍDUOS DE FRUTOS DE BABAÇU E MACAÚBA NA PRODUÇÃO DE
COMPÓSITOS COM MATRIZ POLIMÉRICA DE PP E PEAD / Rossana
Cortelini da Rosa; orientador Cláudio Henrique Soares Del
Menezzi. -- Brasília, 2025.
109 p.

Tese (Doutorado em Ciências Florestais) -- Universidade de
Brasília, 2025.

1. Compósitos. 2. Aproveitamento de resíduos. 3. Babaçu.
4. Macaúba. I. Henrique Soares Del Menezzi, Cláudio, orient.
II. Título.

©2025

Todos os direitos autorais reservados a Rossana Cortelini da Rosa. A reprodução de
partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.
E-mail: ro.cortelini@hotmail.com

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**RESÍDUOS DE FRUTOS DE BABAÇU E MACAÚBA NA PRODUÇÃO
DE COMPÓSITOS COM MATRIZ POLIMÉRICA DE PP E PEAD**

ROSSANA CORTELINI DA ROSA

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTORA EM CIÊNCIAS FLORESTAIS.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Cláudio Henrique Soares Del Menezzi (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB) - (Orientador)

Prof. Dr. Ailton Teixeira do Vale (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB) – (Examinador Interno)

Prof. Dr. Darci Alberto Gatto (Centro de Engenharias - UFPel) - (Examinador Externo à UnB)

Profª. Drª. Lina Bufalino (Departamento de Engenharia Florestal - UFRA) – (Examinadora Externa à UnB)

BRASÍLIA/DF, FEVEREIRO DE 2025

Para Dione, Vera e Niwton.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha família. Ao meu marido, Dione, por todo suporte, apoio, amor, amizade, incentivo e ajuda, sem você ao meu lado, este trabalho não teria sido concluído. Aos meus pais, Vera e Niwton, e ao meu irmão, Guilherme, que sempre apoiaram todas as minhas decisões e são meus maiores exemplos de amor, carinho e dedicação, às minhas cunhadas, Scheila e Danielle, aos meus afilhados, Lívia e Pedro, e aos meus sogros. Vocês foram fundamentais para a realização deste trabalho. Muito obrigada por todo apoio.

Agradeço ao meu orientador, professor Cláudio Del Menezzi, pela oportunidade, dedicação, paciência, incentivo e sugestões ao longo desses cinco anos. Sua orientação foi essencial para a concretização desta pesquisa.

Às minhas amigas Annie de Lima e Paula Dornelles, que me ajudaram imensamente nos últimos anos do doutorado. Foram minhas parceiras, sempre ao meu lado durante as análises e incontáveis dias de laboratório. Muito obrigada por todo conhecimento compartilhado.

Ao Laboratório de Produtos Florestais do Serviço Florestal Brasileiro e a todos que sempre me receberam em seus laboratórios, contribuindo para a realização de algumas análises deste trabalho. Meu agradecimento também ao professor Thiago e à Karol, pela disponibilidade e auxílio nas análises mecânicas da tese, e à professora Sandra e ao Linconl, pelo suporte nas análises de TGA/DSC e FTIR.

Agradeço à FINEP e ao CNPq pelos equipamentos disponibilizados nos laboratórios de compósitos, propriedades físicas e mecânicas e produtos não madeireiros, adquiridos por meio do CT-Infra e de Editais Universais. À CAPES, pela bolsa concedida.

Por fim, sou grata a todos os amigos e amigas que fiz ao longo dessa jornada em Brasília. Vocês tornaram esses anos muito mais leves e felizes. Obrigada por serem minha família longe de casa!

Muito obrigada!

RESUMO

RESÍDUOS DE FRUTOS DE BABAÇU E MACAÚBA NA PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS COM MATRIZ POLIMÉRICA DE PP E PEAD

AUTORA: Rossana Cortelini da Rosa

ORIENTADOR: Cláudio Henrique Soares Del Menezzi

A crescente preocupação com a sustentabilidade tem impulsionado a busca por alternativas que minimizem o impacto ambiental das atividades industriais. Nesse contexto, a utilização de resíduos provenientes de processos industriais na produção de fibras naturais emerge como uma solução viável e ecologicamente sustentável. Especificamente, os frutos de palmeiras como o babaçu e a macaúba são frequentemente aproveitados de forma parcial, resultando na geração de subprodutos que podem ser valorizados. O objetivo deste estudo foi avaliar a eficácia de resíduos desses frutos na produção de compósitos com matrizes poliméricas de polipropileno (PP) e polietileno de alta densidade (PEAD). A produção dos compósitos foi obtida através da mistura do babaçu e macaúba com os polímeros, seguida de extrusão e moldagem por injeção para obtenção dos corpos de prova. Para caracterização dos compósitos, foram realizados testes de absorção de água, densidade, dureza Vickers, resistência à tração, rigidez e análise mecânica dinâmica (DMA), além de análises térmicas (TGA/DSC) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) visando examinar a morfologia e a interação entre fibras e polímero. A análise estatística consistiu em testes de normalidade e homogeneidade, ANOVA, análise de regressão polinomial e teste de médias (Scott-Knott), Dunnett. Os resultados indicaram que a absorção de água aumentou proporcionalmente à quantidade de material lignocelulósico adicionado. Os compósitos contendo até 25% de fibras apresentaram desempenho satisfatório em termos de resistência à água, enquanto, em porcentagens mais elevadas, a interação entre a matriz e as fibras comprometeu as propriedades mecânicas devido à formação de vazios na interface entre os materiais. Quanto à densidade e dureza Vickers dos compósitos, observou-se que a adição de fibras de macaúba e babaçu elevou a densidade dos compósitos, melhorando as propriedades mecânicas. No entanto, a dureza Vickers não apresentou variações estatisticamente significativas entre os compósitos, exceto nos tratamentos com fibras de babaçu, onde as adições de 10% e 25% de fibra se destacaram. Os compósitos contendo fibras de macaúba e babaçu mantiveram boas propriedades de densidade e resistência, o que os torna promissores para aplicações que demandam um equilíbrio entre desempenho mecânico e resistência a condições ambientais adversas. Em relação à resistência à tração, observou-se uma redução no desempenho à medida que a porcentagem de fibras aumentava. Nos compósitos de PP, a resistência à tração diminuiu de 41,98 MPa para 27,10 MPa com a adição das fibras de macaúba. Por outro lado, a resistência dos compósitos com fibras de babaçu também foi afetada, mas o tratamento com 10% de fibra de babaçu apresentou desempenho superior ao do PP puro, com 44,60 MPa. A inclusão de fibras naturais nos compósitos resultou em melhorias na rigidez e em um aumento no fator de perda ($\tan \delta$), indicando maior dissipação de energia e redução nas propriedades elásticas. A análise termogravimétrica (TGA/DSC) confirmou a degradação das fibras com o aumento da temperatura, com uma perda de massa mais acentuada nos compósitos contendo maior proporção de fibras, refletindo a degradação térmica dos componentes lignocelulósicos. Conclui-se que os resíduos de babaçu e macaúba possuem potencial para a produção de compósitos com PP e PEAD, sendo que os tratamentos de babaçu com a matriz polimérica de PEAD apresentaram os melhores resultados.

Palavras-chave: Plásticos, Sustentabilidade, Reciclagem, Palmeiras.

ABSTRACT

BABASSU AND MACAUBA FRUITS WASTE IN THE PRODUCTION OF COMPOSITES WITH PP AND HDPE POLYMERIC MATRIX

AUTHOR: Rossana Cortelini da Rosa
ADVISER: Cláudio Henrique Soares Del Menezzi

The growing concern about sustainability has driven the search for alternatives that minimize the environmental impact of industrial activities. In this context, the use of industrial waste to produce natural fibers can be considered a viable and ecologically sustainable solution. Specifically, the fruits of palm trees, such as babassu and macauba, are often partially used, resulting in the generation of by-products that can be valorized. The aim of this study was to evaluate the effectiveness of waste from these fruits in the production of composites with polypropylene (PP) and high-density polyethylene (HDPE) polymer matrices. The composites were produced by mixing babassu and macauba with the polymers, followed by extrusion and injection molding to obtain specimens. To characterize the composites, tests were carried out on water absorption, density, Vickers hardness, tensile strength, stiffness, and dynamic mechanical analysis (DMA), as well as thermal analysis (TGA/DSC) and scanning electron microscopy (SEM) to examine the morphology and interaction between fibers and polymer. Statistical analysis consisted of normality and homogeneity tests, analysis of variance, polynomial regression analysis, and Dunnett's test of means (Scott-Knott). The results indicated that water absorption increased proportionally to the amount of lignocellulosic material added. Composites containing up to 25% fibers performed satisfactorily in terms of water resistance, whereas at higher percentages, the interaction between the matrix and the fibers compromised the mechanical properties due to the formation of voids at the interface between the materials. Regarding the density and Vickers hardness of the composites, the addition of macauba and babassu fibers increased the density of the composites, improving their mechanical properties. However, Vickers hardness did not show statistically significant variations between the composites except in the case of the treatment with babassu fibers, where the 10% and 25% fiber additions stood out. The composites containing macauba and babassu fibers maintained good density and strength, which is promising for applications that require a balance between mechanical performance and resistance to adverse environmental conditions. The tensile strength showed a reduction in performance as the fiber percentage increased. In the PP composites, the tensile strength decreased from 41.98 MPa to 27.10 MPa upon the addition of macauba fibers. On the other hand, the strength of the composites with Babassu fibers was also affected, but the treatment with 10% babassu fiber outperformed pure PP at 44.60 MPa. The inclusion of natural fibers in the composites improved the stiffness and increased the loss factor ($\tan \delta$), indicating greater energy dissipation and a reduction in elastic properties. Thermogravimetric analysis (TGA/DSC) confirmed the degradation of the fibers with increasing temperature, with a more pronounced loss of mass in composites containing a higher proportion of fibers, reflecting the thermal degradation of the lignocellulosic components. It can be concluded that babassu and macauba waste have potential for the production of PP and HDPE composites, with babassu treatment with an HDPE polymer matrix showing the best results.

Keywords: Plastics, Sustainability, Recycling, Palm Trees.

Lista de figuras

Figura 1. Corte transversal do coco babaçu. Fonte: Autora.....	30
Figura 2. Corte transversal do coco macaúba. Fonte: Autora.....	31
Figura 3. (A) - Pellets 100%PEAD; (B) - Pellets da mistura 25% macaúba 75% PEAD; (C) - Pellets 25% babaçu 75% PEAD. Fonte: Autora.....	33
Figura 4. (A) - Amostras de PP injetados em molde gravata; (B) - Molde retangular. Fonte: Autora.....	33
Figura 5. Amostras utilizadas para o ensaio de taxa de absorção de água. Fonte: Autora.....	35
Figura 6. (A) - Aparelho DAX6000; (B) - Corpo de prova 100% PP durante a análise. Fonte: Autora.....	37
Figura 7. (A) - Equipamento Duran Scan; (B) - Durômetro Vickers; (C) - monitor de leitura da dureza. Fonte: Autora.....	38
Figura 8. (A) - Equipamento MTS 810; (B) - Ensaio de tração em um corpo de prova 100% PP. Fonte: Autora.....	38
Figura 9. (A) - Corpo de prova no início da análise de DMA no 3-point bending; (B) - Corpo de prova no final da análise. Fonte: Autora.....	40
Figura 10. (A) - Equipamento SDT Q600; (B) - Cadiños com amostra. Fonte: Autora.....	41
Figura 11. (A) - Equipamento TM4000Plus; (B) - Corpos de prova mostrando a superfície e a ponta quebrada. Fonte: Autora.....	42
Figura 12. Comportamento das variáveis de absorção em água em compósitos produzidos a partir resíduos de frutos de macaúba e babaçu com PP e PEAD. R^2 = coeficiente de determinação. * Indica que houve diferença significativa	45
Figura 13. Perfil de densidade compósitos Babaçu 10% e PEAD 90%.....	48
Figura 14. Comportamento das variáveis de dureza em compósitos produzidos a partir resíduos de frutos de macaúba e babaçu com PP e PEAD. R^2 = coeficiente de determinação. * Indica que houve diferença significativa e ^{ns} que não houve diferença significativa a nível de 5% de probabilidade.....	52
Figura 15. Comportamento das variáveis de tração em compósitos produzidos a partir resíduos de frutos de macaúba e babaçu com PP e PEAD. R^2 = coeficiente de determinação. * Indica que houve diferença significativa.....	56
Figura 16. Comportamento das variáveis do modo de elasticidade (E_t) em compósitos produzidos a partir resíduos de frutos de macaúba e babaçu com PP e PEAD. R^2 = coeficiente de determinação. * Indica que houve diferença significativa.....	57
Figura 17. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de macaúba e PP.....	59
Figura 18. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de macaúba e PEAD.....	60
Figura 19. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de babaçu e PP.....	60
Figura 20. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de babaçu e PEAD.....	61
Figura 21. Caracterização térmica do tratamento 100% PP.....	63
Figura 22. Caracterização térmica do tratamento 100% PEAD.....	63

Figura 23. Caracterização térmica das fibras de babaçu (100%).....	64
Figura 24. Caracterização térmica das fibras de macaúba (100%).....	64
Figura 25. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em compósitos: (A) - B10PP; (B) - B50PP; (C) - M10PP e (D) - M50PP.....	67
Figura 26. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em compósitos: (A) - B10PEAD; (B) -B50PEAD; (C) - M10PEAD e (D) - M50PEAD.....	68
Figura 27. Perfil de densidade compósitos Babaçu 25% e PEAD 75%.....	83
Figura 28. Perfil de densidade compósitos Babaçu 50 % e PEAD 50%.....	83
Figura 29. Perfil de densidade compósitos Babaçu 10% PP e 90%.....	84
Figura 30. Perfil de densidade compósitos Babaçu 25% e PP 75%.....	84
Figura 31. Perfil de densidade compósitos Babaçu 50% e PP 50%.....	85
Figura 32. Perfil de densidade compósitos macaúba 10% e PEAD 90%.....	85
Figura 33. Perfil de densidade compósitos macaúba 25% e PEAD 75%	86
Figura 34. Perfil de densidade compósitos macaúba 50% e PEAD 50%.....	86
Figura 35. Perfil de densidade compósitos macaúba 10% e PP 90%.....	87
Figura 36. Perfil de densidade compósitos macaúba 25% e PP 75%	87
Figura 37. Perfil de densidade compósitos macaúba 50% e PP %.....	88
Figura 38. Caracterização térmica do compósito com resíduo de macaúba e PP 10/90%.....	89
Figura 39. Caracterização térmica do compósito com resíduo de macaúba e PP 25/75%	89
Figura 40. Caracterização térmica do compósito com resíduo de macaúba e PP 50/50%	90
Figura 41. Caracterização térmica do compósito com resíduo de macaúba e PEAD 10/90%.....	90
Figura 42. Caracterização térmica do compósito com resíduo de macaúba e PEAD 50/50%	91
Figura 43. Caracterização térmica do compósito com resíduo de babaçu e PP 10/90%.....	91
Figura 44. Caracterização térmica do compósito com resíduo de babaçu e PP 25/75%	92
Figura 45. Caracterização térmica do compósito com resíduo de babaçu e PP 50/50%	92
Figura 46. Caracterização térmica do compósito com resíduo de babaçu e PEAD 10/90%	93
Figura 47. Caracterização térmica do compósito com resíduo de babaçu e PEAD 25/75%	93
Figura 48. Caracterização térmica do compósito com resíduo de babaçu e PEAD 50/50%	94
Figura 49. Curvas tan d do tratamento 100% PEAD	95
Figura 50. Curvas tan d do tratamento 100% PP	96
Figura 51. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de macaúba 10% e PP 90%.....	97
Figura 52. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de macaúba 25% e PP 75%.....	98
Figura 53. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de macaúba 50% e PP 50%.....	99

Figura 54. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de macaúba 10% e PEAD 90%.....	100
Figura 55. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de macaúba 25% e PEAD 75%.....	101
Figura 56. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de macaúba 50% e PEAD 50%.....	102
Figura 57. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de babaçu 10% e PP 90%.....	103
Figura 58. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de babaçu 25% e PP 75%.....	104
Figura 59. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de babaçu 50% e PP 50%.....	105
Figura 60. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de babaçu 10% e PEAD 90%.....	106
Figura 61. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de babaçu 25% e PEAD 75%.....	107
Figura 62. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de babaçu 50% e PEAD 50%.....	108

Lista de tabelas

Tabela 1 Diferentes concentrações dos resíduos (fibras) para produção dos compósitos. Onde a letra B representa o babaçu, e a letra M a macaúba nos compósitos.....	32
Tabela 2. Parâmetros de injeção para cada formulação e molde. Onde Tc = temperatura do cilindro; Pi = pressão de injeção; ti = tempo de injeção; Tm = temperatura do molde; Pr = pressão de recalque e tr = tempo de recalque.....	34
Tabela 3. Absorção de água em compósitos de PP e resíduo de macaúba e babaçu.....	44
Tabela 4. Absorção de água em compósitos de PEAD e resíduo de macaúba e babaçu	44
Tabela 5. Densidade calculada dos compósitos a partir de fibras de macaúba e babaçu.....	46
Tabela 6. Densidade média, obtida no densitômetro, dos compósitos a partir de fibras de macaúba.....	47
Tabela 7. Densidade média, obtida no densitômetro, dos compósitos a partir de fibras de babaçu.....	47
Tabela 9. Dureza Vickers dos compósitos de PP e resíduo de macaúba e babaçu. 49	
Tabela 10. Dureza Vickers dos compósitos de PEAD e resíduo de macaúba e babaçu.	51
Tabela 11. Modo de elasticidade (Et) e resistência a tração (σ_t) dos compósitos de PP e resíduo de macaúba.....	53
Tabela 12. Modo de elasticidade (Et) e resistência a tração (σ_t) dos compósitos de PP e resíduo de babaçu.....	54
Tabela 13. Modo de elasticidade (Et) e resistência a tração (σ_t) dos compósitos de PEAD e resíduo de macaúba.	55
Tabela 14. Modo de elasticidade (Et) e resistência a tração (σ_t) dos compósitos de PEAD e resíduo de babaçu.	55
Tabela 15. Tabela de tendencia dos resultados de modulo de elasticidade, resistência a tração e dureza conforme a adição dos resíduos de macaúba e babaçu.	58

Sumário

1. INTRODUÇÃO	15
2. JUSTIFICATIVA.....	18
3. OBJETIVOS.....	19
3.1 GERAL.....	19
3.2 ESPECÍFICOS	19
4. HIPÓTESE	20
5. ESTRUTURA DA TESE.....	21
6. REFERENCIAL TEÓRICO.....	23
6.1 PALMEIRAS.....	23
6.2 POLÍMEROS	25
6.3 COMPÓSITOS	27
7. MATERIAL E MÉTODOS.....	30
7.1 LOCAL DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	30
7.2 MATÉRIA PRIMA PARA CONFECÇÃO DOS COMPÓSITOS	30
7.3 PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS	31
7.3.1 Preparação dos compósitos.....	31
7.4 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS.....	35
7.4.1 Absorção em água	35
7.4.2 Densidade calculada	36
7.4.3 Perfil de densidade longitudinal.....	37
7.4.4 Dureza Vickers.....	37
7.4.5 Resistencia e rigidez a tração.....	38
7.5 ANÁLISE MECÂNICA DINÂMICA (DMA)	39
7.6 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA / CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (TGA/DSC).....	40
7.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	41
7.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA	42
8. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
8.1 ABSORÇÃO EM ÁGUA.....	43
8.3 DUREZA VICKERS	49
8.4 TRAÇÃO	52
8.5 ANÁLISE MECÂNICA DINÂMICA (DMA)	59
8.6 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA / CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA - TGA/DSC	62
8.7 MICROSCOPIA ELETÔNICA DE VARREDURA - MEV	66

9. CONCLUSÕES.....	68
10. REFERÊNCIAS.....	70
APÊNDICE A – PERFIL DE DENSIDADE	83
APÊNDICE B - CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA.....	89
APÊNDICE C - ANÁLISE MECÂNICA DINÂMICA (DMA)	95

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, há uma demanda crescente por materiais com custos acessíveis e alto desempenho capazes de substituir materiais derivados de fontes não-renováveis, como por exemplo o petróleo. Quando a substituição é inviável, torna-se necessário a reciclagem dos resíduos gerados por esses produtos.

Ademais, esse movimento, é impulsionado pela crescente onda de conscientização ambiental, que preconiza a utilização de materiais ecológicos, valorizando conceitos amplamente difundidos atualmente, como: renovável, sustentável, reciclável, reutilizável, recuperável entre outros.

Tal cenário, favorece o surgimento de materiais inovadores visando o aproveitamento de resíduos industriais que atendam aos apelos da sociedade atual, buscando produtos alinhados ao conceito de "*green product*" ou produto verde. Esses materiais apresentam menor impacto ambiental, são menos prejudiciais à saúde humana, além de serem capazes de satisfazer os consumidores pela sua qualidade e baixo custo, e otimização da matéria prima com a utilização de resíduos de distintas indústrias.

Atualmente, a demanda pelo desenvolvimento de produtos sustentáveis "*green product*", motiva inúmeros pesquisadores, oferecendo diversas oportunidades para a melhora da qualidade de vida de milhares de pessoas em todo mundo, trazendo consigo vantagens do ponto de vista econômico e sustentável, uma vez que a utilização de resíduos, outrora destinados ao descarte, gera mudanças nos padrões de produção evitando danos ambientais (BEIGBEDER et al., 2019; DE ARAÚJO VELOSO et al., 2021; GALEMBECK; BARBOSA; DE SOUSA, 2009; SATYANARAYANA; ARIZAGA; WYPYCH, 2009a; SATYANARAYANA; RAMOS; WYPYCH, 2008a).

Para que isso ocorra, é indispensável haver um planejamento adequado dos produtos e processos de obtenção, focando em ações que resultem no prolongamento da vida útil do produto ou no reprocessamento de subprodutos e reinserção à cadeia de produção, fazendo com que o ciclo de vida seja prolongado (JACOBI; GIATTI, 2017; OLIVEIRA; FRANÇA; RANGEL, 2019).

A busca por um processo produtivo sustentável na economia circular, de modo a otimizar o uso dos recursos e possibilitar ciclos contínuos de reconversão encaixa-se na fabricação produtos à base de polímeros sintéticos e fibras naturais denominados materiais compósitos. Os compósitos são viáveis para a reciclagem de inúmeros materiais, incluindo resíduos plásticos e florestais.

Possuem uma infinidade de aplicações, estando presentes em diversos setores como: automotivo, aeroespacial, construção civil, eletrônicos entre outros. Apresentam alta resistência e módulos específicos quando comparados com materiais convencionais como ligas e metais, além de, em sua grande maioria, possuírem excelente durabilidade (BLEDZKI; GASSAN, 1999; MOHANTY et al., 2018; MOHANTY; MISRA; DRZAL, 2002; MOHANTY; MISRA; HINRICHSEN, 2000; WU; MISRA; MOHANTY, 2021).

Assim, por possuir grande extensão territorial, condições climáticas favoráveis e solos férteis, o Brasil conta com uma imensa variedade de recursos naturais renováveis utilizáveis na produção de compósitos, como fibras naturais de curauá (NURAZZI et al., 2021; VENKATESHA PRASANNA et al., 2021), coco, juta, cana-de-açúcar, linho, cânhamo (CASTRO et al., 2017; DE PAIVA et al., 2019), chá-mate (MATTOS et al., 2014), sisal, abacaxi, banana (GALEMBECK; BARBOSA; DE SOUSA, 2009; SATYANARAYANA; RAMOS; WYPYCH, 2008b; SUMESH et al., 2021), dendê (JAWAID et al., 2021; NEHER et al., 2014), entre outros.

O crescente interesse em promover utilização e empregabilidade dessas fibras naturais, visando a substituição de materiais tradicionais como por exemplo carbono ou vidro, pois fibras naturais possuem baixo custo de aquisição, peso reduzido, menores desgastes no processamento e utilização e alta disponibilidade (MOHANTY et al., 2018; NURAZZI et al., 2021; SABA et al., 2015a). Essas fibras, especialmente as originadas por palmeiras como: dendê, açaí, babaçu e macaúba, são lignocelulósicas (JAWAID et al., 2021; SABA et al., 2015a, 2016; THEN et al., 2015), tornando a produção de compósitos uma alternativa viável para a substituição de materiais tradicionais como fibras sintéticas e madeira natural.

A utilização de resíduos provenientes de processos industriais na obtenção de fibras naturais apresenta-se como uma alternativa sustentável e

viável. No caso das palmeiras, seus frutos são frequentemente aproveitados de forma parcial, resultando em subprodutos que podem ser valorizados.

A amêndoia de babaçu (*Attalea speciosa*) é um dos principais produtos da exploração vegetal no Brasil (PORRO, 2019). Da mesma forma, a amêndoia da macaúba (*Acrocomia aculeata*) é amplamente utilizada para a fabricação de óleo, sendo uma das produções econômicas mais relevantes dessa espécie (SZPIZ et al., 1989).

Após a extração da amêndoia em ambas as palmeiras, o restante do fruto, composto pelo epicarpo, mesocarpo e endocarpo, pode ser aproveitado na produção de compósitos, contribuindo para a redução de resíduos e o desenvolvimento de materiais sustentáveis.

Nesse contexto, o objetivo do trabalho visa avaliar a eficiência de resíduos de frutos de babaçu e macaúba, na elaboração de compósitos com matriz polimérica de polipropileno (PP) e polietileno de alta densidade (PEAD).

2. JUSTIFICATIVA

No contexto atual, existe uma busca constante por materiais que ofereçam baixo custo, alto desempenho e sustentabilidade ambiental, além de promoverem a otimização das matérias-primas utilizadas em sua produção. As indústrias de processamento de frutos e derivados de palmeiras geram resíduos ricos em fibras naturais que, na maioria das vezes, são descartados de forma inadequada, resultando em desperdício e impactos ambientais negativos. Além disso, a elevada geração de resíduos sólidos plásticos representa um grave problema ambiental, especialmente devido ao seu acúmulo nos oceanos e ao longo processo de decomposição.

A produção de compósitos a partir de resíduos de frutos de palmeiras combinados com polipropileno e polietileno de alta densidade possibilitará a análise do desempenho geral desses novos materiais. Isso permitirá identificar a melhor combinação para futura fabricação em escala industrial, com foco na otimização do processo produtivo e na aplicação em diferentes áreas.

O desenvolvimento deste trabalho busca mitigar os impactos ambientais causados pelos setores envolvidos, como indústrias que descartam inadequadamente seus resíduos, e gerar renda adicional em cadeias produtivas de diversas espécies de palmeiras como babaçu e macaúba.

3. OBJETIVOS

3.1 GERAL

- Avaliar a eficiência de resíduos fibrosos de frutos de palmeiras para o desenvolvimento de compósitos com polímeros polipropileno (PP) e polietileno de alta densidade (PEAD).

3.2 ESPECÍFICOS

- Avaliar a melhor combinação fibra/polímero para a produção do compósito.
- Avaliar a melhor proporção de fibra/polímero (diferentes porcentagens) para a produção do compósito;

4. HIPÓTESE

H0: A fabricação de compósitos utilizando resíduos de babaçu e macaúba promove a melhoria das propriedades físicas e mecânicas dos polímeros, podendo superar as características originais, dependendo da natureza e proporção dos resíduos e do tipo de polímero empregado.

5. ESTRUTURA DA TESE

A tese está estruturada em: introdução, oferecendo ao leitor uma compreensão completa e fundamentada sobre os compósitos desenvolvidos. A relevância científica e prática do estudo é destacada, seguida pela justificativa que motivou a realização do trabalho e pela apresentação de seus objetivos, tanto gerais quanto específicos.

Na sequência, são apresentadas as informações essenciais para a compreensão plena do tema abordado, incluindo uma revisão abrangente sobre compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais, suas propriedades, vantagens, limitações e aplicações potenciais. Os principais estudos científicos relacionados ao desenvolvimento de compósitos com fibras vegetais são destacados, oferecendo uma base sólida para contextualizar a pesquisa. Além disso, o capítulo explora detalhadamente as características das espécies de palmeiras utilizadas no estudo, macaúba (*Acrocomia aculeata*) e babaçu (*Attalea speciosa*).

Na seção materiais e métodos, são descritos detalhes sobre processo de fabricação dos compósitos, desde a coleta e preparação das fibras vegetais até a incorporação na matriz polimérica. A metodologia inclui informações sobre a proporção de fibras utilizadas, o processo de mistura e conformação, e os testes realizados para avaliar as propriedades físicas, mecânicas e térmicas dos compósitos, bem como as análises estatísticas realizadas.

Após, são apresentados os resultados obtidos, de forma estruturada e acompanhados de uma análise crítica. A seção abrange desde os dados de densidade e absorção de água até os parâmetros mecânicos, como módulo de elasticidade e resistência à tração, além das propriedades térmicas dos compósitos. As discussões são fundamentadas em estudos correlatos, destacando os resultados encontrados.

Na sequência, há a conclusão visando enfatizar os principais achados, destacando a viabilidade do uso de resíduos de fibras de macaúba e babaçu na fabricação de compósitos, suas contribuições para o avanço científico e as implicações ambientais e industriais. Recomendações para futuros estudos e

aprimoramentos são também apresentadas, reforçando o potencial de inovação na área de compósitos sustentáveis.

Por fim, nos apêndices, são disponibilizados os materiais complementares que oferecem suporte adicional aos resultados discutidos. Esses materiais incluem gráficos detalhados de caracterização térmica, que ajudam a compreender o comportamento dos compósitos em condições de variação de temperatura. Os apêndices foram organizados para facilitar o acesso a informações técnicas relevantes, garantindo a transparência e a reproduzibilidade do estudo.

6. REFERENCIAL TEÓRICO

6.1 PALMEIRAS

A família Arecaceae, anteriormente denominada Palmae, compreende um extenso grupo de espécies amplamente conhecidas como palmeiras (LORENZI et al., 2004). As palmeiras são plantas monocotiledôneas, com cerca de 2700 espécies, distribuídas em aproximadamente 240 gêneros, e situam-se entre as plantas mais antigas do globo, visto que vestígios paleontológicos das mesmas remontam mais de 120 milhões de anos (LORENZI, 2010). No Brasil, conforme o mesmo autor, há registro natural de aproximadamente 38 gêneros e cerca de 270 espécies, refletindo a relevância dessa família no contexto nacional.

A classificação das Arecaceae baseia-se em diversos critérios, incluindo a morfologia dos estipes, folhas, frutos e flores, além de aspectos anatômicos, comparações morfológicas e histológicas, distribuição geográfica e história evolutiva da família e de seus gêneros (DRANSFIELD et al., 2008). Uma das características é a notável capacidade de adaptação a condições variadas de clima e solo, embora encontrem sua maior diversidade em regiões de clima equatorial quente e úmido (SOARES et al., 2014).

No Brasil, as palmeiras desempenham um papel econômico significativo, destacando-se na produção de uma ampla variedade de produtos, como cera, amêndoas, óleos, frutos, polpas, sucos e palmito. Dados recentes indicam que algumas espécies têm conquistado reconhecimento internacional, especialmente o açaí, cuja produção apresentou um crescimento substancial nos últimos cinco anos, impulsionada pelo apelo de seus produtos no mercado global (DA SILVA; SEVALHO; MIRANDA, 2021; FREITAS et al., 2021; HIDALGO PIZANGO et al., 2022; IBGE, 2020).

Entre as espécies de maior relevância, destaca-se o dendê, amplamente cultivado no Brasil e mundialmente reconhecido. O óleo de palma, derivado dessa planta, é o óleo vegetal mais comercializado no mundo, com cerca de 72% de sua produção destinada à alimentação. No Brasil, esse percentual é ainda mais expressivo, chegando a 97%. Este óleo é amplamente utilizado e está presente em cerca de 50% dos produtos vendidos nos supermercados. Além de

seu uso tradicional, o óleo de palma tem ganhado espaço em novos segmentos, como químicos industriais, cosméticos, fármacos, biodiesel, entre outros (MAPA, 2018).

Outras espécies também se destacam no cenário nacional, como o babaçu, cuja produção alcança cerca de 26400 mil toneladas (IBGE, 2023) e a macaúba, que está sendo empregada em larga para produção de óleo para biocombustíveis e diversos outros produtos, como cosméticos (FÁVARO; ROCHA, 2022).

A espécie *Attalea speciosa* Mart., conhecida popularmente como babaçu, possui uma ampla distribuição geográfica, estendendo-se desde o oceano Atlântico até a Bolívia. No Brasil, sua ocorrência concentra-se principalmente nas zonas de transição entre as bacias amazônica e o semiárido nordestino, abrangendo os estados do Piauí, Maranhão, Tocantins, Goiás, Mato Grosso e Pará (FILHO, 2004).

O babaçu se sobressai como uma das plantas mais importantes para a sobrevivência de várias comunidades tradicionais, graças à versatilidade de suas partes, particularmente o endocarpo e o mesocarpo, que têm múltiplas utilidades. Recentemente, essa espécie tem sido valorizada como um recurso de grande potencial econômico, com usos que vão desde a fabricação de biodiesel até a criação de outros produtos sustentáveis. Isso destaca sua relevância tanto para a economia local quanto para estratégias de preservação ambiental e avanço técnico (GONZÁLEZ-PÉREZ et al., 2012; LIMA et al., 2007) quanto na indústria cosmética, produzindo principalmente sabão e glicerina (FILHO, 2004).

Já a macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart.), popularmente conhecida também como bocaiúva, é uma espécie nativa das florestas tropicais. Uma de suas características mais marcantes é a presença de espinhos escuros, longos e pontiagudos, localizados principalmente na região dos nós (LORENZI; NEGRELLE, 2006). A macaúba é notável pela sua polpa e amêndoas, que são amplamente empregadas tanto para consumo *in natura* quanto em várias receitas típicas da culinária brasileira.

Dentre as aplicações mais frequentes estão a fabricação de sorvetes, bolos, paçoca doce e cocada, evidenciando sua versatilidade como um ingrediente. Essa espécie, além de seu sabor inconfundível, tem um alto valor

nutricional, podendo enriquecer a alimentação ao servir como uma fonte adicional de nutrientes vitais, auxiliando na diversificação alimentar (ALMEIDA, 1998).

A macaúba vem se destacando pela sua capacidade de produção de óleo, sendo uma das espécies mais promissoras para a produção sustentável de biocombustíveis. A macaúba é conhecida por suas folhas espinhosas e frutos que contêm uma polpa rica em óleo, utilizada tanto para a produção de biodiesel quanto na indústria alimentícia e cosmética (FÁVARO; ROCHA, 2022).

O processo convencional de obtenção de óleo da macaúba é fundamentado em uma sequência de etapas que começa com a secagem dos frutos, normalmente feita de maneira natural. Depois dessa fase, procede-se com a descamação, a despolpa, a prensagem da polpa em prensas, a quebra e a separação do endocarpo e da amêndoia, culminando na extração do óleo da polpa também através de prensagem (FÁVARO; ROCHA, 2022).

A amêndoia, presente nos frutos do babaçu e da macaúba, representa a fração de maior valor comercial e industrial dessas palmeiras. Sua extração é amplamente explorada para a produção de óleos vegetais, amplamente utilizados na indústria alimentícia, cosmética e energética. Esse alto valor mercantil impulsiona a demanda por esses frutos, ao mesmo tempo em que gera uma quantidade significativa de resíduos, como o epicarpo, mesocarpo e endocarpo (CICONINI et al., 2012; PORRO, 2019).

6.2 POLÍMEROS

O termo polímero vem do grego "polumeres", que se traduz como "composto por várias partes". Historicamente, o ser humano tinha apenas conhecimento sobre polímeros naturais, tais como borracha, celulose, polissacarídeos e outros, que tinham funções cruciais em diversas aplicações. Contudo, a situação dos polímeros sofreu alterações significativas com os progressos científicos (HAGE JR., 1998).

Atualmente, apesar de muitos polímeros ainda serem originários da natureza e serem facilmente encontrados, a invenção e aplicação de polímeros sintéticos transformaram a indústria e a tecnologia. A descoberta do processo de

polimerização em 1920 pelo químico alemão Hermann Staudinger possibilitou o entendimento das bases científicas para a criação dessas macromoléculas, possibilitando o avanço de uma ampla variedade de materiais sintéticos (CAI et al., 2024; HAGE JR., 1998; STEINMETZ et al., 2024; YADAV et al., 2024).

De maneira geral, polímeros, são macromoléculas caracterizadas por seu tamanho, sua estrutura química e interações intra e intermoleculares. Possuem unidades químicas que são unidas por ligações covalentes, que se repetem ao longo da cadeia, podendo ser sintéticos ou naturais, e conforme vão variando com o aumento da temperatura podem ser classificados como termoplásticos (plásticos) ou termofixos (SPINACE; PAOLI, 2001; CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

Um termoplástico muito utilizado na indústria é o polietileno, um polímero parcialmente cristalino, flexível, que possui propriedades acentuadamente influenciadas pela quantidade relativa das fases cristalina e amorfia. Possui unidades cristalinas menores e lamelas na forma planares, da qual consistem em cadeias perpendiculares ao plano da cadeia principal e dobradas em zig-zag de 5 a 15nm. Desta forma, mesmo que haja defeitos, serão bem pouco frequentes (MARK, 1987).

De maneira geral, polietilenos são inertes frente a grande maioria de produtos químicos comuns, uma vez que possuem natureza parafínica, alto peso molecular e estrutura parcialmente cristalina e, em temperaturas menores que 60 °C, são parcialmente solúveis em quaisquer solventes. No entanto, cabe destacar que dois fenômenos podem ser observados, um é a interação com solventes, ocasionando inchamento, dissolução parcial, surgimento de cor ou, com o passar do tempo, degradação total do material e, a segunda com adição de agentes tensoativos, há redução da resistência mecânica do material através do efeito de tenso-fissuramento superficial (NEVES, 1999).

Os polietilenos mais conhecidos são o polietileno de baixa densidade (PEBD) e o polietileno de alta densidade (PEAD). Ambos são polímeros formados a partir do mesmo monômero, o eteno (C_2H_4), porém apresentam diferenças estruturais significativas. O PEBD possui uma estrutura ramificada, o que impede um empacotamento eficiente das cadeias poliméricas, resultando em menor densidade e maior flexibilidade. Já o PEAD tem uma estrutura predominantemente linear, permitindo um arranjo mais compacto das moléculas,

o que leva a uma maior densidade, resistência mecânica e térmica. O PEAD é, segundo a International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), o mais simples quimicamente e um dos mais utilizados hoje em dia na fabricação de tampas e garrafas plásticas, banners, cadeiras e mesas plásticas, tubulações entre outras.

Outro termoplástico muito utilizado industrialmente é o polipropileno, que se origina de reações de polimerização por adição, possuindo como monômero de partida o propeno (ou também propileno), que é um hidrocarboneto insaturado com fórmula C₃H₆, originado principalmente através do craqueamento da nafta do petróleo (CANEVAROLO, 2010).

Cabe destacar, que a grande maioria do polipropileno comercializado é do tipo isotáctico, onde, todos os grupos laterais metila estão dispostos do mesmo lado do plano definido pelos átomos da cadeia principal, assim a estrutura estereorregular favorece o desenvolvimento de regiões cristalinas (CANEVAROLO, 2010).

O polipropileno (PP) é um polímero termoplástico amplamente utilizado devido à sua facilidade de processamento, baixa densidade e custo relativamente inferior em comparação a outros polímeros, como o polimetacrilato de metila (PMMA), o poliestireno (PS) e o policloreto de vinila (PVC).

6.3 COMPÓSITOS

O crescimento econômico não sustentável gerou diversas questões globais, especialmente as relacionadas ao destino dos resíduos sólidos, como o plástico, produzidos por várias atividades humanas, como a produção industrial e o consumo em grande quantidade de produtos fabricados com esse material. O alto consumo de produtos industrializados, como os alimentos, que necessitam de embalagens, majoritariamente de plástico, resultando no aumento de resíduos sólidos e consequentemente a intensificação da poluição ambiental (BABAFEMI et al., 2018; LANDIM et al., 2016; RAHMANI et al., 2013).

Desse modo, os compósitos surgem como alternativa para utilização de parte desses resíduos. Os compósitos são frequentemente usados como

produtos de alto valor agregado devido às suas características multifuncionais, como baixo custo de manutenção e produção, ecologicamente sustentáveis e ampla aplicabilidade (RAMACHANDRAN et al., 2022; YANG et al., 2025; YOUSSEF et al., 2019a; ZHAO et al., 2025a), sendo utilizados em várias áreas, incluindo materiais de construção de aplicação interna e externa, indústria automobilística, aeronáutica entre outras.

É considerado compósito qualquer combinação de dois ou mais materiais de qualquer forma para qualquer finalidade. O conceito essencial de um compósito é que, de forma isolada os materiais mantenham suas características, entretanto, ao serem misturados suas propriedades serão parcialmente ou totalmente modificadas tirando vantagem das características positivas de cada componente, e que em sua grande maioria tendem a apresentar propriedades mais satisfatórias do que qualquer um dos materiais quando aplicados de forma isolada, aumentando a aplicabilidade final do material produzido (JELE et al., 2023; KRIŠT'ÁK; RÉH, 2021; LEE et al., 2023; MAGALHÃES et al., 2013; SABA et al., 2015b, 2017; SATYANARAYANA; ARIZAGA; WYPYCH, 2009b; SAVOV et al., 2023; WANG et al., 2021; YOUSSEF et al., 2019b).

Os compósitos utilizando fibras lignocelulósicas foram inicialmente desenvolvidos na Europa e América do Norte. No entanto, a utilização de compósitos remonta a períodos mais antigos, como no caso do uso de resinas termofixas em materiais como painéis MDF, exemplificando a longa tradição de aplicação de compósitos em diversas indústrias (CORREA et al., 2003).

Atualmente, a criação de novos materiais compósitos está majoritariamente focada no emprego de materiais lignocelulósicos. Essa tendência se deve às várias vantagens proporcionadas por esses materiais, como a sua facilidade de reutilização e reciclagem, além de possuírem propriedades biológicas, físicas e mecânicas consideravelmente melhoradas (BEKHTA et al., 2023; KHANJANZADEH et al., 2019; LEE et al., 2023; NORO et al., 2024; PELAEZ-SAMANIEGO et al., 2013; QUIROGA; MARZOCCHI; RINTOUL, 2016; SAVOV et al., 2023; WANG et al., 2021).

Os materiais lignocelulósicos, principalmente originados de fontes renováveis como madeira, fibras vegetais e resíduos agroindustriais, possuem grande potencial para substituir materiais tradicionais em diversas utilizações. A sua adaptabilidade, juntamente com o impacto ambiental reduzido e a habilidade

de satisfazer requisitos específicos de desempenho, tem estimulado sua aplicação em uma vasta variedade de setores, como a construção civil, indústria automobilística, embalagens ecológicas entre outras (ASHORI, 2008; CARVALHO et al., 2024; ELSHEIKH; ELMILIGY; EL-KASSAS, 2025; TULI; KHATUN; RASHID, 2024; ZHAO et al., 2025b; ZHU et al., 2025).

Compósitos que combinam resinas termoplásticas ou termofixas com madeira, resíduos lignocelulósicos ou fibras vegetais são comumente referidos como compósitos plástico-madeira (WPC - Wood-Plastic Composites). Estes materiais têm sido objeto de pesquisas científicas e aplicações industriais, particularmente na indústria automobilística, que procura integrar fibras vegetais como soluções tecnológicas (BOLLAKAYALA et al., 2023; GANDARA; GONÇALVES; SARON, 2017; HE et al., 2024; SUNITHA et al., 2023; ZENG et al., 2025).

Os compósitos com fibras lignocelulósicas tem como características primordiais a leveza final do produto e a facilidade de modelagem, a vantagem da utilização de resíduos plástico em sua composição e, a atenuação de problemas ocasionados pelo uso da madeira *in natura*, como higroscopidade e instabilidade dimensional, que podem até mesmo ser superados dependendo da proporção de material a ser utilizado (BATTISTELLE et al., 2014; BHASKAR et al., 2021; JELE et al., 2023; RADZI et al., 2022; VALENTE et al., 2016).

Os materiais mais utilizados para a confecção dos compósitos são de matriz polimérica (polietileno, polipropileno, cloreto de vinila), revigorada ou preenchida com partículas/fibras, podendo ser também de madeira sólida preenchida por um polímero sintetizado de forma natural a partir de monômeros insaturados impregnados nos poros da madeira (BHASKAR et al., 2021; ELSHEIKH et al., 2022; MATTOS et al., 2014; MEHDIKHANI et al., 2019; MOHAMED; KHAOULA; LEILA, 2023; RAMACHANDRAN et al., 2022; SAVOV et al., 2023).

7. MATERIAL E MÉTODOS

7.1 LOCAL DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Os experimentos foram desenvolvidos no Laboratório de Compósitos Lignocelulósicos do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília (UnB), Campus Darcy Ribeiro, Laboratório SG9 do Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Produtos Florestais e Laboratório de Anatomia da Madeira do Serviço Florestal Brasileiro e Laboratório de Análise Instrumental localizado na Faculdade do Gama (FGA).

7.2 MATÉRIA PRIMA PARA CONFECÇÃO DOS COMPÓSITOS

Foram utilizadas fibras de palmeiras, oriundas dos frutos do babaçu e da macaúba. Esses resíduos são gerados em larga escala por empresas e/ou comunidades extrativistas e cooperativas responsáveis pelo beneficiamento de polpa ou óleo. Os cocos de babaçu (Figura 1), foram doadas por uma empresa situada no município de Alexânia (GO). Os cocos de macaúba (Figura 2), foram doadas por coletores de sementes para produção de mudas do município de Planaltina (DF).

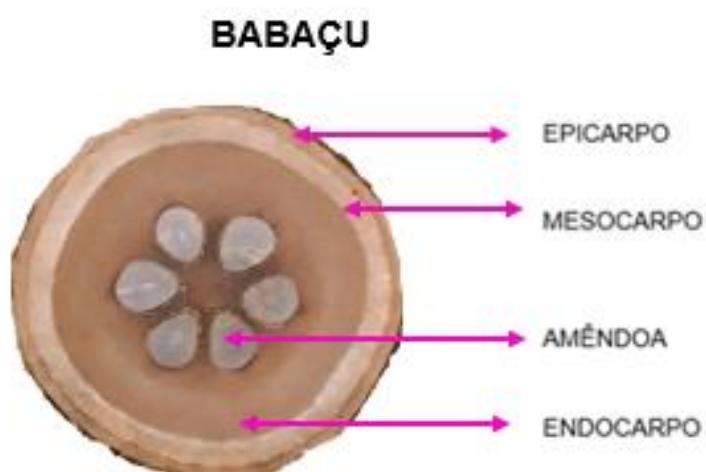


Figura 1. Corte transversal do coco babaçu. **Fonte:** Autora.

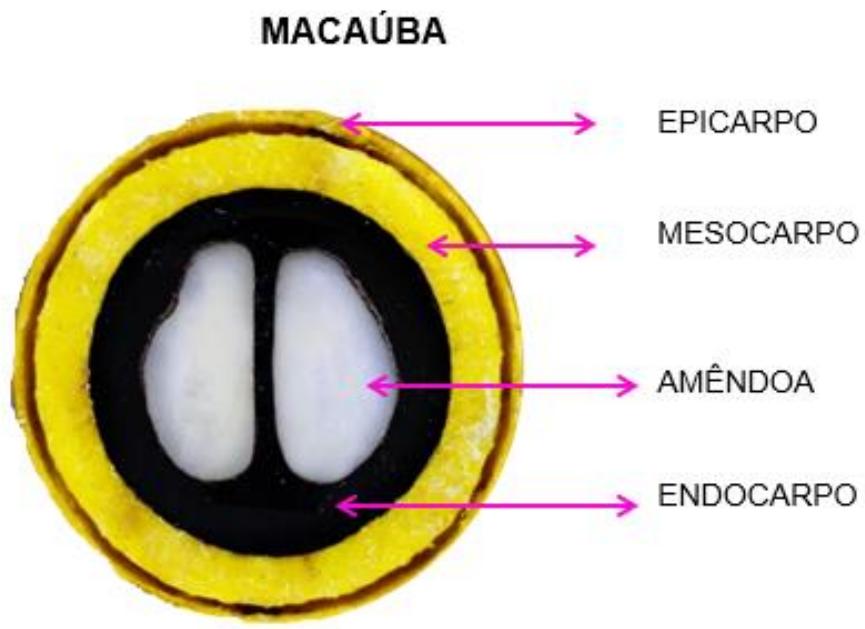


Figura 2. Corte transversal do coco macaúba. **Fonte:** Autora.

O processamento do fruto foi realizado em 3 etapas: após secagem natural, foi realizada a abertura do fruto, seguido pela retirada da amêndoa, e posterior moagem do epicarpo, mesocarpo e endocarpo restante. Para tanto foi realizado o processamento manual de redução de tamanho dos cocos, e, em seguida, o material foi moído em moinho tipo Willey. Os polímeros utilizados foram o polietileno de alta densidade (PEAD), doado pelo Laboratório de Produtos Florestais da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e o polipropileno (PP), adquirido no comércio local.

7.3 PRODUÇÃO DOS COMPÓSITOS

7.3.1 Preparação dos compósitos

Os compósitos preparados a partir da mistura do resíduo moído em moinho tipo Willey, fração 40/60 Mesh, juntamente com polímero. Os tratamentos realizados estão descritos a seguir na Tabela 1, em que o tratamento testemunha foi constituído apenas de polímero (100%), e os demais

constituídos de polímero/fibras nas proporções 90/10%, 75/25% e 50/50% respectivamente.

Tabela 1 Diferentes concentrações dos resíduos (fibras) para produção dos compósitos. A letra B representa o babaçu, e a letra M a macaúba nos compósitos.

Matriz Polimérica	Compósito	Resíduo (%)	Polímero (%)
PP	PP100	0	100
	B10PP	10	90
	B25PP	25	75
	B50PP	50	50
	M10PP	10	90
	M25PP	25	75
	M50PP	50	50
PEAD	PEAD 100	0	100
	B10PEAD	10	90
	B25PEAD	25	75
	B50PEAD	50	50
	M10PEAD	10	90
	M25PEAD	25	75
	M50PEAD	50	50

Para fabricação dos compósitos foi utilizado máquina extrusora, onde material foi inserido no funil de alimentação e através da gravidade, caiu sobre uma rosca que o transporta pelo cilindro aquecido por resistências elétricas a temperatura de fusão do polímero, parte do calor é provido pelo próprio atrito do material com as paredes do cilindro. Na extrusora o material passou por três zonas distintas, a zona de alimentação, de compressão e de dosagem.

A zona de alimentação possui sulcos profundos onde o material é aquecido próximo ao seu ponto de fusão. Na zona de compressão o comprimento dos sulcos de rosca do cilindro vai diminuindo progressivamente, causando uma maior compressão do material na parede do cilindro promovendo sua plastificação, e na zona de dosagem os sulcos da rosca são continuamente rasos, realizando assim a mistura do polímero com o resíduo e a manutenção da vazão através da pressão gerada.

A produção dos compósitos se deu em três etapas. Na primeira etapa, foram produzidos pellets dos plásticos com comprimento de 0,5 mm e então misturados com as fibras do resíduo. Na segunda etapa, a mistura plástico-

resíduo (Figura 3), foi extrudada utilizando em extrusora dupla rosca co-rotante (Thermo Scientific™ Process 11 Parallel Twin-Screw Extruder).



Figura 3. (A) - Pellets 100%PEAD; (B) - Pellets da mistura 25% macaúba 75% PEAD; (C) - Pellets 25% babaçu 75% PEAD. **Fonte:** Autora.

Foram produzidas um total de 12 amostras de cada tratamento, sendo seis do molde gravata, utilizados para o ensaio de tração, no tamanho médio de 62,3 mm de comprimento x 3,1 mm de largura x 3,3 mm de espessura, e outras seis no molde retangular, utilizados para os ensaios de dureza, densidade, absorção de água e DMA, com dimensões médias de 86,5 mm de comprimento x 12,4 mm de largura x 3,4 mm de espessura (Figura 4).

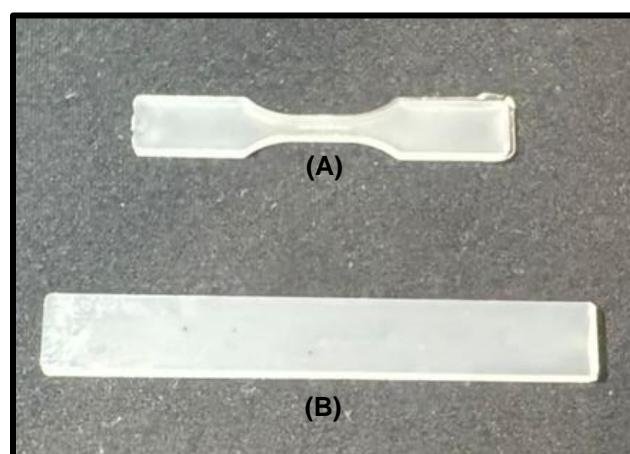


Figura 4. (A) - Amostras de PP injetados em molde gravata; (B) - Molde retangular. **Fonte:** Autora.

A confecção dos corpos de prova foi realizada utilizando uma injetora de sistema de moldagem por pistão de injeção (HAAKE™ MiniJet Pro). Os parâmetros utilizados para a injeção foram ajustados para cada formulação e a depender do molde utilizado (Tabela 2).

Tabela 2. Parâmetros de injeção para cada formulação e molde. Onde T_c = temperatura do cilindro; P_i = pressão de injeção; t_i = tempo de injeção; T_m = temperatura do molde; P_r = pressão de recalque e t_r = tempo de recalque.

Molde	Compósito	T_c (°C)	P_i (bar)	t_i (s)	T_m (°C)	P_r (bar)	t_r (s)
Retangular	PP100	190	300	5	50	250	15
	B10PP	190	300	5	50	250	15
	B25PP	195	300	5	50	250	15
	B50PP	200	300	5	50	250	15
	M10PP	190	300	5	50	200	15
	M25PP	195	300	5	50	250	15
	M50PP	200	300	5	50	200	15
	PEAD 100	160	250	5	50	200	15
	B10PEAD	160	250	5	50	200	15
	B25PEAD	160	275	5	50	220	15
Gravata	B50PEAD	165	300	5	50	250	15
	M10PEAD	160	300	5	50	250	15
	M25PEAD	160	300	5	50	250	15
	M50PEAD	165	300	5	50	250	15
	PP100	220	550	5	65	300	20
	B10PP	225	600	5	65	500	20
	B25PP	235	675	5	65	500	20
	B50PP	240	675	5	65	550	20
	M10PP	220	650	5	65	600	20
	M25PP	220	700	5	65	600	20
Gravata	M50PP	230	700	5	65	600	20
	PEAD 100	170	550	5	65	500	15
	B10PEAD	180	650	5	65	600	15
	B25PEAD	185	650	5	65	600	20
	B50PEAD	195	670	5	65	600	20
	M10PEAD	170	550	5	65	500	15
	M25PEAD	180	550	5	65	500	15
	M50PEAD	190	550	5	65	500	15

7.4 PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

7.4.1 Absorção em água

A determinação da taxa de absorção foi realizada em corpos de prova, previamente secos em estufa à 100ºC, que foram imersos em água, e pesados após 160 horas. Foram utilizados 6 corpos de prova, com dimensões médias de 43,2 mm de comprimento x 12,4 mm de largura x 3,4 mm de espessura (Figura 5).

A absorção em água foi calculada de acordo com a Equação 1:

$$AA = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

AA = Absorção em água (%);

M_1 = Massa úmida do corpo de prova (g);

M_2 = Massa seca do corpo de prova (g).

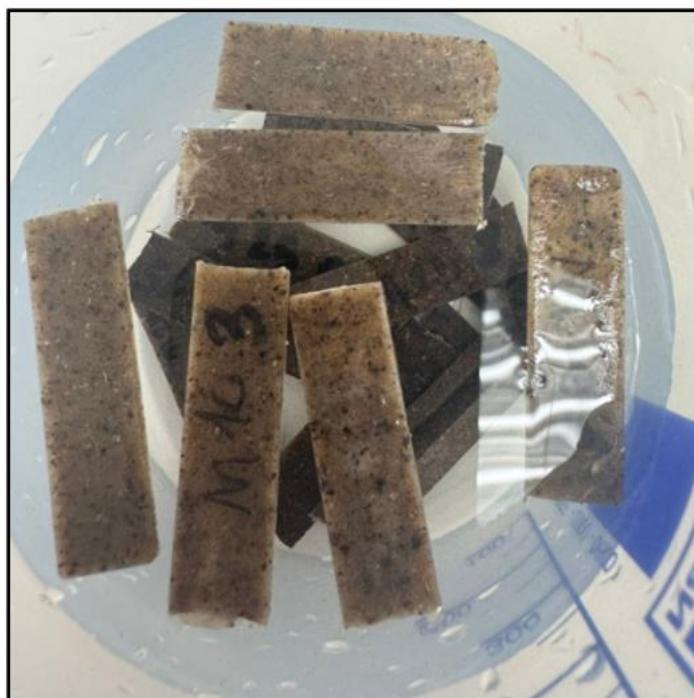


Figura 5. Amostras utilizadas para o ensaio de taxa de absorção de água. **Fonte:** Autora.

7.4.2 Densidade calculada

Para efeito de comparação, foram determinadas as densidades a granel das partículas de tamanho 40/60mesh do babaçu, macaúba, PP e PEAD (Equação 2), e com isso foi possível estimar a densidade do compósito a partir da média ponderada das densidades do material lignocelulósico e das matrizes poliméricas (Equação 3). A densidade calculada foi estimada para posterior cálculo de taxa de compactação, utilizando os resultados obtidos de densidade calculada e da densidade média obtida através do perfil de densidade longitudinal (Equação 4).

$$\rho_g = \frac{M}{V} \quad (2)$$

Onde:

ρ_g = Densidade a Granel (Kg/m³);

M = Massa do material (Kg);

V = Volume (m³).

$$\rho_c = \rho_m V_m + \rho_r V_r \quad (3)$$

Onde:

ρ_c = Densidade calculada (Kg/m³);

ρ_m = Densidade a granel da matriz polimérica (Kg/m³);

V_m = Proporção percentual da matriz polimérica utilizada no compósito;

ρ_r = Densidade a granel do resíduo (Kg/m³);

V_r = Proporção percentual do resíduo utilizado no compósito.

$$TC = \frac{\rho_c}{\rho_l} 100 \quad (4)$$

Onde:

TC = Taxa de compactação (%);

ρ_c = Densidade calculada (Kg/m³);

ρ_l = Densidade média do perfil longitudinal (Kg/m³).

7.4.3 Perfil de densidade longitudinal

Os perfis de densidade das amostras foram determinados usando o aparelho de varredura de densidade DAX6000 da GreCon Co Ltd. (Figura 6), que utiliza raios-x como fonte, e faz uma varredura da densidade ao longo do perfil do corpo de prova, demonstrando se o corpo prova está uniforme ao longo do seu comprimento. Foram medidos os perfis de dois compósitos de cada formulação.

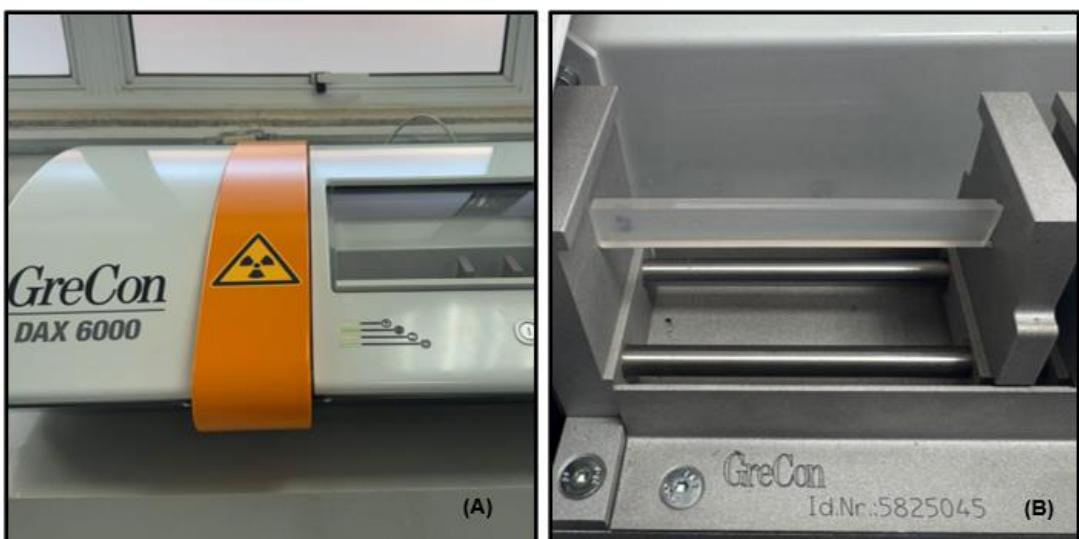


Figura 6. (A) - Aparelho DAX6000; **(B)** - Corpo de prova 100% PP durante a análise. **Fonte:** Autora.

7.4.4 Dureza Vickers

O ensaio de micro dureza Vickers foi realizado com equipamento Duran Scan EMCO TEST, no modo Vickers. A lupa foi ajustada para um aumento de 10x, conforme norma ASTM E384 com carga de 0,1 kgf (Figura 7). Foram medidos cinco pontos em cada uma das amostras. Foram utilizadas cinco amostras de cada tratamento.

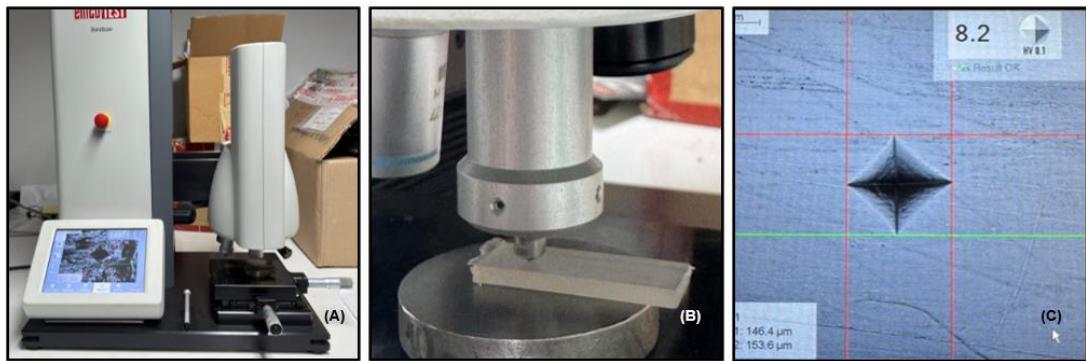


Figura 7. (A) - Equipamento Duran Scan; **(B)** - Durômetro Vickers; **(C)** - monitor de leitura da dureza. **Fonte:** Autora.

7.4.5 Resistencia e rigidez a tração

Os módulos de elasticidade, resistência à tração, percentual de deformação e comportamento da curva tensão-deformação, foram obtidos por meio do ensaio de tração. Os ensaios foram realizados no equipamento de servo-hidráulico MTS 810 Landmark, com célula de carga de 5 KN. A distância entre as garras foi de 40 mm, com taxa de deslocamento de 40 mm/min e pressão de 0,5 MPa, em temperatura média de 20 +/- 4 °C (Figura 8).



Figura 8. (A) - Equipamento MTS 810; **(B)** - Ensaio de tração em um corpo de prova 100% PP. **Fonte:** Autora.

O teste foi realizado em cinco amostras de cada tratamento, observando-se as normas da ASTM D638. As condições de umidade e temperatura seguiram as determinações estabelecidas na norma ASTM D618. A resistência à tração foi calculada conforme Equação 5:

$$\sigma_t = \frac{F}{A_0} \quad (5)$$

Onde:

σ_t = Resistência à tração (MPa);

F = Carga aplicada em (N);

A_0 = Área da seção transversal do corpo de prova (mm^2).

O módulo de elasticidade foi determinado pela Equação 6:

$$E_t = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (6)$$

Onde:

E_t = Módulo de elasticidade (MPa);

σ = Tensão (MPa);

ε = Deformação (%).

7.5 ANÁLISE MECÂNICA DINÂMICA (DMA)

As análises mecânicas dinâmicas foram conduzidas utilizando um analisador dinâmico-mecânico (Dynamic Mechanical Analyzer), modelo DMA-342E da NETZSCH Co. Ltd. Este equipamento aplica cargas oscilatórias de deformação ou tensão em regime senoidal, permitindo a determinação de três parâmetros fundamentais para a caracterização dos materiais testados: o módulo de armazenamento (E'), que reflete a capacidade do material de armazenar energia elástica; o módulo de perda (E''), que indica a dissipação de

energia em forma de calor; e o fator de perda ($\tan \delta$), calculado como a razão entre E'' e E' ($\tan \delta = E''/E'$), sendo uma medida da dissipação relativa de energia. Essas variáveis fornecem informações detalhadas sobre o comportamento viscoelástico dos materiais, contribuindo para a avaliação de suas propriedades mecânicas dinâmicas.

Para a realização da análise, foi utilizada uma amostra representativa de cada compósito, com dimensões de 50 mm de comprimento x 12,4 mm de largura e 3,4 mm de espessura. O ensaio foi conduzido no modo de flexão estática em três pontos (3-point bending), com um vão de apoio de 40 mm (Figura 9).

Os testes foram realizados em uma faixa de temperatura que variou de -15 °C a 140 °C para matriz PEAD e de -15 °C a 170 °C para matriz PP, utilizando uma taxa de aquecimento controlada de 1k/min. Durante o experimento, as cargas aplicadas foram geradas a uma frequência fixa de 1 Hz, permitindo uma avaliação precisa do comportamento viscoelástico dos compósitos ao longo da faixa térmica analisada.

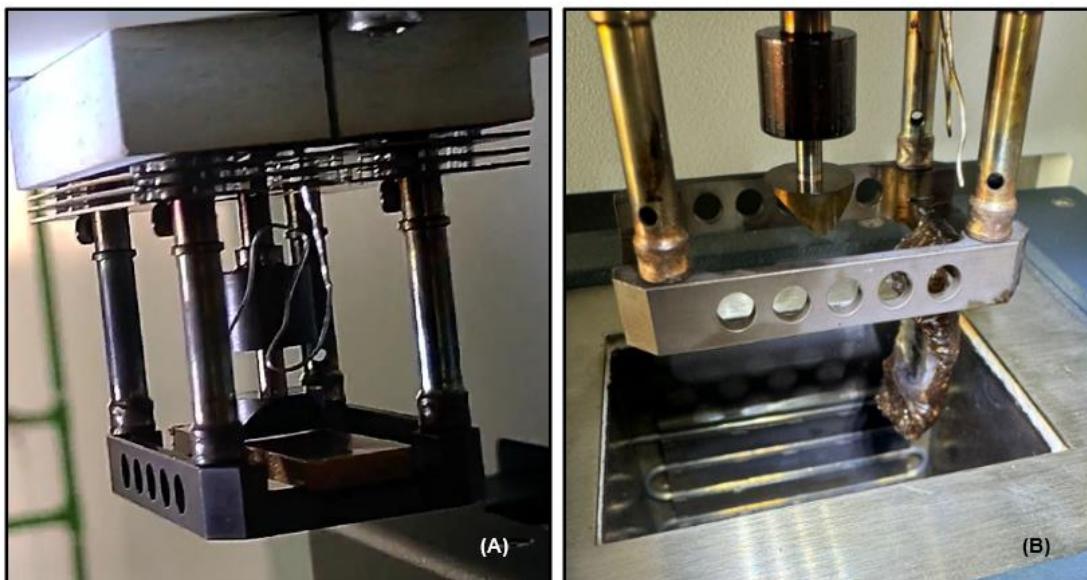


Figura 9. (A) - Corpo de prova no início da análise de DMA no 3-point bending; (B) - Corpo de prova no final da análise. **Fonte:** Autora.

7.6 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA / CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (TGA/DSC)

A caracterização térmica dos compósitos ocorreu por meio de análise termogravimétrica e calorimetria diferencial de varredura simultânea (TGA e DSC) em equipamento SDT Q600 da TA Instruments, no Laboratório de Análise Instrumental, FGA (UnB). Cerca de 10 a 15 mg de cada amostra, após extrusão e moagem, foram colocados em cadiños de alumina (Figura 10).

As amostras foram aquecidas desde a temperatura ambiente até 600 °C, com uma taxa de aquecimento de 10 °C por minuto, sob uma atmosfera de nitrogênio com fluxo de gás de 50 mL/min.



Figura 10. (A) - Equipamento SDT Q600; (B) - Cadiños com amostra. **Fonte:** Autora.

7.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Para avaliação da microscopia eletrônica de varredura foi utilizado o equipamento TM4000Plus da Hitachi (Figura 11), localizado no Laboratório de Anatomia da Madeira do LPF do Serviço Florestal Brasileiro, com o intuito de observar a morfologia da superfície e interna os compósitos foram quebrados em pequenos pedaços, a fim de analisar as faces através das rachaduras, com imagens de alta resolução em que foram observadas as ligações da matriz polimérica com as fibras. Foram obtidas imagens com aumento entre 100 e 700 vezes.

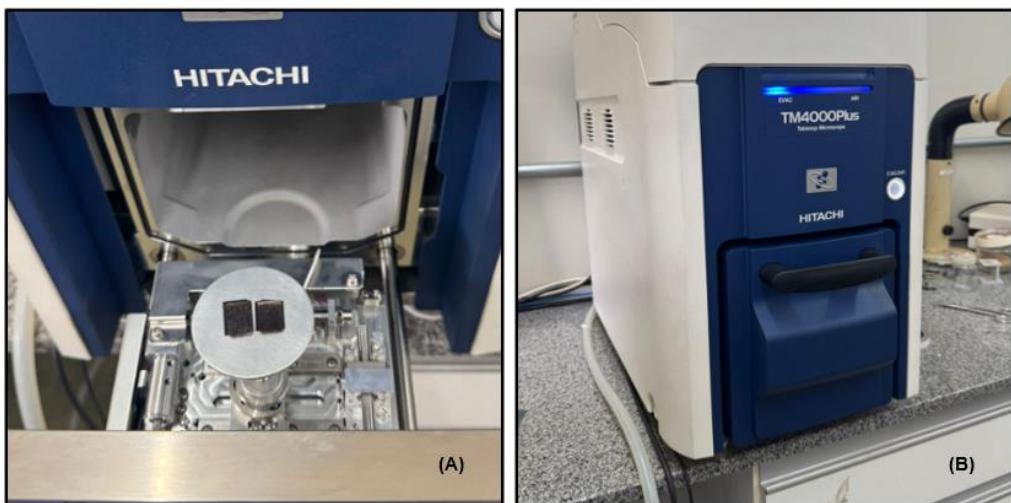


Figura 11. (A) - Equipamento TM4000Plus; (B) - Corpos de prova mostrando a superfície e a ponta quebrada. **Fonte:** Autora.

7.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado (DIC). Os dados preliminares passaram por diferentes análises, incluindo a descritiva (média e desvio padrão), seguida dos testes de normalidade (Shapiro-Wilk), e homogeneidade (Bartlett). Em seguida, foi aplicado o teste de Scott-Knott para comparação de médias das propriedades de todos os tratamentos. O teste de Dunnett foi feito para comparar par a par as propriedades do polímero isolado e cada um dos tratamentos com fibra, com o objetivo de identificar o efeito direto da adição das fibras. Foram também rodados modelos de regressão polinomial para a predição das propriedades médias dos compósitos em função da adição gradual das fibras. A equação de regressão selecionada foi correspondente à regressão significativa de mais alto grau ($p<0,05$). Para realização dos testes foi utilizado o SISVAR statistical software v. 5.6 (FERREIRA, 2014).

8. RESULTADOS E DISCUSSÃO

8.1 ABSORÇÃO EM ÁGUA

Os resultados da absorção em água dos compósitos fabricados a partir de fibras de macaúba demonstram suscetibilidade à absorção de água, com a diminuição da matriz polimérica presente nos compósitos. Na Tabela 3 verifica-se que os tratamentos com adição de 10 e 25% de fibras obtiveram resultados próximos, não diferindo estatisticamente entre si, no entanto conforme há um aumento da adição de fibras (50%), constata-se a elevação da absorção de água, algo já esperado, uma vez que a absorção de água é uma propriedade crítica a ser avaliada em compósitos de fibra vegetal e polipropileno (PP), especialmente quando esses materiais são projetados para aplicações sujeitas a condições ambientais adversas.

De maneira geral, a utilização de fibras vegetais adicionados a matriz PP ou PEAD aumentam significativamente a probabilidade de produzir materiais sustentáveis com boas características mecânicas, estruturais e térmicas, no entanto, apesar de inúmeros avanços na melhoria e desempenho desse material, sua suscetibilidade à umidade e absorção de água continuam sendo um desafio (GAPSARI et al., 2024).

A matriz polimérica, PP ou PEAD, funciona como um obstáculo para diminuir a absorção de umidade, evidenciado pelos valores obtidos nos tratamentos com 100% PP e PEAD e menores proporções de fibras (10 e 25%). Contudo, a interação entre as fibras e a matriz polimérica pode criar falhas na interface, possibilitando a entrada de água como em compósitos com mais de 50% de fibras, resultando em inchaço, deformação, diminuição da rigidez e diminuição de resistência mecânica.

Para compósitos produzidos a partir de fibra de babaçu e PP (Tabela 3), o tratamento com maior porcentagem de fibras, 50%, apresenta diferença estatística significativa entre os demais compósitos. Os tratamentos com 10 e 25% de adição de fibra ficaram próximos aos valores do tratamento 100% PP.

Tabela 3. Absorção de água em compósitos de PP e resíduo de macaúba e babaçu.

Tratamento	Absorção (%) – Macaúba	Absorção (%) - Babaçu
PP	0,0062 (a)	0,0062 (a)
10% Resíduo	1,6800* (b)	0,0130 ^{ns} (a)
25% Resíduo	1,9000* (b)	0,0202 ^{ns} (a)
50% Resíduo	5,3920* (c)	5,2920* (b)

Médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna não se diferenciam pelo teste de Scott-Knott a nível 5% de probabilidade. * Indica que houve diferença significativa e ^{ns} que não houve diferença significativa pelo teste Dunnett, a nível de 5% de probabilidade, na mesma coluna.

Nos compósitos produzidos com fibra de macaúba e PEAD (Tabela 4), o tratamento controle (100% PEAD), ficou abaixo dos tratamentos com fibra de macaúba, apresentando diferença estatística significativa. Por outro lado, os tratamentos com 10% e 25% de adição de fibras apresentaram desempenho considerado abaixo do encontrado na literatura para outros compósitos, com valores abaixo de 1,5%, quando comparados com adição de fibra de banana em diferentes matrizes juntamente com tratamentos químicos da fibra, em que os resultados mostraram valores acima de até 25% de absorção (PROME et al., 2025).

Nos compósitos produzidos com fibra de babaçu e PEAD (Tabela 4), o tratamento contendo 50% de fibras apresentou diferença estatisticamente significativa em relação aos demais compósitos. Por outro lado, os tratamentos com 10% e 25% de adição de fibras apresentaram desempenho similar aos valores observados no tratamento composto exclusivamente pelo polímero PEAD 100%.

Tabela 4. Absorção de água em compósitos de PEAD e resíduo de macaúba e babaçu

Tratamento	Absorção (%) - Macaúba	Absorção (%) – Babaçu
PEAD	0,0080 (a)	0,0080 (a)
10% Resíduo	0,6160* (b)	0,0130 ^{ns} (a)
25% Resíduo	1,1340* (b)	0,0142 ^{ns} (a)
50% Resíduo	2,3300* (c)	4,8320* (b)

Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não se diferenciam pelo teste de Scott-Knott a nível 5% de probabilidade. * Indica que houve diferença significativa e ^{ns} que não houve diferença significativa pelo teste Dunnett, a nível de 5% de probabilidade, na mesma coluna.

Ao comparar os resultados obtidos para os compósitos reforçados com fibras de babaçu e macaúba com estudos semelhantes realizados utilizando

fibras de sumaúma, que apresentaram uma média de absorção de água de 3,63% com 30% de fibras (GAPSARI et al., 2024), constata-se que os desempenhos dos compósitos analisados são satisfatórios, especialmente para formulações contendo até 25% de fibras. Em estudos com diferentes tratamentos químicos em fibras de banana e juncos na fabricação de compósitos, valores de absorção ficaram entre 3,5 e 6% (PROME et al., 2025), evidenciando bons resultados obtidos inclusive no tratamento com 50% de fibras de macaúba e babaçu com ambos os polímeros.

Essa avaliação ressalta a viabilidade técnica dos materiais estudados, indicando um bom equilíbrio entre resistência à absorção de água e o teor de fibra utilizado, o que é essencial para a manutenção das propriedades mecânicas e a durabilidade dos compósitos em condições ambientais adversas.

A análise de regressão (Figura 12) foi significativa para as variáveis que apresentaram significância na ANOVA, sendo os modelos de maiores valores de R^2 os lineares positivos, para absorção em água, de todos os tratamentos.

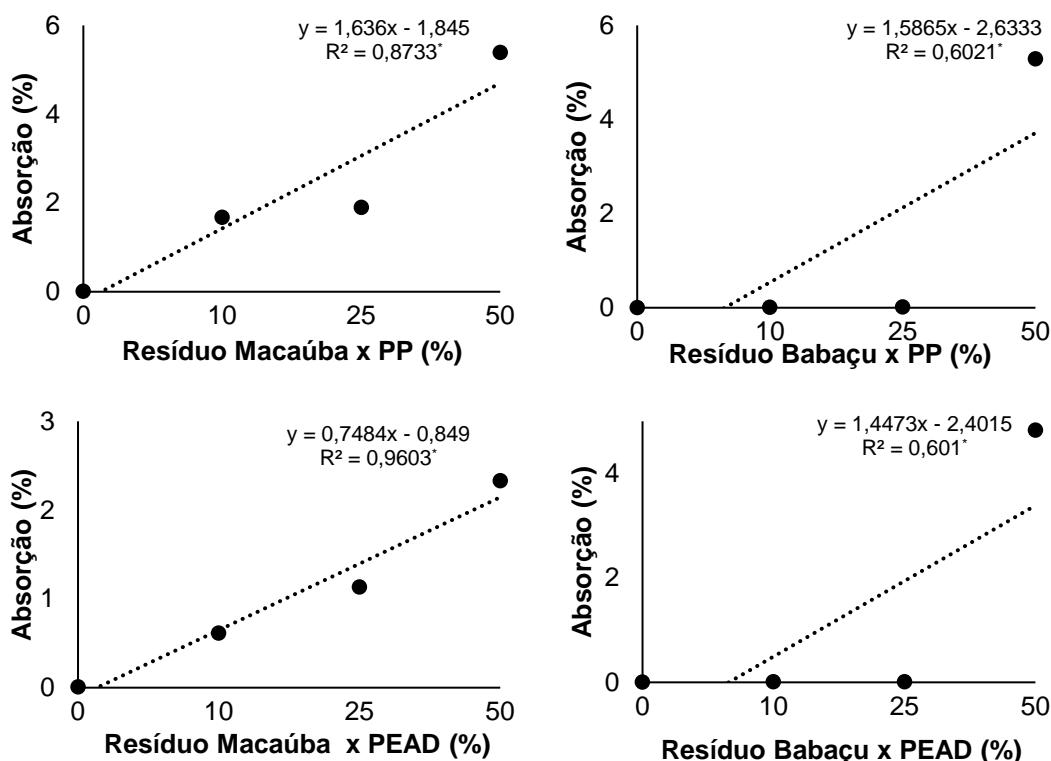


Figura 12. Comportamento das variáveis de absorção em água em compósitos produzidos a partir resíduos de frutos de macaúba e babaçu com PP e PEAD. R^2 = coeficiente de determinação. * Indica que houve diferença significativa

8.2 DENSIDADE ESTIMADA E AVALIAÇÃO DO PERFIL DE DENSIDADE LONGITUDINAL

As densidades a granel encontradas foram de 859,16 kg/m³ para o PP100, de 943,91 kg/m³ para o PEAD100, 1066,50 kg/m³ para o resíduo de babaçu e de 989,30 kg/m³ para o resíduo de macaúba.

Os resultados da estimativa da densidade dos compósitos apresentados na Tabela 5, demonstram que as estimativas de densidade dos compósitos de macaúba e babaçu são maiores que as densidades a granel obtidas para os plásticos puros.

Tabela 5. Densidade calculada dos compósitos a partir de fibras de macaúba e babaçu.

Tratamento	Densidade média estimada (kg/m ³)
PP100	859,16
M10PP	872,17
M25PP	891,70
M50PP	924,23
PEAD100	943,91
M10PEAD	948,45
M25PEAD	955,26
M50PEAD	966,61
PP100	859,16
B10PP	879,89
B25PP	911,00
B50PP	962,83
PEAD100	943,91
B10PEAD	956,17
B25PEAD	974,56
B50PEAD	1005,21

Os resultados da densidade média dos compósitos, obtidos através da análise de perfil de densidade, apresentados nas Tabelas 6 e 7 indicam um aumento proporcional conforme há a elevação do teor de resíduos incorporados. Esse comportamento reflete a influência direta da adição de resíduos na composição do material, evidenciando uma correlação positiva entre a densidade do compósito e a quantidade de resíduos utilizados.

Tabela 6. Densidade média, obtida no densitômetro, dos compósitos a partir de fibras de macaúba.

Tratamento	Densidade média (kg/m ³)
PP100	830,85
M10PP	881,70
M25PP	923,07
M50PP	1011,18
PEAD100	867,60
M10PEAD	898,84
M25PEAD	926,29
M50PEAD	1039,86

À medida que a porcentagem de fibras aumenta, ocorre um incremento em sua densidade, o que está diretamente relacionado às propriedades mecânicas do material. Esse aumento na densidade contribui significativamente para o aprimoramento do desempenho mecânico dos compósitos. Com a adição de fibras de frutos palmeiras, observa-se uma elevação na densidade, que registrou um aumento de até 18% em relação à densidade dos tratamentos com 100% polímeros (PP e PEAD).

Essa relação evidencia a importância da densidade como fator determinante para a melhoria das propriedades estruturais dos materiais compostos (BEG; PICKERING; GAUSS, 2023; CRUZ et al., 2023; LIU; TISSERAT, 2018; PICKERING; EFENDY; LE, 2016; SHEEBA et al., 2023; WENG et al., 2024; YANG et al., 2024a).

Tabela 7. Densidade média, obtida no densitômetro, dos compósitos a partir de fibras de babaçu.

Tratamento	Densidade média (kg/m ³)
PP100	830,85
B10PP	865,24
B25PP	918,56
B50PP	991,40
PEAD100	867,60
B10PEAD	909,61
B25PEAD	970,61
B50PEAD	1018,66

O perfil de densidade longitudinal foi feito ao longo do comprimento total das amostras. A densidade média dos perfis dos compósitos variou entre 830,85

e 1039,86 kg/m³. A análise demonstrou que não há variações expressivas na densidade ao longo do comprimento dos compósitos, o que indica que houve uma boa homogeneização entre o resíduo e o plástico. A Figura 13 mostra um exemplo de um perfil de densidade dos compósitos, os outros perfis encontram-se no apêndice A.

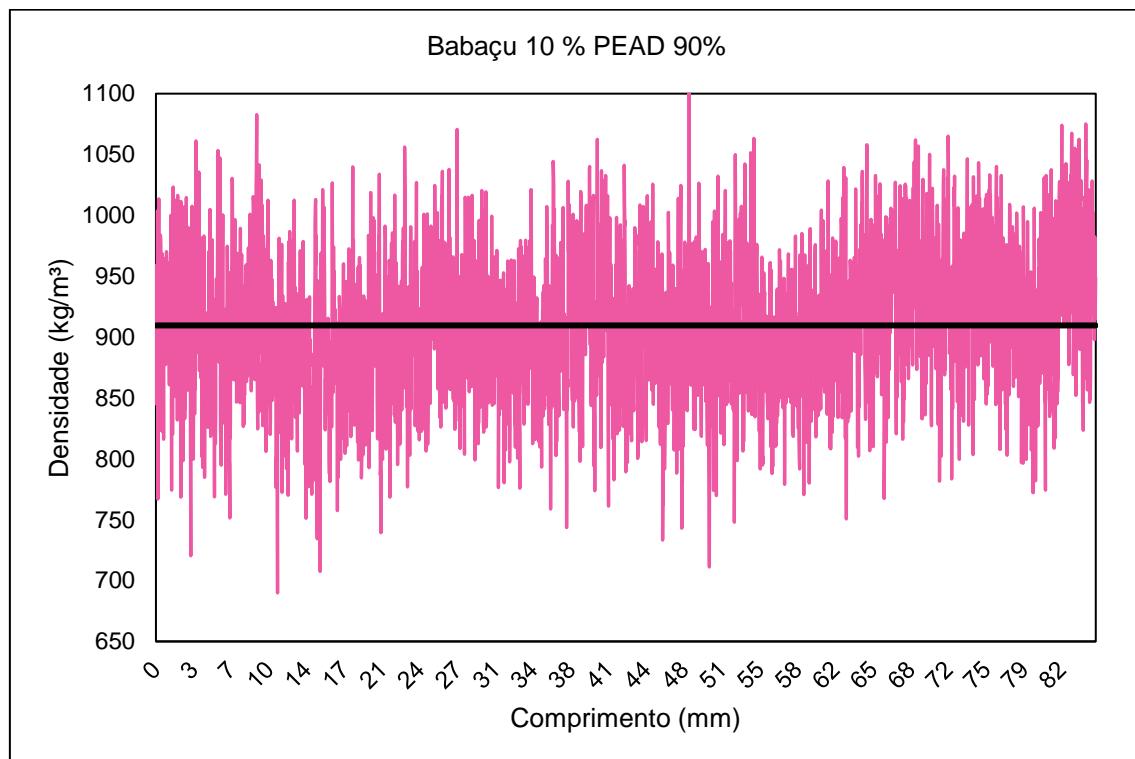


Figura 13. Perfil de densidade compósitos Babaçu 10% e PEAD 90%.

Para efeito de comparação foi obtida a taxa de compactação dos compósitos, dividindo a densidade obtida através do perfil de densidade pela densidade calculada (Tabela 8). As taxas de compactação dos compósitos apresentaram resultados, de maneira geral, com valores próximos, indicando a uma compactação parecida em todos os tratamentos.

Na madeira, taxas de compactação acima de 1 indicam, normalmente, que as resistências físicas e mecânicas dos materiais vão ser aprimoradas, no caso dos compósitos de babaçu e macaúba esse comportamento não ocorreu necessariamente.

Tabela 8. Taxa de compactação dos compósitos de macaúba e babaçu.

Tratamento	Taxa de Compactação
M10PP	1,01
M25PP	1,04
M50PP	1,09
M10PEAD	0,95
M25PEAD	0,97
M50PEAD	1,08
B10PP	0,98
B25PP	1,01
B50PP	1,03
B10PEAD	0,95
B25PEAD	1,00
B50PEAD	1,01

8.3 DUREZA VICKERS

A dureza Vickers (HV) é uma medida de resistência de um material à deformação plástica permanente causada pela aplicação de uma carga, que foi desenvolvida em 1921 por Smith e Sandland no Reino Unido. A principal finalidade do teste é avaliar a resistência à deformação do material a ser analisado, com o objetivo de auxiliar na seleção de aplicações específicas, tais como pisos, móveis, construção, carpintaria entre outros.

Os resultados obtidos no ensaio de dureza Vickers para compósitos produzidos a partir de fibra de macaúba (Tabela 8), demonstram que não houve diferença estatística significativa entre os compósitos. O tratamento com 10% de fibra ficou com 9,12 HV, seguido do tratamento sem adição de fibras (100% PP) com 8,66 HV.

Tabela 8. Dureza Vickers dos compósitos de PP e resíduo de macaúba e babaçu.

Tratamento	Dureza (HV) Macaúba	Dureza (HV) Babaçu
PP	8,66 (a)	8,66 (b)
10% Resíduo	9,12 ^{ns} (a)	9,46* (a)
25% Resíduo	8,64 ^{ns} (a)	9,48* (a)
50% Resíduo	8,61 ^{ns} (a)	8,94 ^{ns} (b)

Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não se diferenciam pelo teste de Scott-Knott a nível 5% de probabilidade. * Indica que houve diferença significativa e ^{ns} que não houve diferença significativa pelo teste Dunnett, a nível de 5% de probabilidade, na mesma coluna.

Inúmeros fatores afetam as características mecânicas dos compósitos, incluindo a disposição, o tamanho e a proporção volumétrica das partículas de reforço, bem como o refinamento e granulometria da matriz (YANG et al., 2024b).

Os valores de dureza obtidos para macaúba/PP não diferiram estatisticamente do plástico puro, esse comportamento pode ser justificado pelo fato de que os compósitos sofrem problemas com dispersão desuniforme de cargas, porosidade e distribuição não homogênea, impactando negativamente na dureza. Ao contrário do PP puro, que mantém uma estrutura consistente e homogênea, a presença de vazios e distribuição irregular de cargas nos compósitos leva a uma ligação interfacial mais fraca e menor dureza geral (GRAYSON, 1983; MUSA, 2014; SHEIKH et al., 2025)

Por outro lado, os resultados obtidos no ensaio de dureza Vickers para compósitos a partir de fibra de babaçu (Tabela 8), demonstram diferença estatística significativa entre os compósitos. Os tratamentos com 25 e 10% foram superiores aos demais com 9,48 e 9,46 HV respectivamente, seguido do tratamento com adição de 50% de fibras de babaçu e 100% PP com 8,94 e 8,66 HV respectivamente.

Os resultados da dureza Vickers, tanto para os compósitos produzidos a partir da fibra de macaúba quanto de babaçu corroboram com resultados encontrados na fabricação de compósitos de polipropileno e adição de casca de noz macadâmia, com dureza média de 10,23 e 9,54 HV para porcentagens de 25 e 15% respectivamente (MENDES, 2019).

Os resultados obtidos no ensaio de dureza para o tratamento PEAD e resíduo de macaúba (Tabela 9), demonstram diferença estatística significativa entre os compósitos. O corpo de prova 100% PEAD obteve dureza superior aos demais (5,93 HV), seguido pelo tratamento com adição de 25% de fibras de macaúba (5,13 HV),

Tabela 9. Dureza Vickers dos compósitos de PEAD e resíduo de macaúba e babaçu.

Tratamento	Dureza (HV) Macaúba	Dureza (HV) Babaçu
PEAD	5,93 (a)	5,93 (a)
10% Resíduo	5,11* (b)	4,36* (c)
25% Resíduo	5,13* (b)	4,72* (c)
50% Resíduo	4,56* (b)	5,11* (b)

Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não se diferenciam pelo teste de Scott-Knott a nível 5% de probabilidade. * Indica que houve diferença significativa e ns que não houve diferença significativa pelo teste Dunnett a nível de 5% de probabilidade na mesma coluna.

Os resultados obtidos no ensaio de dureza para compósitos com fibra de babaçu e PEAD (Tabela 9), demonstram diferença estatística significativa. O tratamento 100% PEAD obteve dureza superior aos demais (5,93 HV), seguido pelo tratamento com adição de 50% de fibras de babaçu (5,11 HV), entretanto, cabe destacar que os compósitos, com 25% e 10% de fibra em sua composição, obtiveram valores considerados dentro do esperado, corroborando com valores de Dornelles (2024) que encontrou médias entre 4,1 e 5,5 HV em experimentos com compósitos de PEAD e resíduo de madeira de marcenaria, com porcentagens de 10 e 30% de resíduo e 100% PEAD.

A análise de regressão (Figura 14) foi significativa para a Dureza em resíduo de Babaçu x PP, Macaúba x PEAD e Babaçu x PEAD, apresentando p-valor menor que 5% de significância, conforme análise de variância (ANOVA), sendo os modelos de maiores valores de R^2 : quadrático positivo para Babaçu x PP, linear negativo para Macaúba x PEAD e quadrático negativo para Babaçu x PEAD. A variável de Dureza para os tratamentos com resíduo de Macaúba x PP apresentou p-valor maior que 5% de significância.

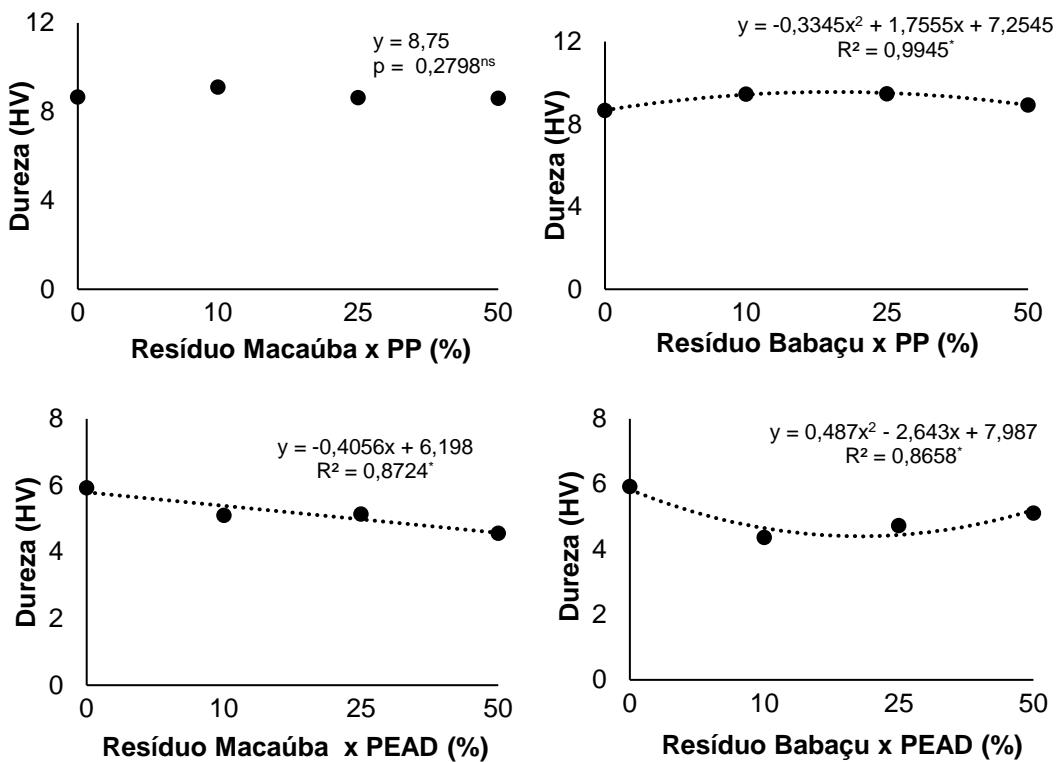


Figura 14. Comportamento das variáveis de dureza em compósitos produzidos a partir resíduos de frutos de macaúba e babaçu com PP e PEAD. R^2 = coeficiente de determinação. * Indica que houve diferença significativa e ns que não houve diferença significativa a nível de 5% de probabilidade.

Em linhas gerais, a dureza de um compósito pode ser reduzida ao aumentar a proporção de fibra natural, contudo, isso depende de diversos elementos, tais como o tipo de fibra, a matriz do compósito, o método de produção e a compatibilidade entre a fibra e a matriz.

Ao desenvolver compósitos com matriz polimérica reforçada com fibra natural de sementes de borassus, com diferentes volumes, Ramanaiah (2012) observou que a dureza dos compósitos diminuiu com o aumento do teor de fibras. Isso pode acontecer porque fibras naturais, tais como sisal, juta, coco e outras, costumam ser menos duras e rígidas em relação a fibras sintéticas (como vidro, carbono etc.).

8.4 TRAÇÃO

Os resultados referentes ao módulo de elasticidade (E_t) e resistência à tração (σ_t) dos compósitos fabricados a partir da adição de fibras de macaúba,

em porcentagens de 10, 25 e 50% com matriz PP (Tabela 10) demonstraram que conforme há um aumento na porcentagem das fibras o Et se eleva e, a σ_t reduz.

Para o Et, os tratamentos com fibras são estatisticamente superiores ao 100% PP. Já para a resistência à tração, o corpo de prova confeccionado com 100% PP é superior estatisticamente (41,98 MPa) aos demais, seguido dos compósitos com adição de 10, 25 e 50% com valores de 37,42; 36,33 e 27,10 MPa respectivamente.

Tabela 10. Modo de elasticidade (Et) e resistência a tração (σ_t) dos compósitos de PP e resíduo de macaúba.

Tratamento	Et (MPa)	σ_t (MPa)	Deformação (%)
PP	1981,54 (b)	41,98 (a)	18,45
10% Resíduo	2562,83* (a)	37,42* (b)	4,99
25% Resíduo	2560,84* (a)	36,33* (b)	4,22
50% Resíduo	2754,38* (a)	27,10* (c)	2,87

Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não se diferenciam pelo teste de Scott-Knott a nível 5% de probabilidade. * Indica que houve diferença significativa e ns que não houve diferença significativa pelo teste Dunnett, a nível de 5% de probabilidade, na mesma coluna.

Os resultados referentes ao Et e σ_t dos compósitos fabricados a partir da adição de fibras de Babaçu, quando comparados ao tratamento 100% PP, demonstram que o Et aumenta conforme há um incremento na adição de 50% fibras. A tração não foi afetada com adição de 10 e 25% de fibras, quando comparada ao tratamento 100% PP, no entanto a adição de 50%, apresentou diferença significativa ficando em 24,04 MPa, cerca de 52% abaixo do tratamento com 10% de adição de fibras que obteve 44,6 MPa.

Os resultados do Et, de ambos os resíduos e matrizes poliméricas, apresentam-se próximos de outros resultados da literatura, conforme Talbatti, 2017, que ao estudarem o modo de elasticidade de compósitos fabricados a partir de resíduo de *Pinus elliottii*, *Hovenia dulcis* e *Maclura tinctoria* e poliestireno, na proporção 50/50%, encontraram valores entre 1390,87, 2042,52 e 1685,76 MPa respectivamente.

Estudos análogos demonstram que as propriedades mecânicas são significativamente afetadas por vazios e dispersão não uniformes das fibras. De maneira geral, os vazios aumentam potencialmente a permeabilidade do compósito, o que degrada a resistência de ligação interfacial (BARIŞ

VATANDAŞ et al., 2023; LI et al., 2024; LIU et al., 2006; MEHDIKHANI et al., 2019; MUSA, 2014; SEO; NINH, 2004; SHEIKH et al., 2025; WANG et al., 2024).

Embora a adição em menores porcentagens de fibras de macaúba e babaçu tenham apresentado resultados satisfatórios para resistência à tração, somente o tratamento com adição de 10% de resíduo de babaçu conseguiu superar o PP puro. Isso pode ser atribuído a vários fatores, incluindo a presença de vazios através do uso partículas em maior quantidade, que acabam enfraquecendo o material, além da dispersão desuniforme e baixa ligação interfacial entre o resíduo e a matriz (LI et al., 2024; LIU et al., 2006; SAENZ-CASTILLO et al., 2019).

Tabela 11. Modo de elasticidade (Et) e resistência a tração (σ_t) dos compósitos de PP e resíduo de babaçu.

Tratamento	Et (MPa)	σ_t (MPa)	Deformação (%)
PP	1981,54 (b)	41,98 (a)	18,45
10% Resíduo	2110,06 ^{ns} (b)	44,60 ^{ns} (a)	7,27
25% Resíduo	2188,82 ^{ns} (b)	41,85 ^{ns} (a)	5,44
50% Resíduo	2740,38* (a)	24,04* (b)	2,64

Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não se diferenciam pelo teste de Scott-Knott a nível 5% de probabilidade. * Indica que houve diferença significativa e ^{ns} que não houve diferença significativa pelo teste Dunnett a nível de 5% de probabilidade na mesma coluna.

A adição das fibras de macaúba em compósitos com matriz PEAD (Tabela 12) demonstram através da análise estatística, que o módulo de elasticidade foi superior na adição de 10 e 25% de fibras de Macaúba juntamente com PEAD, apresentando valores acima de 1560 MPa. Por outro lado, a resistência a tração foi menor nos tratamentos com adição de fibras, em comparação ao tratamento com 100% PEAD. Ao relacionar os resultados a outros estudos, pode-se constatar que a resistência ficou acima de WPC's, confeccionados com polietileno reciclado e partículas de madeira de reflorestamento, na porção 50/50%, que obtiveram medias de 14,8 MPa (REDIGHIERI; COSTA, 2008).

Tabela 12. Modo de elasticidade (Et) e resistência a tração (σt) dos compósitos de PEAD e resíduo de macaúba.

Tratamento	Et (MPa)	σt (MPa)	Deformação (%)
PEAD	1137,01 (b)	42,09 (a)	14,27
10% Resíduo	1877,72* (a)	36,45* (b)	4,75
25% Resíduo	1562,14* (a)	31,22* (c)	4,81
50% Resíduo	1042,02 ^{ns} (b)	23,05* (d)	4,75

Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não se diferenciam pelo teste de Scott-Knott a nível 5% de probabilidade. * Indica que houve diferença significativa pelo teste Dunnett a nível de 5% de probabilidade na mesma coluna.

Os compósitos com matriz PEAD com fibras de babaçu (Tabela 13), demonstraram através da análise estatística que o módulo de elasticidade foi superior na adição de 10 e 25% de fibras de Macaúba juntamente com PEAD, apresentando valores acima de 1560 MPa. A resistência a tração foi menor nos tratamentos em que houve adição de material fibroso quando comparadas ao tratamento com 100% PEAD. Entretanto, ao serem confrontados com estudos, em moldes análogos, demonstram resistência acima de WPC's com polietileno e resíduos de flores de *Samanea saman* (AYYANAR et al., 2024).

A resistência à tração dos compósitos PEAD e diferentes porcentagens de peso 0, 10, 20, 30 e 40% de *Samanea saman* mostrou resultados máximos de 23,5 MPa no com 30% de resíduos (AYYANAR et al., 2024), enquanto a adição de fibras de babaçu apresentou 26,64 MPa, sendo considerado correlato.

Tabela 13. Modo de elasticidade (Et) e resistência a tração (σt) dos compósitos de PEAD e resíduo de babaçu.

Tratamento	Et (MPa)	σt (MPa)	Deformação (%)
PEAD	1137,01 (c)	42,09 (a)	14,27
10%	2318,10* (a)	30,76* (b)	4,14
25%	2472,06* (a)	26,64* (c)	2,87
50%	1811,40* (b)	19,37* (d)	2,52

Médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não se diferenciam pelo teste de Scott-Knott a nível 5% de probabilidade. * Indica que houve diferença significativa pelo teste Dunnett a nível de 5% de probabilidade na mesma coluna.

Através da análise de regressão (Figura 15), verifica-se que todos os as equações foram significativas, sendo os modelos de maiores valores de R² os lineares negativos para tração de compósitos confeccionados com resíduo de

macaúba x PP, macaúba x PEAD e babaçu x PEAD. Já para tração do compósito babaçu x PP nota-se o comportamento quadrático positivo.

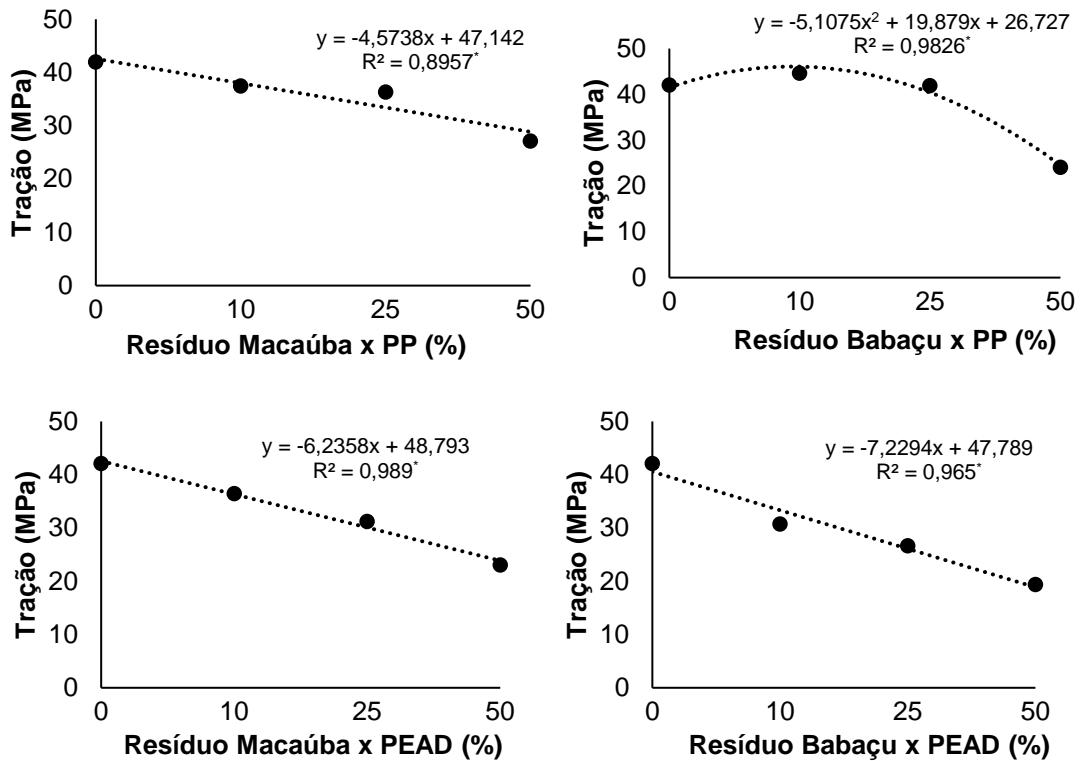


Figura 15. Comportamento das variáveis de tração em compósitos produzidos a partir resíduos de frutos de macaúba e babaçu com PP e PEAD. R^2 = coeficiente de determinação. * Indica que houve diferença significativa.

A análise de regressão (Figura 16), demonstra que todos as equações apresentaram significância, sendo os modelos de maiores valores de R^2 os lineares negativos para o modo de elasticidade de compósitos confeccionados com resíduo de macaúba x PP e babaçu x PP, e quadrático positivo macaúba x PEAD e babaçu x PEAD.

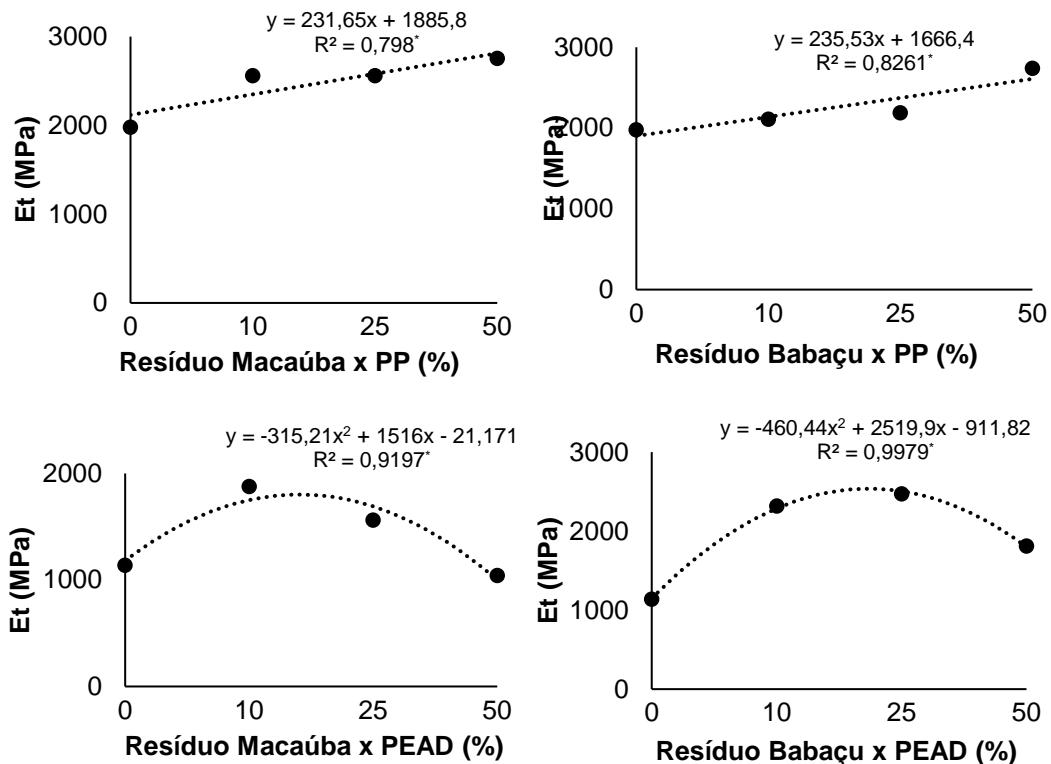


Figura 16. Comportamento das variáveis do modo de elasticidade (Et) em compósitos produzidos a partir resíduos de frutos de macaúba e babaçu com PP e PEAD. R^2 = coeficiente de determinação. * Indica que houve diferença significativa.

Na Tabela 14 é possível observar o comportamento geral dos resíduos de babaçu e macaúba adicionados nas matrizes poliméricas de PP e PEAD em que o modulo de elasticidade foi melhor na maioria dos compósitos. Quanto a resistência a tração, existiu uma queda para quase todos os compósitos. Os compósitos com babaçu obtiveram uma maior dureza, tanto com PP quanto com PEAD. Quanto a macaúba observa-se uma tendência a queda e a não diferença estatística em relação as duas matrizes poliméricas.

Tabela 14. Tabela de tendência dos resultados de modulo de elasticidade, resistência a tração e dureza conforme a adição dos resíduos de macaúba e babaçu.

Compósito	Et (MPa)	σ _t (MPa)	Dureza (HV)	E'
B10PP	↔	↔	↑	↑
B25PP	↔	↔	↑	↑
B50PP	↑	↓	↔	↑
M10PP	↑	↓	↔	↑
M25PP	↑	↓	↔	↑
M50PP	↑	↓↓	↔	↑
B10PEAD	↑	↓	↑	↑
B25PEAD	↑	↓↓	↑	↑
B50PEAD	↑	↓↓↓	↑↑	↑
M10PEAD	↑	↓	↓	↑
M25PEAD	↑	↓↓	↓	↑
M50PEAD	↔	↓↓↓	↓	↑

Valores que mantiveram comportamento semelhante ao PP e PEAD puro apresentam o símbolo ↔

↔ Valores maiores ↑ e valores menores com ↓. A variação na quantidade dos símbolos representa a diferença estatística entre eles.

Os compósitos de babaçu com PP apresentaram resultados mais parecidos com a matriz polimérica. No tratamento B10PP ocorreu somente um aumento na dureza do compósito, o mesmo ocorre para B25PP, já no tratamento B50PP ocorreu um aumento na rigidez do material e uma maior resistência a tração. Já os compósitos de macaúba com PP apresentaram uma maior rigidez em todos os tratamentos, menor resistência a tração conforme o aumento das partículas lignocelulósicas presentes nos compósitos e uma dureza semelhante ao PP.

Os compósitos de matriz polimérica PEAD com babaçu apresentaram os melhores resultados entre os tratamentos, com maior rigidez e dureza para todos os compósitos. A macaúba misturada com o PEAD apresentou um aumento apenas na rigidez dos tratamentos M10PEAD e M25PEAD, enquanto as outras propriedades diminuíram com a adição do material lignocelulósico nos compósitos.

8.5 ANÁLISE MECÂNICA DINÂMICA (DMA)

O DMA é uma ferramenta utilizada para caracterização mecânica dos materiais devido à sua elevada sensibilidade às mudanças estruturais, incluindo as interações entre as fibras e a matriz (CORREA-AGUIRRE et al., 2020).

A Análise Mecânica Dinâmica foi empregada para caracterizar as propriedades mecânicas e viscoelásticas dos compostos. Essa técnica avalia a resposta do material a uma carga oscilatória que varia de frequência, acompanhada por um aumento gradual de temperatura. Para fins de comparações entre as propriedades dos compósitos de babaçu e macaúba foi analisado o comportamento dos plásticos puros.

As Figuras 17 a 20 apresentam o comportamento do módulo de armazenamento (E') dos compósitos comparados com os polímeros puros.

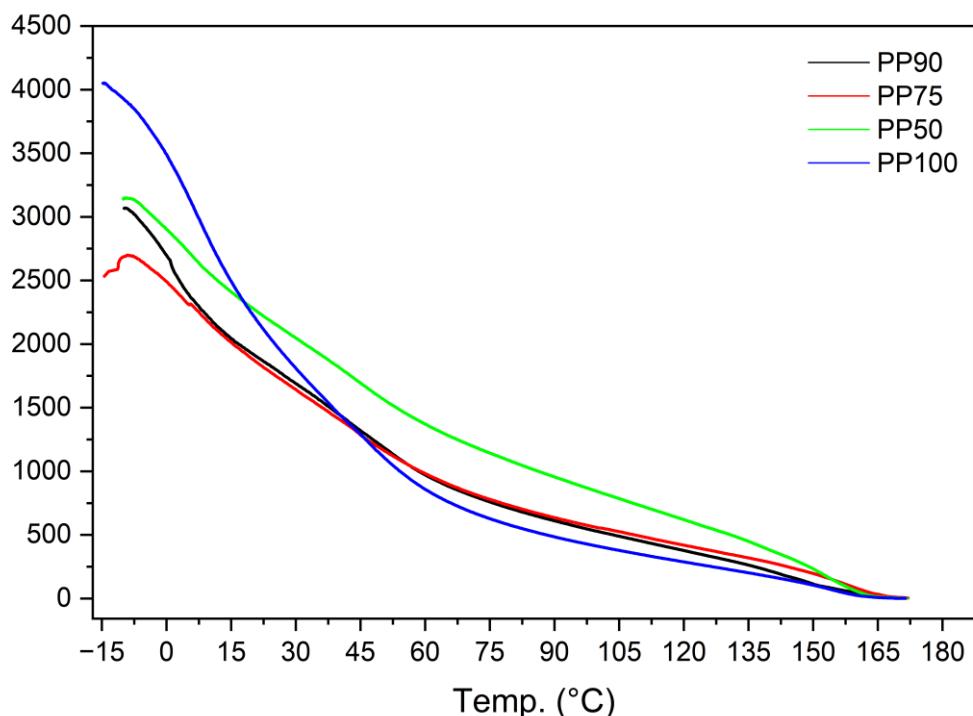


Figura 17. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de macaúba e PP.

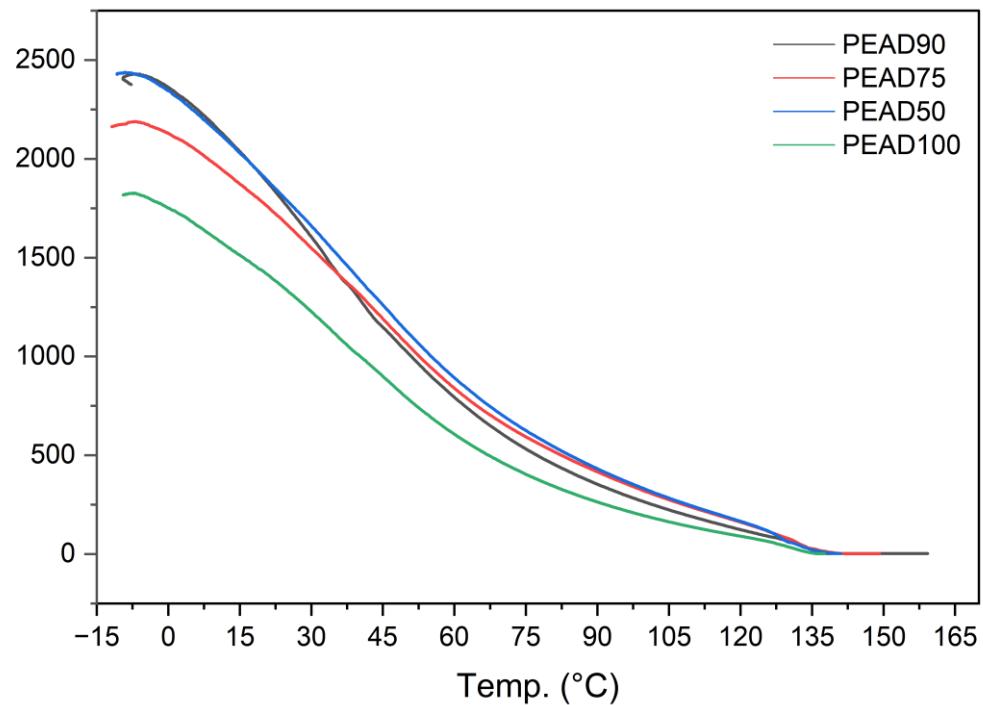


Figura 18. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de macaúba e PEAD.

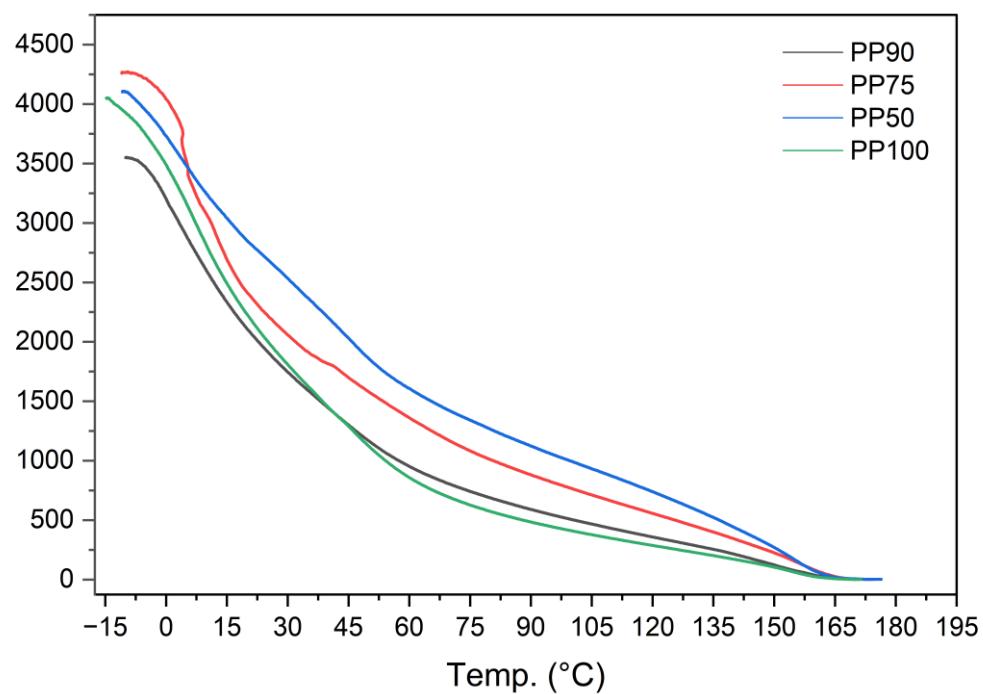


Figura 19. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de babaçu e PP.

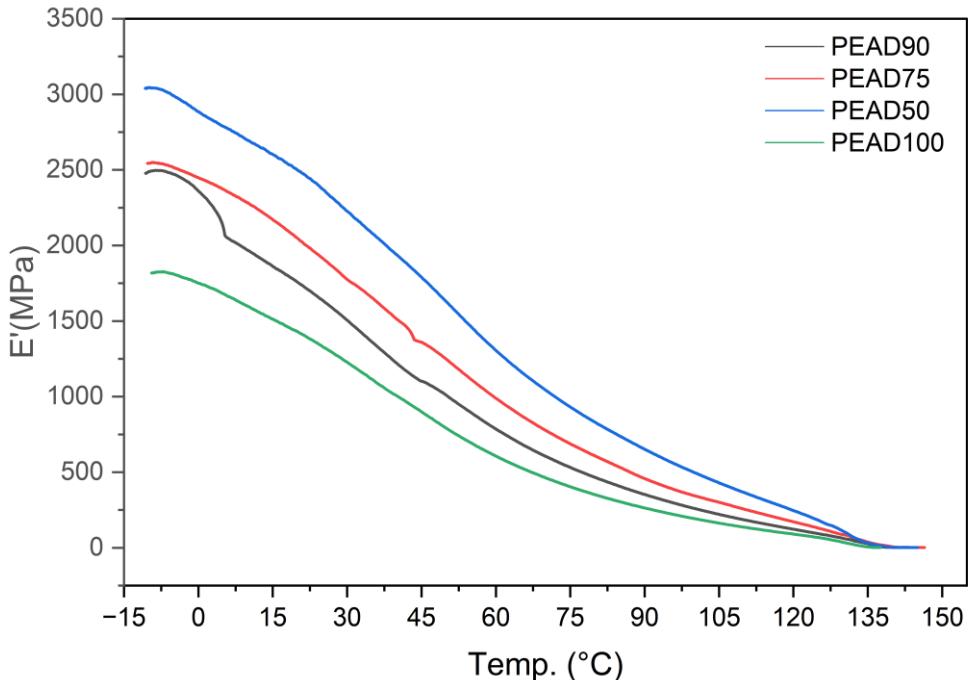


Figura 20. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de babaçu e PEAD.

De maneira geral, o comportamento do módulo de armazenamento de todos os materiais diminui com o aumento da temperatura, o que é esperado para materiais plásticos. Quanto maior a quantidade de material lignocelulósico nos compósitos, maior será o valor de E' , pois quanto maior a presença desse material, mais o comportamento do compósito se aproxima do material puro, sem a matriz polimérica. Isso indica que o compósito se torna mais rígido e menos elástico.

A região vítreia dos compósitos é encontrada entre -15°C e 10°C , que é caracterizada pela faixa de temperatura em que os compósitos apresentam uma maior rigidez, independente da sua formulação, isso se dá devido a não mobilidade das cadeias poliméricas.

Já nas faixas de 10°C a 125°C para PEAD e de 10°C a 150°C para PP, ocorre uma diminuição do modulo de armazenamento, isso acontece porque devido ao aumento da temperatura as moléculas começam a sofrer atrito nas cadeias poliméricas, e os compósitos passam de um estado rígido e vítreo para um estado mais flexível e emborrachado, alterando drasticamente as propriedades mecânicas do compósito.

Após essa temperatura os compósitos entram em uma região chamada de região de platô emborrachado, onde os compósitos tornam-se completamente flexíveis e elásticos assumindo um comportamento emborrachado, porém o material ainda oferece uma resistência ao estiramento.

Nas figuras apresentadas no apêndice C, observa-se que a incorporação de fibras naturais aumenta a rigidez do compósito, desempenhando um papel crucial na melhoria das propriedades mecânicas do WPC. De maneira geral, os compósitos que contêm resíduos de palmeiras resultaram em um aumento significativo no valor de $\tan \delta$. Esse aumento pode ser atribuído ao atrito entre as partículas de madeira aglutinadas dentro do compósito e/ou ao atrito entre a madeira e a matriz polimérica, especialmente quando há uma ligação inadequada entre esses materiais.

Em termos simplificados, materiais com valores mais baixos de $\tan \delta$ apresentam um comportamento mais elástico, são menos viscosos e dissipam menos energia durante o processo de deformação. Isso significa que esses materiais tendem a ser mais flexíveis e eficientes em sua capacidade de resistir a deformações sem perder muita energia no processo.

8.6 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA / CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA - TGA/DSC

Através da caracterização térmica dos compósitos observa-se as curvas de perda de massa com o aumento da temperatura (TG – Curva Verde), de termogravimétrica derivada que fornece a primeira derivada da curva do TG, em função da temperatura. (DTG – Curva Azul) e a de calorimetria exploratória diferencial (DSC – Curva Marrom). A seguir, apresentam-se as curvas para os tratamentos de controle: 100% PP (Figura 21) e 100% PEAD (Figura 22), além das curvas para os materiais lignocelulósicos puros: 100% babaçu (Figura 23) e 100% macaúba (Figura 24).

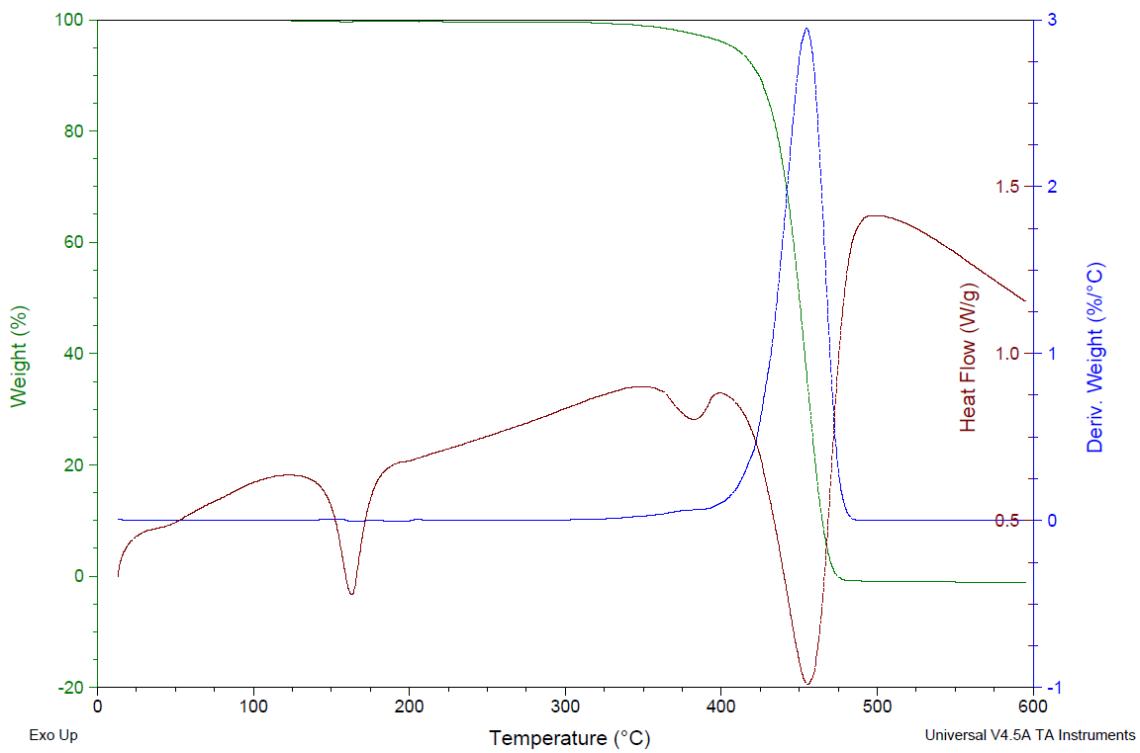


Figura 21. Caracterização térmica do tratamento 100% PP.

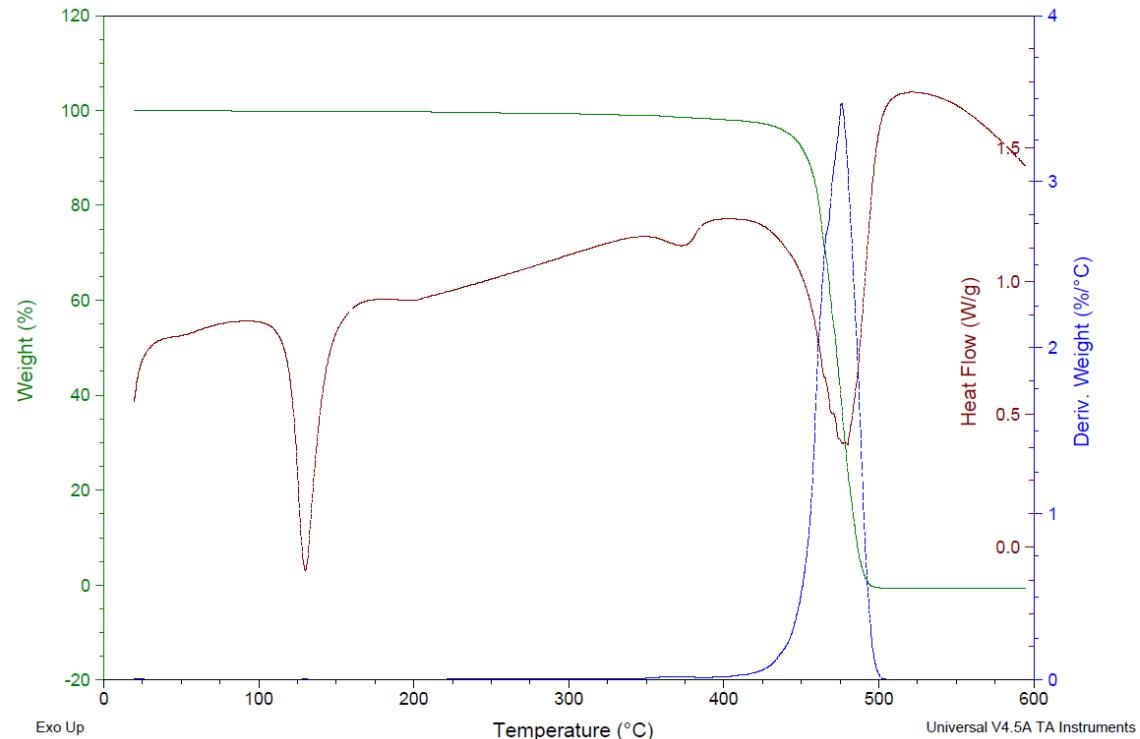


Figura 22. Caracterização térmica do tratamento 100% PEAD.

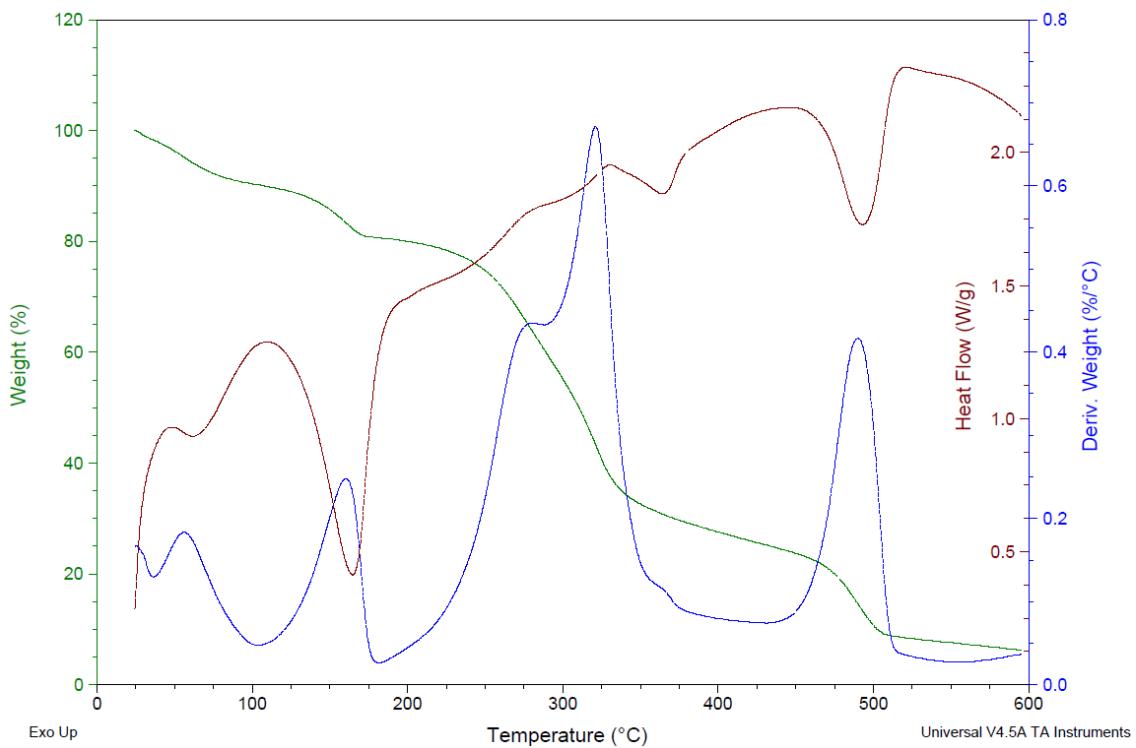


Figura 23. Caracterização térmica das fibras de babaçu (100%).

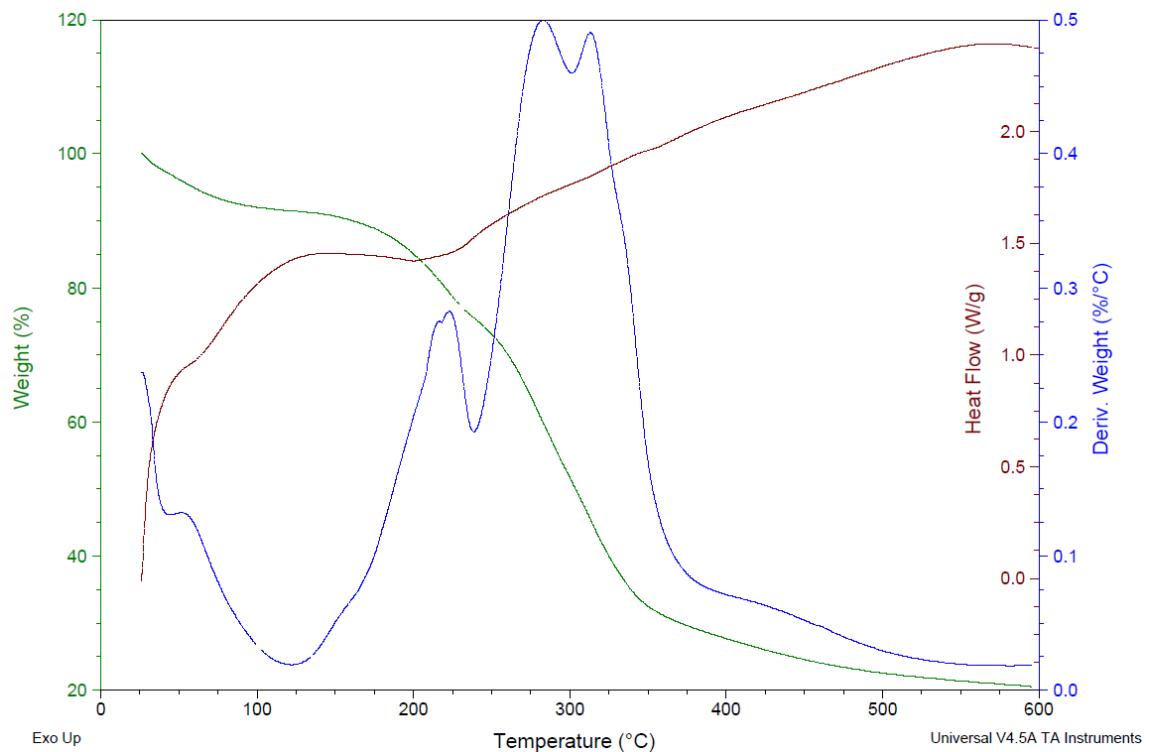


Figura 24. Caracterização térmica das fibras de macaúba (100%).

As curvas da calorimetria diferencial de varredura (DTG) demonstram que enquanto os plásticos virgens têm apenas um pico, que é o pico da TG desses materiais, tanto para o PP ($\sim 450^\circ\text{C}$) quanto para o PEAD ($\sim 475^\circ\text{C}$), já no babaçu

e na macaúba os vários picos apresentados da DTG são da evaporação da umidade presente no material, volatilização dos extrativos, degradação da hemicelulose, celulose e lignina respectivamente.

Observa-se que nas proporções 10% material lignocelulósico o pico é o da TG do material polimérico, já nas proporções de 25% e 50% independente do material utilizado foram obtidos picos menores mostrando a degradação dos componentes tanto da macaúba quanto do babaçu e o pico maior demonstrando a TG do material que se manteve em todos os casos na mesma faixa de temperatura do plástico virgem (Figuras apêndice B).

As curvas da TG do PP e PEAD possuem uma constante de massa até o polímero chegar na sua TG que é quando o polímero passa do seu estado vítreo para o estado emborrachado e assim perdendo grande parte da sua massa (Figuras apêndice B). Nos gráficos do babaçu e macaúba 100% observamos outros picos que são os de degradação dos componentes químicos, já nos compósitos é observado em todos os tratamentos que quanto maior a quantidade do composto lignocelulósico mais massa o compósito perde ao longo da temperatura.

Como a perda de massa nos compósitos é mais pronunciada com o aumento da adição de fibras, a decomposição da celulose e dos compósitos é caracterizada por dois picos diferentes: a primeira perda de massa foi observada antes dos 100°C, sendo atribuída à eliminação de umidade da poliose e de seus componentes, como xilose, manose, glicose, entre outros, além de substâncias voláteis presentes nas fibras. A segunda perda de massa apresentou picos na faixa de 210 a 360°C, estando associada à manipulação da hemicelulose, da celulose e ao início da manipulação lenta da lignina (SANTOS, et al., 2011).

A degradação da hemicelulose ocorre predominantemente em temperaturas inferiores a 230°C. Entre 230 e 260°C, tanto a hemicelulose quanto a celulose passam por degradação térmica, enquanto acima de 290°C, já a lignina é o componente mais hidrofóbico, desempenhando o papel de adesivo entre as fibras e contribuindo para a dureza e fragilidade da parede celular, sendo também o último a se degradar (FENGEL et al., 2003; BOTAN et al., 2014).

As curvas de DSC dos compósitos apresentaram dois eventos endotérmicos como padrão em todas as amostras. O primeiro é na temperatura

em que os materiais perdem a umidade retida e o segundo evento na temperatura da TG dos compósitos, que é caracterizada pela decomposição da estrutura química inicial da amostra.

8.7 MICROSCOPIA ELETÔNICA DE VARREDURA – MEV

A microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para avaliação da dispersão das fibras do resíduo na matriz polimérica, a verificação do comportamento da matriz e das fibras frente à fratura, e finalmente, a morfologia das fibras empregadas.

A análise da superfície fraturada do corpo de prova fornece informações importantes sobre a qualidade da adesão na interface fibra/matriz nos compostos estudados. Esse aspecto é crucial, pois as propriedades desses materiais dependem significativamente da interação entre as fibras de madeira e a matriz polimérica. A presença de fibras destacadas, cavidades deixadas por elas na superfície da fratura, além de espaços vazios ou fendas entre as fibras e a matriz, são indicativos de adesão (ÅKESSON et al., 2016; ILHAM AKBAR; ARMYNAH; TAHIR, 2024; TURKU et al., 2017).

Observa-se tanto na matriz polimérica de PP (Figura 25) quanto a de PEAD (Figura 26), independente do resíduo utilizado as partículas do resíduo lignocelulósico estão separadas do plástico, isso ocorre, muito provavelmente, pelo fato de que os dois resíduos possuem uma grande quantidade de extractivos presentes, que podem formar uma barreira entre o polímero e o plástico.

Em relação a compatibilidade do polímero com as fibras, a Figura 25 mostra que a matriz polimérica PP teve uma boa agregação com o material lignocelulósico tanto do babaçu, quanto da macaúba.

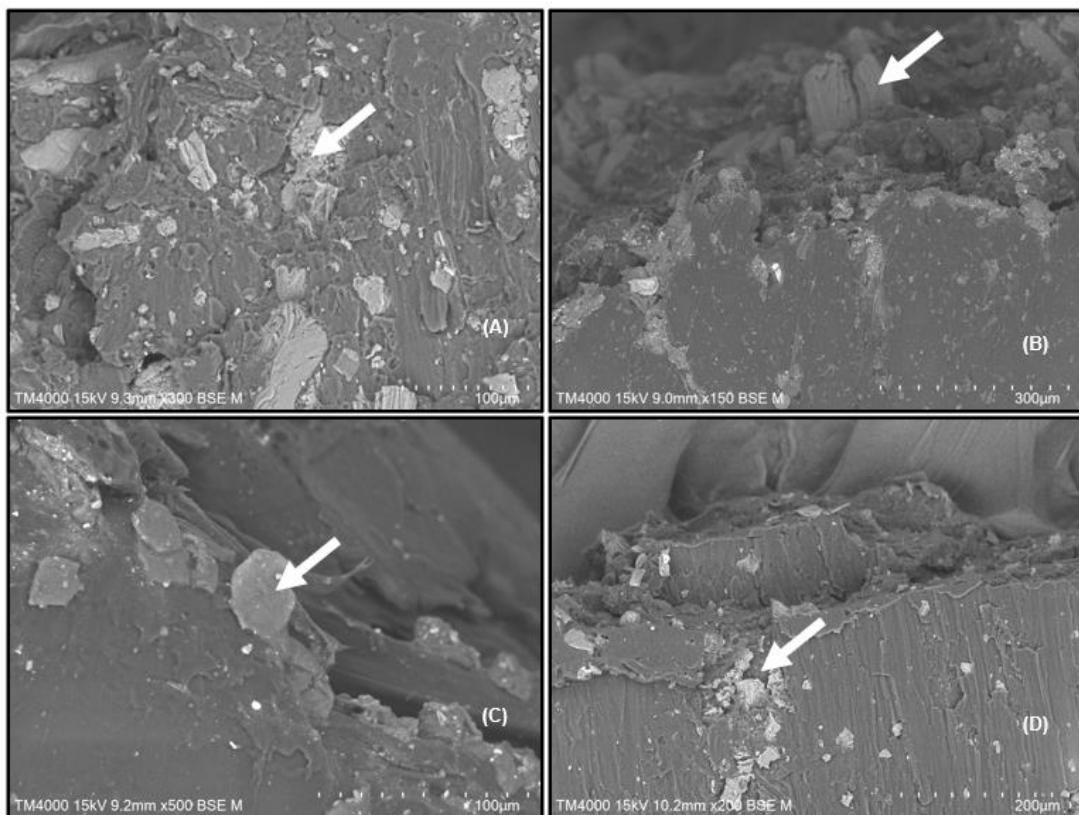


Figura 25. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em compósitos: **(A)** - B10PP; **(B)** - B50PP; **(C)** - M10PP e **(D)** - M50PP.

Em relação a matriz polimérica PEAD (Figura 26), observa-se que o polímero apresenta um comportamento mais elástico, com menos espaços vazios nos compósitos, porém também apresenta as partículas lignocelulósicas não envolvidas pela matriz polimérica dentro dos compósitos.

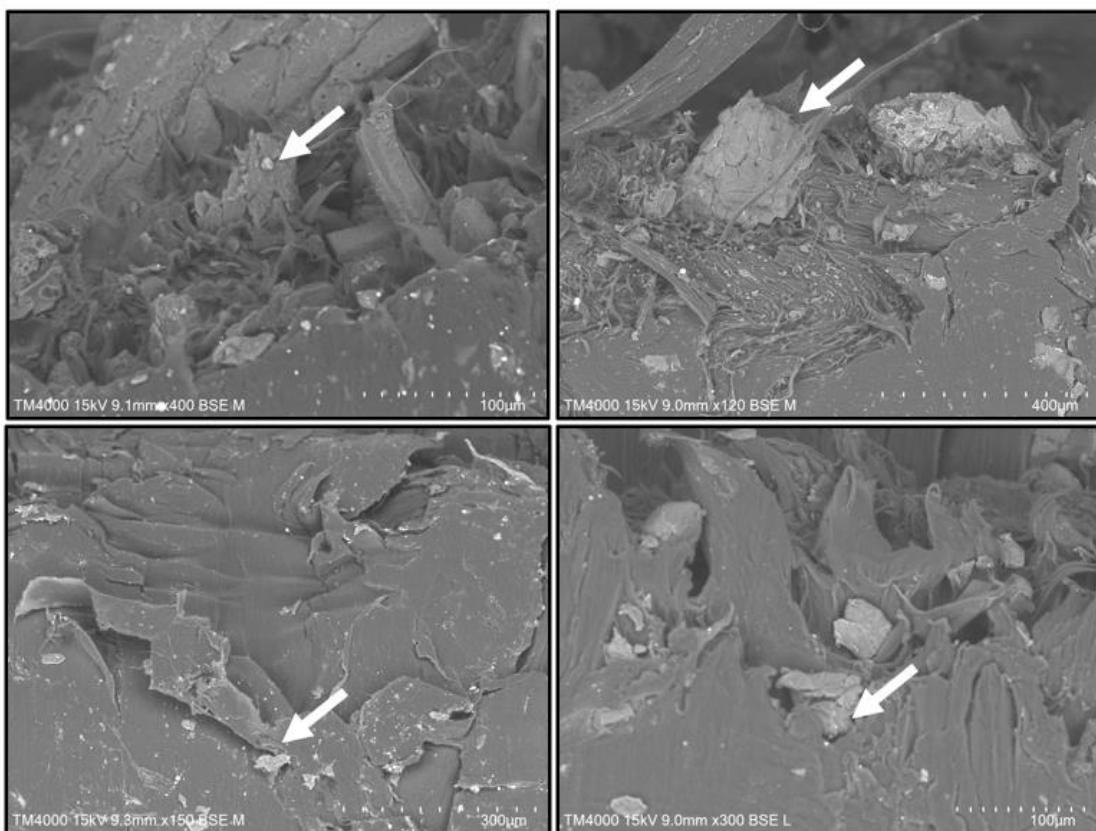


Figura 26. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em compósitos: **(A)** - B10PEAD; **(B)** - B50PEAD; **(C)** - M10PEAD e **(D)** - M50PEAD.

9. CONCLUSÕES

Este estudo avaliou a eficiência dos resíduos de babaçu e macaúba na produção de compósitos com polímeros de polipropileno (PP) e polietileno de alta densidade (PEAD) e as principais conclusões foram as seguintes:

A adição crescente dos resíduos das palmeiras levou ao aumento da absorção de água e da densidade final dos compósitos;

De modo geral, a adição crescente dos resíduos, levou ao aumento da rigidez à tração dos compósitos, enquanto a resistência final foi reduzida;

A utilização do resíduo de babaçu levou ao aumento da dureza para ambos os polímeros testados; já para o resíduo de macaúba, observou-se a ausência de efeito ou a redução da dureza;

Adição dos resíduos de babaçu e macaúba nos compósitos aumenta o modulo de armazenamento dos compósitos comparados com os 100% PP e PEAD;

A melhor combinação foi a de babaçu/PEAD que obteve os melhores resultados, e dentro destes tratamentos, a melhor proporção obtida foi a de 25% babaçu com o PEAD;

Dessa forma, com base nos resultados obtidos e nas análises realizadas, confirma-se a hipótese de que uso de resíduos de babaçu e macaúba na fabricação de compósitos melhora as propriedades físicas e mecânicas dos polímeros, podendo até superar as características originais do polímero empregado.

10. REFERÊNCIAS

ÅKESSON, D. et al. Mechanical recycling of polylactic acid composites reinforced with wood fibres by multiple extrusion and hydrothermal ageing. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 35, n. 16, p. 1248–1259, 2016.

ALMEIDA, S. P. DE. **Cerrado aproveitamento alimentar**. Planaltina: Embrapa, 1998.

ASHORI, A. Wood–plastic composites as promising green-composites for automotive industries! **Bioresource Technology**, v. 99, n. 11, p. 4661–4667, 2008.

AYYANAR, C. B. et al. Thermoplastic bio-composites from natural *Samanea Saman* fillers loaded HDPE: Mechanical, thermal, and structural analysis. **Results in Engineering**, v. 23, p. 102841, 2024.

BABA FEMI, A. J. et al. Engineering properties of concrete with waste recycled plastic: A review. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 11, 2018.

BARIŞ VATANDAŞ, B. et al. Additive manufacturing of PEEK-based continuous fiber reinforced thermoplastic composites with high mechanical properties. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 167, p. 107434, 2023.

BATTISTELLE, R. et al. Caracterização física e mecânica de um compósito de polipropileno reciclado e farinha de madeira sem aditivos. **Revista Materia**, v. 19, n. 1, p. 7–15, 2014.

BEG, M. D. H.; PICKERING, K. L.; GAUSS, C. The effects of alkaline digestion, bleaching and ultrasonication treatment of fibre on 3D printed harakeke fibre reinforced polylactic acid composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 166, p. 107384, 2023.

BEIGBEDER, J. et al. How to manage biocomposites wastes end of life? A life cycle assessment approach (LCA) focused on polypropylene (PP)/wood flour and

polylactic acid (PLA)/flax fibres biocomposites. **Waste Manag**, v. 83, p. 184–193, 2019.

BEKHTA, P. et al. Eco-Friendly wood composites: design, characterization and applications. **Eco-Friendly Wood Composites: Design, Characterization and Applications**, p. 204, 2023.

BHASKAR, K. et al. Analysis on mechanical properties of wood plastic composite. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, p. 5886–5891, 2021.

BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibres. **Progress in Polymer Science**, v. 24, n. 2, p. 221-274, 1999.

BOLLAKAYALA, V. L. et al. Enhancement of wood-plastic composite properties in presence of recycled vehicular soot as a carbon source material: Sustainable management approach. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 174, p. 286–297, 2023.

CAI, S. et al. Review of synthetic polymer-based thermal insulation materials in construction and building. **Journal of Building Engineering**, v. 97, p. 110846, 2024.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. 10. ed., LTC, 2020.

CANEVAROLO, S. V. **Ciência dos Polímeros. Um Texto Básico Para Tecnólogos e Engenheiros**. Artliber, 2010.

CARVALHO, D. et al. Advancing sustainability in the automotive industry: Bioprepregs and fully bio-based composites. **Composites Part C: Open Access**, v. 14, p. 100459, 2024.

CASTRO, D. O. et al. Use of castor and canola oils in “biopolyethylene” curauá fiber composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 95, p. 22–30, 2017.

CICONINI, Gabrielly et al. Biometry and oil contents of *Acrocomia aculeata* fruits from the Cerrados and Pantanal biomes in Mato Grosso do Sul, Brazil. **Industrial Crops and Products**, v. 45, p. 208-214, 2013.

CORREA, C. A. et al. Compósitos termoplásticos com madeira. **Polímeros**, v. 13, n. 3, p. 154–165, 2003.

CRUZ, L. C. et al. Sustainable WPC Production: A Novel Method Using Recycled High-Density Polyethylene and Wood Veneer. **Recycling**, v. 9, n. 1, p. 1, 2023.

DA SILVA, A. J. B.; SEVALHO, E. DE S.; MIRANDA, I. P. DE A. Potencial das palmeiras nativas da Amazônia Brasileira para a bioeconomia: análise em rede da produção científica e tecnológica. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 2, p. 1020–1046, 2021.

DE ARAÚJO VELOSO, M. C. R. et al. Sustainable valorization of recycled low-density polyethylene and cocoa biomass for composite production. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 25, p. 32810–32822, 2021.

DE PAIVA, F. F. G. et al. Sugarcane bagasse fiber as semi-reinforcement filler in natural rubber composite sandals. **J Mater Cycles Waste Manag**, v. 21, n. 2, p. 326–335, 2019.

DORNELLES, P. G. **Produção e caracterização de compósitos de madeira-plástico com resíduos de marcenaria**. Dissertação—Brasília: Universidade de Brasília, 2024.

DRANSFIELD, J. et al. **Genera Palmarum: the evolution and classification of palms**. Londres: Kew Publishing, Royal Botanical Garden, 2008.

ELSHEIKH, A. H. et al. Recent progresses in wood-plastic composites: Pre-processing treatments, manufacturing techniques, recyclability and eco-friendly assessment. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 8, p. 100450, 2022.

ELSHEIKH, A. H.; ELMILIGY, M.; EL-KASSAS, A. M. Optimization of joint strength in friction stir welded wood plastic composites using ANFIS and Cheetah

Optimizer. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 34, p. 2539–2552, 2025.

FÁVARO, S. P.; ROCHA, J. D. **Macaúba: fonte de renda e energia limpa no Brasil - Entre Solos.** Brasília. Disponível em: <<https://www.entreosolos.org.br/macauba-fonte-de-renda-e-energia-limpa-no-brasil/>>. Acesso em: 12 jan. 2025.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a guide for its bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciênc. Agrotec**, v. 38, n. 2, p. 109-112, 2014.

FILHO, J. C. M. **O Livro de Ouro da Amazônia: Mitos e verdades sobre a região mais cobiçada do planeta.** Ediouro, 2004.

FREITAS, M. A. B. et al. Intensification of açaí palm management largely impoverishes tree assemblages in the Amazon estuarine forest. **Biological Conservation**, v. 261, p. 109251, 2021.

GALEMBECK, F.; BARBOSA, C. A. S.; DE SOUSA, R. A. Sustainable use of biomass and natural resources for chemical innovation. **Química Nova**, v. 32, n. 3, p. 571–581, 2009.

GANDARA, M.; GONÇALVES, A. R.; SARON, C. Compósitos de pet reciclado com fibra de cana-de-açúcar tratada por explosão a vapor. **Revista Materia**, v. 22, n. 4, 2017.

GAPSARI, F. et al. Modification on Fiber from Alkali Treatment and AESO Coating to Enhance UV-Light and Water Absorption Resistance in Kapok Fiber Reinforced Polyester Composites. **Journal of Natural Fibers**, v. 21, n. 1, 2024.

GONZÁLEZ-PÉREZ, S. E. et al. Conhecimento e usos do babaçu (*Attalea speciosa* Mart. e *Attalea eichleri* (Drude) A. J. Hend.) entre os Mebêngôkre-Kayapó da Terra Indígena Las Casas, estado do Pará, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 26, n. 2, p. 295–308, 2012.

GRAYSON, M. **Encyclopedia of composite materials and components.** J. Wiley and Sons, New York, NY, 1983.

HAGE JR., E. Aspectos históricos sobre o desenvolvimento da ciência e da tecnologia de polímeros. **Polímeros**, v. 8, n. 2, p. 6–9, 1998.

HE, Z. et al. Lateral behavior of wood frame shear wall using PVC wood-plastic composite (WPC) veneer panels. **Journal of Building Engineering**, v. 89, p. 109367, 2024.

HIDALGO PIZANGO, C. G. et al. Sustainable palm fruit harvesting as a pathway to conserve Amazon peatland forests. **Nature Sustainability**, v. 5, n. 6, p. 479–487, 2022.

IBGE. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura**, 2025.

ILHAM AKBAR, M.; ARMYNAH, B.; TAHIR, D. Comprehensive compilation and analysis of wood composite materials for X-ray, Gamma-ray, and neutron radiation shielding applications: A review. **Industrial Crops and Products**, v. 222, p. 119440, 2024.

JACOBI, P. R.; GIATTI, L. Inovação e sustentabilidade. **Ambiente & Sociedade**, v. 20, n. 4, p. 1–4, 2017.

JAWAID, M. et al. A comparative evaluation of chemical, mechanical, and thermal properties of oil palm fiber/pineapple fiber reinforced phenolic hybrid composites. **Polymer Composites**, v. 42, n. 12, p. 6383–6393, 2021.

JELE, T. B. et al. Engineered transparent wood composites: a review. **Cellulose**, v. 30, n. 9, p. 5447–5471, 2023.

KHANJANZADEH, H. et al. Application of surface chemical functionalized cellulose nanocrystals to improve the performance of UF adhesives used in wood based composites - MDF type. **Carbohydrate Polymers**, v. 206, p. 11–20, 2019.

KRIŠTÁK, L.; RÉH, R. Application of Wood Composites. **Applied Sciences 2021, Vol. 11, Page 3479**, v. 11, n. 8, p. 3479, 2021.

LANDIM, A. P. M. et al. Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil. **Polímeros**, v. 26, p. 82–92, 2016.

LEE, S. H. et al. Application of Wood Composites III. **Applied Sciences**, v. 13, n. 11, p. 6712, 2023.

LI, J. et al. Strength-plasticity synergetic CF/PEEK composites obtained by adjusting melt flow rate. **Polymer**, v. 305, p. 127186, 2024.

LIMA, J. R. D. O. et al. Biodiesel de babaçu (*Orbignya* sp.) obtido por via etanólica. **Química Nova**, v. 30, n. 3, p. 600–603, 2007.

LIU, L. et al. Effects of cure cycles on void content and mechanical properties of composite laminates. **Composite Structures**, v. 73, n. 3, p. 303–309, 2006.

LIU, Z.; TISSERAT, B. H. Coating applications to natural fiber composites to improve their physical, surface and water absorption characters. **Industrial Crops and Products**, v. 112, p. 196–199, 2018.

LORENZI, G. M. A. C.; NEGRELLE, R. R. B. *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart.: aspectos ecológicos. **Visão Acadêmica**, v. 7, n. 1, p. 1–12, 2006.

LORENZI, H. et al. **Palmeiras brasileiras e exóticas cultivadas**. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2004.

LORENZI, H. **ARECACEAE (Palmeiras)**. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2010.

MAGALHÃES, W. L. E. et al. Preparation and characterization of polypropylene/heart-of-peach palm sheath composite. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 127, n. 2, p. 1285–1294, 2013.

MAPA. **Diagnóstico da produção sustentável da palma de óleo**. Brasília, 57p. 2018.

MARK, H. F. **Encyclopedia of Polymer Science and Engineering**. Time-Life Books, 1987.

MATTOS, B. D. et al. Properties of polypropylene composites filled with a mixture of household waste of mate-tea and wood particles. **CONSTRUCTION & BUILDING MATERIALS**, v. 61, p. 60–68, 2014.

MEHDIKHANI, M. et al. Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance. **Journal of Composite Materials**, v. 53, n. 12, p. 1579–1669, 2019.

MENDES, P. S. N. **Síntese e caracterização de um compósito de polipropileno reforçado com fibras da casca de noz macadâmia**. Dissertação - Volta Redonda: Universidade Federal Fluminense, 2019.

MOHAMED, B.; KHAOULA, A.; LEILA, B. Effect of the Fibers Orientation of the Different Types of Composite Plates Notched of U-Shape Repaired by Composite Patch. **Materials Research**, v. 26, p. e20220302, 2023.

MOHANTY, A. K. et al. Composites from renewable and sustainable resources: Challenges and innovations. **Science**, v. 362, n. 6414, p. 536–542, 2018.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, L. T. Sustainable Bio-Composites from renewable resources: Opportunities and challenges in the green materials world. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 10, n. 1–2, p. 19–26, 2002.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; HINRICHSEN, G. Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. **Macromolecular Materials and Engineering**, v. 276–277, n. 1, p. 1–24, 2000.

MUSA, B. H. Effect of Glass Powder on Some Mechanical Properties of Polymer Matrix Composite Material. **Journal of Al-Nahrain University**, v. 17, n. 2, p. 108–115, 2014.

NEHER, B. et al. Study of Mechanical and Physical Properties of Palm Fiber Reinforced Acrylonitrile Butadiene Styrene Composite. **Materials Sciences and Applications**, v. 05, n. 01, p. 39–45, 2014.

NEVES, C. J. A. **Resistência química de PE's a vários reagentes químicos.** Boletim. Técnico nº 13 – OPP Petroquímica S.A., 1999.

NORO, J. et al. Extracellular matrix-derived materials for tissue engineering and regenerative medicine: A journey from isolation to characterization and application. **Bioactive Materials**, v. 34, p. 494–519, 2024.

NURAZZI, N. M. et al. A review on natural fiber reinforced polymer composite for bullet proof and ballistic applications. **Polymers** 2021, v. 13, n. 4, p. 646, 2021.

OLIVEIRA, F. R. DE; FRANÇA, S. L. B.; RANGEL, L. A. D. Principles of circular economy for the development of products in industrial clusters. **Interações**, v. 20, n. 4, p. 1179–1193, 2019.

PELAEZ-SAMANIEGO, M. R. et al. A review of wood thermal pretreatments to improve wood composite properties. **Wood Science and Technology**, v. 47, n. 6, p. 1285–1319, 2013.

PICKERING, K. L.; EFENDY, M. G. A.; LE, T. M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 83, p. 98–112, 2016.

PORRO, R. A economia invisível do babaçu e sua importância para meios de vida em comunidades agroextrativistas. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas**, v. 14, p. 169-188, 2019.

PROME, F. S. et al. Different chemical treatments of natural fiber composites and their impact on water absorption behavior and mechanical strength. **Hybrid Advances**, v. 8, p. 100379, 2025.

QUIROGA, A.; MARZOCCHI, V.; RINTOUL, I. Influence of wood treatments on mechanical properties of wood–cement composites and of *Populus euroamericana* wood fibers. **Composites Part B: Engineering**, v. 84, p. 25–32, 2016.

RADZI, A. M. et al. Bamboo-fiber-reinforced thermoset and thermoplastic polymer composites: A review of properties, fabrication, and potential applications. **Polymers**, v. 14, n. 7, p. 1387, 2022.

RAHMANI, E. et al. On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1302–1308, 2013.

RAMACHANDRAN, A. R. et al. Modification of fibers and matrices in natural fiber reinforced polymer composites: A comprehensive review. **Macromolecular Rapid Communications**, v. 43, n. 17, 2022.

REDIGHIERI, K. I.; COSTA, D. A. Compósitos de polietileno reciclado e partículas de madeira de reflorestamento tratadas com polietileno modificado. **Polímeros**, v. 18, n. 1, p. 5–11, 2008.

SABA, N. et al. A review on dynamic mechanical properties of natural fibre reinforced polymer composites. **Construction and Building Materials**, v.106, p.149-159, 2016.

SABA, N. et al. Thermal and dynamic mechanical properties of cellulose nanofibers reinforced epoxy composites. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 102, p. 822–828, 2017.

SAENZ-CASTILLO, D. et al. Effect of processing parameters and void content on mechanical properties and NDI of thermoplastic composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 121, p. 308–320, 2019.

SANTOS, M. L. et al. Estudo das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica. **Revista Química Nova**, v.34, n.3, p. 507-511, 2011.

SATYANARAYANA, K. G.; ARIZAGA, G. G. C.; WYPYCH, F. Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers-An overview. **Progress in Polymer Science**, v. 34, p. 982-1021, 2009.

SATYANARAYANA, K. G.; RAMOS, L. P.; WYPYCH, F. Comparative study of Brazilian natural fibers and their composites with others. Em: **Natural Fiber**

Reinforced Polymer Composites. Philadelphia: Maney Publishers, p. 473–522, 2008.

SAVOV, V. et al. Eco-Friendly Wood Composites: Design, Characterization and Applications. **Polymers**, v. 15, n. 4, p. 892, 2023.

SEO, Y.; NINH, T. H. Enhanced interfacial adhesion between polypropylene and nylon 6 by in situ reactive compatibilization. **Polymer**, v. 45, n. 25, p. 8573–8581, 2004.

SHEEBA, K. R. J. et al. Enhancing structural, thermal, and mechanical properties of *Acacia pennata* natural fibers through benzoyl chloride treatment for construction applications. **Case Studies in Construction Materials**, v. 19, p. e02443, 2023.

SHEIKH, T. Z. et al. Investigation of mechanical, morphological and thermal properties of waste glass powder and wood flour reinforced polypropylene composite. **Heliyon**, v. 11, n. 1, p. e41352, 2025.

SOARES, K. P. et al. Brasil this paper is a survey of Arecaceae family in Rio Grande do Sul state. We recognize 15 native species in this abstract. **Rodriguésia**, v. 65, n. 1, p. 113–139, 2014.

SPINACE, M. A. S.; PAOLI, M. A. DE. Characterization of Poly (ethylene terephthalate) after multiple processing cycles. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 80, p. 20–25, 2001.

SZPIZ, R. R.; LAGO, R. C. A.; JABLONKA, F. H.; PEREIRA, D. A. Óleos de macaúba: uma alternativa para a oleoquímica. Rio de Janeiro: **EMBRAPA-CTAA**, 1989. p.1-10.

STEINMETZ, Z. et al. Plastic problem solved? Environmental implications of synthetic hydrophilic polymers across ecosystem boundaries. **Trac Trends in Analytical Chemistry**, v. 181, p. 118000, 2024.

SUMESH, K. R. et al. Effect of banana, pineapple and coir fly ash filled with hybrid fiber epoxy based composites for mechanical and morphological study. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 23, n. 4, p. 1277–1288, 2021.

SUNITHA, V. L. et al. Wood plastic composites (WPC) waste based triboelectric nanogenerator for mechanical energy harvesting and self-powered applications. **Materials Letters**, v. 351, p. 134995, 2023.

TALGATTI, M. et al. Compósito madeira-plástico a partir de resíduos de três espécies florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 91, p. 277, 2017.

THEN, Y. Y. et al. Influence of fiber content on properties of oil palm mesocarp fiber/poly (butylene succinate) biocomposites. **BioResources**, v. 10, n. 2, p. 2949–2968, 2015.

TULI, N. T.; KHATUN, S.; RASHID, A. BIN. Unlocking the future of precision manufacturing: A comprehensive exploration of 3D printing with fiber-reinforced composites in aerospace, automotive, medical, and consumer industries. **Helijon**, v. 10, n. 5, p. e27328, 2024.

TURKU, I. et al. Characterization of wood plastic composites manufactured from recycled plastic blends. **Composite Structures**, v. 161, p. 469–476, 2017.

VALENTE, M. et al. Dual morphology (fibres and particles) cellulosic filler for WPC materials. **AIP Conference Proceedings**, v. 1736, n. 1, 2016.

VENKATESHA PRASANNA, G. et al. Hybridization and influence of chemical treatment on the morphology and optimization of composites. **Materials Today: Proceedings**, v. 44, p. 4833–4837, 2021.

WANG, H. et al. A review of coextruded wood–plastic composites. **Polymer Composites**, v. 42, n. 9, p. 4174–4186, 2021.

WANG, Y. et al. Study on the preparation and process parameter-mechanical property relationships of carbon fiber fabric reinforced poly (ether ether ketone) thermoplastic composites. **Polymers 2024**, v. 16, n. 7, p. 897, 2024.

WENG, A. et al. Study of the control and influence of humidity on the mechanical and structural properties of geopolymers foam composites based on fly ash and wood flour. **Materials Letters**, v. 365, p. 136443, 2024.

WU, F.; MISRA, M.; MOHANTY, A. K. Challenges and new opportunities on barrier performance of biodegradable polymers for sustainable packaging. **Progress in Polymer Science**, v. 117, p. 101395, 1 jun. 2021.

YADAV, P. et al. Synthetic and natural polymer hydrogels: A review of 3D spheroids and drug delivery. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 280, p. 136126, 2024.

YANG, A. et al. Preparation of situ microfiber-reinforced co-extruded high-filled wood-plastic composite with excellent mechanical, creep resistance, and water resistance properties. **Construction and Building Materials**, v. 415, p. 135002, 2024a.

YANG, A. et al. Scalable production of robust and creep resistant ultra-high filled wood-plastic composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 289, p. 111937, 2025.

YANG, J. et al. Hardness and compressive properties of negative thermal expansion ceramic ZrMgMo₃O₁₂ reinforced 2024Al composites. **Ceramics International**, v. 50, n. 23, p. 50496–50503, 2024b.

YOUSSEF, A. M. et al. Green, economic, and partially biodegradable wood plastic composites via enzymatic surface modification of lignocellulosic fibers. **Heliyon**, v. 5, n. 3, p. e01332, 2019.

ZENG, Z. et al. Predicting the tensile properties of wood plastic composites using material extrusion with meta-based Few-Shot learning. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 190, p. 108671, 2025.

ZHAO, L. et al. Experimental study on the axial compression performance of CFRP wrapped wood plastic composite hollow short columns. **Thin-Walled Structures**, v. 209, p. 112887, 2025a.

ZHAO, Z. et al. Functional wood-plastic composites: A review of research progress on flame retardancy, weather resistance and antimicrobial properties. **Industrial Crops and Products**, v. 223, p. 120196, 2025b.

ZHU, J. et al. A fully bio-based intumescence flame retardant for enhancing the flame retardancy and smoke suppression properties of wood flour polypropylene composites. **Polymer Degradation and Stability**, v. 231, p. 111072, 2025.

APÊNDICE A – PERFIL DE DENSIDADE

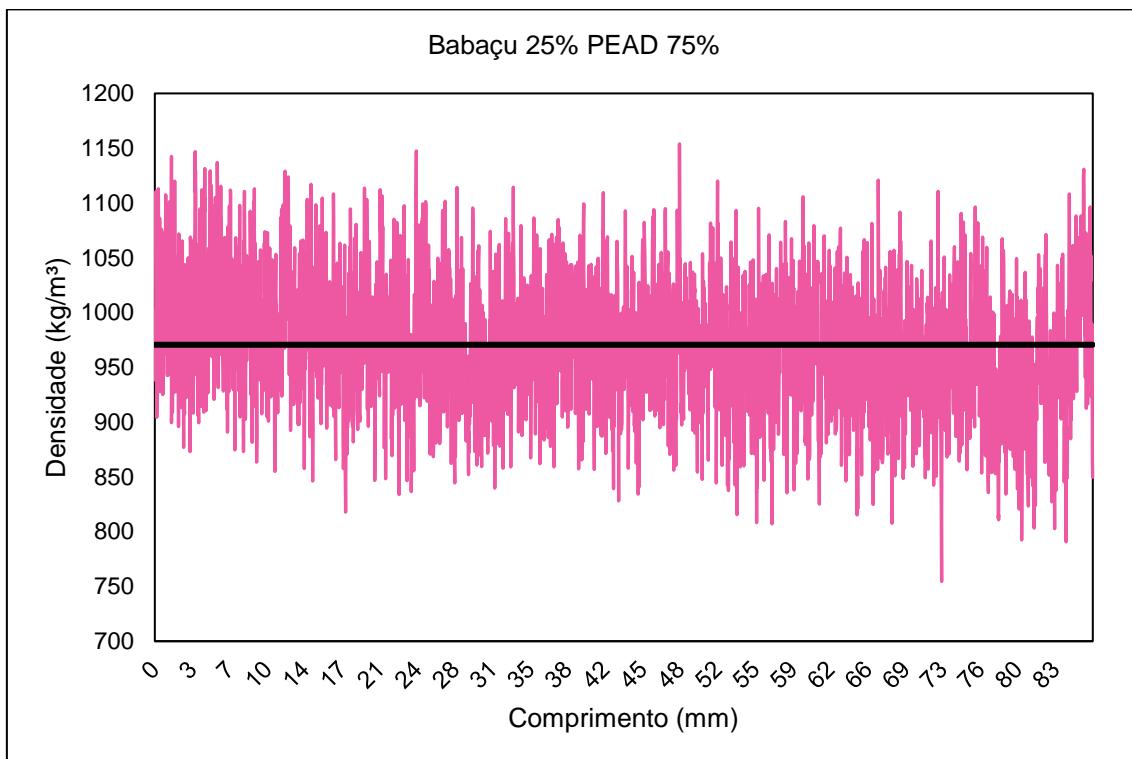


Figura 27. Perfil de densidade compósitos Babaçu 25% e PEAD 75%.

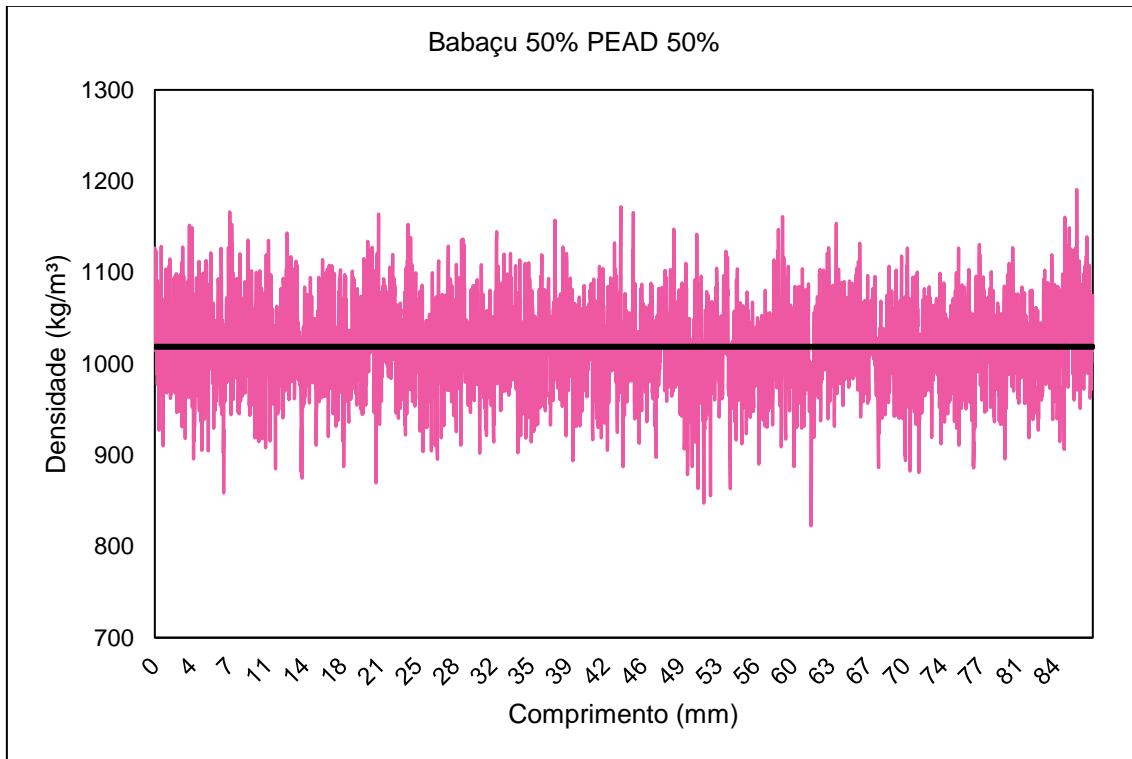


Figura 28. Perfil de densidade compósitos Babaçu 50 % e PEAD 50%.

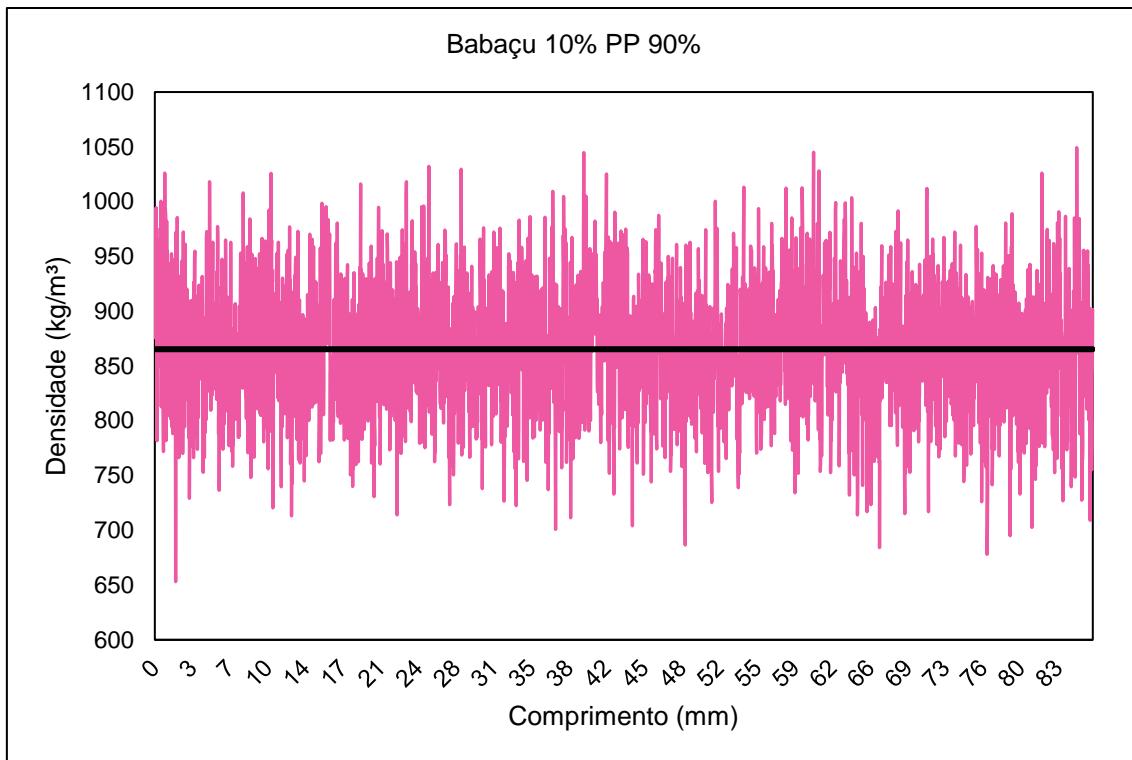


Figura 29. Perfil de densidade compósitos Babaçu 10% PP e 90%.

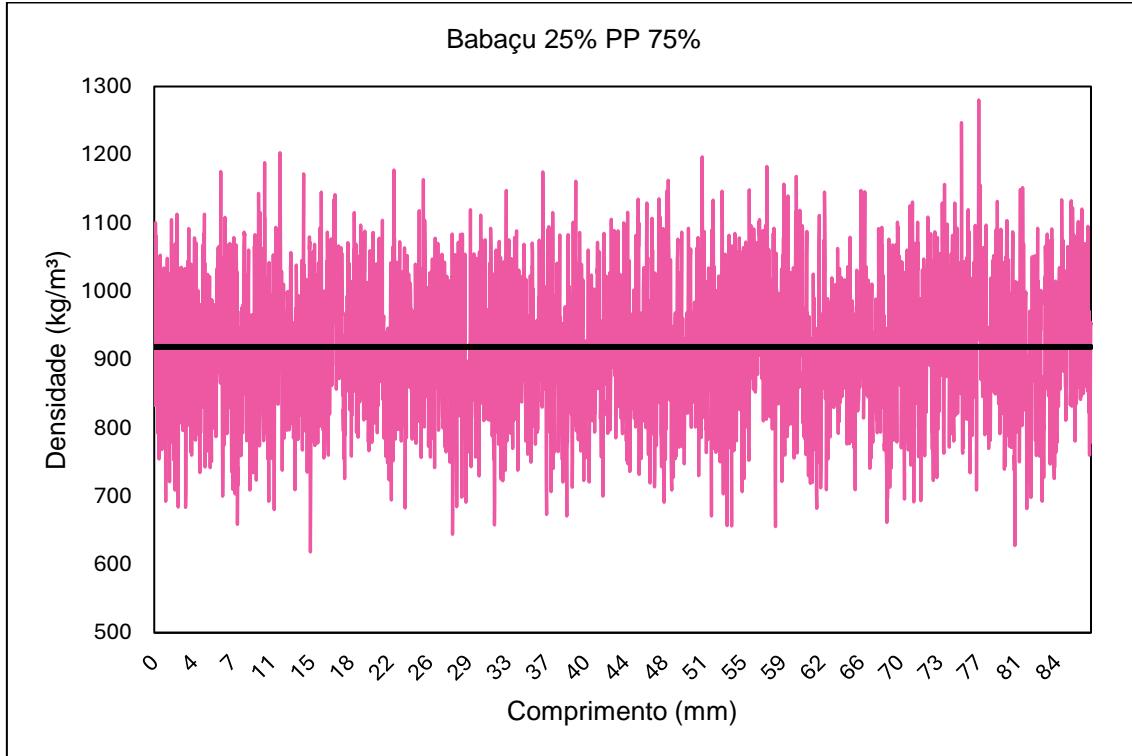


Figura 30. Perfil de densidade compósitos Babaçu 25% e PP 75%.

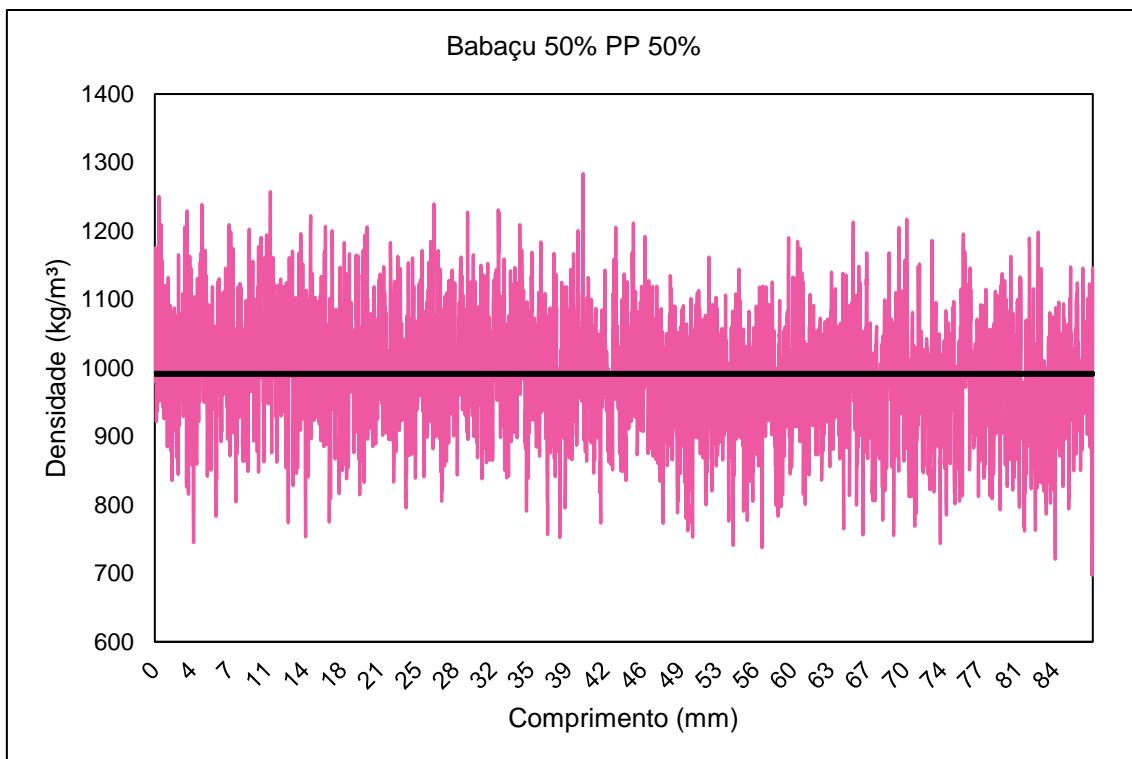


Figura 31. Perfil de densidade compósitos Babaçu 50% e PP 50%.

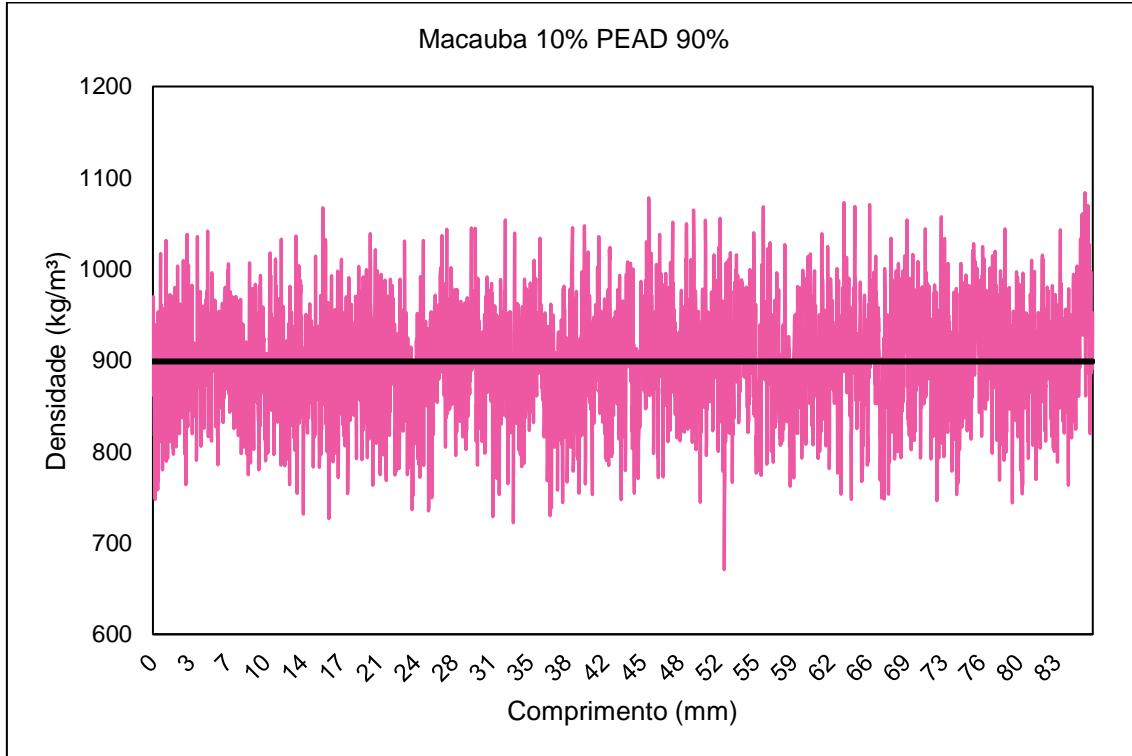


Figura 32. Perfil de densidade compósitos macaúba 10% e PEAD 90%.

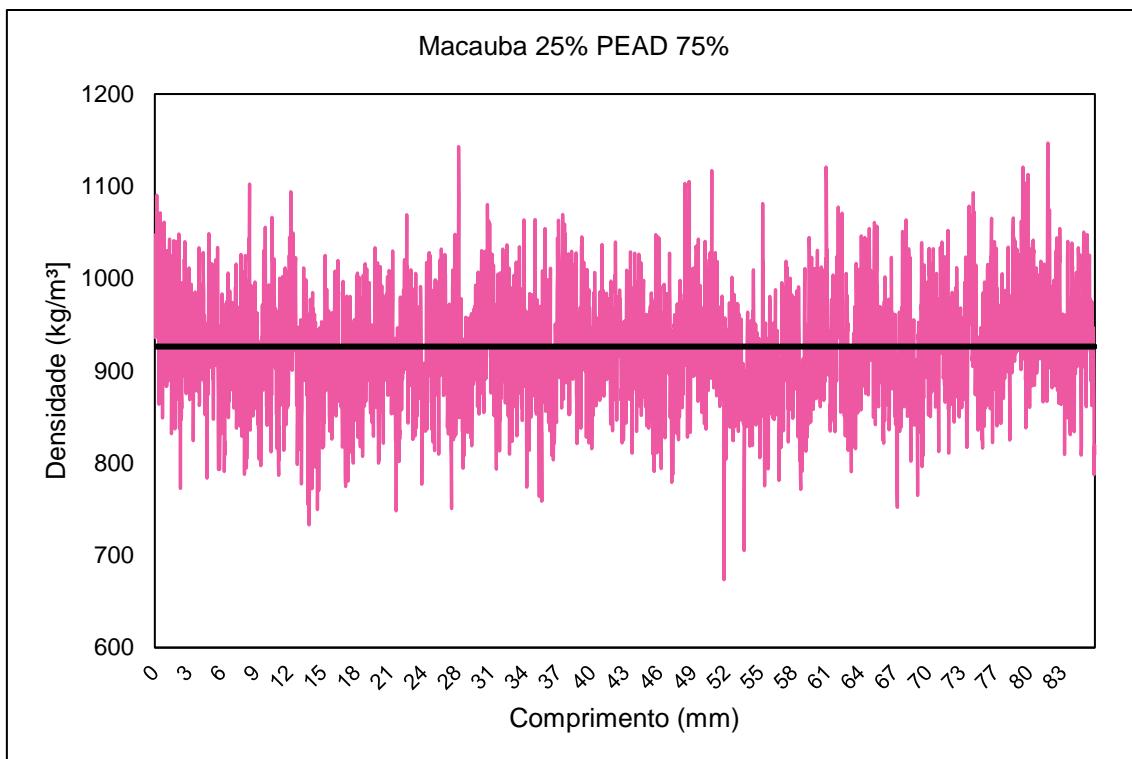


Figura 33. Perfil de densidade compósitos macaúba 25% e PEAD 75%.

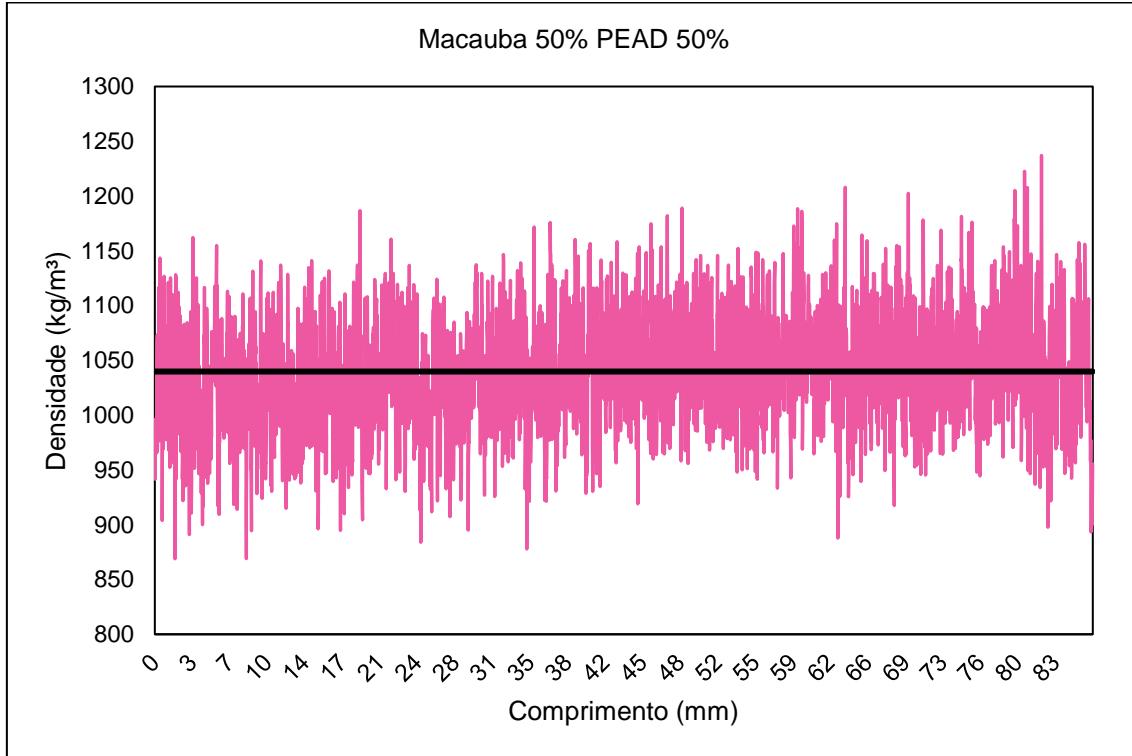


Figura 34. Perfil de densidade compósitos macaúba 50% e PEAD 50%.

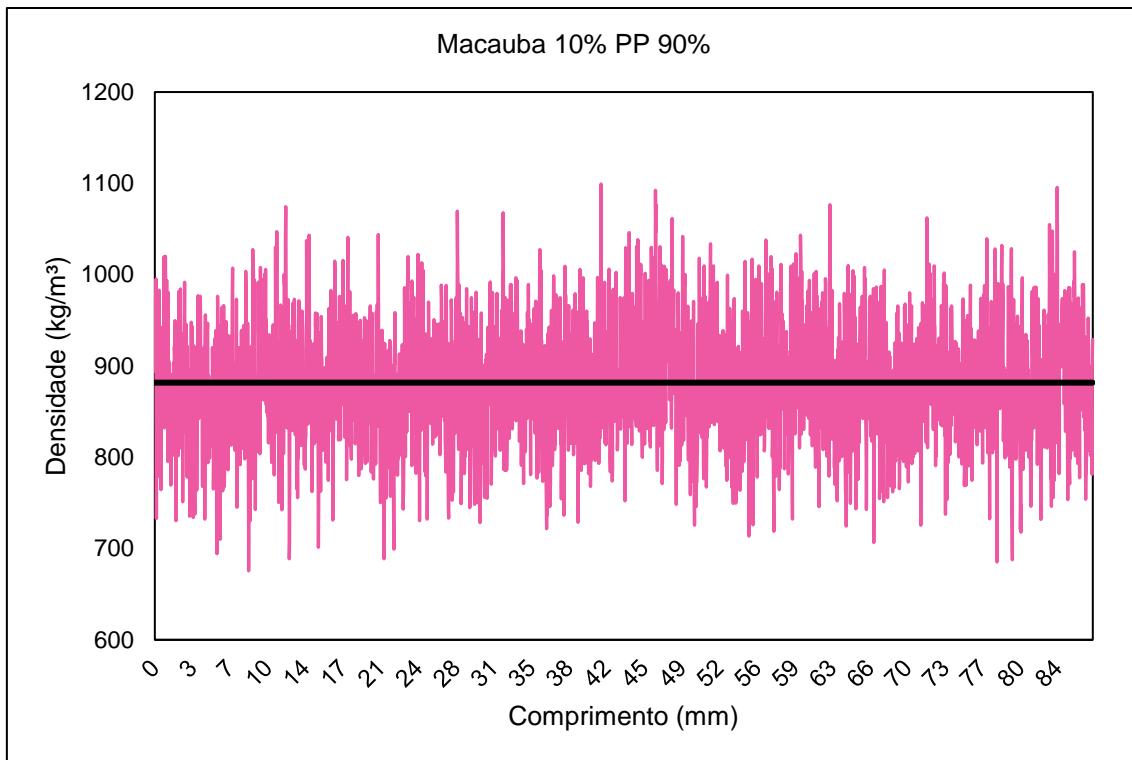


Figura 35. Perfil de densidade compósitos macaúba 10% e PP 90%.

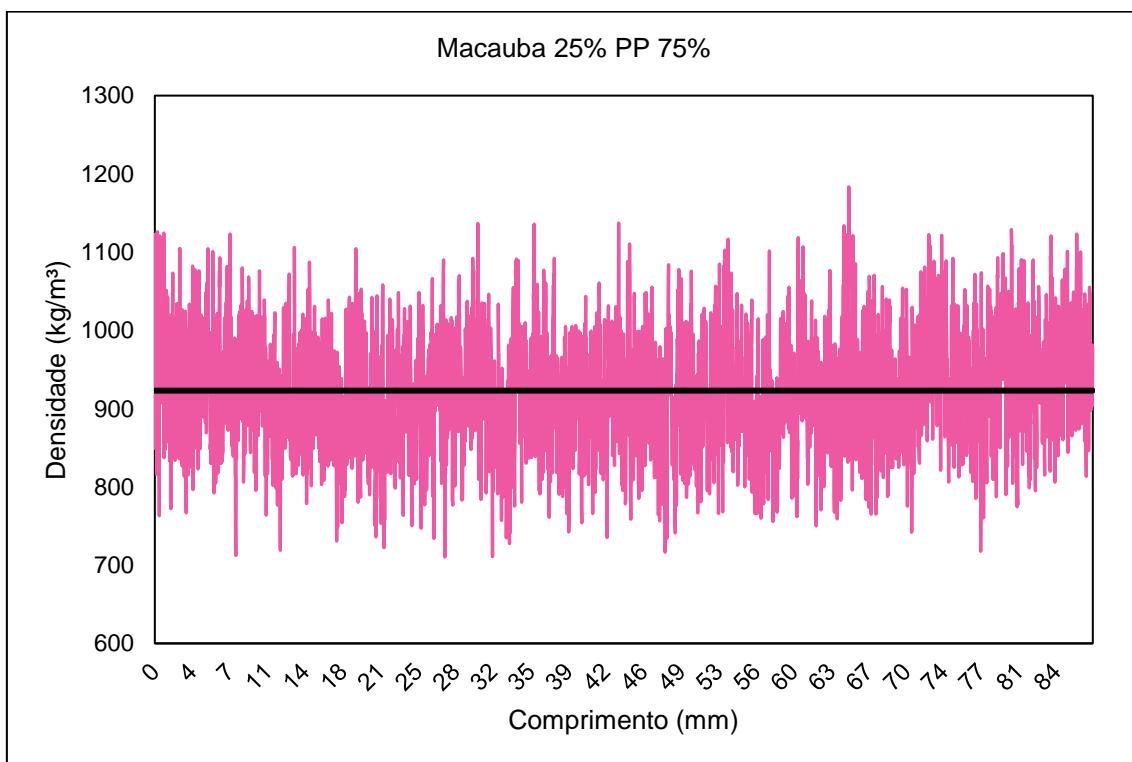


Figura 36. Perfil de densidade compósitos macaúba 25% e PP 75%.

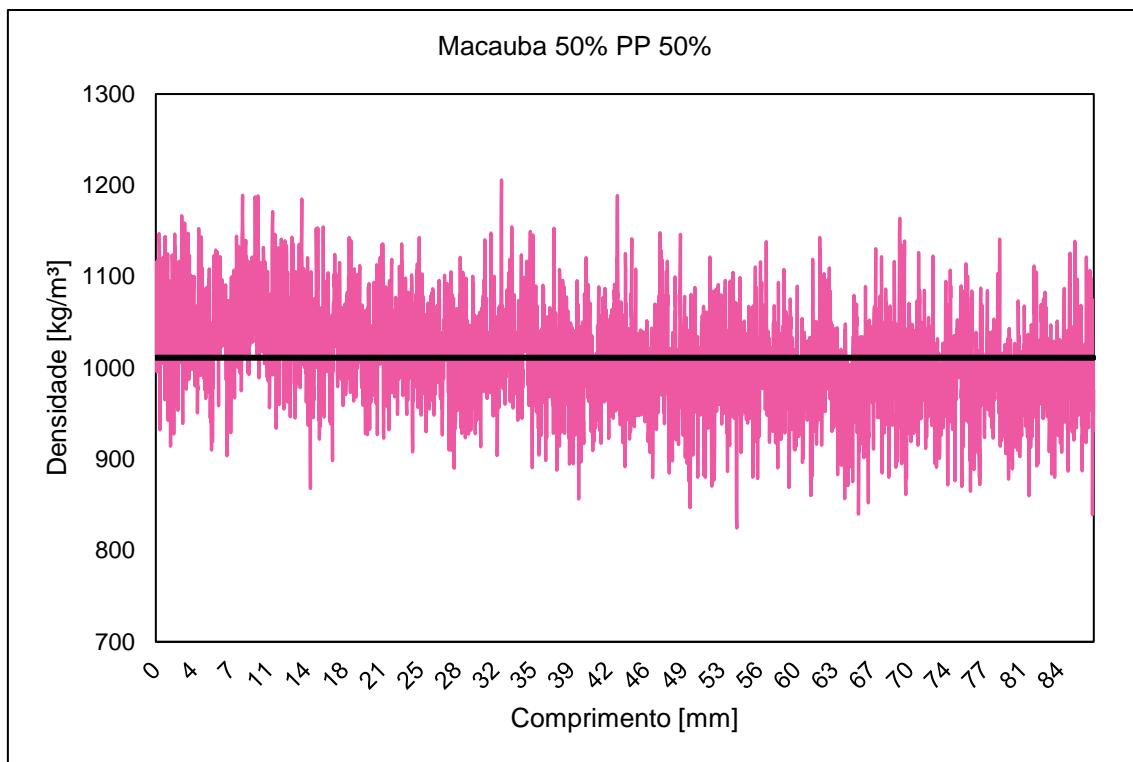


Figura 37. Perfil de densidade compósitos macaúba 50% e PP %.

APÊNDICE B - CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA

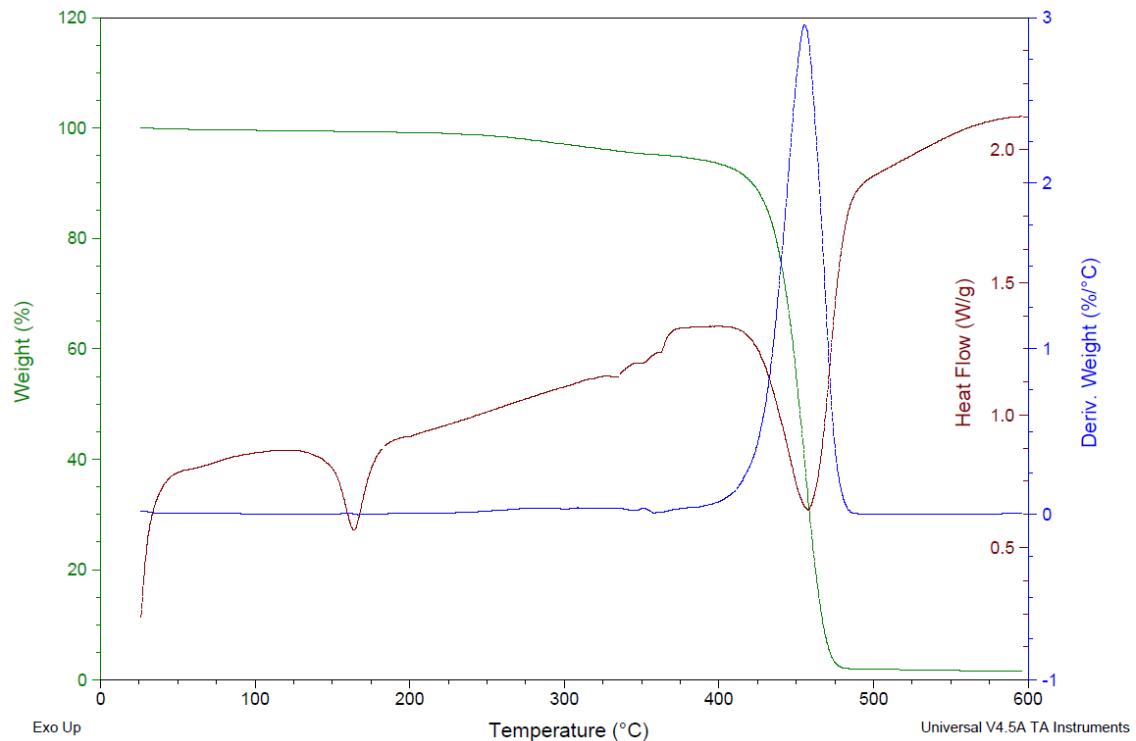


Figura 38. Caracterização térmica do compósito com resíduo de macaúba e PP 10/90%.

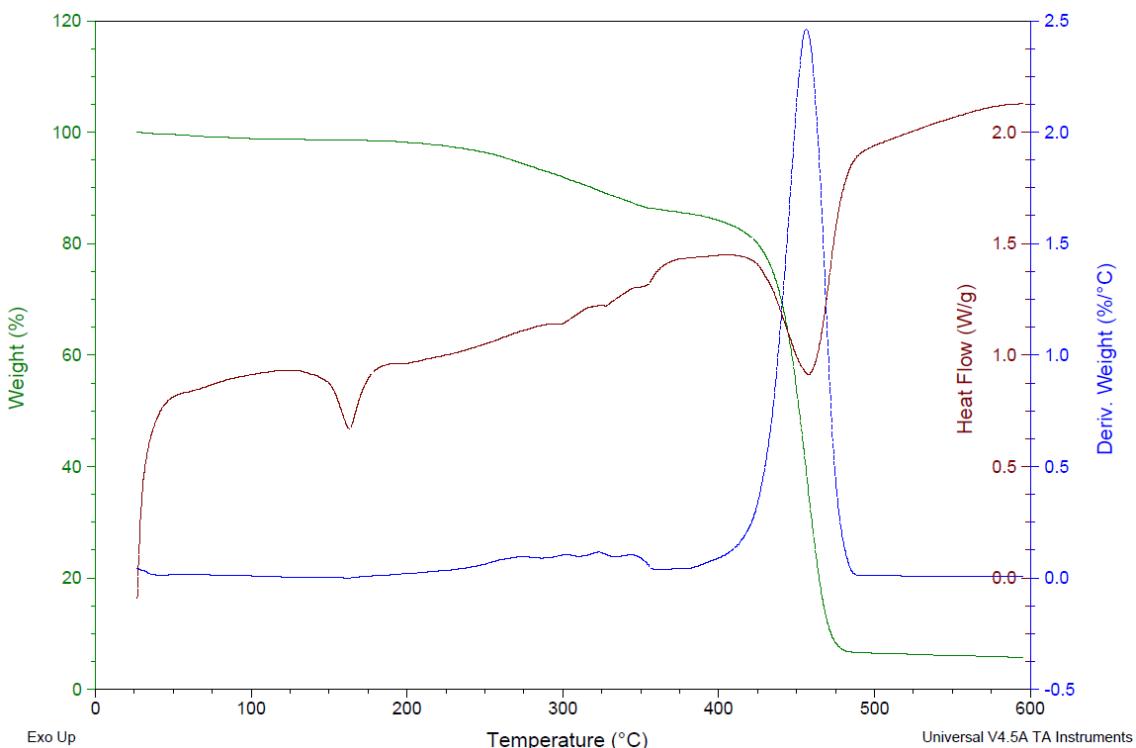


Figura 39. Caracterização térmica do compósito com resíduo de macaúba e PP 25/75%.

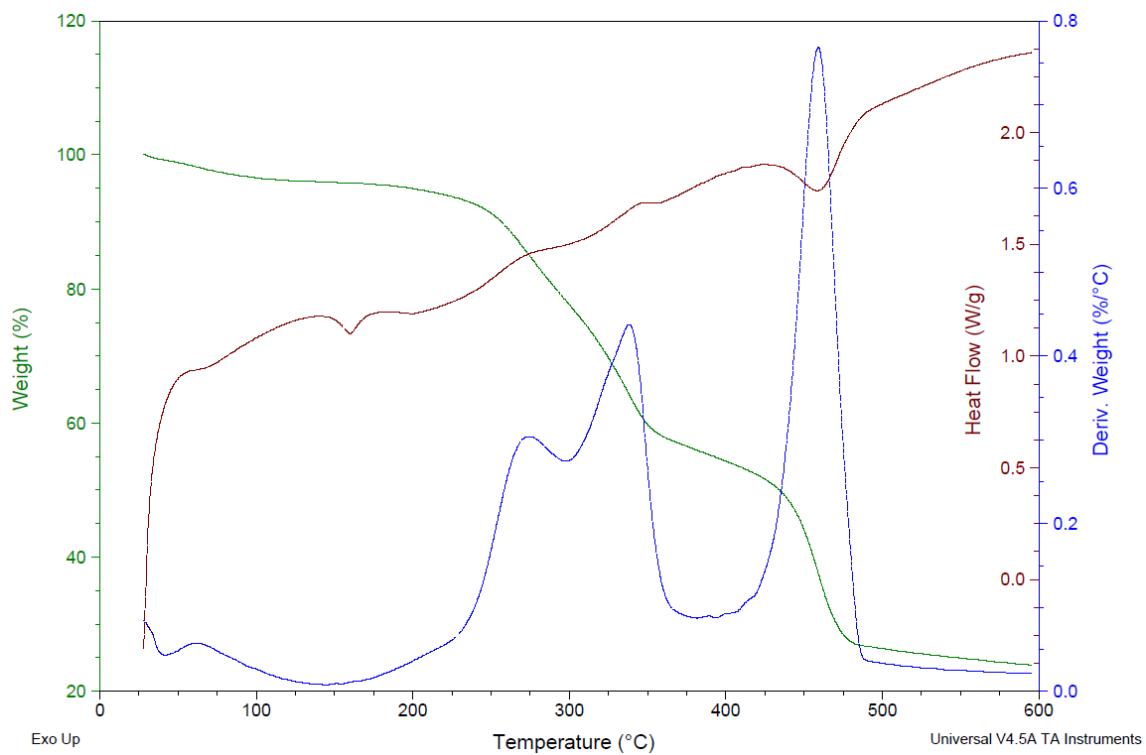


Figura 40. Caracterização térmica do compósito com resíduo de macaúba e PP 50/50%.

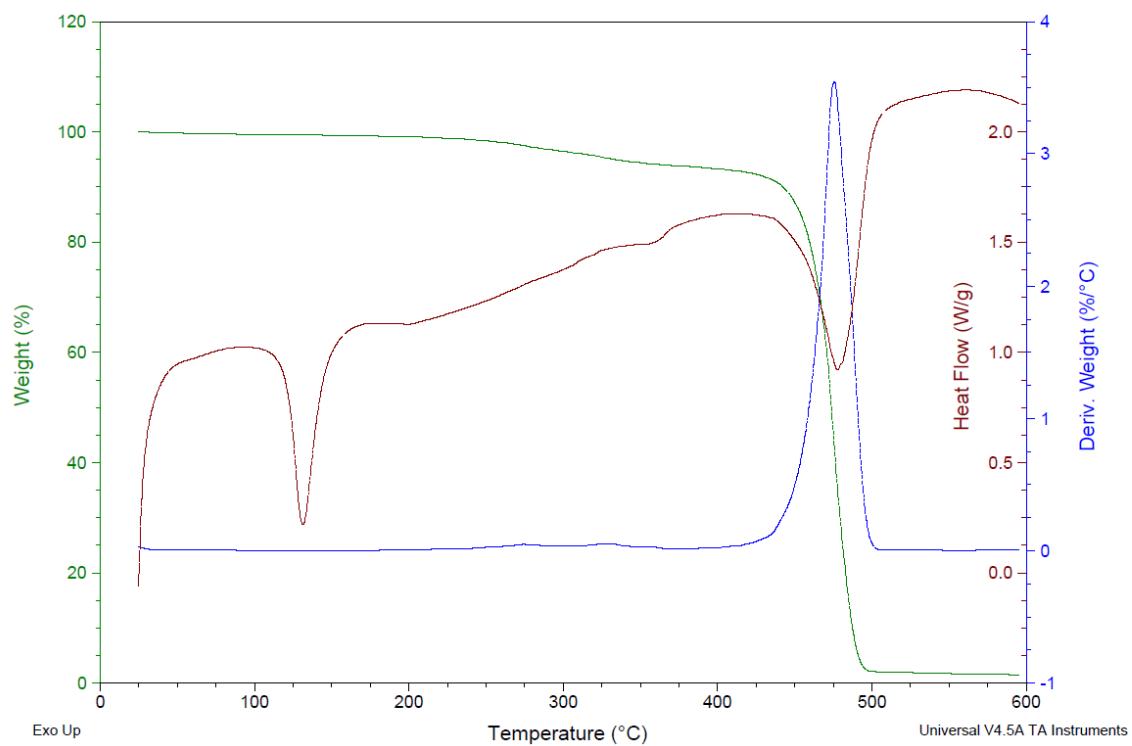


Figura 41. Caracterização térmica do compósito com resíduo de macaúba e PEAD 10/90%.

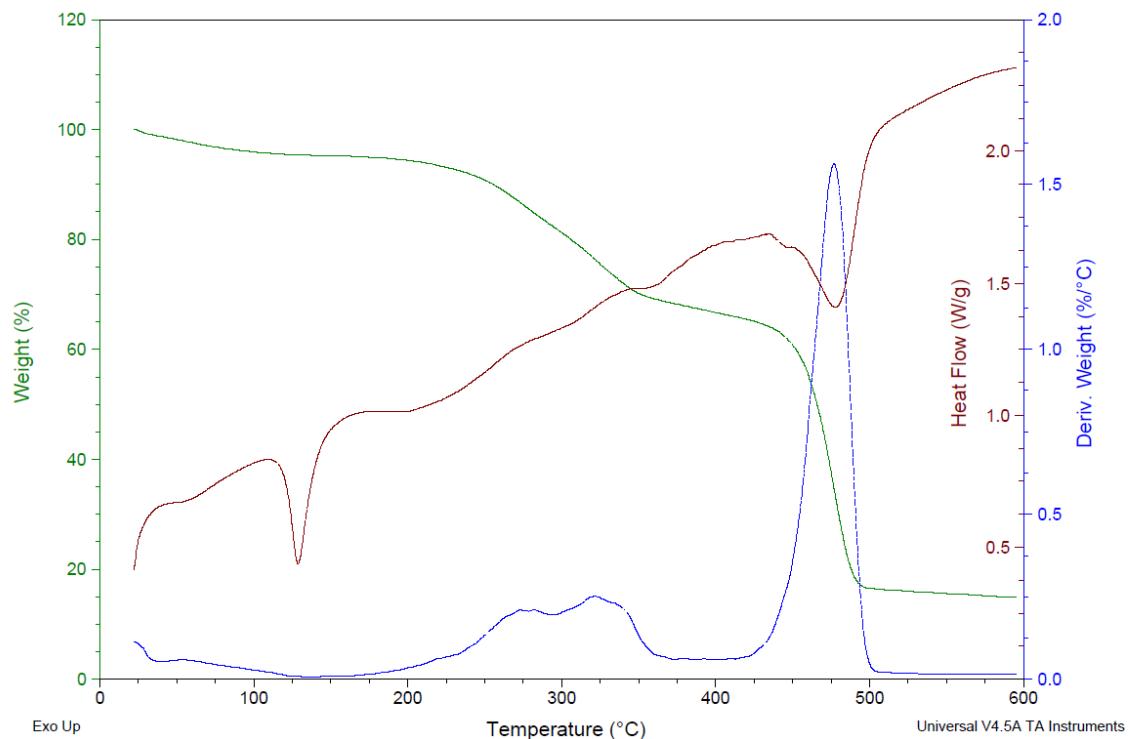


Figura 42. Caracterização térmica do compósito com resíduo de macaúba e PEAD 50/50%.

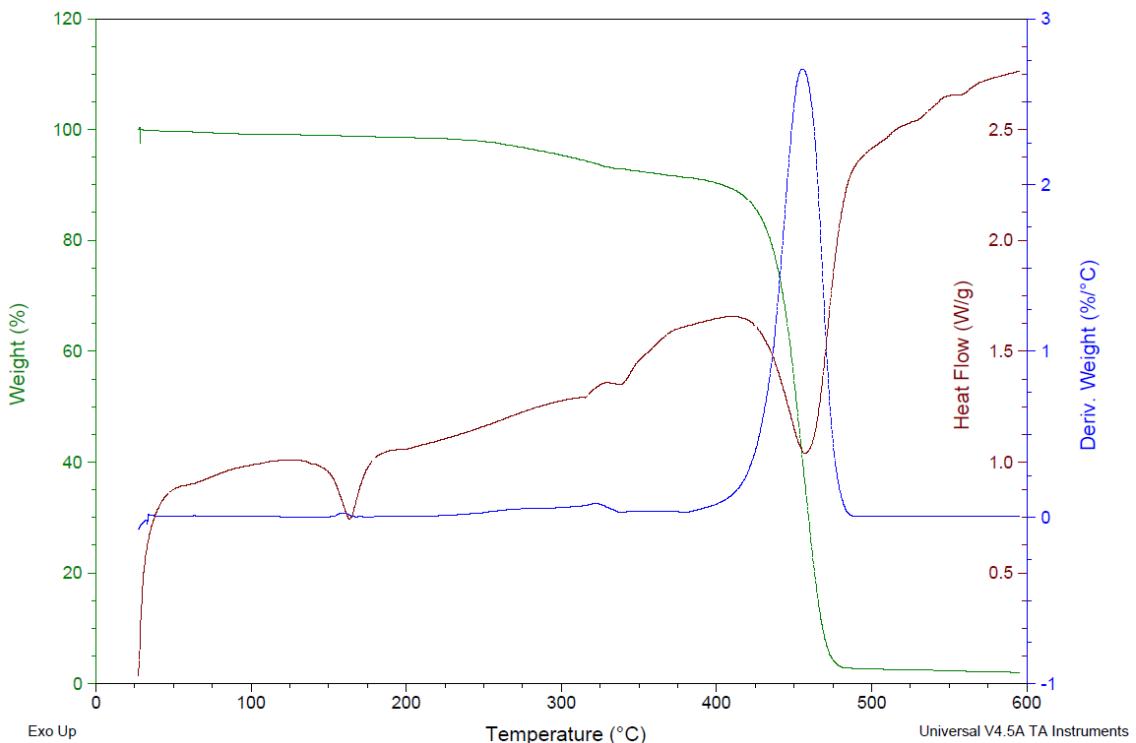


Figura 43. Caracterização térmica do compósito com resíduo de babaú e PP 10/90%.

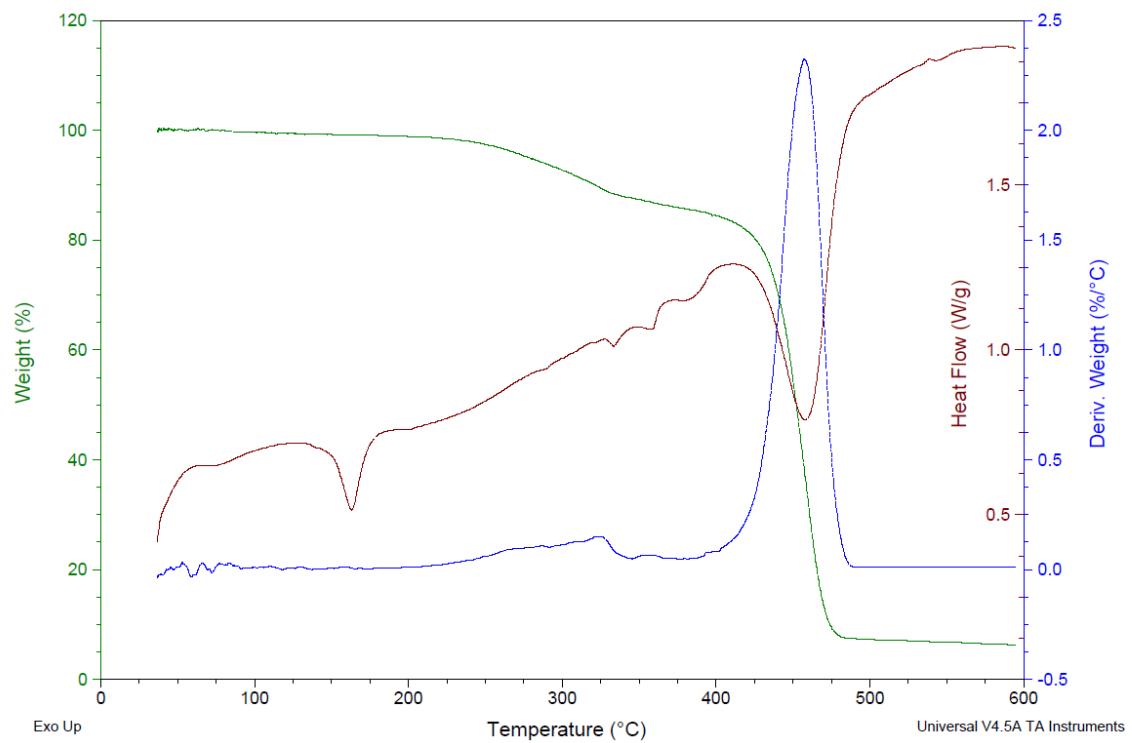


Figura 44. Caracterização térmica do compósito com resíduo de babaçu e PP 25/75%.

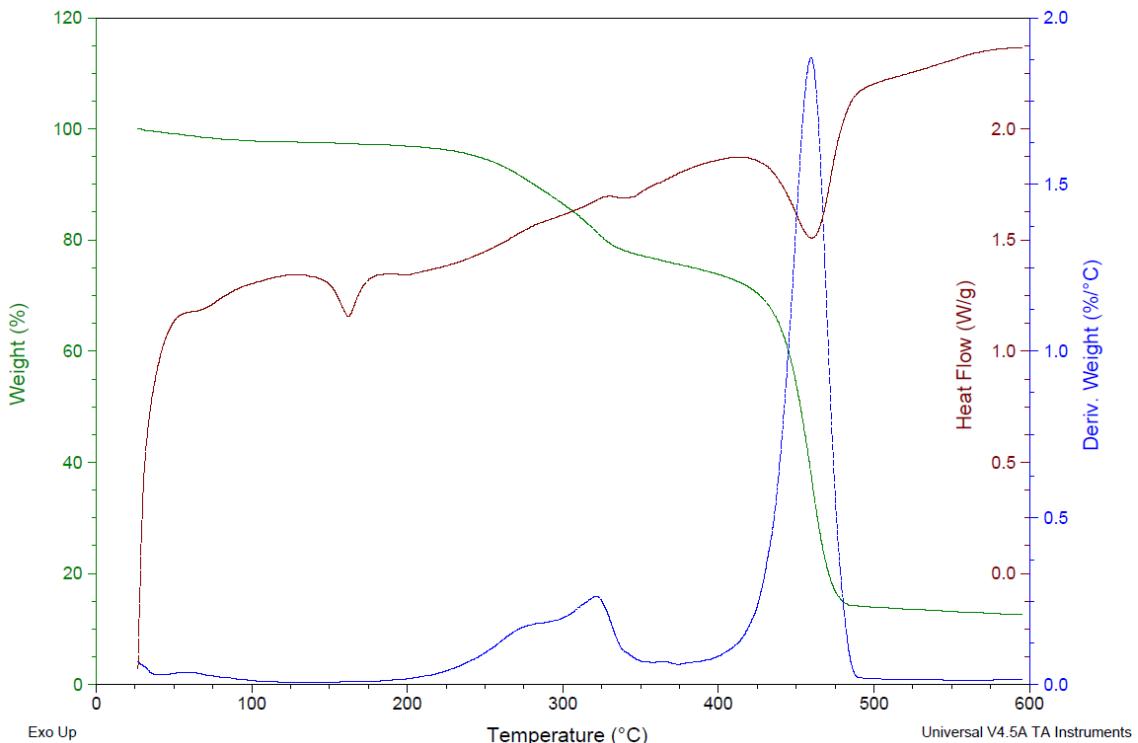


Figura 45. Caracterização térmica do compósito com resíduo de babaçu e PP 50/50%.

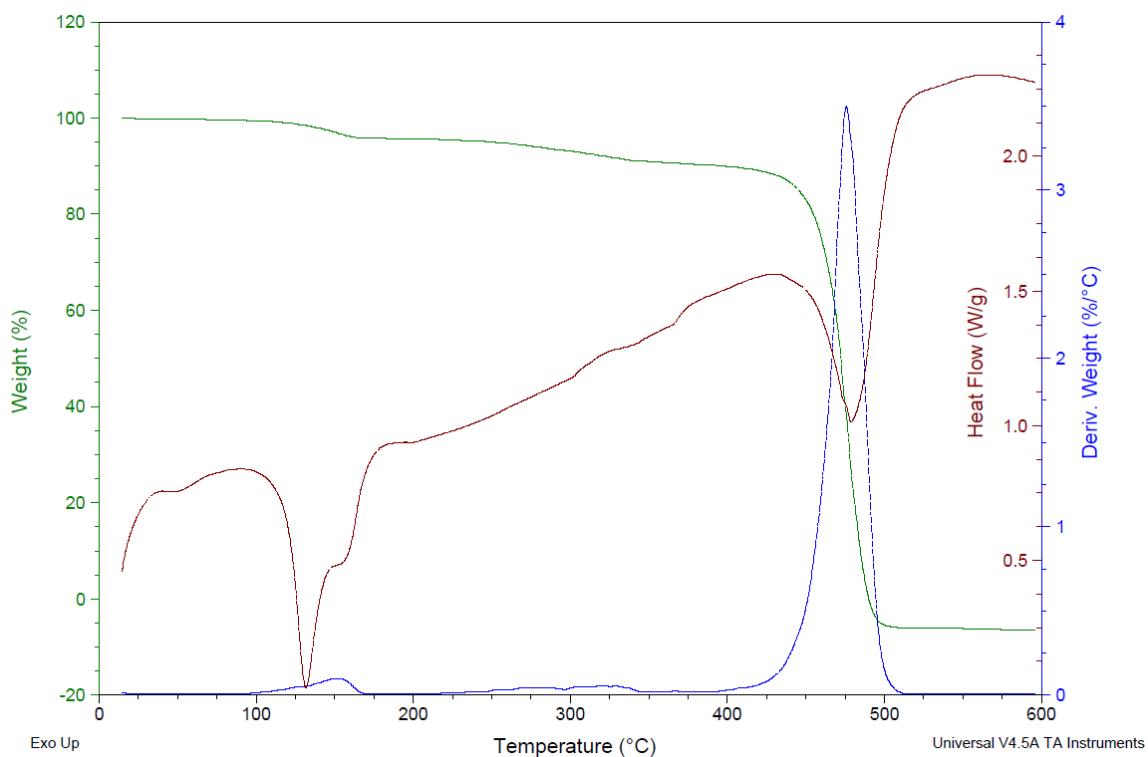


Figura 46. Caracterização térmica do compósito com resíduo de babaçu e PEAD 10/90%.

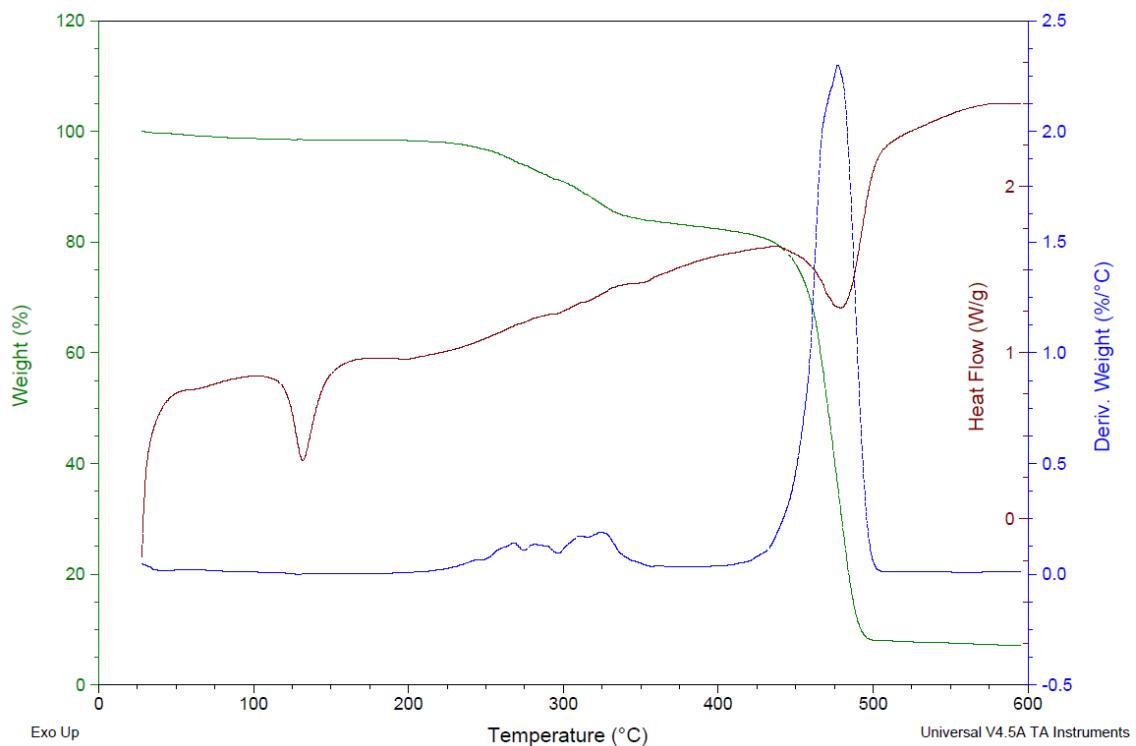


Figura 47. Caracterização térmica do compósito com resíduo de babaçu e PEAD 25/75%.

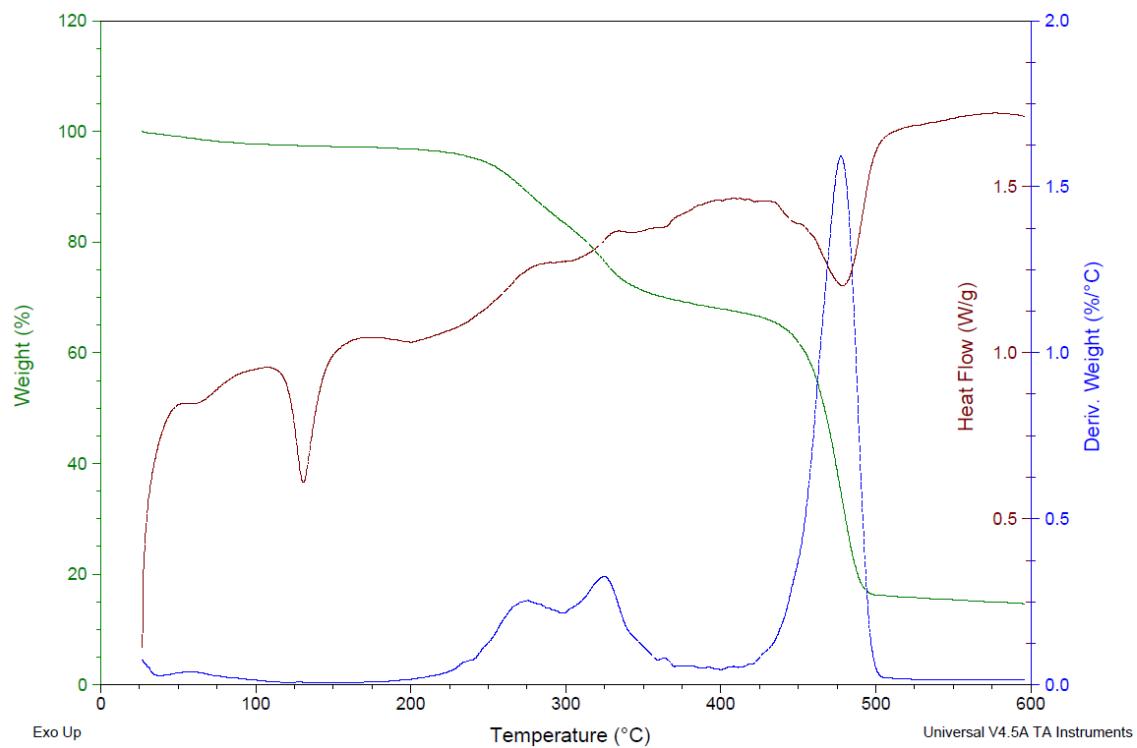


Figura 48. Caracterização térmica do compósito com resíduo de babaçu e PEAD 50/50%.

APÊNDICE C - ANÁLISE MECÂNICA DINÂMICA (DMA)

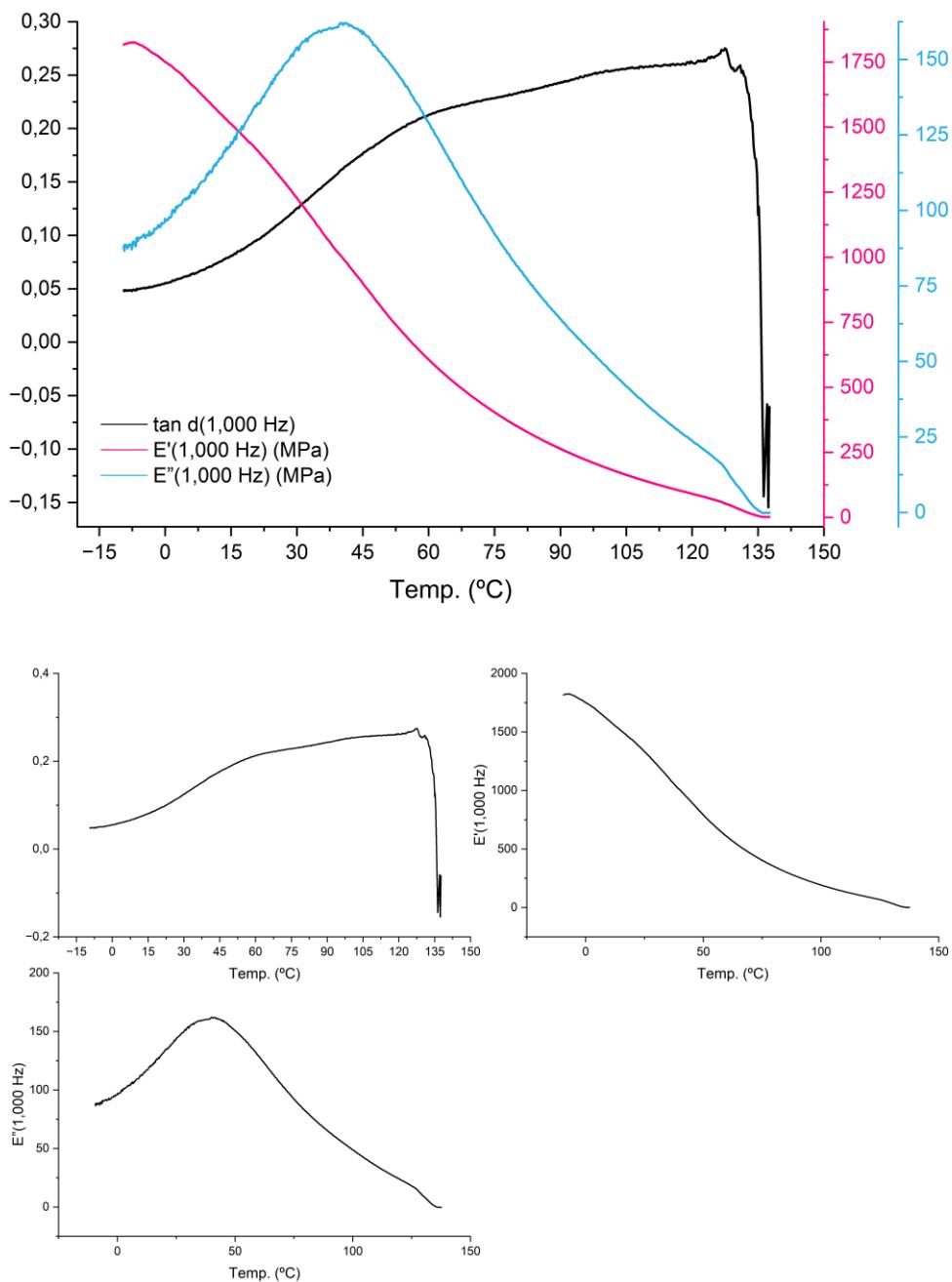


Figura 49. Curvas $\tan \delta$ do tratamento 100% PEAD.

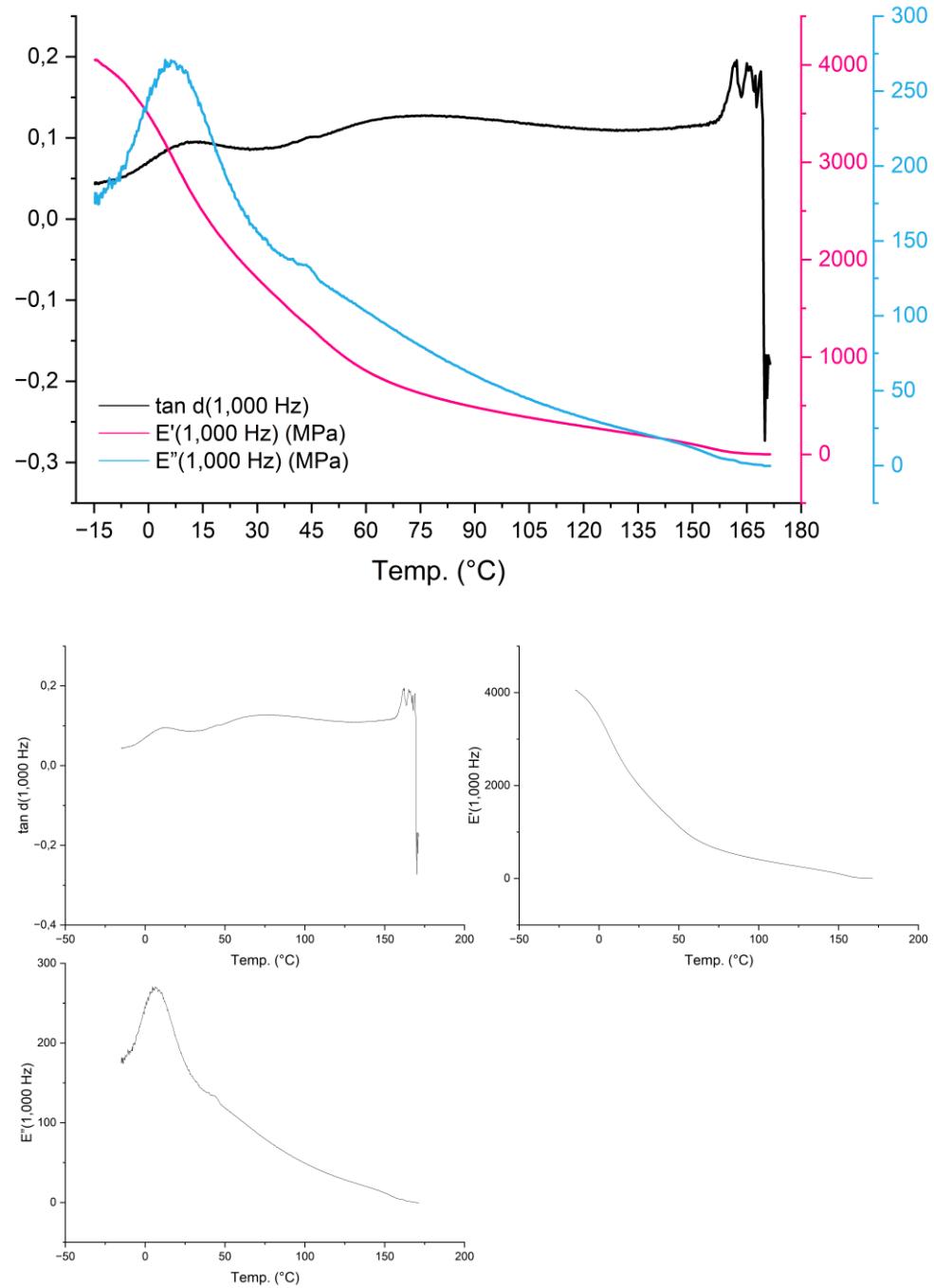


Figura 50. Curvas $\tan d$ do tratamento 100% PP.

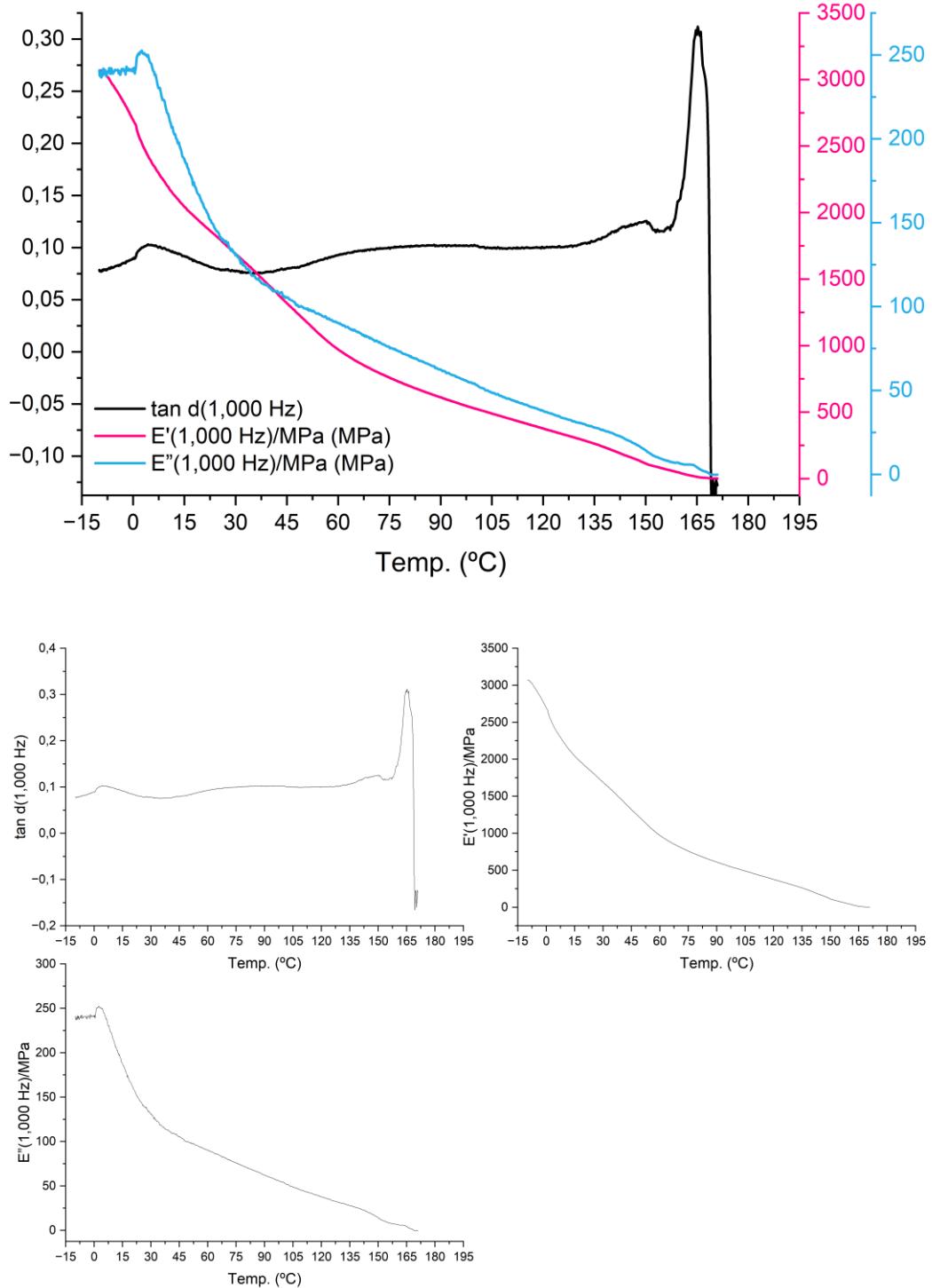


Figura 51. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de macaúba 10% e PP 90%.

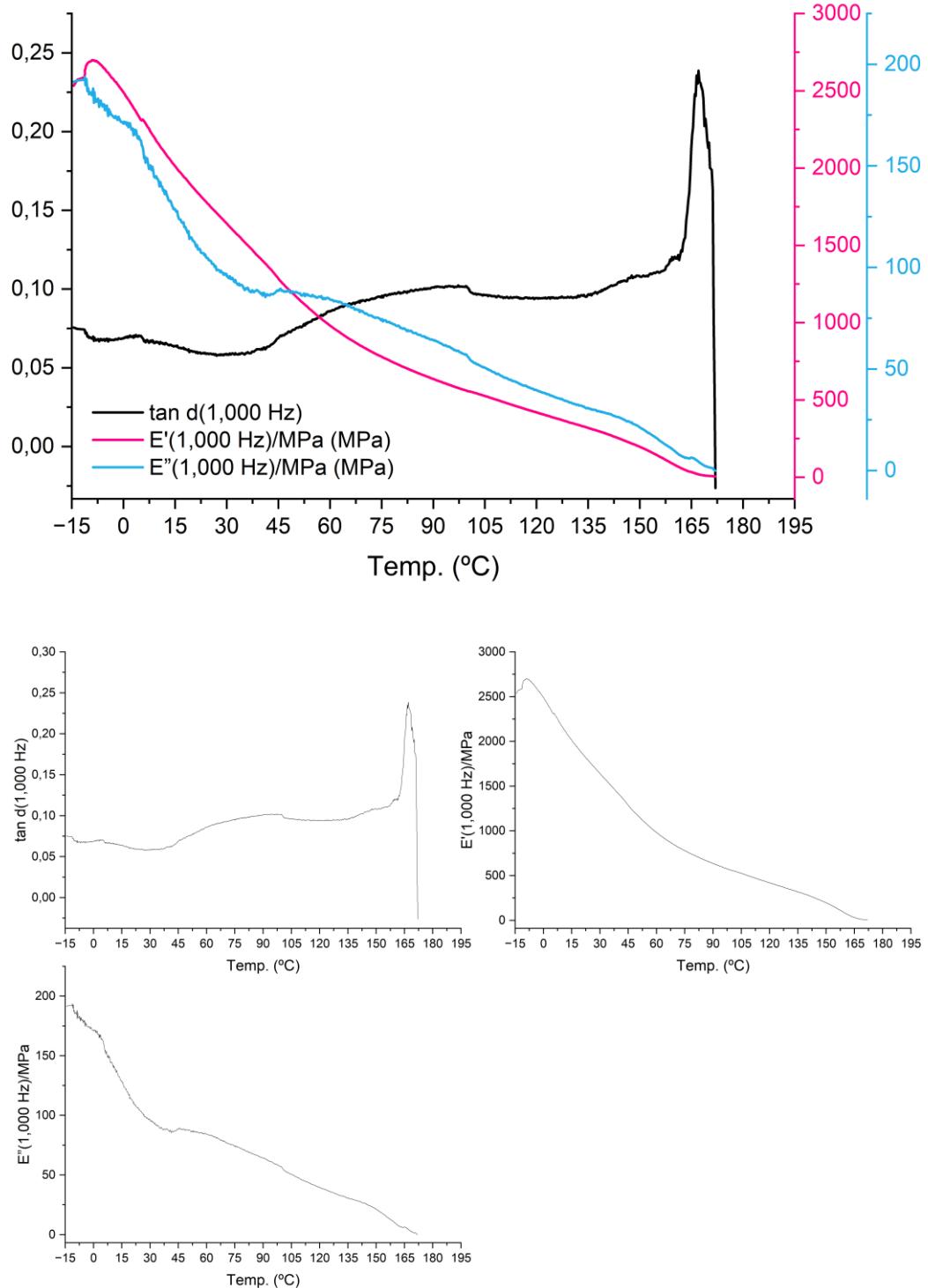


Figura 52. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de macaúba 25% e PP 75%.

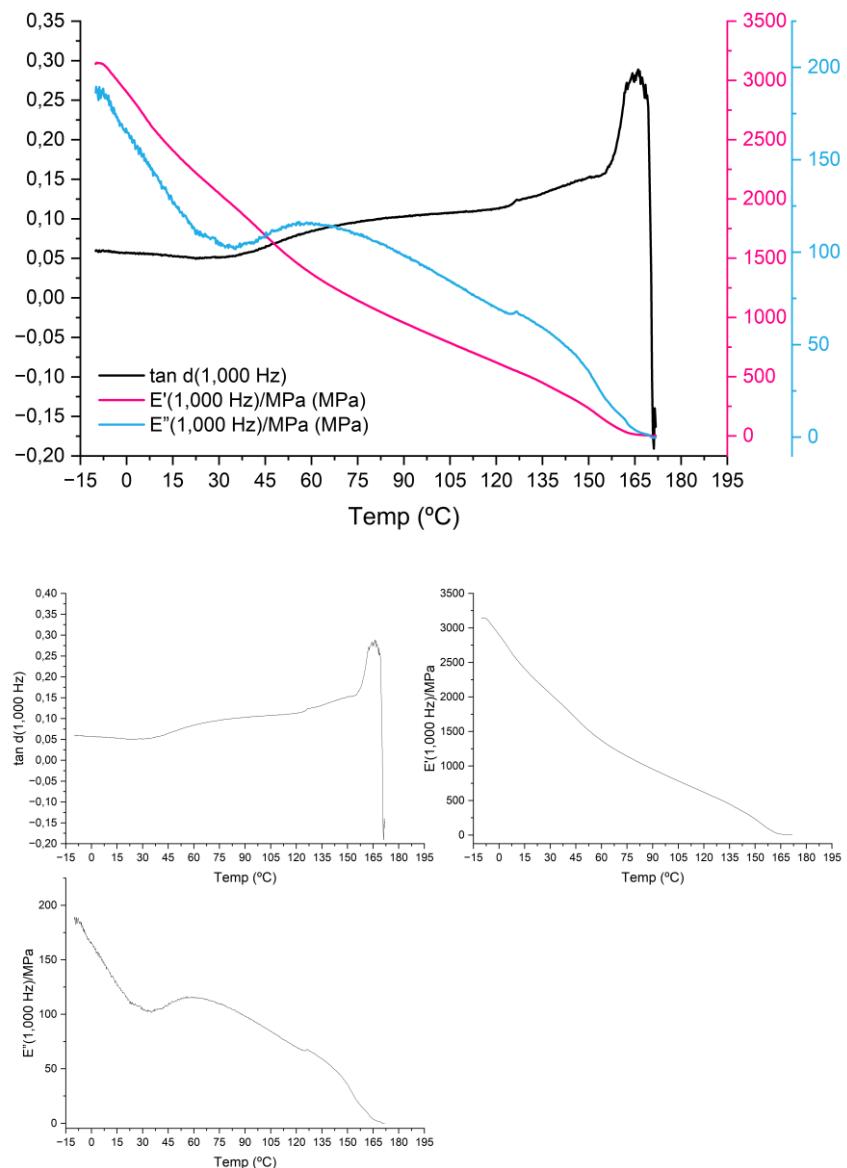


Figura 53. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de macaúba 50% e PP 50%.

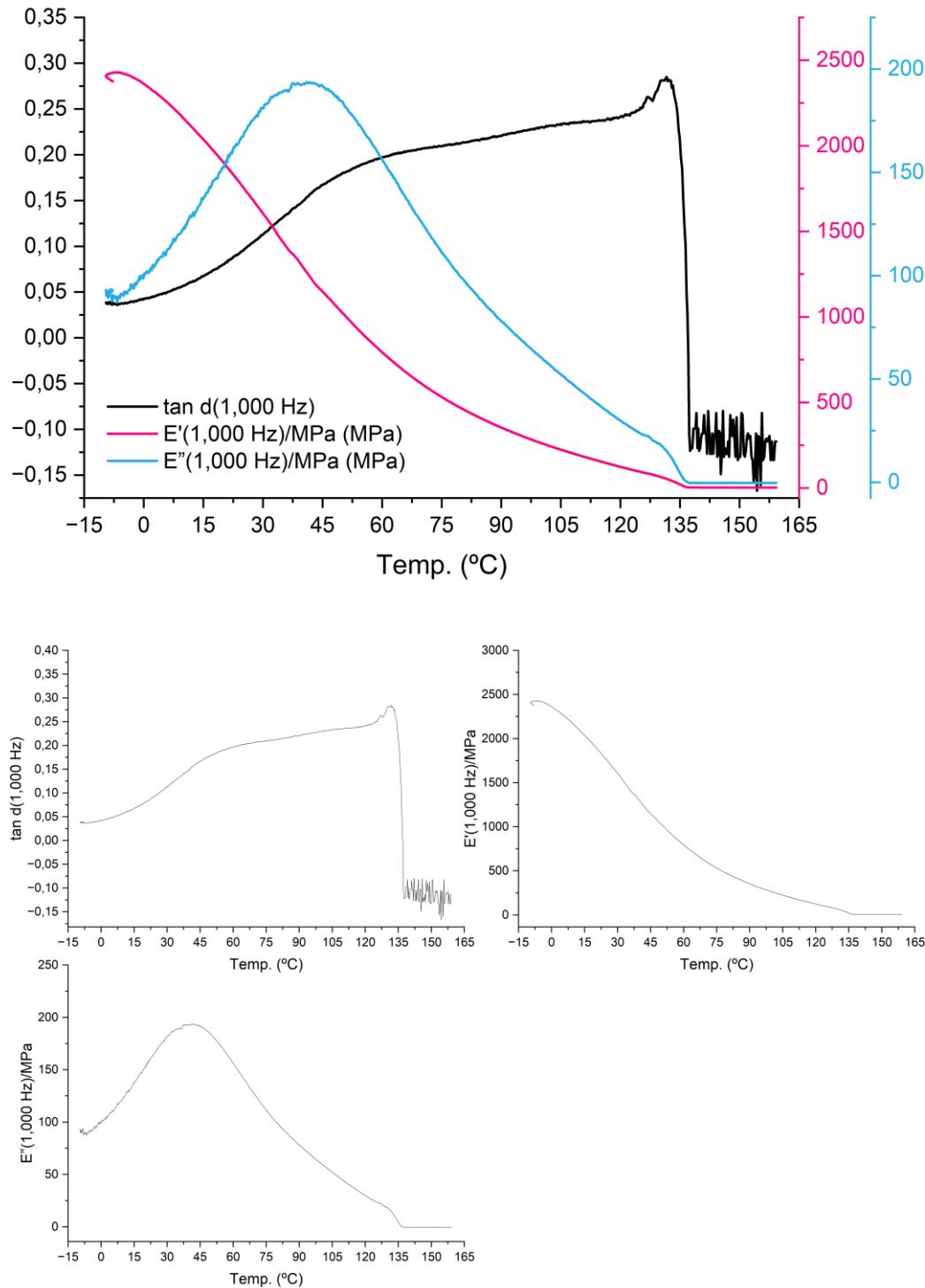


Figura 54. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de macaúba 10% e PEAD 90%.

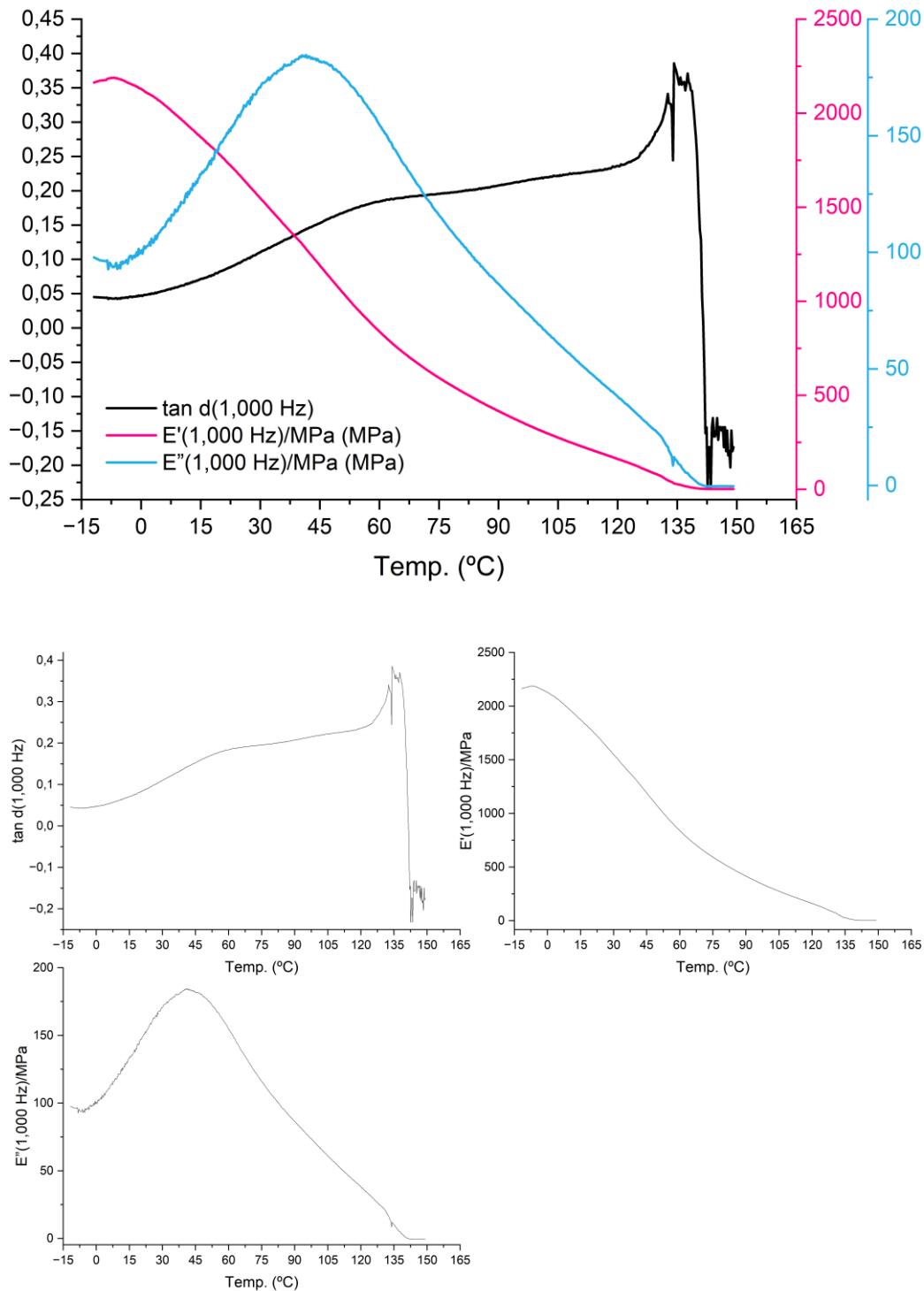


Figura 55. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de macaúba 25% e PEAD 75%.

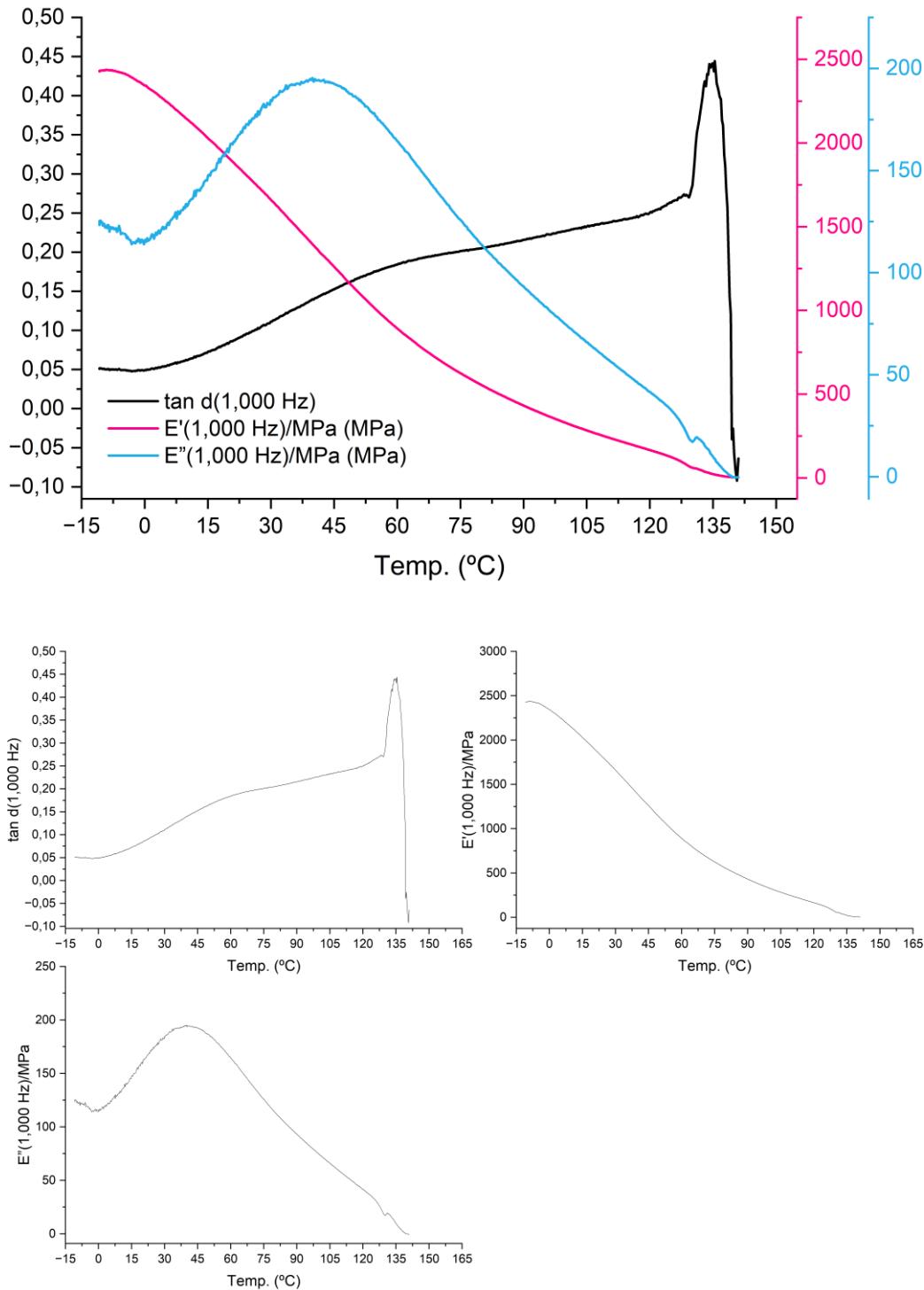


Figura 56. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de macaúba 50% e PEAD 50%.

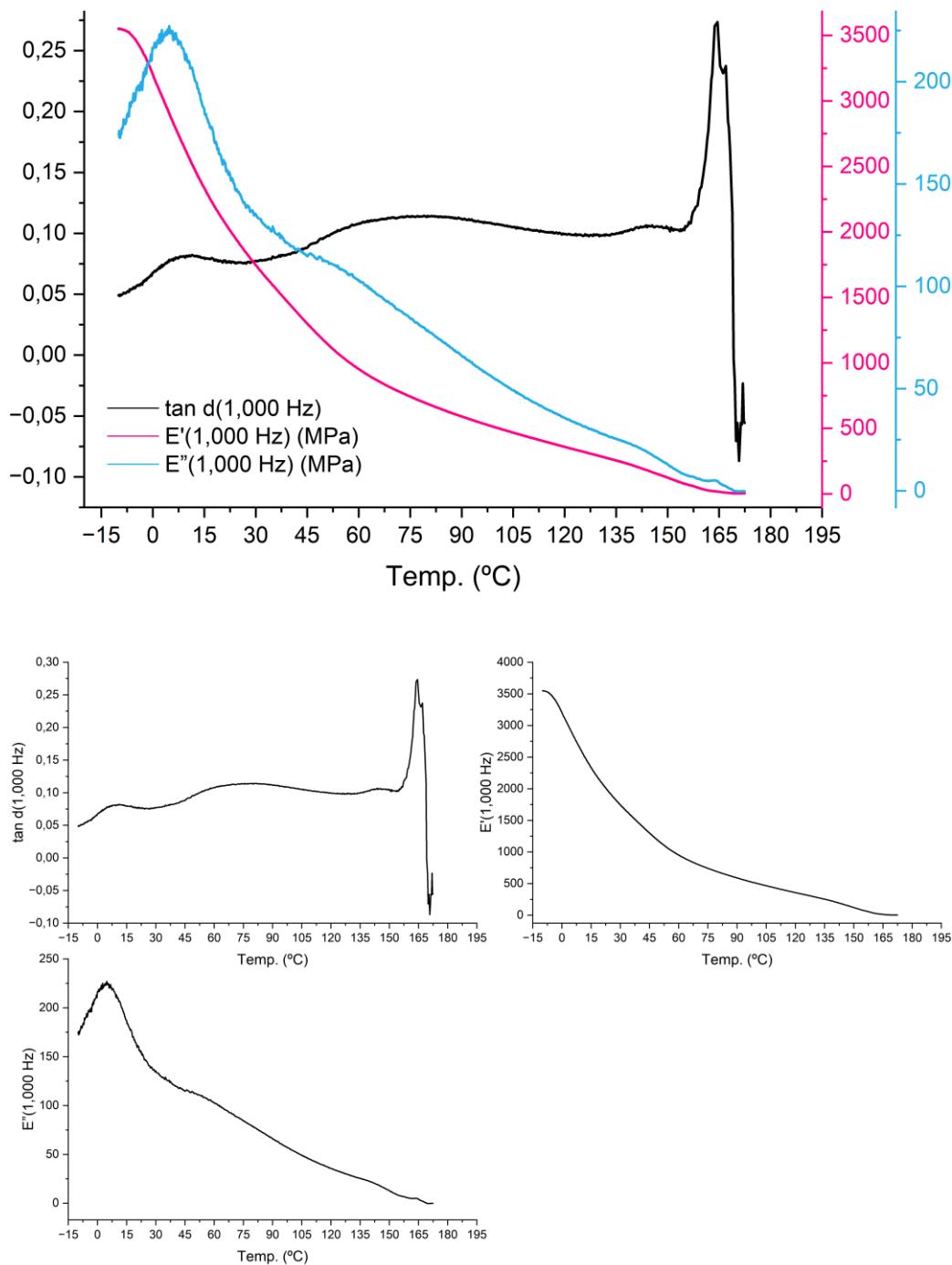


Figura 57. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de babaçu 10% e PP 90%.

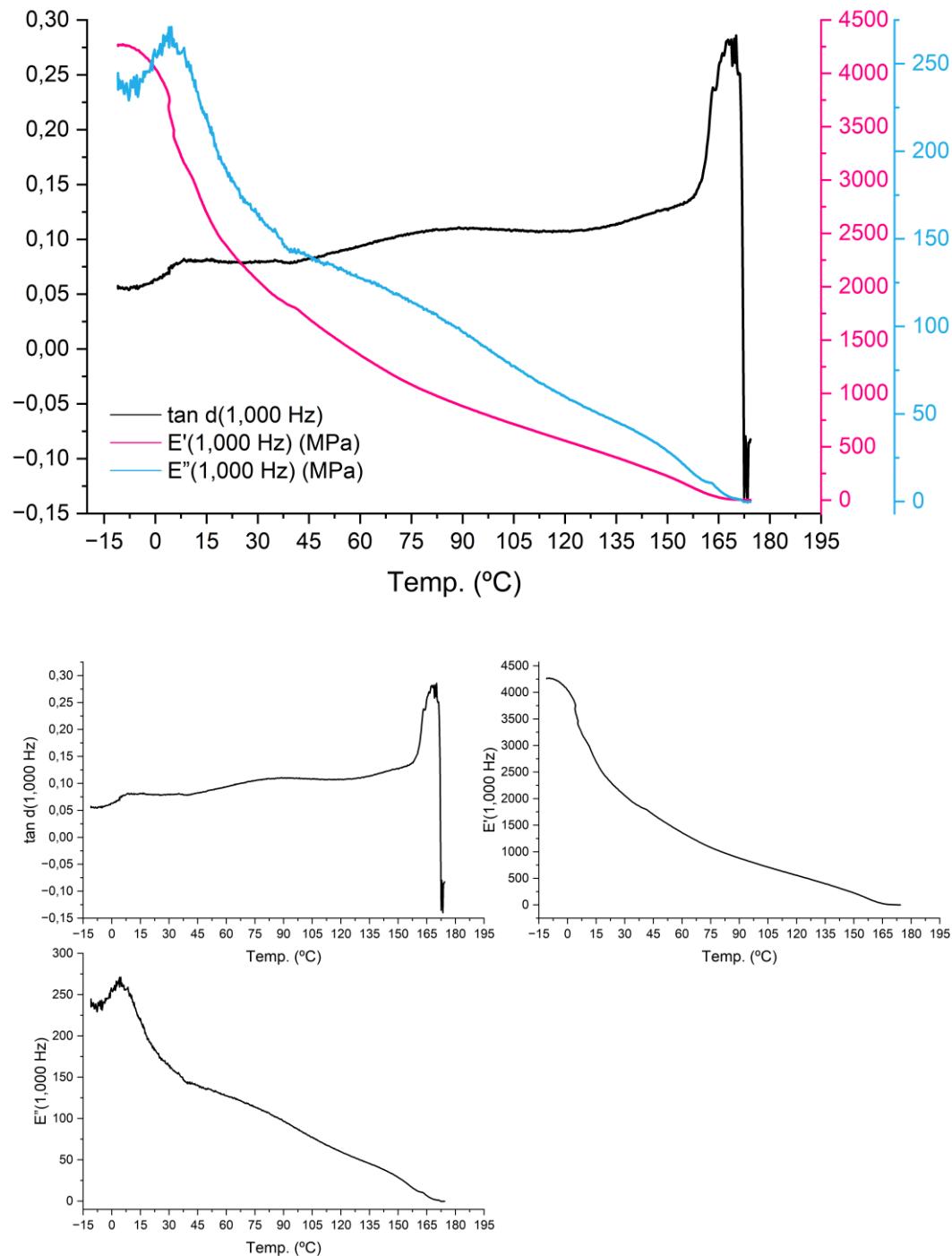


Figura 58. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de babaçu 25% e PP 75%.

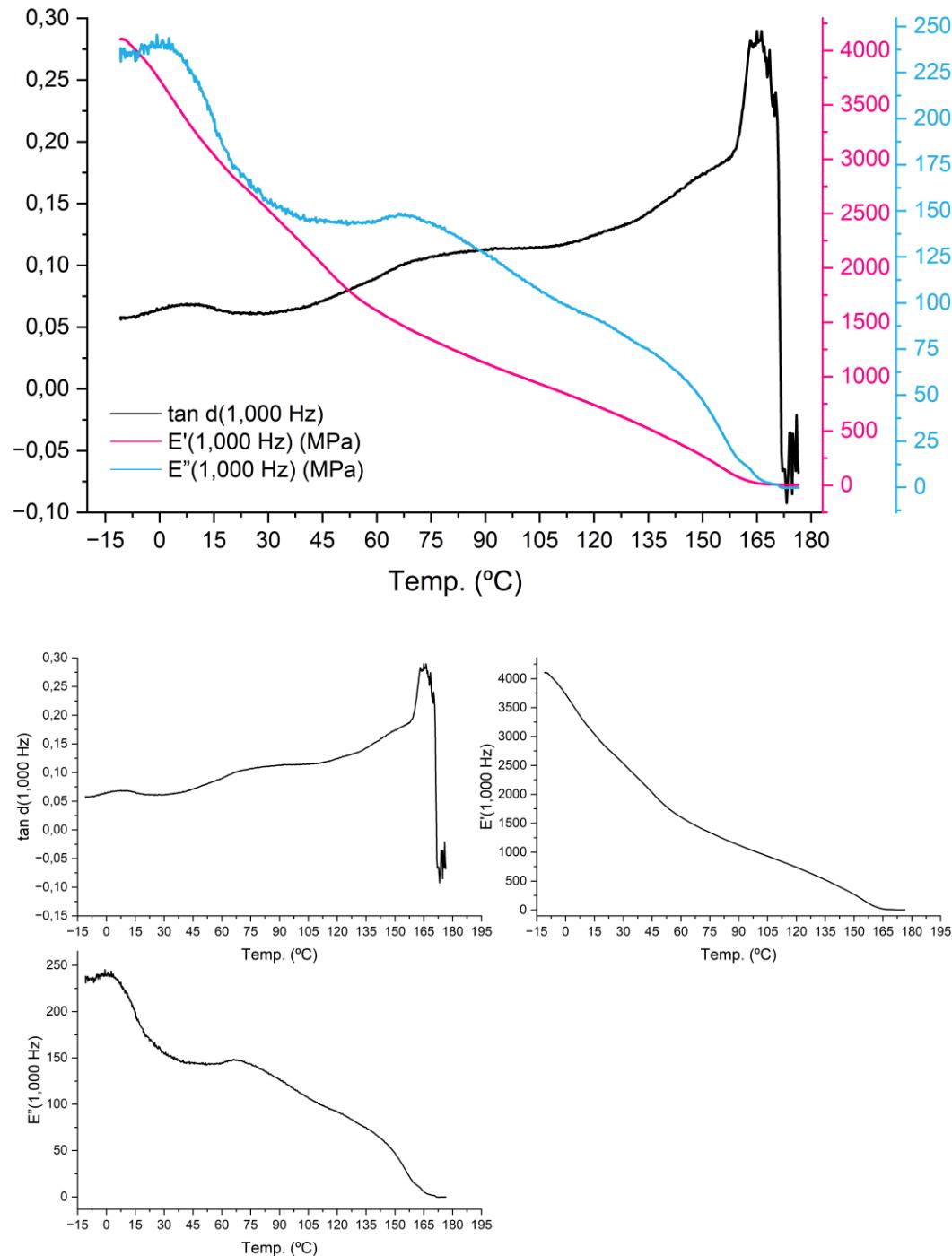


Figura 59. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de babaçu 50% e PP 50%.

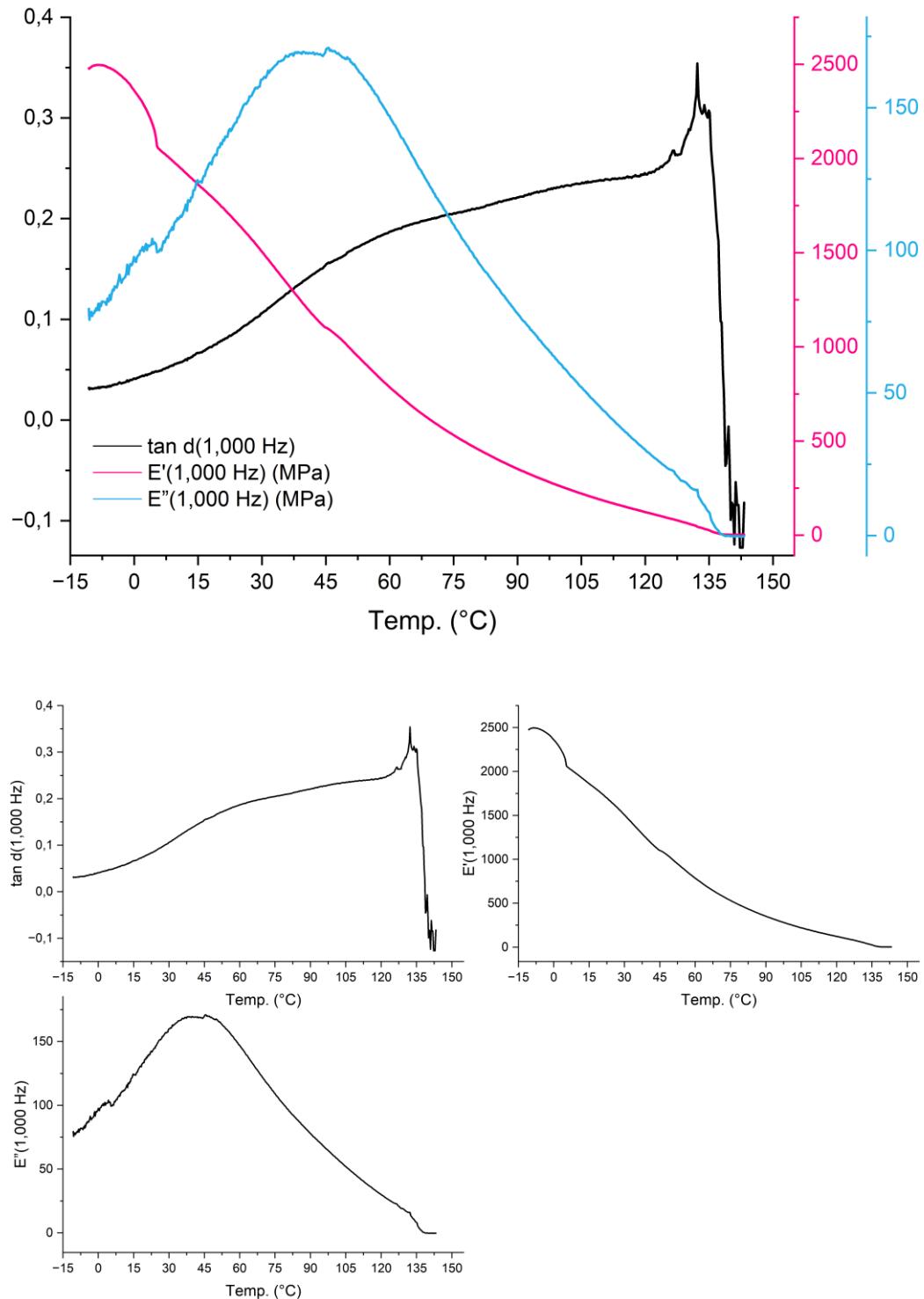


Figura 60. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de babaçu 10% e PEAD 90%.

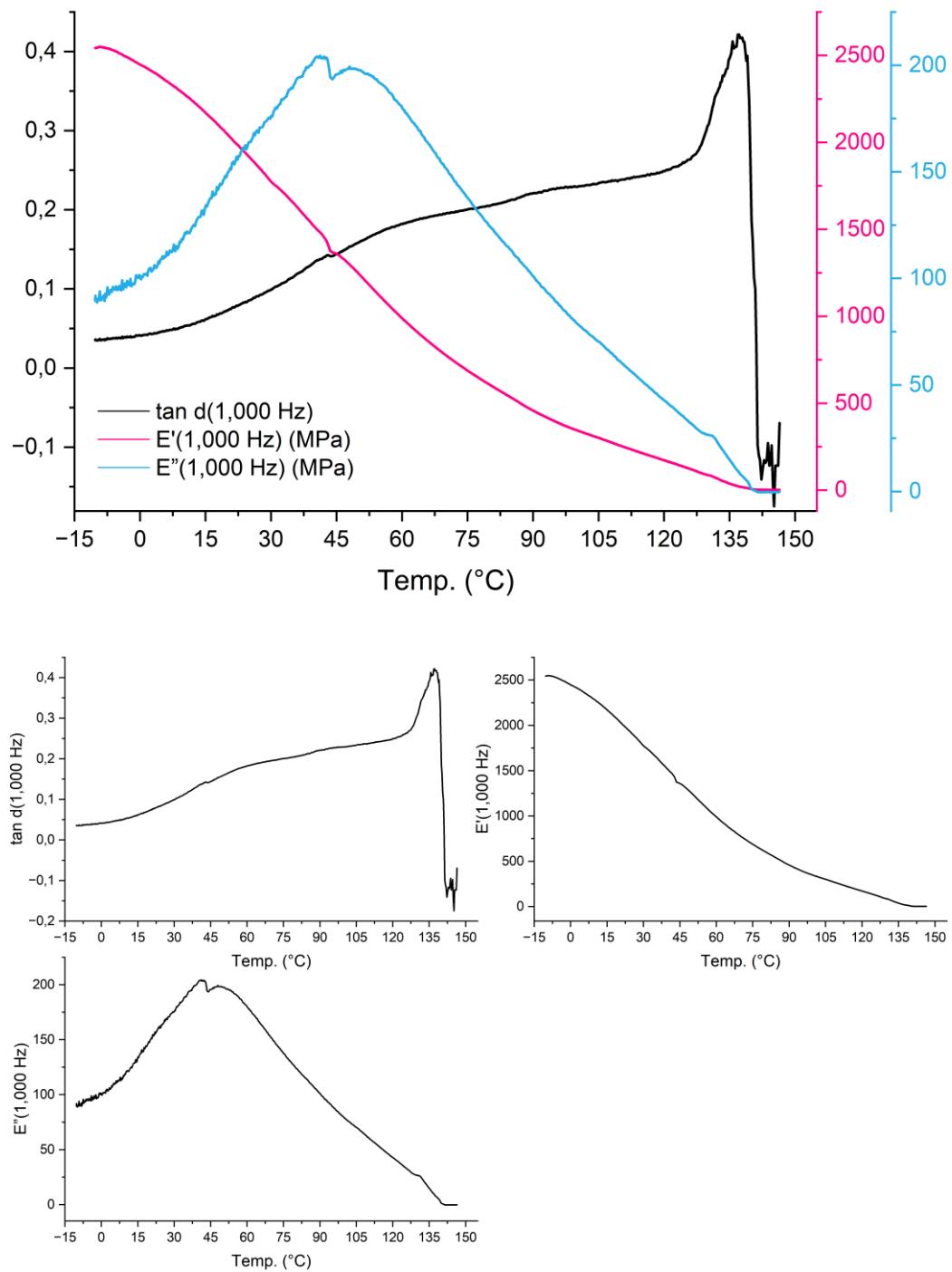


Figura 61. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de babaçu 25% e PEAD 75%.

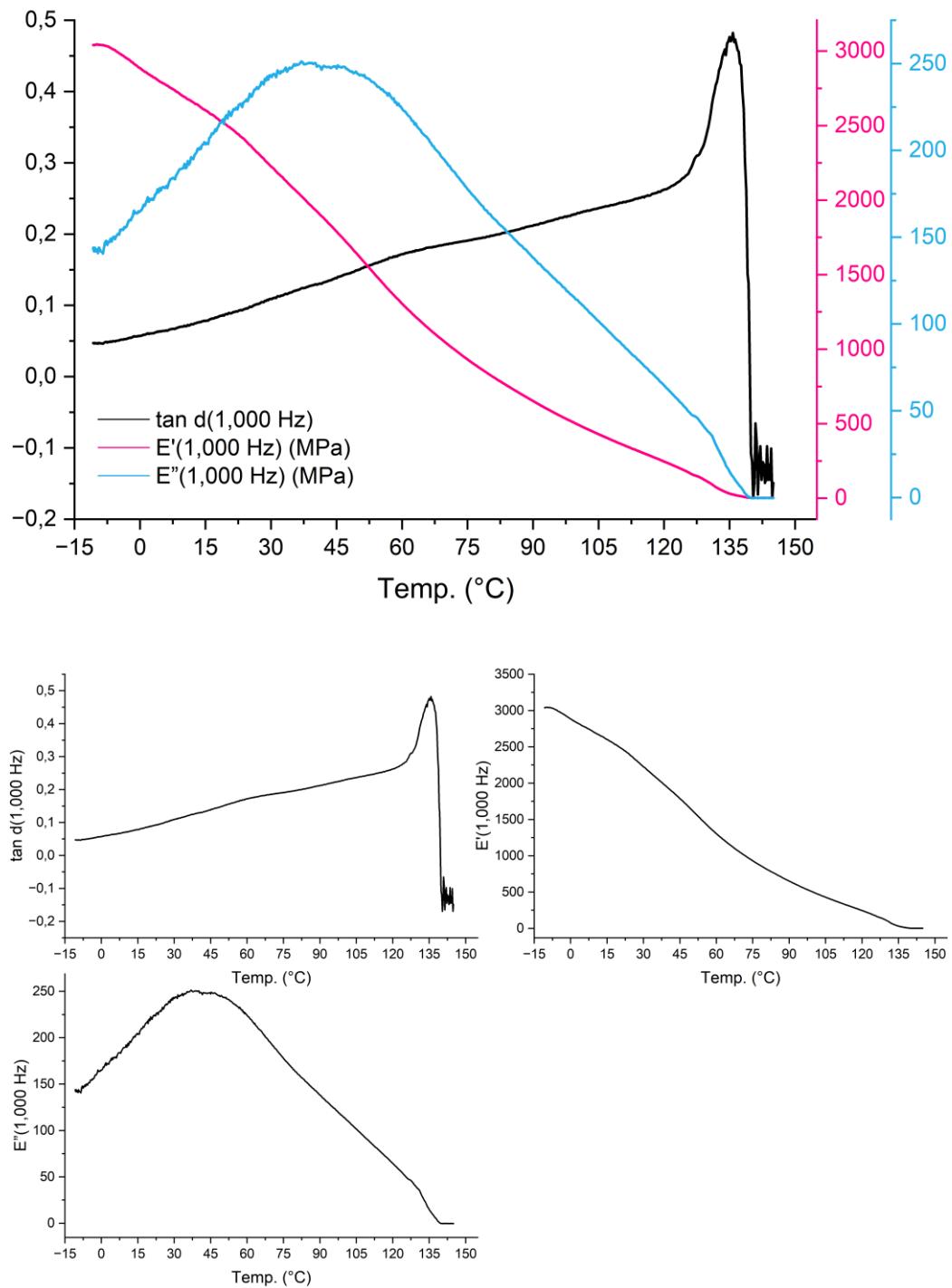


Figura 62. Resultados de E' dos compósitos fabricados com resíduo de babaçu 50% e PEAD 50%.