



**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**

**JULIA CARDOSO LANDIM**

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL COMPÓSITO COM BASE DE  
POLIACETAL REFORÇADO COM BIOMASSA DE CASCA DE CASTANHA DO  
PARÁ (*Bertholletia excelsa*)**

**VOLTA REDONDA - RJ  
2024**



**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL COMPÓSITO COM BASE DE  
POLIACETAL REFORÇADO COM BIOMASSA DE CASCA DE CASTANHA DO  
PARÁ (*Bertholletia excelsa*)**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Materiais, sob a orientação da Prof<sup>a</sup> Dra. Cirlene Fourquet Bandeira, na área de concentração de Processamento e caracterização de materiais reciclados, compósitos, e biomateriais, linha de pesquisa de Materiais Compósitos.

Orientada: Julia Cardoso Landim

Orientadora: Prof. Dra. Cirlene Fourquet Bandeira

**VOLTA REDONDA - RJ  
2024**

### FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tação Wagner - CRB 7/RJ 4316

L155o Ladim, Julia Cardoso

Obtenção e caracterização de material compósito com base de Poliacetal reforçado com biomassa de casca de castanha do Pará (*Bertholletia excelsa*). / - Volta Redonda: UniFOA, 2024.

69 p.: II

Orientador (a): Profa. Cirlene Fourquet Bandeira

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em Materiais, 2024

1. Materiais - dissertação. 2. POM. 3. Castanha do Brasil - reaproveitamento. 4. Agroindústria. I. Bandeira, Cirlene Fourquet. II. Centro Universitário de Volta Redonda. III. Título.

CDD – 620.1



FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS



JULIA CARDOSO LANDIM

CONFEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAL COMPÓSTO COM BASE DE POLIACETAL  
REFORÇADO POR BIOMASSA DE CASCA DE CASTANHA DO PARÁ

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cirlene Fourquet Bandeira

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE  
"MESTRE EM MATERIAIS"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE MESTRADO  
PROFISSIONAL EM MATERIAIS

*Roberto de Oliveira Magnago*

Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago  
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

*Cirlene Fourquet Bandeira*

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cirlene Fourquet Bandeira  
Presidente / UniFOA

*Sérgio Roberto Montoro*

Prof. Dr. Sérgio Roberto Montoro  
Examinador interno / UniFOA

*Daniela Camargo Vernilli*

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Daniela Camargo Vernilli  
Examinador externo / USP

Dezembro de 2024.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus por me dar oportunidades e os caminhos para chegar até aqui.

À minha orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Cirlene Fourquet Bandeira por estar ao meu lado desde minha graduação até agora, pela paciência e parceria, além de todos os ensinamentos.

Aos meus pais, Eloisa Landim Cardoso e Antônio Carlos Landim, por me apoiarem sempre e trabalharem muito duro para me proporcionar o apoio necessário, além de me incentivar mesmo com ideias absurdas que eles sabiam que não tínhamos condições de sustentar.

Ao meu companheiro Douglas do Couto Soares por incentivar todos os meus objetivos e planejar comigo cada ação necessária para alcançar meus sonhos.

Ao meu tio Marcos Landim Cardoso por me aguentar mexendo nas suas ferramentas para cortar meus corpos de prova.

À banca examinadora de qualificação e defesa (Dr. Sérgio Roberto Montoro e Dra. Daniella Camargo Vernilli) por todas as contribuições.

Aos técnicos de laboratório UniFoa em especial o técnico Dirceu Hartung Camargo Coutinho.

Dedico essa pesquisa aos meus pais e meu marido que tanto me apoiaram, não apenas durante a realização deste trabalho, mas em todos os momentos difíceis que passei durante minha formação. E a minha orientadora Prof<sup>a</sup>. Dra. Cirlene Fourquet Bandeira.

“Húrin Thalion, isso é o que eu julgo mais verdadeiro dizer: que visas o alto, mas eu temo cair para o fundo”

Tolkien, J. R. R, Os Filhos de Húrin, 2020

## SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

DSC - Calorimetria Exploratória Diferencial ou *Differential Scanning Calorimetry*

FT-IR - *Fourier Transforme Infra Red*

PE - Polietileno de alta densidade

PEBD - Polietileno de baixa densidade

PET - Polietileno Tereftalato

POM - Poliacetal

PP - Polipropileno

PS - Poliestireno

PVC - Policloreto de Vinila

TGA - Análise termogravimétrica ou *Thermogravimetric Analysis*

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Estrutura da cadeia polimérica do POM.....	19
<b>Figura 2:</b> Árvore da espécie <i>Bertholletia Excelsa</i> .....	20
<b>Figura 3:</b> Valor da produção, em mil Reais, de Castanha do Pará na Amazônia brasileira, separada por estado.....	20
<b>Figura 4:</b> Fruto da castanheira da espécie <i>Bertholletia excelsa</i> .....	21
<b>Figura 5:</b> Materiais compósitos classificados segundo o tipo do reforço utilizado.....	23
<b>Figura 6:</b> Resíduo de Castanha do Pará dispostos nas ruas de Belém do Pará.....	30
<b>Figura 7:</b> Poliacetal grade M90 (POM) da CELCON®.....	31
<b>Figura 8:</b> Erlenmeyer com amostra na proporção de 1:10 (m/m) de biomassa e água destilada.....	32
<b>Figura 9:</b> Processo de lavagem da biomassa para retirada dos materiais lignocelulósicos.....	33
<b>Figura 10:</b> Princípio de medição do CHNS/O da PerkinElmer.....	36
<b>Figura 11:</b> Corpos de prova de tração de acordo com a norma ASTM D 638 com dimensões em mm.....	39
<b>Figura 12:</b> Raspagem das cascas da Castanha do Pará.....	40
<b>Figura 13:</b> Casca da Castanha do Pará após a primeira moagem.....	40
<b>Figura 14:</b> Casca da Castanha do Pará após a segunda moagem e peneirada com tamanho de partícula inferior a 50#.....	41
<b>Figura 15:</b> Casca da Castanha do Pará após tratamento idrotérmico.....	41
<b>Figura 16:</b> Curva de TGA e derivada da biomassa de Castanha do Pará in natura.....	42
<b>Figura 17:</b> Curva de TGA e derivada da biomassa de Castanha do Pará tratada....	43
<b>Figura 18:</b> Curva de TGA e derivada do polímero POM.....	44
<b>Figura 19:</b> Curva de DSC do polímero POM.....	45
<b>Figura 20:</b> Análise de DSC da castanha in natura.....	45
<b>Figura 21:</b> Análise de DSC da castanha tratada hidrotérmicamente.....	46
<b>Figura 22:</b> Espectro de FT-IR da biomassa da casca da Castanha do Pará in natura obtido pela técnica de UATR com torque de 200N.....	49
<b>Figura 23:</b> Espectro de FT-IR da biomassa da casca da Castanha do Pará tratada obtido pela técnica de UATR com torque de 200N.....	49
<b>Figura 24:</b> Espectro de FT-IR do POM obtido pela técnica de UATR com torque de 200N.....	50
<b>Figura 25:</b> Família de compósitos com 0%, 10%, 20% e 30% m/m de reforço (respectivamente de cima para baixo) de biomassa in natura.....	52
<b>Figura 26:</b> Compósitos in natura após triturados no moinho de facas com 0%, 10%, 20% e 30% m/m de reforço (respectivamente da esquerda para a direita).....	53
<b>Figura 27:</b> Corpos de prova de tração com 0%, 10%, 20% e 30% m/m de reforço (respectivamente da esquerda para a direita) de biomassa.....	53

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1:</b> Métodos de tratamento de substâncias lignocelulósicos mais empregado .....	26
--	----

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de TGA das amostras de castanha in natura, tratada e do polímero puro.....	44
<b>Tabela 2:</b> Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de DSC das amostras de castanha in natura, tratada e do polímero puro.....	47
<b>Tabela 3:</b> Variação de massa das amostras após tratamento hidrotérmico.....	47
<b>Tabela 4:</b> Teores de Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio presentes nas amostras in natura.....	48
<b>Tabela 5:</b> Teores de Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio presentes nas amostras tratadas hidrotermicamente.....	48
<b>Tabela 6:</b> Principais bandas de transmitância da lignina e suas atribuições.....	51
<b>Tabela 7:</b> Propriedades mecânicas dos compósitos.....	54

LANDIM, J. C. **Obtenção e caracterização de material compósito com base de poliacetal reforçado com biomassa da casca de Castanha do Pará (*Bertholletia excelsa*)**. 2024. 69f. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha do Campus Três Poços, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda.

## RESUMO

Um dos maiores desafios da atualidade é o de garantir, para as gerações futuras, acesso a condições dignas de existência, com qualidade de vida que seja compatível com a atual. Sendo assim, vários estudos no sentido de mitigar e dar destino adequado a resíduos tem sido realizado. Dentre estes, a reciclagem de materiais, outrora inservíveis, oriundos do agronegócio vem crescendo, principalmente, no processo de fabricação de compósitos. No contexto atual, o norte do Brasil enfrenta graves problemas ambientais decorrentes do aumento no consumo e na produção de bens e materiais originados das florestas da região. Um dos desafios mais críticos é o destino adequado dos subprodutos gerados por essa agroindústria, como as cascas de Castanha do Pará. Com uma produção anual de aproximadamente 35.351 toneladas (IBGE, 2023), apenas as sementes do fruto são aproveitadas para consumo, enquanto cerca de 90% do restante é descartado, agravando o problema do desperdício e da gestão de resíduos. Para a fabricação de compósitos, muitas empresas vêm optando pelo uso do poliacetal (POM) como matriz, por ser um termoplástico que apresenta alta resistência à abrasão, fácil trabalhabilidade, estabilidade dimensional, resistência química e não absorver umidade. Levando-se em conta esses fatores, o presente trabalho busca obter e caracterizar compósitos formados por uma matriz polimérica, de poliacetal, e um reforço feito a partir da biomassa obtida das cascas da Castanha do Pará *in natura* e tratadas hidrotermicamente nas proporções de 10%, 20% e 30% m/m para comparar os resultados com o polímero puro processado. Sendo assim, o reforço *in natura* foi obtido a partir do processo de moagem e peneiração, das cascas da Castanha do Pará. Parte deste reforço, com granulometria inferior a 50mm, foi tratado hidrotermicamente (45 minutos a uma temperatura de 121 °C em autoclave) para obtenção do material denominado tratado. Na sequência, foram realizados os ensaios de termogravimetria (TGA) e DSC para avaliar as temperaturas de degradação e ponto de fusão de forma a se determinar as temperaturas de trabalho do processo, bem como, a compatibilidade térmica da matriz/reforço. O ensaio de FT-IR visou determinar as características dos materiais e o ensaio de tensão deformação, as características mecânicas de resistência. A partir dos resultados obtidos, foi possível afirmar que o poliacetal utilizado é um material puro que pode ser processado com a biomassa de Castanha do Pará sem impedimentos térmicos. Além disso, o melhor resultado de tensão de escoamento, foi o do compósito com 10% de biomassa em comparação ao polímero puro. Apesar do tratamento hidrotérmico ser efetivo, os resultados de tensão de escoamento não apresentaram diferenças estatísticas entre si. Sendo assim, é possível obter um compósito com menor teor de polímeros, para uso em engrenagens, com maior valor agregado e que contribui significativamente na mitigação de problemas ambientais.

**Palavras-Chave:** POM, castanha do brasil, reaproveitamento, agroindústria, TGA e DSC.

LANDIM, J. C. **Obtaining and characterizing a composite material based on polyacetal reinforced with biomass from the shell of Brazil nuts (*Bertholletia excelsa*)**. 2024. 69f. Dissertation (Professional Master's Degree in Materials) – Fundação Oswaldo Aranha, Campus Três Poços, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda.

### ABSTRACT

One of the greatest challenges today is to guarantee future generations access to decent living conditions, with a quality of life that is compatible with the current one. Therefore, several studies have been carried out to mitigate and dispose of waste appropriately. Among these, the recycling of materials that were previously useless and originated from agribusiness has been growing, mainly in the composite manufacturing process. In the current context, northern Brazil faces serious environmental problems resulting from the increase in consumption and production of goods and materials originating from the region's forests. One of the most critical challenges is the appropriate disposal of by-products generated by this agroindustry, such as Brazil nut shells. With an annual production of approximately 35,351 tons (IBGE, 2023), only the seeds of the fruit are used for consumption, while approximately 90% of the rest is discarded, aggravating the problem of waste and waste management. For the manufacture of composites, many companies have been opting to use polyacetal (POM) as a matrix, because it is a thermoplastic that presents high resistance to abrasion, easy workability, dimensional stability, chemical resistance and does not absorb moisture. Taking these factors into account, this study aims to obtain and characterize composites formed by a polymeric matrix, polyacetal, and a reinforcement made from biomass obtained from Brazil nut shells in natura and hydrothermally treated in proportions of 10%, 20% and 30% m/m to compare the results with the pure processed polymer. Thus, the in natura reinforcement was obtained from the grinding and sieving process of Brazil nut shells. Part of this reinforcement, with particle size lower than 50 mesh, was hydrothermally treated (45 minutes at a temperature of 121 °C in an autoclave) to obtain the material called treated. Next, thermogravimetric (TGA) and DSC tests were performed to evaluate the degradation temperatures and melting point in order to determine the working temperatures of the process, as well as the thermal compatibility of the matrix/reinforcement. The FT-IR test aimed to determine the characteristics of the materials and the stress-strain test, the mechanical resistance characteristics. From the results obtained, it was possible to state that the polyacetal used is a pure material that can be processed with Brazil nut biomass without thermal impediments. In addition, the best yield stress result was that of the composite with 10% biomass compared to the pure polymer. Although the hydrothermal treatment was effective, the yield stress results did not show statistical differences between them. Therefore, it is possible to obtain a composite with a lower polymer content, for use in gears, with greater added value and that contributes significantly to the mitigation of environmental problems.

**Key words:** *POM, brazil nut, reuse, agroindustry, TGA and DSC.*

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	16
1.1. Objetivo	17
1.2. Objetivos Específicos	17
1.3. Justificativa	17
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	18
2.1. Poliacetal	18
2.2. Castanha do Pará- <i>Bertholletia excelsa</i>	19
2.3. Compósitos	22
2.4. Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras Naturais	23
2.5. Tratamento Superficial de Biomassas	25
2.6. Impacto Ambiental	26
2.7. Reciclagem	28
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	30
3.1. Materiais	30
3.1.1. Castanha do Pará ( <i>Bertholletia Excelsa</i> )	30
3.1.2. Poliacetal	30
3.2. Métodos	31
3.2.1. Obtenção da Biomassa da casca da Castanha do Pará	31
3.2.2. Tratamento hidrotérmico	32
3.2.3. Ensaio Termogravimétricos (TGA)	33
3.2.4. Differential Scanning Calorimetry (DSC)	34
3.2.5. Espectrometria de Absorção na Região do Infravermelho (FT-IR)	35
3.2.6. Análise Elementar	36
3.2.7. Pesagem do resíduo tratado	37
3.2.8. Fabricação dos compósitos POM/Casca da Castanha do Pará	37
3.2.9. Confeção dos corpos de prova	38
3.2.10. Ensaio de Tração	38
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	40
4.1. Biomassa da Casca de Castanha do Pará e POM	40
4.1.1. Obtenção da biomassa da casca da Castanha do Pará	40
4.1.2. Tratamento hidrotérmico	41
4.1.3. Análise Termogravimétrica	42
4.1.4. Differential Scanning Calorimetry (DSC)	45

4.1.5. Avaliação do resíduo tratado por pesagem .....	47
4.1.6. Análise Elementar .....	48
4.1.7. Espectrometria de Absorção na Região do Infravermelho (FT-IR).....	48
4.1.8. Fabricação dos compósitos POM/Casca da Castanha do Pará .....	52
4.1.9. Produção dos corpos de prova.....	53
4.1.10. Ensaio de tração .....	54
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.55</b>
<b>6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>55</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>56</b>
<b>Anexo 1 .....</b>	<b>63</b>
<b>Anexo 2 .....</b>	<b>69</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Com o passar das últimas décadas, observa-se um crescente aumento em pesquisas voltadas para o desenvolvimento de materiais provenientes de fontes renováveis, que possam substituir ou reduzir a utilização de polímeros sintéticos, especialmente os de base em petróleo. Isto ocorre, principalmente, devido ao esgotamento das reservas, as pressões ambientais, bem como, pela instabilidade política entre países produtores (PITT; BOING; BARROS, 2011).

Dentre esses materiais pesquisados, os compósitos vêm se destacando significativamente devido às suas propriedades e por sua vasta aplicabilidade que permite a criação de novos materiais que podem ser usados nas mais diversas áreas do conhecimento (COSTA, 2018).

Com isso, a pesquisa saiu das áreas acadêmicas e tomou a indústria, que além de promover a reciclagem, que gera inúmeras vantagens econômicas, traz a possibilidade de explorar, em marketing, a imagem da empresa como parceira do meio ambiente (CARVALHO, 2019).

Sendo assim, seguimentos como o agronegócio que vem gerando, concomitantemente a sua elevada renda, uma grande quantidade de resíduos que vem atingindo o meio ambiente, tem sido alvo de setores governamentais ou particulares no sentido de mitigar esse problema (BANDEIRA, 2015).

Vários autores tais como Pitt, Boing e Barros (2011), Milanese (2012), Oliveira (2013), Silva (2014), Oliveira (2015), Costa (2018), Carvalho (2019), Castro (2020), Brandão, Peres e Silva (2023), Flores (2023) e SILVA (2024) destacam, a tendência à obtenção de compósitos verdes que vem sendo a principal solução como forma de reduzir a quantidade utilizada de material polimérico.

Entretanto, apesar desta vasta disponibilidade de material e de pesquisa, quase nada foi encontrado sobre a utilização das cascas de Castanha do Pará, que são um subproduto da produção da castanha (consumidas *in natura*, utilizadas na indústria alimentícia ou na fabricação de cosméticos) como reforço de polímeros. Na bibliografia pesquisada, nada foi encontrado com matriz de poliacetal (BALBI, et al., 2014; MONTEIRO, 2023; SILVA, VIERA, 2020).

O poliacetal é um termoplástico cristalino, conhecido como plástico de engenharia, que apresenta estabilidade dimensional, usinabilidade, resistência à abrasão e a produtos químicos, baixo coeficiente de atrito e absorção de água. Devido

às suas propriedades, seu uso se destaca em seguimentos industriais que necessitem de grande resistência tais como para fabricação de roscas, parafusos, esteiras, torneiras, flanges, dobradiças, trilhos deslizantes, bombas articuladas, acoplamentos, etc. (COMPOSTOS, 2024; ISOLAPLAST, 2024).

Levando em conta essas informações, esta pesquisa, visou combinar o poliacetal e a casca da Castanha do Pará visando à redução no uso do polímero na fabricação de compósitos, agregar valor ao produto final e diminuir o volume de resíduo produzido na agroindústria.

### 1.1. Objetivo

O presente trabalho teve como objetivo a obtenção e a caracterização de um compósito formado por uma matriz polimérica, utilizando o poliacetal, e um reforço feito a partir da biomassa obtida das cascas da Castanha do Pará.

### 1.2. Objetivos específicos

- Tratar hidrotermicamente a biomassa;
- Fabricar compósitos com 10%, 20% e 30% m/m de reforço de biomassa tratada e *in natura*;
- Comparar os resultados das análises com o polímero puro.

### 1.3. Justificativa

Esta pesquisa se ampara na necessidade de redução da dependência do petróleo e a importância de se encontrar um destino adequado para o subproduto proveniente da agroindústria, especialmente as cascas de Castanha do Pará, que atualmente representam um grande volume de resíduo no Norte do Brasil e que não possui uma forma adequada de descarte, o que vem provocando grandes problemas de ordem ambiental, de saúde, social e econômica. Além disso existe a necessidade da criação de novos materiais, buscando trazer inovação e renovação ao mercado.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Poliacetal

A utilização dos polímeros pode ser observada em diferentes áreas, principalmente devido suas características que possibilitam o uso em substituição a materiais naturais e/ou sintéticos. Esse tipo de solução já é utilizado em diversos seguimentos inclusive nos setores esportivo, automobilístico e aeroespacial (PITT; BOING; BARROS, 2011; CARVALHO, 2019; SILVA, 2024).

Ainda conforme Pitt, Boing e Barros (2011) esta vasta aplicabilidade se deve, em parte, às ligações covalentes que formam as macromoléculas que compõem a estrutura dos polímeros. Essas ligações são responsáveis por garantir ao material, características como a capacidade de isolamento elétrico.

Os polímeros, de forma geral, são macromoléculas formadas pela combinação de diversas unidades de repetição denominados monômeros. A cada unidade deste seguimento de repetição dá-se o nome de “mero”, que pode ser sintético ou ter sua origem natural (BANDEIRA, 2015; SILVA, 2024).

Este material vem conquistando seu espaço no mercado de forma a tornar sua importância na indústria inquestionável. Sua utilização abrange produtos médico hospitalares, embalagens, peças automobilísticas, peças de alta tecnologia, equipamentos espaciais, entre outros e podem ser divididos em *commodities* e plásticos de engenharia (ANDRADE, 2019).

Dentre os *commodities*, que são os polímeros produzidos em larga escala, estão, principalmente, o PE (Polietileno de alta densidade), o PP (Polipropileno), PET (Polietileno Tereftalato), PVC (Policloreto de Vinila) e o PS (Poliestireno) cuja produção mundial pode chegar até 91,98 milhões de toneladas, como é o caso do PP em 2024 (MORDOR INTELLIGENCE, 2024; ROSA, 2023).

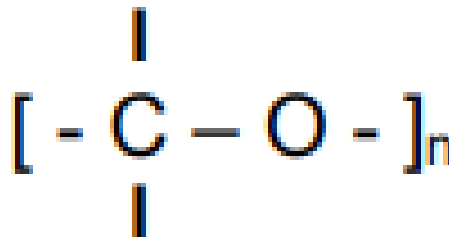
Sua larga aplicabilidade se dá pelo seu baixo custo de produção e seu processamento e moldabilidade fáceis (HOLGUIN, 2017).

Entretanto, para aplicações onde são necessárias maior estabilidade térmica e química, os polímeros de engenharia têm ganhado destaque devido as suas propriedades, tais como, maior resistência mecânica e química, maior condução elétrica ou por atuarem como isolantes, alta rigidez e módulo de elasticidade, grande resistência à abrasão, ao intemperismo e ao calor, bem como, elevada usinabilidade e estabilidade dimensional (VICENTE, 2009).

Dentre esses, destaca-se o poliacetal (POM), que é um polímero cuja utilização está particularmente voltada para a substituição de metais em produtos de precisão (VELOZO, 2019).

Ainda segundo Velozo (2019), o POM tem sua composição dada por um conjunto de ligações carbono-oxigênio em forma de grupos oximetileno (OCH<sub>2</sub>) (Figura 1), que dá a este material suas principais características.

**Figura 1:** Estrutura da cadeia polimérica do POM.



Fonte: COELHO FILHO (2002)

O POM, também denominado poli(óxido de metileno) é um termoplástico semicristalino, formado a partir da cristalização do formaldeído. Ele apresenta alta resistência a abrasão, fácil manipulação, estabilidade dimensional e resistência química, além de não absorver umidade (SIQUEIRA; BEGALLI, 2013).

Além de sua versatilidade em relação às características o POM também pode divergir em sua forma, pode ser encontrado como homopolímero (formado por um único tipo de mero) ou como copolímero (formado por dois ou mais tipos de meros) que apresentam características levemente diferentes. Enquanto o homopolímero é especialmente resistente e rígido, o copolímero terá alta resistência química (SIQUEIRA; BEGALLI, 2013).

## 2.2. Castanha do Pará - *Bertholletia excelsa*

A Castanha do Pará é mundialmente conhecida e apresenta grande valor comercial para o Brasil, por isso, é considerada uma riqueza da Amazônia. Seu valor econômico é maximizado devido ao alto potencial de aproveitamento de se sua castanha (CARDARELLI; OLIVEIRA, 2000).

A castanheira (*Bertholletia excelsa*) é uma árvore de grande porte (Figura 2), que pode chegar a uma altura de 50 metros e faz parte da família das lecitidáceas

originária da Amazônia, especialmente nos estados do Pará, Amazonas e Acre (KOBAYASHI; et al, 2023).

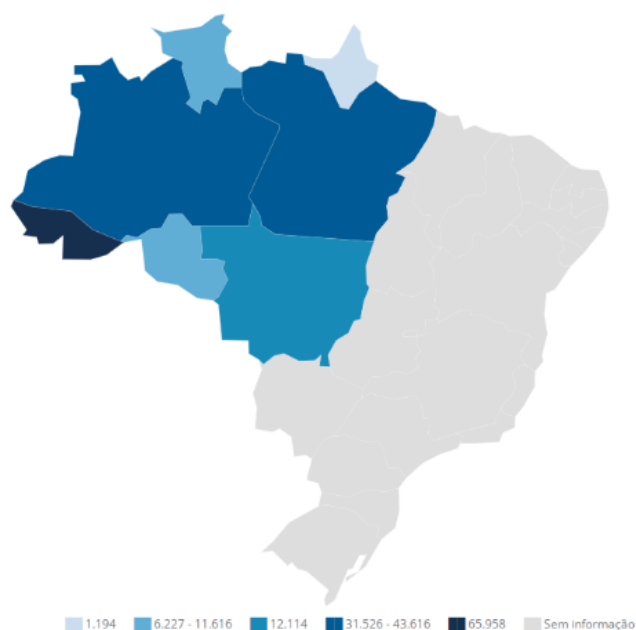
**Figura 2:** Árvore da espécie *Bertholletia Excelsa*.



Fonte: SOUSA (2023) apud Arbóreo.com

De acordo com o IBGE (2023), a produção anual das castanhas é de 35.351 toneladas, que rendem um valor total de 172.252 mil reais (Figura 3).

**Figura 3:** Valor da produção, em mil Reais, de Castanha do Pará na Amazônia brasileira, separada por estado.



Fonte: IBGE (2023)

Entretanto, do fruto total produzido, apenas as sementes são comestíveis. Estas ficam contidas em um ouriço (Figura 4) que pode conter de 8 a 24 sementes com forma triangulares e que ficam maduras após, aproximadamente, 14 meses (CARDOSO et al, 2017; DA SILVA, 2019; PETRECHEN; AMBRÓSIO, 2016).

**Figura 4:** Fruto da castanheira da espécie *Bertholletia excelsa*.



Fonte: AUTORA (2024)

Este ouriço, juntamente com as cascas da semente, representa 90% do total do fruto que é descartado ou utilizados como fertilizante, briquete ou reforço de concreto. Entretanto, este material apresenta grande valor de dureza e resistência, o que pode possibilitar outras utilizações, uma vez que eles possuem, em sua composição química, valores significativos de lignina, betacelulose e hemicelulose, podendo, assim, ser considerado um material lignocelulósico (CARDOSO et al, 2017; DA SILVA, 2019; DOS SANTOS et al., 2022; KOBAYASHI; et al, 2023; SILVA, 2024).

Para cada tonelada de castanha obtida, 1,4 toneladas de resíduos são geradas, o que promove um impacto ambiental considerável na região, especialmente, porque esse descarte é realizado de forma inadequada em lixões e/ou córregos da região (DA SILVA, 2019; SILVA, 2024).

Desta forma, apesar da grande representatividade desta castanha na exportação e da necessidade crescente do aumento da produção, as empresas que colhem e/ou manufaturam este material vêm buscando uma utilização eficiente destes recursos, além de processos que diminuam o impacto de desmatamento (BARBOSA; GUMIERO, 2023).

### 2.3. Compósitos

Com a crescente demanda do mercado por novos materiais que sejam capazes de atender as especificações de resistência mecânica, química, etc. Pesquisadores vêm tentando desenvolver soluções cada vez mais tecnológicas. Dentro deste escopo, os compósitos vêm ganhando espaço (BANDEIRA, 2015; CARVALHO, 2019; DE OLIVEIRA, 2023; MARINELLI; et al, 2008; SEZEFREDO, 2015).

Compósitos são desenvolvidos a partir da união de dois ou mais componentes de forma a se obter um material cujas características são superiores aos que deram origem a ele (BANDEIRA, 2015; CARVALHO, 2019; DE OLIVEIRA, 2023; MOREIRA, 2009; SEZEFREDO, 2015).

Esta mistura macroscópica é constituída de duas fases distintas denominadas de matriz e reforço. A matriz tem por função proteger o reforço de ataques químicos e dar coesão ao conjunto. Enquanto que, a principal função do reforço é o de suportar as solicitações mecânicas sofridas pelas peças (COSTA, 2018; DE OLIVEIRA, 2023; SEZEFREDO, 2015).

A interação destas partes vai determinar as propriedades finais do compósito. Sendo assim a composição e o arranjo estrutural do mesmo é de extrema importância. A composição da matriz pode ser bastante variada (materiais metálicos, poliméricos ou cerâmicos), assim como a do reforço que pode apresentar-se como fibras descontínuas ou contínuas, materiais particulados, entre outros materiais que julguem ser apropriado para se obter as características desejadas ao produto final (Figura 5) (CARVALHO, 2019; MAZUR, 2010).

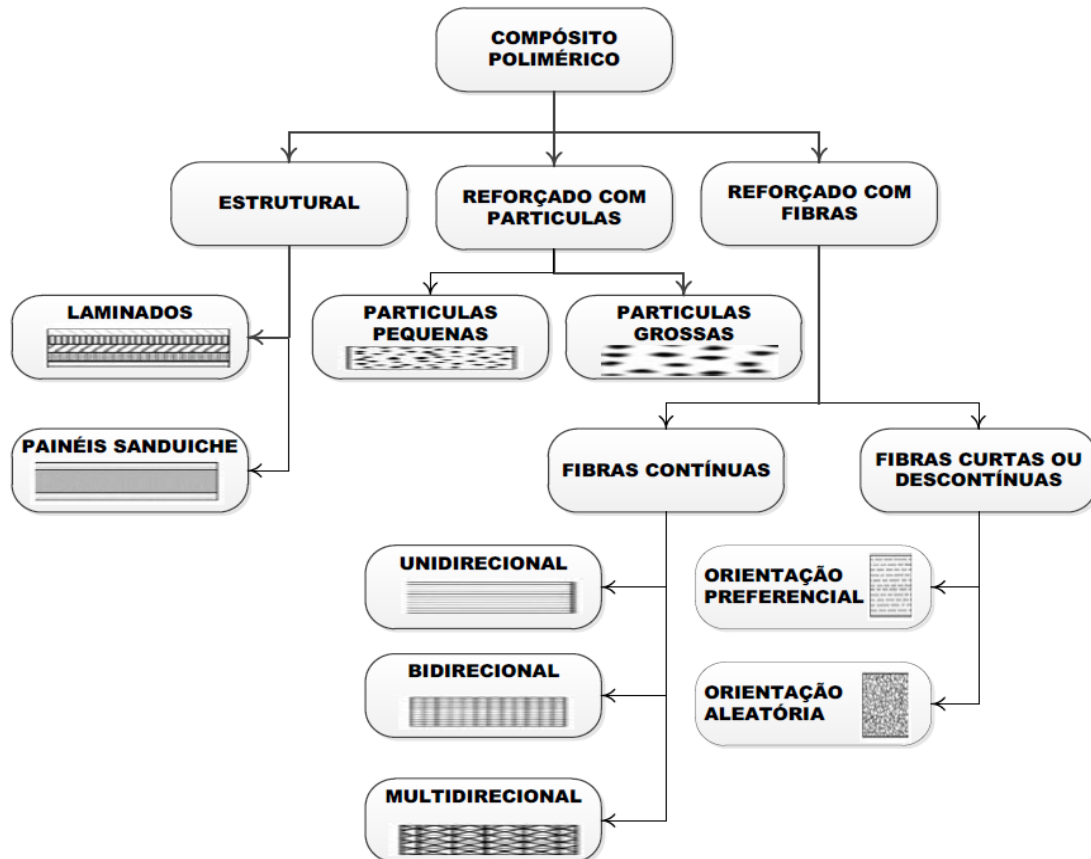
Dentre os reforços mencionados, o particulado de origem natural, outrora com uma função apenas de carga, vem ganhando visibilidade, sendo aplicado como um produto mais nobre que vem fornecendo, além do barateamento dos custos de processo, qualidades desejáveis de serem obtidas (SILVA, 2024; GEHLEN, 2014).

Este destaque se deve, em parte, a implementação de novas leis ambientais tais como a Lei nº 12.651–12 que determina a destinação de fibras e outras biomassas, o que forçou o desenvolvimento de novas técnicas e processamentos com menor impacto ambiental, através da reciclagem e do uso de matérias-primas renováveis (MILANESE, 2012).

Para as matrizes, os principais tipos de polímeros usados são os termoplásticos devido a facilidade de obtenção, baixa temperatura de fusão, fácil trabalhabilidade e

possibilidade de reciclagem. Dentre estes, os *commodities* são os mais usados devido ao seu baixo custo. Entretanto, polímeros de engenharia, tais como o POM, tem se destacado por suas propriedades (BONELLI; *et al*, 2005).

**Figura 5:** Materiais compósitos classificados segundo o tipo do reforço utilizado.



Fonte: CARVALHO (2019)

#### 2.4. Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras Naturais

Resíduo florestal é qualquer refugo proveniente da colheita ou da utilização de materiais originários de florestas. Esses materiais descartados da agroindústria, vêm sendo estudados a fim de se reaproveitar os mesmos e reinseri-los na cadeia produtiva, bem como o de reduzir a produção de resíduos. Entretanto a forma mais comum de utilização, até o momento, é a queima desses produtos para geração de energia, o que não representa o melhor método de destinação final (HANSTED, *et al*, 2022).

Esta destinação final vem causando preocupação crescente no Brasil, que se justifica pela grande quantidade e variedade destes materiais existentes em países tropicais. Por outro lado, essa diversidade pode ser considerada uma vantagem em termos de pesquisas devido, principalmente, a maior facilidade de acesso a essas biomassas quando comparado a outros países (CACURO; WALDMAN, 2015).

Sendo assim, existe um grande potencial de utilização destes materiais lignocelulósicos na fabricação de compósitos (GROTT; *et al*, 2013).

Neste contexto vários pesquisadores vêm desenvolvendo trabalhos que demonstram a variedade e as possibilidades da utilização de biomassas no desenvolvimento de compósitos “verdes” (COSTA, 2018).

Brandão, *et al.* (2023) utilizou a fibra do bagaço da cana-de-açúcar como reforço para obter um compósito com matriz de borracha natural. Ele comparou suas propriedades mecânicas com as da borracha natural sem o bagaço, obtendo um produto final com dureza maior (32,4%) e com limite de resistência menor (61%) que a borracha pura devido ao processo de incorporação que foi realizado sem a utilização de agente compatibilizante.

Silva, *et al.* (2023) desenvolveu um compósito com matriz de polipropileno (PP) reforçado com fibra de palha de milho. Entretanto, o material não apresentou adesão satisfatória, o que causou queda nas propriedades mecânicas do material quando comparado ao polímero puro. Porém, essa divergência não impossibilita a aplicação do compósito em funções menos nobres.

Dias, *et al* (2023) utilizou duas fibras naturais (juta e sisal) como reforços para uma matriz de resina poliéster. Com base em seus resultados foi possível determinar que ambos são reforços satisfatórios individualmente. Entretanto, o compósito híbrido utilizando a juta e o sisal ao mesmo tempo, incorporados na resina, não apresentou propriedades mecânicas superiores ao da resina pura, nem aos compósitos reforçados com juta ou com sisal.

Além destes, Silva (2024) trabalhou com uma matriz de PEBD (Polietileno de baixa densidade) e reforço da biomassa da casca da *Bertholletia Excelsa* (Castanha do Pará) nas proporções de 10%, 20% e 30% (m/m). Como resultado, foi obtido compósitos que apresentaram aumento do módulo elástico, bem como, da tensão de escoamento, com o aumento de biomassa na composição. No entanto, houve diminuição da a tenção máxima.

## 2.5. Tratamento Superficial de Biomassas

Os resíduos lignocelulósicos demonstram grande variação em suas estruturas, o que torna necessária a alteração e adaptação das superfícies para possibilitar a utilização técnica desses materiais, buscando homogeneizar as características, diminuir a retenção de umidade e promover a ancoragem com a matriz (MIRANDA, et. al. 2015).

Dentre os tratamentos mais utilizados com esse fim, se destacam a mercerização, acetilação e o tratamento hidrotérmico.

A mercerização apresenta redução na hidrofiliabilidade das fibras e aumento na rugosidade superficial do material, podendo melhorar significativamente a interação entre reforço e matriz (LITAIFF *et al*, 2023). Enquanto que a acetilação substitui os grupos de hidroxilas presentes nas fibras por grupos de acetila, aumentando, assim, a área superficial da fibra e gerando maior superfície de contato com a matriz (MELO, 2023).

Já o tratamento hidrotérmico vem ganhando espaço nos estudos que utilizam fibras naturais. Devido à algumas características, que o tornam uma ferramenta mais simples aos pesquisadores, este processo atua sem a necessidade de reatores ou reagentes químicos, hidrolisando grande parte da fração hemicelulósica sem gerar resíduos (CARVALHO, 2019; SANTOS *et al.*, 2014).

Este tratamento se mostra eficiente no que se refere a potencializar as propriedades das fibras naturais. Dentre elas, ele melhorara a aderência entre matriz e reforço na produção de compósitos, o que facilita a ancoragem e a transferência de energia entre as fases. Isso se dá, segundo Santos (2013), devido ao acesso a celulose que é facilitado, quando o tratamento hidrotérmico é realizado pela retirada da camada de hemicelulose que envolve a celulose, criando uma rugosidade maior que facilita a ancoragem da resina e/ou polímero (COSTA, 2018; QUINELATO, 2016).

O processo é simples e feito através da hidrólise dos compostos que são retirados, aumentando a cristalinidade e diminuindo a absorção de umidade (CARVALHO, 2019; COSTA, 2018).

No Quadro 1 é possível observar os métodos mais utilizados em tratamentos superficiais.

**Quadro 1:** Métodos de tratamento de substâncias lignocelulósicos mais empregados.

<b>Métodos físicos</b>	<b>Métodos Químicos</b>	<b>Métodos Biológicos</b>	<b>Métodos Combinados</b>
Vapor	Ozonólise	Pré-tratamento por fungos (de composição branca, parda)	Explosão a vapor
Radiação	Hidrólise com ácido diluído (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , HCl, HNO <sub>3</sub> , H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	Pré- tratamento Bioorganossolv (tratado com <i>Ceriporiopsis subvermispora</i> seguido de etanólise)	Hidrotérmico
Moinho de bola	Hidrólise com ácido concentrado (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )		SO <sub>2</sub> e Vapor
Moinho do tipo martelo	Ácido Acético (H <sub>3</sub> CCOOH)		NO <sub>2</sub> e irradiação
Barra giratória	Hidrólise com ácido concentrado (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )		Alcalino e moinho de bolas
Umidificação	Amônia (NH <sub>3</sub> )		Amônia a vapor (AFEX)
Água quente	SO <sub>2</sub>		Explosão com CO <sub>2</sub>
Pirólise	Deslignificação oxidativa  Processo Organossolv		

Fonte: COSTA (2018) apud QUINELATO, (2016)

## 2.6. Impacto Ambiental

A crescente preocupação ambiental em torno do descarte de materiais orgânicos e inorgânicos, químicos, peças e afins se justifica devido aos alarmantes dados sobre produção global de lixo. Pesquisas apontam que em 2023 foram produzidos, aproximadamente, 2,3 bilhões de toneladas de lixo urbano, o que ultrapassa a previsão anterior para 2025, de lixo sólido, que seria de 2,2 bilhões de toneladas (ANDRADE, 2019; GWMO, 2024; ONU, 2024).

A previsão para 2050 é de que sejam produzidos 3,8 bilhões de toneladas. Considerando o tempo de degradação de muitos desses materiais, especialmente de

polímeros de origem sintética, o prejuízo para o meio ambiente e para a saúde das populações é inestimável, podendo comprometer a existência das gerações futuras (ANDRADE, 2019; GWMO, 2024; ONU, 2024; PITT; BOING; BARROS, 2011).

Além desses resíduos urbanos, os provenientes da agroindústria vêm crescendo em quantidade e variedades (KOMATSU, SANTOS E SOUSA 2019). Segundo Campos (2023) os resíduos da agroindústria na América Latina contam com cerca de 500 milhões de toneladas sem destinação adequada ou reaproveitamento, sendo que o Brasil representa mais de 50% desse total.

Entre estes resíduos provenientes do agronegócio alguns componentes químicos se destacam, tais como a hemicelulose, a celulose e a lignina, que são encontrados em restos de colheitas, cascas e folhas (CAJAMARCA, 2019).

Além destes produtos, substâncias tóxicas residuais de defensivos agrícolas, também podem ser encontrados. Estes materiais são potenciais contaminantes do solo e da água quando não descartados adequadamente (MELO, 2023).

Campos, Faria e Joele (2023) afirmam que as biomassas de origem vegetal são compostas basicamente por celulose, lignina e hemicelulose. Os outros componentes químicos presentes nesses materiais, são encontrados em quantidades insignificantes, não estando ligados a moléculas maiores, o que facilita sua extração por meio de tratamentos químicos e/ou físicos.

Neste tocante, Andrade (2019) aponta para o fato de que os recursos naturais, assim como a própria natureza, não são inesgotáveis.

Outra preocupação cada vez maior é a capacidade de disposição adequada do lixo produzido, especialmente devido à demora da sua decomposição. No passado, uma prática muito usada, especialmente por países ditos desenvolvidos, era o de terceirizar seu lixo, como foi o caso do envio ilegal de vários contêineres, da Inglaterra para o Brasil de lixo tóxico (2009), que abalou as relações entre esses dois países. Além desse, 22 toneladas de lixo foram despachadas da Alemanha (2010) e mais 21 toneladas de lixo hospitalar (2011) que foram enviados da Espanha para o Brasil (ANDRADE, 2019; PAZ, 2024).

Apesar da existência da Lei nº 9.605/98, art. 56 que trata do transporte e armazenagem de produtos nocivos à saúde humana, a devolução destes produtos ao seu porto de origem, não era contemplado. Entretanto essa discrepância foi corrigida pela instauração da Lei 12.715 em 2012 que trata, entre outros tópicos, da devolução,

aos seus países de origem, de mercadorias importadas e forma ilegal, impondo multas ao importador (ANDRADE, 2019; PAZ, 2024).

Sendo assim, muitos pesquisadores vêm tratando a gestão adequada de todo esse resíduo. Com isso, a redução da geração de resíduo e, principalmente, sua reinserção no ciclo produtivo de forma a se tornarem úteis novamente vem ganhando notoriedade (FARIA, 2019).

Jesus *et al.* (2021) apresenta como possível forma de reutilização desses resíduos orgânicos a compostagem.

Komatsu, Santos e Sousa (2019) também frisa a importância do gerenciamento de resíduos e o alinhamento com as leis vigentes para a garantia da promoção da economia circular neste setor que é o que mais cresce no país.

## 2.7. Reciclagem

Visando a sustentabilidade no Brasil e no mundo, de forma a garantir uma existência plena e digna para as próximas gerações, várias técnicas que preveem a reinserção de materiais no ciclo produtivo vêm sendo aplicadas (CARVALHO, 2019, COSTA, 2018; SPINACÉ; DE PAOLI, 2005).

Dentre essas técnicas a reciclagem ou reintegração, do que outrora foi considerado inservível, no ciclo produtivo é a mais conhecida (CARVALHO, 2019, COSTA, 2018).

Neste contexto, os resíduos agroindustriais possuem algumas possíveis formas de destinação e reaproveitamento, a principal utilização atualmente é na obtenção de energia através da transformação das biomassas em carvão vegetal, briquetes, etanol ou biodiesel (CAMPOS; FARIA; JOELE, 2023).

Dentre esses produtos, a Castanha do Pará, originária da região amazônica, tem seus resíduos subutilizados. Sua utilização se restringe ao uso do mesmo para obtenção de energia e na fabricação de briquetes (CARMONA *et al.*, 2017).

Alguns produtores também praticam a reutilização do resíduo orgânico, o utilizando em adubos e fertilizantes, o devolvendo às plantações, aproveitando os nutrientes presentes nesses resíduos e evitando o uso de químicos artificiais. Porém esse método é utilizado em pequena escala na agricultura familiar (FURTADO *et al.*, 2023)

Além da reciclagem de resíduos provenientes do agronegócio, a reciclagem de materiais poliméricos, segundo alguns autores, como é o caso de Andrade (2019), pode ser separada em três diferentes categorias.

- A reciclagem mecânica, que é o processo onde o polímero é separado de possíveis contaminantes e reprocessado para dar origem a um produto final ou a *pellets*. Essa categoria é aplicável apenas em termoplásticos;
- A reciclagem química que trata da despolimerização do material. Esse procedimento permite uma repolimerização, com retorno ao polímero original, entretanto, exige alta tecnologia;
- A reciclagem energética que é a incineração dos polímeros com o objetivo de transforma-los em energia. Este é o método mais eficaz quando o intuito é a real redução da quantidade de resíduos. Entretanto, é a pior opção em termos ecológicos visto que libera substâncias nocivas, como dióxidos de carbono e enxofre na atmosfera.

Com isso, é possível dar destinos mais nobres aos produtos descartados, com maior valor agregado, auxiliando, não apenas ao meio ambiente, mas também a saúde das populações, ao visual da região e ao fator econômico pela geração de renda para fatia mais pobre dos habitantes (CARVALHO, 2019, COSTA, 2018).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Materiais

##### 3.1.1. Castanha do Pará (*Berthollesia Excelsa*)

As cascas de Castanha do Pará foram utilizadas como reforço ao polímero base, com o objetivo de melhorar suas características físicas e mecânicas. Estes resíduos, obtidos após o processamento da retirada da noz, foram coletados nas ruas de Belém/PA (Figura 6).

**Figura 6:** Resíduo de Castanha do Pará dispostos nas ruas de Belém do Pará.



Fonte: AUTORA (2024).

##### 3.1.2. Poliacetal

O polímero que serviu de base para o compósito foi o poliacetal grade M90 (POM) da CELCON® (Figura 7). Este copolímero apresenta um índice de fluidez de  $8 \text{ cm}^3 \cdot 10 \text{ min}^{-1}$ , sendo próprio para moldagem por injeção e para extrusão de tubos com parede fina, bem como, filmes finos. De acordo com seu *datasheet*, este material apresenta temperatura de fusão de  $165 \text{ }^\circ\text{C}$  e densidade de  $1410 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  (Anexo 1).

**Figura 07:** Poliacetal grade M90 (POM) da CELCON®.



Fonte: AUTORA (2024).

## 3.2. Métodos

### 3.2.1. Obtenção da biomassa da casca da Castanha do Pará

As cascas da Castanha do Pará, *in natura*, foram obtidas nas ruas de Belém do Pará, após retirada das nozes.

O primeiro processo ao qual elas foram submetidas foi a catação manual para separação das cascas e retirada de outras impurezas. Em seguida foi realizada uma raspagem visando a eliminação dos resíduos das nozes presas na casca e posteriormente a secagem das mesmas em estufa BOD 411D (Nova Ética Ltda.) à temperatura de 60 °C por, aproximadamente, 72 horas nos laboratórios do UniFOA. Após resfriadas, elas foram moídas usando-se dois processos distintos.

O primeiro processo consistiu na trituração das cascas em um moinho de facas modelo V da top Voges localizado no laboratório de Processamento de Materiais - CIT - Campus Olezio Galotti – UniFOA e foi usado para se obter o reforço em um tamanho menor que facilitasse a moagem posterior.

Com o tamanho de partícula menor, a amostra foi inserida em um moedor elétrico (modelo Moedor De Café Philco Grano Aroma Pmc01i Inox 127V). O pó obtido neste segundo processo foi peneirado e o material passante em 50 mesh, foi

denominado biomassa de castanha não tratada, e foi utilizado na fabricação dos compósitos.

### 3.2.2. Tratamento hidrotérmico

Essa biomassa adquirida a partir das cascas da castanha moída, foi tratada hidrotérmicamente através de um processo de autoclavagem do material na proporção de 1:10 (m/m) de biomassa e água destilada, respectivamente, contidos em um *Erlenmeyer* com 500 mL de capacidade, à temperatura de 121 °C por 45 minutos para retirada de materiais lignocelulósicos (Figura 8).

Este tratamento foi realizado no laboratório de biotecnologia do UniFoa numa autoclave vertical (Phoenix modelo AV) com capacidade máxima de pressão (de 0 a 3,0 Kgf/cm<sup>2</sup>) e *range* de temperatura de 100 a 143 °C tomando-se como base os trabalhos de Carvalho (2019) e Costa (2018).

**Figura 8:** Erlenmeyer com amostra na proporção de 1:10 (m/m) de biomassa e água destilada.



Fonte: AUTORA (2024).

Após o tratamento, foi feita uma dupla lavagem, utilizando filtros de papel e água destilada (Figura 9).

**Figura 9:** Processo de lavagem da biomassa para retirada dos materiais lignocelulósicos.



Fonte: AUTORA (2024).

Esta biomassa lavada foi seca em uma estufa BOD 411D (Nova Ética Ltda.) à 60 °C, por 72 h. O material obtido após esse processo foi denominado biomassa de castanha tratada, sendo utilizado na fabricação dos compósitos tratados.

O principal objetivo deste processo foi a remoção de compostos como lignina e hemicelulose, que apresentam baixa massa molar, além de retirar a umidade presente no material de forma a melhorar a aderência entre o polímero e a biomassa (COSTA, 2018).

### **3.2.3. Ensaio Termogravimétrico (TGA)**

Os ensaios foram realizados em um equipamento TGA 7 da PekinElmer alocado na empresa i-TECH – SP, visando obter as temperaturas iniciais de degradação dos materiais estudados, bem como as informações de variação de massa.

Este ensaio consiste na exposição do POM e da biomassa da casca da Castanha do Pará (tratada e *in natura*) ao calor, com taxa de aquecimento e atmosfera inerte controladas numa dada faixa de temperatura.

Sendo assim, as condições de trabalho foram:

- Faixa de aquecimento: 30 °C a 950 °C;
- Taxa de aquecimento: 20 °C.min<sup>-1</sup>;
- Massa: aproximadamente 10 mg;
- Recipiente da amostra: Platina;
- Atmosfera: Nitrogênio;
- Fluxo gasoso: 20 mL.min<sup>-1</sup>.

#### **3.2.4. Differential Scanning Calorimetry (DSC)**

No DSC, os ensaios realizados visaram determinar as temperaturas de onset, endset, entalpia de fusão e transições vítreas (*t<sub>g</sub>*) quando possível.

No ensaio, as amostras foram colocadas em recipientes de alumínio e comparadas com referências (painéis vazias). Posteriormente, elas foram aquecidas em fornos de platina a uma taxa de aquecimento e atmosfera controladas

Este equipamento (DSC 7 da PekinElmer) foi, gentilmente cedido, pela empresa i-TECH – SP.

Sendo assim os insumos para manufatura do compósito foram submetidos as seguintes condições de análise:

Amostra polimérica (POM)

- Faixa 1 de aquecimento: -25 °C a 300 °C;
- Taxa 1 de aquecimento: 20 °C.min<sup>-1</sup>;
- Faixa de resfriamento: 300 °C a -25 °C;
- Taxa de resfriamento: 20 °C.min<sup>-1</sup>;
- Faixa 2 de aquecimento: -25 °C a 300 °C;
- Taxa 2 de aquecimento: 20 °C.min<sup>-1</sup>;
- Massa: aproximadamente 7,5 mg;
- Recipiente da amostra: alumínio padrão para sólidos;
- Atmosfera: Nitrogênio;
- Fluxo gasoso: 50 mL.min<sup>-1</sup>.

Entre as rampas de aquecimento, foram realizados isoterma de 5min, visando estabilizar a temperatura.

Amostra de biomassa (Tratada e in natura)

- Faixa 1 de aquecimento:  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- Taxa 1 de aquecimento:  $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ;
- Isoterma 1: 5 min
- Faixa de resfriamento:  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- Taxa de resfriamento:  $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ;
- Isoterma 2: 5 min
- Faixa 2 de aquecimento:  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- Taxa 2 de aquecimento:  $20\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ;
- Massa: aproximadamente 7,5 mg;
- Recipiente da amostra: alumínio padrão para sólidos;
- Atmosfera: Nitrogênio;
- Fluxo gasoso:  $50\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ .

As condições de ensaio se basearam na norma ASTM E 1356, bem como as obtenções de dados que foram realizadas na segunda rampa de aquecimento para eliminação de interferências decorrentes da história térmica da amostra.

Todas as calibrações e ajustes foram feitos respeitando as recomendações do fabricante.

### **3.2.5. Espectrometria de Absorção na Região do Infravermelho (FT-IR)**

Visando determinar a composição dos materiais e garantir que o polímero usado neste trabalho é puro, foram feitos ensaios de FT-IR que determinam a composição através de bandas resultantes da vibração de átomos ou de grupos de átomos que absorvem luz na faixa do infravermelho (COSTA, 2018).

O ensaio foi realizado com célula de seleneto de zinco em UATR (*Universal Attenuated Total Reflectance*), na região do infravermelho médio (MIR), utilizando ganho de 1, resolução de  $4\text{ cm}^{-1}$  com 20 varreduras à velocidade de  $0,2\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  e torque de 200N na faixa de  $4.000$  a  $550\text{ cm}^{-1}$ .

Este equipamento (espectrofotômetro *Spectro One da PerkinElmer*) está localizado do laboratório de Instrumentação - Divisão de Química (AQI/IAE).

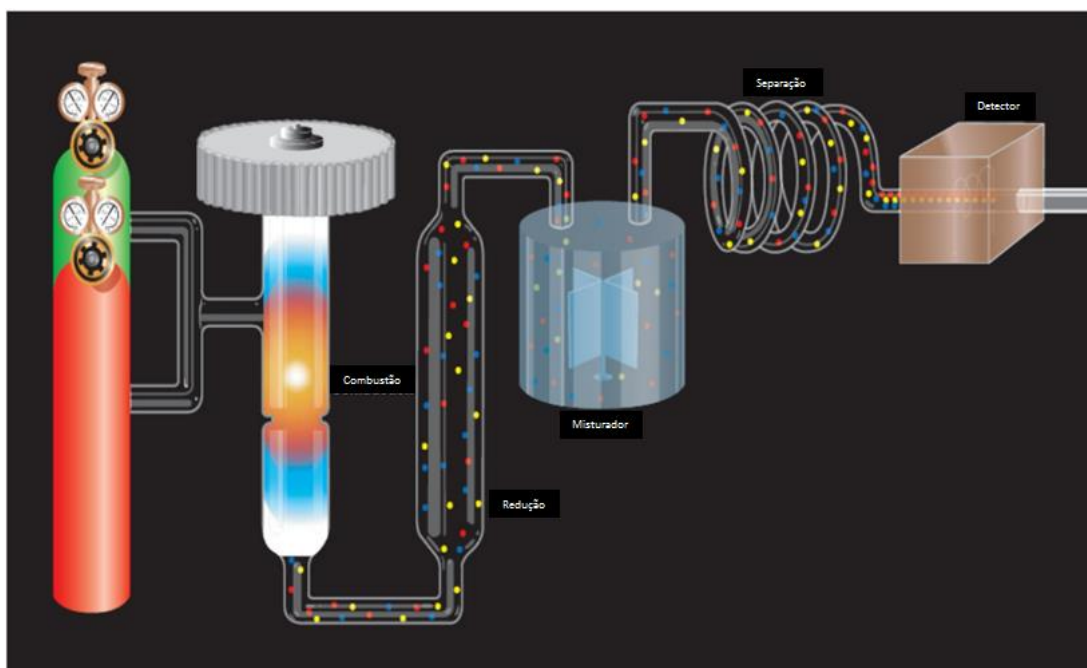
### 3.2.6. Análise Elementar

Os ensaios de análise elementar foram realizados em um equipamento CHNS/O 2400 Série II da PerkinElmer localizado na i-Tech em São Caetano do Sul – SP.

Essa técnica analítica, visa determinar os teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio de uma determinada substância, e tem por base a metodologia de Pregl-Dumas.

Este método se caracteriza pela combustão da amostra previamente pesada e encapsulada em um porta amostra de estanho (Figura 10).

**Figura 10:** Princípio de medição do CHNS/O da PerkinElmer.



Fonte: Folder PerkinElmer (2005).

Esse processo de queima ocorre em um tubo de combustão, a temperatura de 925 °C, recheado por vanadato de prata, óxido de magnésio com tungstato de prata, gaze de prata, um oxidante comercial denominado de EA1000 fabricado pela PerkinElmer e lâ de quartzo para suportar o sistema.

A atmosfera de hélio 5.0, que percola o equipamento a  $900 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ , visa carrear os gases da queima, após combustão por injeção de oxigênio 6.0 (aproximadamente  $3 \text{ cm}^3$ ).

Os gases resultantes são carreados para o tubo de redução composto por cobre cru (não oxidado) granulado, também suportado em lã de quartzo a uma temperatura de  $640 \text{ }^\circ\text{C}$  para eliminação do oxigênio residual da queima.

Posteriormente, os gases passam por um misturador para serem homogeneizados e vão ser separados em uma coluna cromatográfica de onde são enviados a um detector de condutividade térmica (TCD).

O equipamento foi calibrado usando-se acetanilida e as amostras pesadas em uma ultra micro balança com precisão de  $0,0001 \text{ mg}$  (AD6 da PerkinElmer), usando-se uma massa de  $3 \text{ mg}$  disposta em cápsula de estanho como recomendação do fabricante.

### **3.2.7. Pesagem do resíduo tratado**

Este ensaio foi realizado para determinar a variação de massa da amostra após o tratamento hidrotérmico.

Para tanto, a amostra e o papel de filtro quantitativo foram secos, à  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  e pesado até massa constante, para determinar a massa do material ( $10 \text{ g}$ ) e do filtro.

Após essa determinação, o material foi tratado hidrotérmicamente (1:10 casca/água) em autoclave, lavado, seco sob as mesmas condições anteriores e pesado.

Por diferença simples, foi obtido a massa perdida e posteriormente foram calculados o percentual de material extraído durante o processo.

### **3.2.8. Fabricação dos compósitos POM/Casca da Castanha do Pará**

Os compósitos foram divididos em três famílias diferentes para cada biomassa trabalhada (*in natura* e tratada hidrotérmicamente). A primeira com  $10\% \text{ m/m}$ , a segunda com  $20\% \text{ m/m}$  e a terceira com  $30\% \text{ m/m}$  de reforço das biomassas. Além disso, foram feitos, sob as mesmas condições de processamento, apenas o polímero puro para servir de material de referência ao estudo desenvolvido.

A mistura se deu em um homogeneizador termocinético Dryzer, modelo MH-50H da MH Equipamentos que fica disponível no Laboratório 9 do Centro Integrado de Tecnologia (CIT) no Campus Olezio Galotti - UniFOA.

O equipamento possui um parafuso localizado em um compartimento de pequeno volume onde é colocado cerca de 70 g de material que se quer misturar (matriz + reforço). Este parafuso gira em duas diferentes velocidades, causando atrito e, conseqüentemente, aquecimento da matriz que sofre fusão e se integra ao reforço.

Na velocidade 1 (menor velocidade), a mistura é processada por aproximadamente 20 segundos ou até que haja a fusão do polímero. Neste ponto ocorre aumento da amperagem que é mostrada em visores analógicos em decorrência da mudança da viscosidade. Na seqüência, é acionada a velocidade 2 (maior velocidade) visando a mistura completa com maior homogeneidade.

Em seguida, com o compósito ainda quente, procede-se o estiramento, sobre uma bancada fria, com o auxílio de um rolo cilíndrico (similar aos rolos utilizados na culinária) até que o mesmo obtenha uma espessura de aproximadamente 1 mm.

Estas chapas, após resfriadas, são trituradas no moinho de facas modelo V da top Voges localizado no laboratório de Processamento de Materiais - CIT - Campus Olezio Galotti – UniFOA para obter a granulometria necessária à sua utilização na produção de corpos de prova através do método de injeção.

### **3.2.9. Confeção dos corpos de prova**

Os corpos de prova foram fabricados utilizando uma injetora de bancada RAY RAM, modelo TSMP, a temperatura de 250 °C que permitiu que a mistura fluísse para os moldes padrões de ensaios de tração.

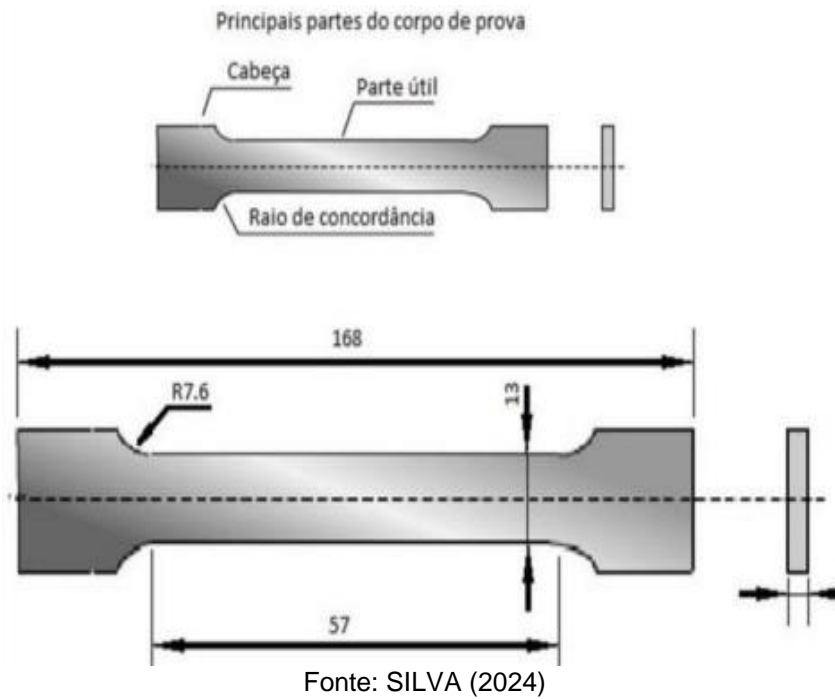
Este equipamento se encontra no Laboratório de Processamento de Materiais - CIT - Campus Olezio Galotti – UniFOA.

### **3.2.10. Ensaio de Tração**

Em um equipamento de ensaio de tração e flexão (marca EMIC) foram realizados ensaios com célula de carga de 5 kN e velocidade de 1,4 mm.min<sup>-1</sup> para determinar as propriedades: tensão máxima; alongamento; módulo de elasticidade e o limite de resistência a tração das famílias de compósitos e compará-las com o polímero puro processado nas mesmas condições.

Foram feitos ensaios em quintuplicata de cada percentagem trabalhada. Os corpos de prova foram manufacturados com dimensões determinadas pela ASTM D 638 – 12 (Figura 11) no laboratório 6 - CIT - Campus Oezio Galotti – UniFOA.

**Figura 11:** Corpos de prova de tração de acordo com a norma ASTM D 638 com dimensões em mm.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Biomassa da Casca de Castanha do Pará e POM

#### 4.1.1. Obtenção da biomassa da casca da Castanha do Pará

Após a raspagem (Figura 12) foi obtido cascas limpas sem resíduos das nozes, o que evitou que a mesma sofresse apodrecimento precoce.

**Figura 12:** Raspagem das cascas da Castanha do Pará.



Fonte: AUTORA (2024).

Com as amostras secas, para evitar que as mesmas aderissem ao moinho de facas, foi feita a primeira moagem com obtenção de particulado grosso de tamanho médio, aproximado, de 3 mm x 3 mm (largura x comprimento) (Figura 13).

**Figura 13:** Casca da Castanha do Pará após a primeira moagem.



Fonte: AUTORA (2024).

A casca triturada, sofreu, então, a segunda moagem que resultou em um pó marrom de tonalidade próxima a do café torrado e moído, que foi peneirado, de forma a se obter o material in natura (Figura 14) para uso no compósito.

**Figura 14:** Casca da Castanha do Pará após a segunda moagem e peneirada com tamanho de partícula inferior a 50#.



Fonte: AUTORA (2024).

#### 4.1.2. Tratamento hidrotérmico

O material após autoclavado, lavado e seco apresentou coloração ligeiramente mais escura do que a amostra in natura. Além disso, sua aparência, mediante análise visual, é de um pó mais fino do que as amostras anteriores ao tratamento (Figura 15).

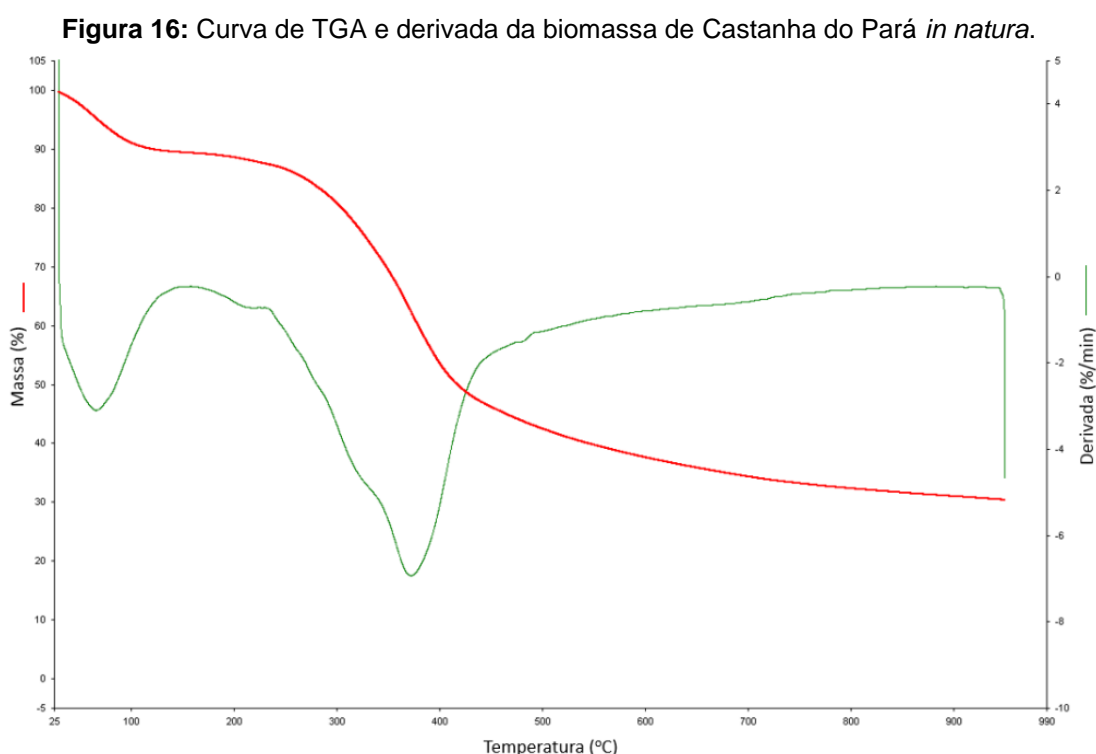
**Figura 15:** Casca da Castanha do Pará após tratamento hidrotérmico.



Fonte: AUTORA (2024).

### 4.1.3. Análise Termogravimétrica

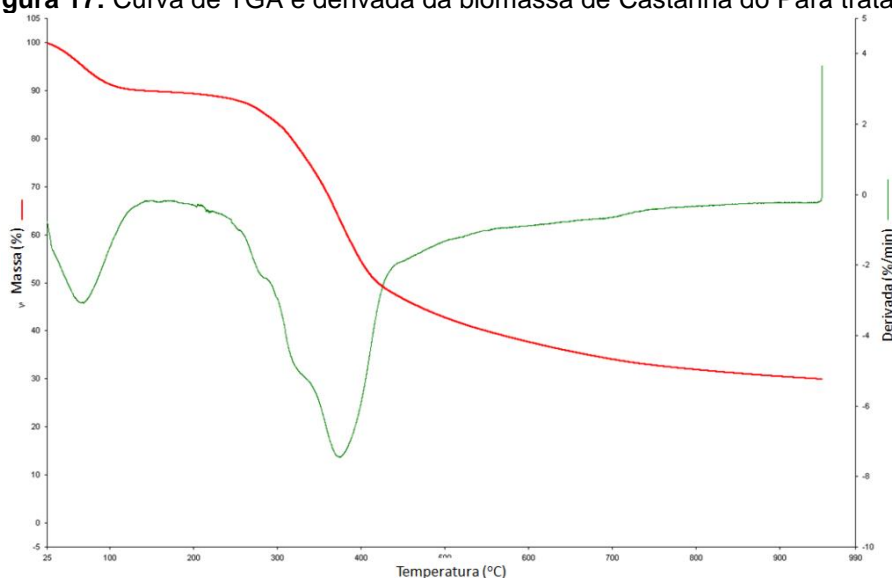
Nas curvas derivadas do TGA é possível observar, no material *in natura* (Figura 16), cinco patamares de perda, sendo a segunda, de difícil visualização, enquanto que o material tratado apresenta apenas quatro decaimentos (Figura 17). Entretanto, essas perdas se sobrepõem indicando uma queima complexa do material (CARVALHO, 2019; SILVA, 2024).



Fonte: AUTORA (2024).

O primeiro patamar, para ambos, segundo a literatura pesquisada (CARVALHO, 2019; COSTA, 2018; SILVA, 2024) é característico da presença de umidade. Esse valor de 10,5% para o material sem tratamento e 10,0% para o material após o tratamento hidrotérmico, estão acima dos valores fornecidos pelos autores supracitados que é de, aproximadamente, 7,5%. Entretanto, esse valor dá indícios de que a parte mais higroscópica da biomassa foi extraída (SILVA, 2024).

**Figura 17:** Curva de TGA e derivada da biomassa de Castanha do Pará tratada.



Fonte: AUTORA (2024).

Entretanto, o segundo decaimento, que ocorre em aproximadamente 200°C, e que corresponde a degradação da  $\beta$ -celulose e hemicelulose, que são os componentes mais higroscópicos da biomassa, está presente apenas no material não tratado, indicando que, apesar de pequeno, houve extração de material lignocelulósico durante o processo de hidrólise (OLIVEIRA et al., 2014; SILVA, 2024).

O terceiro e o quarto eventos que ocorrem na faixa de 230 a 290 °C e 290 °C à 335 °C, com percentuais de 5,5% e 4,5% para as amostras *in natura* e tratadas, respectivamente, no primeiro evento e de 8,6% e 8,5% no segundo evento, correspondem, provavelmente, a uma mistura de componentes (hemicelulose, cristais mais acessíveis da celulose e lignina) causando um efeito de “ombro” (ALMEIDA JR., 2021, NAVARRO, 2012).

Esta diferença percentual de massa entre o material sem tratamento e o tratado hidrotermicamente que é de 1%, apesar de pequena, reforça que houve extração parcial de lignina, hemicelulose e/ou  $\beta$ -celulose durante o tratamento hidrotérmico (ALMEIDA JR., 2021; COSTA, 2018; NAVARRO, 2012).

O último patamar de perda entre 325 °C e 500 °C, corresponde a queima da celulose com valores de 33,5% (*in natura*) e 35,7%(tratado). Estes valores estão próximos ao encontrado na literatura em Carvalho (2019), Costa (2018), Navarro (2012) e Silva (2024) que está em torno de 30%.

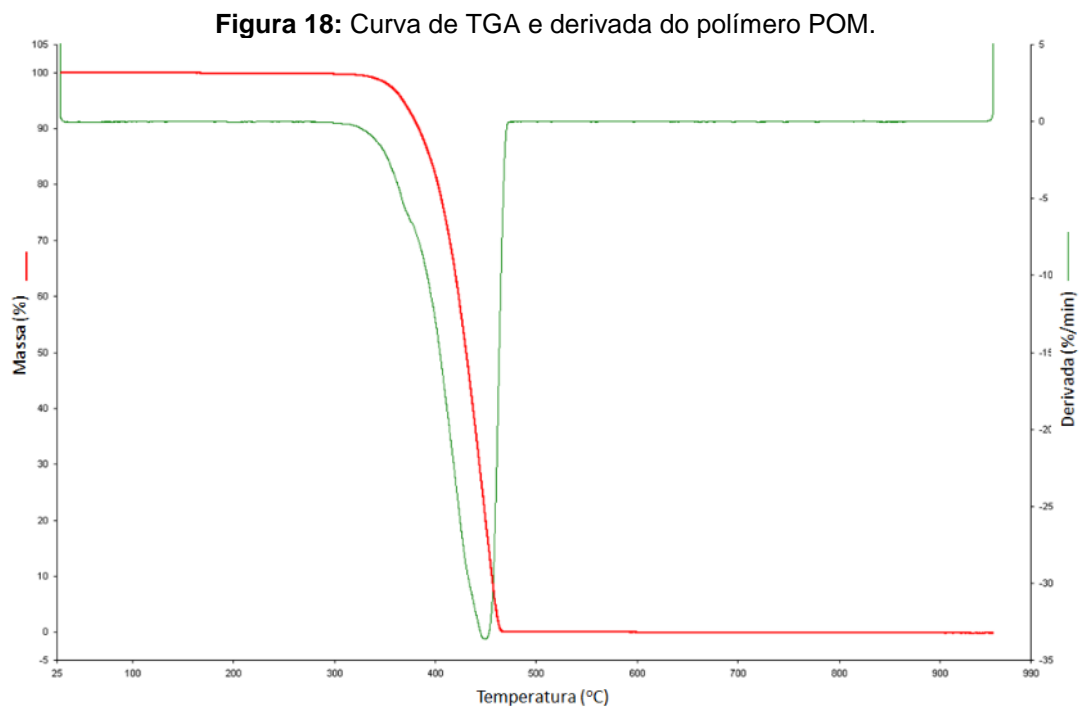
Além disso, o elevado teor de resíduos após a queima (30,4% - material *in natura* e 29,9% - material tratado), indica uma grande quantidade de lignina na biomassa.

Estes valores estão acima do encontrado nos trabalhos de Carvalho (2019), Costa (2018) e Silva (2024) que está em torno de 20 a 26 %.

Outro fator importante é a TI de degradação da biomassa que é de 234 °C para a amostra não tratada e 241 °C para a amostra tratada. Essa temperatura corresponde à temperatura máxima de trabalho da mesma (COSTA, 2018).

O Poliacetal (POM) (Figura 18) apresentou um único patamar de perda na curva de TGA e um pico na derivada, o que indica que o material é puro, com Ti de 297 °C e perda de 100% (SILVA, 2024).

Sendo assim, no tocante as degradações, não há impedimentos para utilização destes materiais para formação de compósito (Tabela 1).



Fonte: AUTORA (2024).

**Tabela 1:** Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de TGA das amostras de castanha *in natura*, tratada e do polímero puro.

Amostras	Patamares de perda	Perda de umidade (%)	Ti (°C)	Perda de massa (%)	Resíduo (%)
Resíduo <i>in natura</i>	5	10,5	234	69,6	30,4
Resíduo tratado	4	10,0	241	70,1	29,9
Polímero puro	1	0,0	297	100,0	0,0

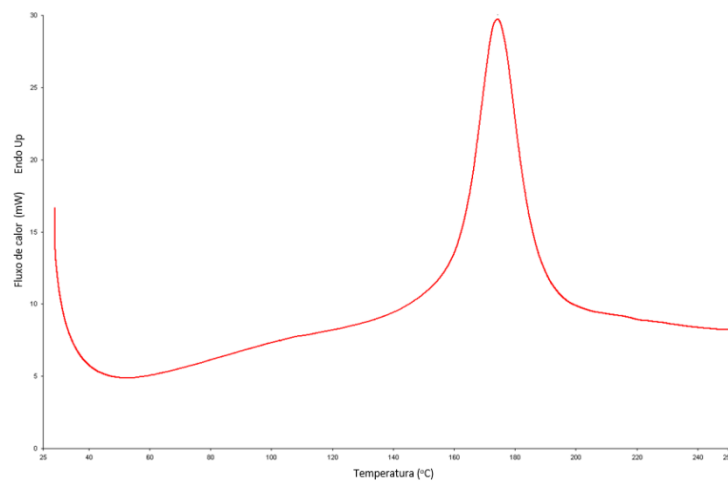
Fonte: AUTORA (2024).

#### 4.1.4 Differential Scanning Calorimetry (DSC)

Nas curvas de DSC do polímero puro (Figura 17), foi observado apenas um pico com *onset* a, aproximadamente, 161 °C e temperatura de pico em 175 °C que corresponde a temperatura de fusão do poliacetal que está na faixa de fusão entre 140 e 175 °C.

Este pico único, não apresenta “ombros”, o que reforça a informação obtida no TGA de que esse material é puro.

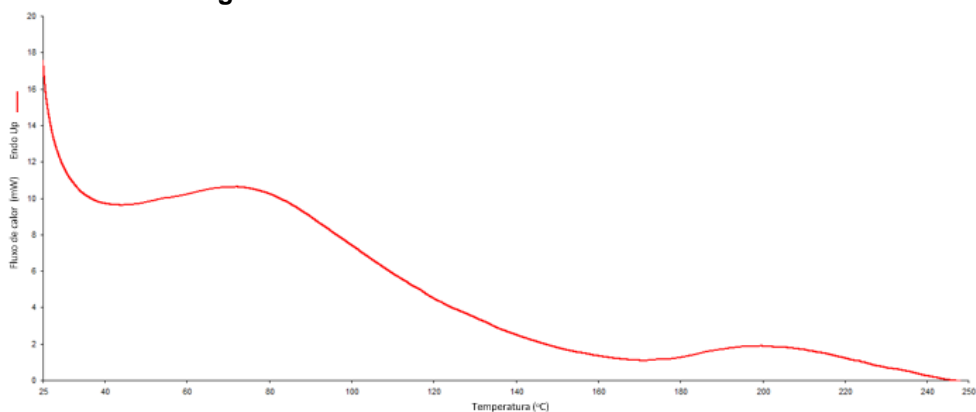
**Figura 19:** Curva de DSC do polímero POM.



Fonte: AUTORA (2024).

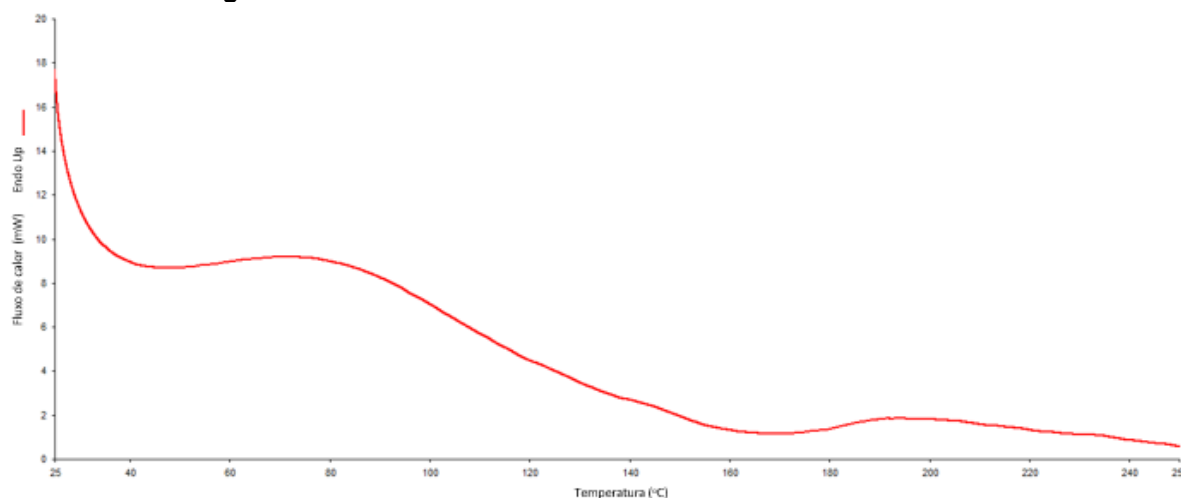
Nos ensaios das amostras da castanha *in natura* e tratada (Figuras 20 e 21) é possível ver um efeito endotérmico que ocorre a, aproximadamente, 79 °C para a amostra *in natura* e 84 °C para a amostra tratada.

**Figura 20:** Análise de DSC da castanha *in natura*.



Fonte: AUTORA (2024).

**Figura 21:** Análise de DSC da castanha tratada hidrotermicamente.



Fonte: AUTORA (2024).

Para muitos autores, esta temperatura corresponde a transição vítrea ( $T_g$ ) da lignina que pode ocorrer entre 55 °C e 92 °C em amostras saturadas com 8% de água e 127 a 146 °C para amostras secas (COSTA, 2018; JORDAO, 1983).

Estas faixas de temperatura se devem, em parte, a composição do solo dos quais foi extraído o vegetal que dá origem ao material analisado, que afeta diretamente o teor de umidade, a sua massa molecular, seu teor de cristalinidade e se a lignina está ou não isolada (COSTA, 2018; FIGUEROA; MORAES, 2009).

Um outro ponto a ser considerado é que, temperaturas intermediárias de  $T_g$  também são encontradas dependendo do teor de umidade (COSTA, 2018; DICK, 2014; JORDAO, 1983).

Além da  $T_g$ , é observado um segundo evento a, aproximadamente, 204,7 °C e 198,9 °C para as amostras *in natura* e tratadas respectivamente. Esse material, de acordo com COSTA (2018), se deve a fusão parcial das partículas cristalinas da lignina.

Ainda, segundo Costa (2018) esta diferença de temperatura se deve a quantidade de material cristalino na molécula que faz com que maior energia, conseqüentemente, maior temperatura, seja necessária para sua fusão (DICK, 2014; BANDEIRA, 2015; OLIVEIRA et al., 2014).

O mesmo raciocínio pode ser empregado na transição vítrea, que demanda maior energia / temperatura para movimentação das moléculas amorfas presentes nas amostras *in natura* e tratadas (COSTA, 2018).

**Tabela 2:** Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de DSC das amostras de castanha *in natura*, tratada e do polímero puro.

Amostras	Tg (°C)	Onset (°C)	Temperatura de pico (°C)	Endset (°C)
Castanha <i>in natura</i>	109,6	179,0	204,7	246,7
Castanha tratado	115,4	180,2	198,9	245,6
Polímero puro	----	160,70	174,26	187,47

Fonte: AUTORA (2024).

#### 4.1.5 Avaliação do resíduo tratado por pesagem

Após a secagem e pesagem dos materiais foi observado que houve uma diferença de aproximadamente  $23,70 \pm 2,34\%$  referente à perda do material após o tratamento (Tabela 3).

**Tabela 3:** Variação de massa das amostras após tratamento hidrotérmico.

Amostras	Variação de massa (g)	Variação de massa (%)
1	2,3402	21,48
2	2,5829	23,70
3	2,7088	24,92
4	2,1851	20,09
5	2,7961	25,66
Média	2,5829	23,70
Desvio Padrão	0,2551	2,34%

Fonte: AUTORA (2024).

Este valor confirma as informações do ensaio de TGA de que as amostras tratadas perderam massa decorrentes da extração lignocelulósica, especialmente lignina e hemicelulose (CARVALHO, 2019; COSTA, 2018).

#### 4.1.6 Análise Elementar

Os ensaios foram feitos em triplicata, apresentando grande repetitividade com Coeficiente de Variação (CV) inferior, em todos os casos a 5 % (Tabela 4 e 5).

Conforme esperado, houve o aumento percentual do teor de nitrogênio, presentes na hemicelulose, nas amostras após o tratamento, indicando que houve saída de lignina do sistema, confirmando os ensaios de TGA e ensaio por pesagem.

**Tabela 4:** Teores de Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio presentes nas amostras *in natura*.

	Teor de Carbono (%)	Teor de Hidrogênio (%)	Teor de Nitrogênio (%)
Amostra 1	48,33	5,68	0,77
Amostra 2	47,74	5,64	0,80
Amostra 3	47,60	5,63	0,79
Média	47,89	5,65	0,79
Desvio Padrão	0,39	0,03	0,02
CV (%)	0,81	0,47	1,94

Fonte: AUTORA (2024).

**Tabela 5:** Teores de Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio presentes nas amostras tratadas hidrotérmicamente.

	Teor de Carbono (%)	Teor de Hidrogênio (%)	Teor de Nitrogênio (%)
Amostra 1	48,16	5,63	0,87
Amostra 2	49,21	5,64	0,85
Amostra 3	49,27	5,59	0,79
Média	48,88	5,62	0,84
Desvio Padrão	0,62	0,03	0,04
CV	1,28	0,47	4,98

Fonte: AUTORA (2024).

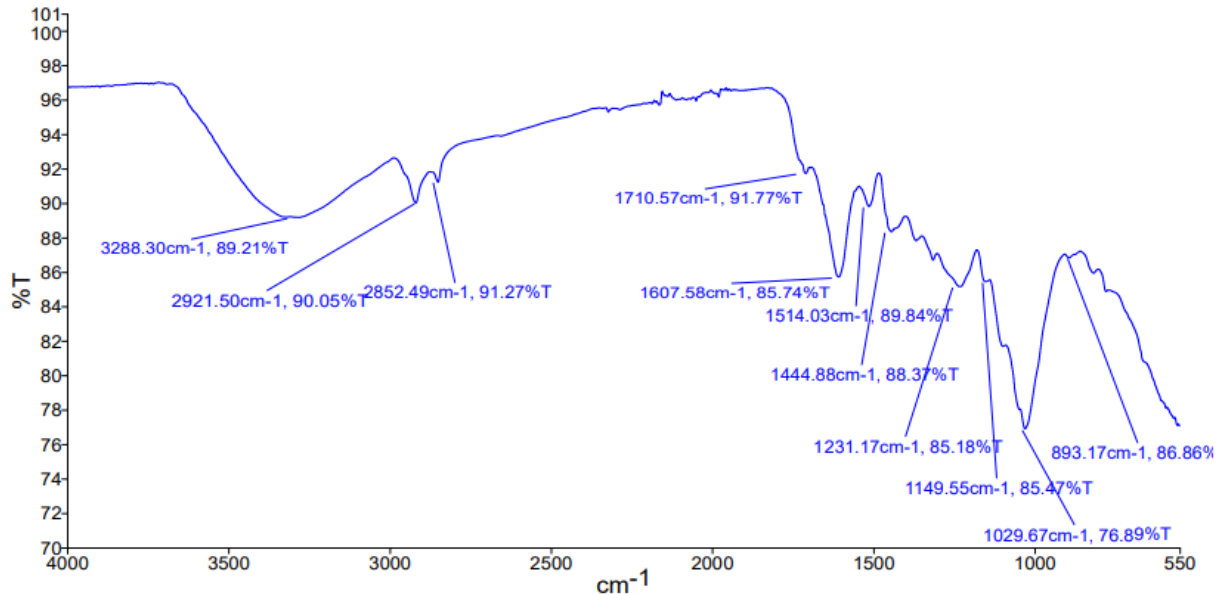
#### 4.1.7 Espectrometria de Absorção na Região do Infravermelho (FT-IR)

Considerando que a intensidade das bandas do FT-IR indicam a absorção de energia em um determinado comprimento de onda, pode-se deduzir que quanto maior a transmitância, menor a concentração do material.

Sendo assim, pode-se observar (Figuras 22 e 23 e Tabela 6), que a biomassa *in natura* apresenta transmitância menor, para quase todas as bandas que caracterizam a lignina, que a biomassa tratada, ou seja, os primeiros apresentam

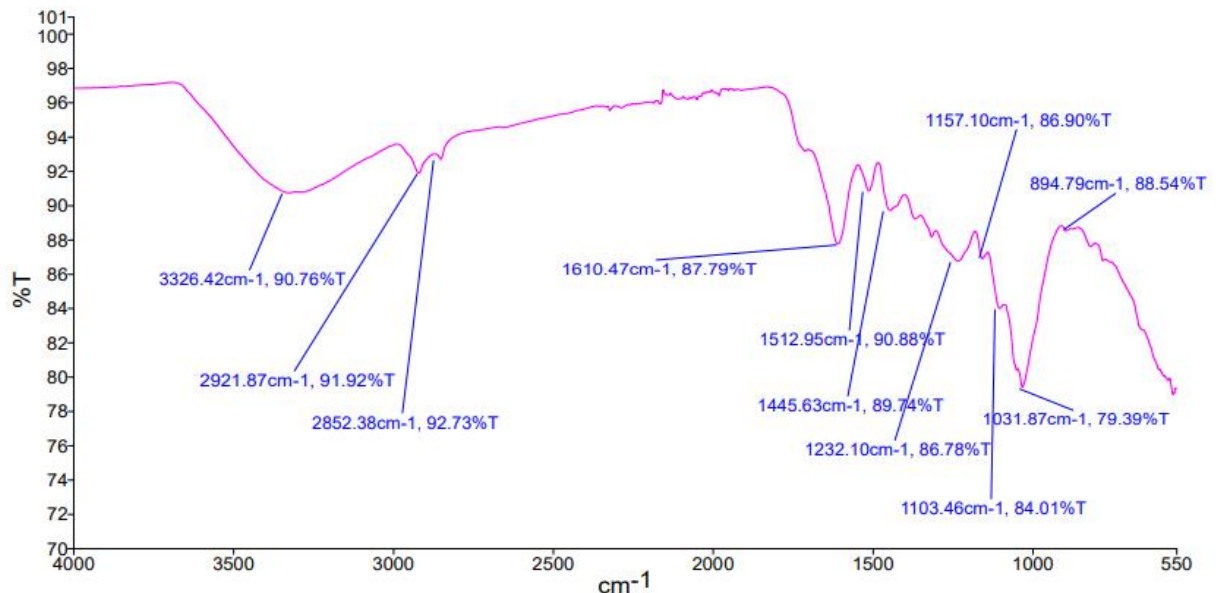
maior concentração nos respectivos comprimentos de onda que caracterizam este material, o que reforça que o tratamento hidrotérmico foi efetivo.

**Figura 22:** Espectro de FT-IR da biomassa da casca da Castanha do Pará *in natura* obtido pela técnica de UATR com torque de 200N



Fonte: AUTORA (2024)

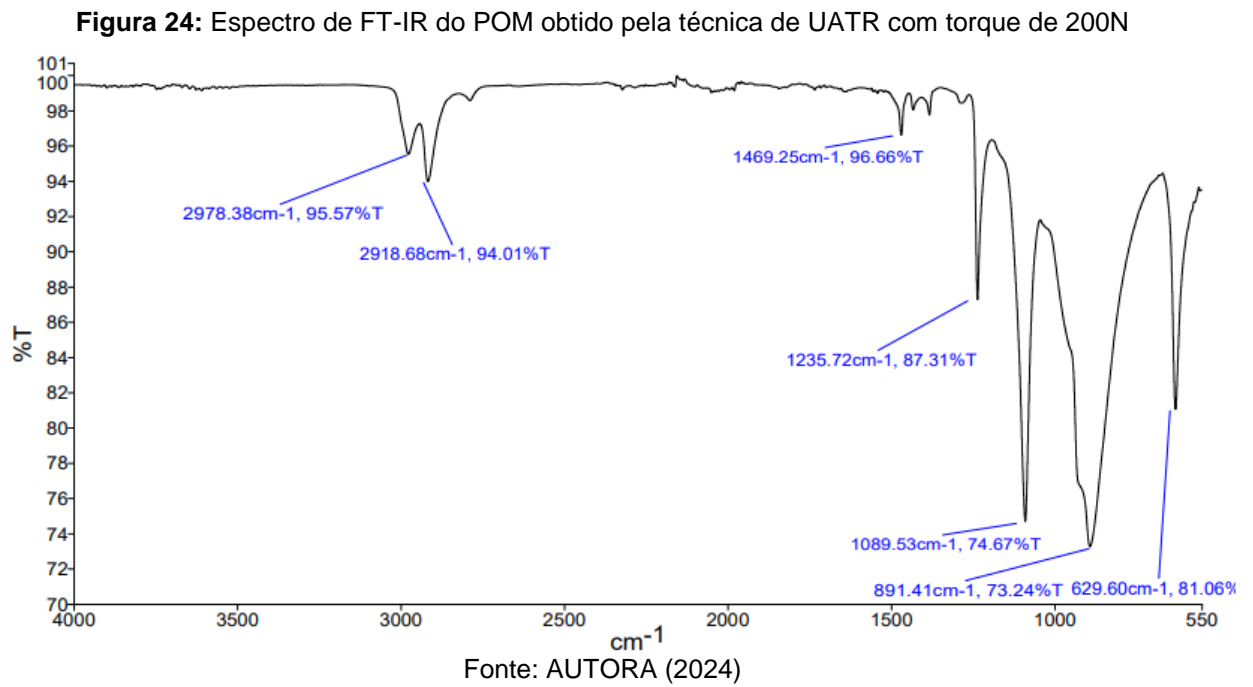
**Figura 23:** Espectro de FT-IR da biomassa da casca da Castanha do Pará tratada obtido pela técnica de UATR com torque de 200N



Fonte: AUTORA (2024)

Além destes espectros, foi feito o FT-IR do POM que apresentou bandas que confirmam ser um material puro. Este material se caracteriza pela presença de bandas em 2978 cm<sup>-1</sup> e 2919 cm<sup>-1</sup> (literatura: 2978 cm<sup>-1</sup> e 2924 cm<sup>-1</sup>) decorrentes da vibração

do alongamento C-H, em  $1469\text{ cm}^{-1}$  (literatura:  $1468\text{ cm}^{-1}$ ) causado pela absorção de vibração de flexão do  $\text{CH}_2$  e vibrações entre as reações de ligação de acoplamento das ligações éter adjacentes na estrutura principal do polímero a  $1236\text{ cm}^{-1}$ ,  $1090\text{ cm}^{-1}$ ,  $891\text{ cm}^{-1}$  (literatura:  $1237\text{ cm}^{-1}$ ,  $1097\text{ cm}^{-1}$ ,  $935\text{ cm}^{-1}$  e  $901\text{ cm}^{-1}$ ) (Figura 24).



**Tabela 6:** Principais bandas de transmitância da lignina e suas atribuições.

Comprimento de onda literatura (cm <sup>-1</sup> )	Amostra <i>in natura</i> - Comprimento de onda literatura (cm <sup>-1</sup> )	Transmitância (%)	Amostra tratada - Comprimento de onda literatura (cm <sup>-1</sup> )	Transmitância (%)	Atribuições
3400	3288	89,21	3326	90,76	Grupamento hidroxílico
3000	-----	-----	-----	-----	C-H aromático
2936	2922	90,05	2922	91,92	C-H alifático
2850	2853	91,27	2852	92,73	C-H alifático
1720-1690	1711	91,77	-----	-----	C=O não conjugado
1675-1650	1608	85,74	1610	87,79	C=O conjugado
1604	1608	85,74	1610	87,79	C=C
1510	1514	89,84	1512	90,88	C=C aromático
1470-1460	1444	88,37	1445	89,74	C-H grupos metílicos
1430-1415					C-H de anéis aromáticos
1270-1265	-----	-----	-----	-----	C-O de aneis guaiacílicos
1240-1230	1231	85,18	1232	86,78	C-O de aneis guaiacílicos C-O de aneis sirigílicos C-O de fenóis
1140-1085	1150	85,47	1157	86,90	C-O de álcoois secundários
1035	1030	76,89	1032	79,39	C-H com deformação no plano
915-815	893	87,86	895	88,54	C-H aromáticos

Fonte: AUTORA (2024) Adaptado de SALIBA et al. (2001).

#### 4.1.8 Fabricação dos compósitos POM/Casca da Castanha do Pará

Após a moagem da castanha e a passagem, da mesma, pelo processo de peneiramento, visando uma granulometria abaixo de 50 mesh (biomassa *in natura*), parte do resíduo foi tratado hidrotêrmicamente afim de se obter a biomassa com menor teor de material lignocelulósico.

Com a mistura destas duas porções de material ao polímero (POM), em uma Dryzer, foram processadas três famílias de compósitos (10% de biomassa m/m, 20% de biomassa m/m e 30% de biomassa m/m), tanto para o material *in natura* quanto para o tratado.

Posteriormente, estes materiais foram trabalhados manualmente, de forma a se obter uma espessura mais fina que possibilita resfriamento rápido e fácil trituração (Figura 25).

Além disso, foi feito, usando-se o mesmo processamento, o material de referência que se caracteriza pelo polímero sem adição de reforço (Figura 25).

Tanto nas amostras trabalhadas, quanto na amostra triturada (Figura 26), é possível observar um aumento da coloração com o acréscimo de reforço.

**Figura 25:** Família de compósitos com 0%, 10%, 20% e 30% m/m de reforço (respectivamente da esquerda para a direita)



Fonte: AUTOR (2024)

**Figura 26:** Compósitos *in natura* após triturados no moinho de facas com 0%, 10%, 20% e 30% m/m de reforço (respectivamente da esquerda para a direita).



Fonte: AUTOR (2024)

#### 4.1.9 Produção dos corpos de prova

Os materiais, após triturados foram inseridos na injetora a 250 °C para se obter os cinco corpos de prova de tração baseado na norma ASTM D 638 – 14 (Figura 27).

**Figura 27:** Corpos de prova de tração com 0%, 10%, 20% e 30% m/m de reforço (respectivamente da esquerda para a direita) de biomassa.



Fonte: AUTOR (2024)

#### 4.1.10 Ensaio de tração

Observa-se (tabela 7) que com o acréscimo de biomassa, ocorre, inicialmente, um aumento da tensão de escoamento na amostra com 10% de reforço de casca de Castanha do Pará tratada e não tratada quando comparado com o POM (33,66 MPa). Estes valores, assim como os demais das amostras tratadas e *in natura*, não apresentam diferença de valores estatisticamente consideráveis entre si, estando dentro da mesma faixa de variação.

No entanto, com o aumento do teor de reforço, o valor da resistência à tração diminui. Isto pode ocorrer devido à redução da ductilidade nos compósitos que acarretam maior fragilidade (SILVA, 2024).

Vale ressaltar que, para compósitos com reforço de biomassa, a resistência à tração e a rigidez destes materiais tende a aumentar com o acréscimo deste material. Entretanto, este comportamento pode não ser linear, como explica Lopes (2011) e, mais recentemente, Maciel (2017) e Silva (2024). Nestes casos, onde se observa a diminuição da resistência à tração, é notório o aumento do módulo elástico como ocorre com o acréscimo de biomassa neste trabalho.

**Tabela 7:** Propriedades mecânicas dos compósitos.

Material	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Módulo Elástico (MPa)
POM	33,66 ±1,47	51,73 ±5,23	439,30 ±26,24
POM + 10% Reforço in natura	42,88 ±1,06	49,64 ±5,12	1357,44 ±64,21
POM + 20% Reforço in natura	41,20 ±4,44	42,80 ±3,97	1464,23 ±49,02
POM + 30% Reforço in natura	30,17 ±8,94	32,74 ±8,24	1602,60 ± 120,90
POM + 10% Reforço tratado	40,71 ±2,77	46,32 ±5,43	1349,61 ±64,25
POM + 20% Reforço tratado	33,53 ±7,72	37,04 ±8,89	1601,12 ± 38,87
POM + 30% Reforço tratado	24,67 ±7,49	25,64 ±7,26	543,35 ± 28,60

Fonte: AUTORA (2024).

## 5. CONCLUSÃO

- O poliacetal utilizado neste trabalho é um material puro, não tendo, portanto, nenhum outro componente que possa interferir nos resultados;
- Os reforços utilizados apresentam temperatura inicial de decomposição superior a 200 °C e o poliacetal apresenta temperatura de fusão em 161 °C. Sendo assim, não há impedimento térmico, no tocante à degradação dos materiais, que impeça a formação do compósito;
- O tratamento hidrotérmico foi efetivo, retirando, da biomassa, parte da lignina;
- O acréscimo de 10% de biomassa aumentou a tensão de escoamento para ambos os reforços quando comparados ao polímero puro;
- Com o aumento do teor de reforço, a tensão de escoamento tende a diminuir;
- Os valores encontrados na tensão de escoamento das amostras tratadas e *in natura*, não apresentam diferença de valores estatisticamente consideráveis entre si, estando dentro da mesma faixa de variação;
- Sendo assim, é possível manufacturar compósitos com essa biomassa (*Bertholletia excelsa*) para fabricação de engrenagens, reduzindo a utilização de polímeros oriundos do petróleo, reinserindo a biomassa na cadeia produtiva e agregando valor ao resíduo da agroindústria.

## 6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Realizar microscopia eletrônica de varredura (MEV) nas amostras de biomassa;
- Avaliar o processo com outros tipos de tratamento da fibra;
- Avaliar o percentual extraído de material lignocelulósico.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA J. A. R. de; et.al. **Agenda global de pesquisa em ciências biológicas.** [S. l.: s. n.], 2021. DOI 10.22533/at.ed.147210311. Disponível em: <https://atenaeditora.com.br/catalogo/ebook/agenda-global-de-pesquisa-em-ciencias-biologicas>. Acesso em: 3 out. 2024.

ANDRADE, R. D. S. de. **Processo de reciclagem de polímeros termoplásticos.** 2019. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. ASTM D 638: **standard test method for tensile properties of plastics.** U.S., 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. ASTM E 1356: **standard test method for assignment of the glass transition temperatures by Differential Scanning Calorimetry.** U.S., 2008.

BALBI, M. E. et al. **Castanha-do-pará (Bertholletia excelsa BONPL.): composição química e sua importância para saúde. Visão Acadêmica,** v. 15, n. 2, p. 51-63, 2014.

BANDEIRA, C. F. **Obtenção e caracterização de compósitos de benzoxazina/fibra de carbono.** 2015. 201 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

BONELLI, C. et al. **Comportamento térmico, mecânico e morfológico de compósitos de polietileno de alta densidade reciclado com fibra de piaçava.** Polímeros, v. 15, p. 256-260, 2005.

BARBOSA, M. R. R.; GUMIERO, R. G. **Territorialização da economia na Amazônia: cadeia produtiva de castanha-do-Pará na Bã-y Cooperativa Kayapó no Sul do Pará.**2023.

BRANDÃO, V. R. P.; PERES, L. S.; DA SILVA, L. C. **Estudo do compósito de borracha natural com fibra de bagaço de cana-de-açúcar.** Brazilian Journal of Development, v. 9, n. 2, p. 8369-8393, 2023.

BRASIL. **Lei nº 9.605–98, de 12 de fevereiro de 1998.** Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9605.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9605.htm).

BRASIL. **Lei nº 12.651–12, de 25 de maio de 2012.** Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis n.ºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis n.ºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm)

BRASIL. **Lei nº 12.715–12, de 17 de setembro de 2012.** Altera a alíquota das contribuições previdenciárias sobre a folha de salários devidas pelas empresas que especifica; institui o Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores, o Regime Especial de Tributação do Programa Nacional de Banda Larga para Implantação de Redes de Telecomunicações, o Regime Especial de Incentivo a Computadores para Uso Educacional, o Programa Nacional de Apoio à Atenção Oncológica e o Programa Nacional de Apoio à Atenção da Saúde da Pessoa com Deficiência; Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm)

CACURO, T. A.; WALDMAN, W. R. **Cinzas da queima de biomassa: aplicações e potencialidades.** Revista virtual de Química, v. 7, n. 6, p. 2154-2165, 2015.

CAJAMARCA, S. M. N. **Composição química de resíduos agro-industriais e sua relação com o potencial agronômico de um biofertilizante líquido aeróbico - hortbio.** 2019. Tese de doutorado em agronomia (doutorado) - universidade de Brasília faculdade de agronomia e medicina veterinária programa de pós-graduação em agronomia, [s. L.], 2019.

CAMPOS, A. M. A. et. al. **Utilização de resíduos do agronegócio pós-pirolise na produção de coque metalúrgico em forno piloto.**2023.

CAMPOS, K. D.; FARIA, L. J. G.; JOELE, M. R. S. P. **Reaproveitamento de resíduos agroindustriais como prática sustentável para geração energia renovável.** Para onde?, v. 17, n. 1, p. 109-124, 2023.

CARDARELLI, H. R.; OLIVEIRA, A. J. de. **Conservação do leite de castanha-do-Pará.** Scientia Agrícola, v. 57, p. 617-622, 2000.

CARDOSO, B. R. et al. Brazil nuts: **nutritional composition, health benefits and safety aspects.** Food Research International, v. 100, n. 3, p. 9-18. 2017.

CARMONA, I. N. et al. **Potencial energético da biomassa e carvão vegetal de resíduos de castanha-do-pará (bertholletia excelsa bonpl.).** 2017.

CARVALHO, J. A. L. de. **Compósitos de resina benzoxazina / biomassa extraída do resíduo de lavagem do açaí: obtenção e caracterização.** 2019. Dissertação (mestrado) - centro universitário de volta redonda, [s. L.], 2019.

CASTRO, R. G. de. **Influência do comprimento de fibra em compósito reforçado com piaçava.** 2020. Dissertação (mestrado) - escola de engenharia universidade federal fluminense, [s. L.], 2020.

COELHO FILHO, P. R. de C. **Comportamento dos termoplásticos pom e pbt em contato com combustíveis.** 2002. Dissertação (mestrado) - pontifícia universidade católica - mg, [s. L.], 2002.

COMPOSTOS. [S. L.], 2021. Disponível em: <https://www.compostos.com.br/blog/conceito-poliacetil-caracteristicas>. Acesso em: 2 out. 2024.

COSTA, A. C. A. da C. **Obtenção e caracterização de compósitos de resina de benzoxazina reforçados com a biomassa da casca de nozmacadâmia.** 2018. Dissertação (mestrado) - centro universitário de volta redonda, [s. L.], 2018.

DA SILVA, J. R. S. **Obtenção e caracterização de um material compósito produzido com resíduos da castanha-do-Brasil e poliestireno de alto impacto.** 2019. 85 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal do Amazona, Manaus, 2019.

DIAS, R. Y. C. et. al. **Aproveitamento de biomassa de fibras de juta e sisal para material compósito.** 2023.

DICK, T. A. **Graftização de partículas de lignina pelo PLLA.** 2014, 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

DE OLIVEIRA, M. L. **Obtenção e caracterização de compósitos com matriz de resina poliéster, resíduos do sabugo de milho e fibras de juta e de vidro tipo E.** 2023.

DOS SANTOS, F. B. et. al. **Ouriço da Castanha do Pará (Bertholettia excelsa): caracterização e seus possíveis usos.** Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 13, n. 4, p. 165-172, 2022.

FARIA, B. da S. **Proposta de um plano de gerenciamento de resíduos sólidos para a faculdade unb planaltina (fup).** 2019. Tcc (graduação) - faculdade unb planaltina, [s. L.], 2019.

FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D. DE. **Comportamento da madeira a temperaturas elevadas.** Ambiente Construído, v. 9, n. 4, p. 157–174, dez. 2009.

FLORES, A. L. L. **Características mecânicas e higroscópicas de compósitos de juta utilizando tratamento químico e hibridização com vidro e carbono.** 2023.

FURTADO, R. de A. G.; MANGIAVACCHI, B. MAGNELLI; S. K. P. **Reaproveitamento de resíduos orgânicos: uma análise integrativa da literatura sobre as formas e benefícios do reuso da palha do café.** Múltiplos acessos, v. 8, n. 1, p. 162-193, 2023.

GEHLEN, L. R. **Efeito da utilização de fibras lignocelulosicas (açáí a curauã) em compósitos com matriz de resina poliéster insaturado.** Dissertação de Mestrado Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

GROTT, S. C. et. al. **Produção e caracterização de compósitos de biomassa lignocelulósica em matriz polimérica.** Universidade de Blumenau, Blumenau, 2013.

GWMO. *In*: Global Waste Management Outlook 2024. [S. l.], 10 out. 2024. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024>. Acesso em: 1 out. 2024.

HANSTED, F. A. S. et al. **Potencial de reciclagem de resíduos de madeira e cinza de caldeira de biomassa em um material compósito cimentício.** Revista Principia- Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB, 2022.

HOLGUIN, I. C. C. **Estudo do comportamento do PP e PET reciclados submetidos a intempéries e suas possíveis aplicações.** 2017.

IBGE. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/castanha-do-para/br>. Acesso em: 2 out. 2024.

ISOLAPLAST. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://isolaplast.com.br/produto/poliacetel/#:~:text=O%20Poliacetel%20%C3%A9%20um%20pl%C3%A1stico,aplica%C3%A7%C3%A3o%20nos%20diversos%20setores%20industriais>. Acesso em: 2 out. 2024.

JESUS, A. R. de; ALVES, D. F.; LIMA, R. A.; OLIVEIRA, A. T. **Procedimentos de manejo dos resíduos do coco verde: um estudo de caso na usina de triagem de resíduos sólidos do município de pinheiros - es.** 2021. Tcc (graduação) - instituto federal do espírito santo, [s. l.], 2021.

JORDAO, M. C. S.; ASSUMPÇÃO, R. M. V.; OTSUKI, H.; PARK, S. W. **Influência da umidade no ponto de transição vítrea da lignina isolada de Pinus e Eucalipto.** Congresso Anual da ABCP, 16, [s. l.], 1983. Disponível em: [chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/1983\\_Lignina\\_transicao\\_vitrea.pdf](chrome-extension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/1983_Lignina_transicao_vitrea.pdf). Acesso em: 1 dez. 2024.

KOBAYASHI, M.; SANTOS, R. E.; PEREIRA, J. S.; SILVA, J. C.; AMBRÓSIO, J. D. **Caracterização termo-química de casca de Castanha do Pará. 12º congresso brasileiro de polímeros,** [s. l.], 2013. Disponível em: <http://e-democracia.com.br/cbpol/anais/2013/pdf/6g2g.pdf>. Acesso em: 5 set. 2023.

KOMATSU, R. K.; SANTOS, C. H. P. dos; SOUSA, J. C. de. **Gestão de Resíduos: Hábitos de descarte de Resíduos derivados da Produção Agrícola das propriedades em Assentamentos Rurais.** Id on Line Revista multidisciplinar e de psicologia, [s. l.], v. 13, n. 44, 2019. DOI <https://doi.org/10.14295/idonline.v13i44.1645>. Disponível em: <https://idonline.emnuvens.com.br/id/search/index?query=Gest%C3%A3o+de+Res%C3%ADduos%3A+H%C3%A1bitos+de+descarte+de+Res%C3%ADduos+derivados++da+Produ%C3%A7%C3%A3o+Agr%C3%ADcola+das+propriedades+em+Assentamentos+Rurais&dateFromYear=&dateFromMonth=&dateFromDay=&dateToYear=&dateToMonth=&dateToDay=&authors=>. Acesso em: 17 jul. 2024.

LITAIFF, H. A. et al. **Influência da mercerização em fibras de malva nas propriedades físico-mecânicas de compósito à base de polipropileno.** 2023.

LOPES, F. P. D. **Estudos adicionais dos compósitos poliméricos reforçados por fibras de curauá.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 92 p. 2011

MACIEL, N. O. R. **Análise mecânica comparativa de tração, flexão e impacto entre compósito reforçados com fibra de curauá e compósitos reforçados com fibras de vidro.** 2017. 119 f. Dissertação (Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2017.

MARINELLI, A. L. et. al. **Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade amazônica.** Polímeros, v. 18, p. 92-99, 2008.

MAZUR, R. L. **Obtenção e caracterização de compósitos de fibras de carbono/PEKK com aplicações aeronáuticas.** 2010. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá; Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

MELO, E. C. R. de. **Efeito dos tratamentos de silanização e acetilação em fibras de Luffa cylindrica para aplicação em compósitos.** 2023.

MILANESSE, A. C. **Processamento e caracterização de compósito fibra de sisal/resina epóxi via RTM.** 2012. 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica na área de Materiais) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

MIRANDA, C. S. et al. **Efeito dos tratamentos superficiais nas propriedades do bagaço da fibra de piaçava Attalea funifera Martius, n2, vol. 38, 2015.**

MONTEIRO, J. P. S. **Processamento e caracterização de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras curtas de casca de castanha.** 2023. Tese de doutorado.

MORDOR INTELLIGENCE. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/polypropylene-market>. Acesso em: 2 out. 2024.

MOREIRA, A. M. M. **Compósitos.** Instituto Politécnico de Tomar, Portugal, 2009.

NAVARRO, C. I. T. **Caracterização microestrutural das fibras naturais: etlingera elatior, costus e helicônia bihai.** 2012. Dissertação (mestrado) - pontifícia universidade católica do rio de janeiro, [s. L.], 2012. Doi 10.17771/pucRio.acad.19405. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strsecao=resultado&nrseq=19405@1>. Acesso em: 3 out. 2024.

OLIVEIRA, J. L. **Processamento e caracterização de compósitos de polipropileno reforçados com fibras da palmeira real australiana.** 2015. 62 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha - Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda-RJ, 2015.

OLIVEIRA, H. N. **Desenvolvimento de compósitos poliméricos para aplicação em deck.** 2013. 60 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha - Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2013.

OLIVEIRA, J. C. et. al. **Avaliação térmica e espectroscópica da celulose, hemicelulose e lignina extraídas da fibra de licuri (syagrus coronata).** In:

congresso brasileiro de engenharia e ciência dos materiais, 21., cuiabá, anais... cuiabá-mt: cbcimat, 2014. Nov.2014.

ONU. *In: O mundo deve superar a era do desperdício e transformar o lixo em recurso, segundo relatório da ONU.* [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/comunicado-de-imprensa/o-mundo-deve-superar-era-do-desperdicio-e-transformar>. Acesso em: 3 out. 2024.

PAZ, A. Zerohora. *In: Para lembrar: há 10 anos, envio ilegal de contêineres com lixo tóxico abalou relações entre Brasil e Inglaterra.* [S. l.], 2024. Disponível em: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/ambiente/noticia/2019/09/para-lembrar-ha-10-anos-envio-ilegal-de-containeres-com-lixo-toxico-abalou-relacoes-entre-brasil-e-inglaterra-ck0qtp6qc0ahq01tgsaufva64.html>. Acesso em: 3 out. 2024.

PETRECHEN, G. P.; AMBRÓSIO, J. D. **Preparation and mechanics characterization of lignocellulosic residues of brazil nut (*bertholletia excelsa*) seed husks reinforced polypropylene composites.** *In: congresso brasileiro de engenharia e ciência dos materiais - metallum congressos técnicos e científicos, natal-rn. Anais... p. 2739-2749. 22º cbcimat, 2016.*

PITT, F. D.; BOING, D.; BARROS, A. A. C. **Desenvolvimento histórico, científico e tecnológico de polímeros sintéticos e de fontes renováveis.** *Revista da unifebe nº 9, [s. l.], v. 1, ed. 9, 2011. Disponível em: https://periodicos.unifebe.edu.br/index.php/revistaunifebe/article/view/47. Acesso em: 8 mar. 2023.*

QUINELATO, C. **Métodos de extração da lignina do bagaço da cana-de-açúcar da região noroeste do estado de São Paulo.** 2016. 95 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto, 2016.

ROSA, D. V. **Estudo de viabilidade econômica de uma planta de produção de polipropileno no Brasil.** 2023.

SANTOS, F. A. **Avaliação do pré-tratamento hidrotérmico de palhas de cana-de-açúcar para produção de etanol de segunda geração.** 2013. Tese (doutorado) - universidade federal de viçosa, [s. l.], 2013.

SANTOS, F.A.; QUEIROZ, J. H. de; COLODETTE, J. L.; MANFREDI, M.; QUEIROZ, M. E. L. R.; CALDAS, C. S.; SOARES, F. E. F. **Otimização do pré-tratamento hidrotérmico da palha de cana-de-açúcar visando à produção de etanol celulósico.** *Química Nova, [s. l.], v. 37, 2014. DOI 10.1590/S0100-40422014000100011. Disponível em: https://www.scielo.br/j/qn/a/KxmCjdRvRMsV8ByjkmShSPG/?lang=pt&format=html#. Acesso em: 17 jul. 2024.*

SEZEFREDO, R. M. **Ensaio de tração em compósitos com matriz biopolimérica.** 2015. TCC (graduação em Engenharia Mecânica)- Universidade Tecnológica Federal Do Paraná - 2015. Disponível em: [https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/28211/1/CP\\_COEME\\_2015\\_1\\_05.pdf](https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/28211/1/CP_COEME_2015_1_05.pdf)

SILVA, A. S.; VIEIRA, D. A. **Síntese e caracterização de compósitos de Castanha do Pará/ferrita de manganês para tratamento de efluentes industriais**. VI seminário de iniciação científica: Pesquisa na Amazônia: Novos cenários, [s. l.], 2020.

SILVA, I. L. A. da. **Propriedades e estrutura de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas de juta**. 2014. Tese (doutorado) - universidade estadual do norte fluminense darcy ribeiro, [s. l.], 2014.

SILVA, J. de O. **Obtenção e caracterização de compósitos de polietileno de baixa densidade reforçados com biomassa da casca da bertholletia excelsa**. 2024. Dissertação (mestrado) - centro universitário de volta redonda, [s. l.], 2024.

SILVA, T. K. L.; FERREIRA, L. M.; HIRATA, J. K. **Desenvolvimento de compósito utilizando matriz de polipropileno e reforço de fibra de milho**. 2023.

SIQUEIRA, A.; BEGALLI, G. **Poliacetal**. 2013. TCC (Tecnico) - Universidade de Campinas - Colégio Técnico de Campinas, [S. l.], 2013. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/slideshow/capa-27187332/27187332#2>. Acesso em: 17 jul. 2024.

SOUSA, R. F. **Avaliação do rendimento da espécie “bertholletia excelsa” na produção de óleo fixo**. 2023. 29 f. Monografia (Licenciatura em Química) – Universidade Federal do Pará, Ananindeua-PA, 2023.

SPINACÉ, M. A. da S.; DE PAOLI, M. **A tecnologia da reciclagem de polímeros**. Química nova, v. 28, p. 65-72, 2005.

VELOZO, E. S. **Análise da influência da temperatura sobre o limite pressão-velocidade (pv) do poliacetal copolímero com aditivo negro-de-fumo**. Orientador: Patric Daniel Neis. 2019. TCC (Graduação) - universidade federal do rio grande do sul escola de engenharia - curso de engenharia mecânica, [s. l.], 1019. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/211337>. Acesso em: 31 mar. 2023.

VICENTE, J. A. **Materiais plásticos de engenharia e suas aplicações (poliamida e poliacetal)**. Monografia em Produção de Plásticos, FATEC–São Paulo, 2009.

## ANEXO 1 – Datasheet do poliacetal M90 da CELCON®.

**CAMPUS® Ficha de especificação**

**CELCON® M90 - POM**  
**Celanese**

**Informação do produto**

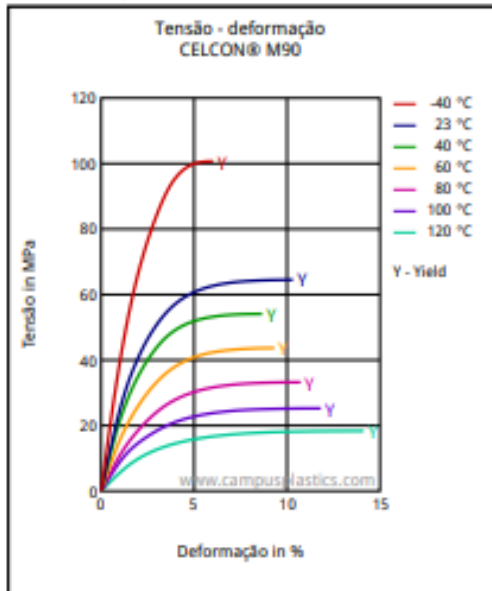
Celcon® acetal copolymer grade M90 is a medium viscosity polymer providing optimum performance in general purpose injection molding and extrusion of thin walled tubing and thin gauge film. This grade provides overall excellent performance in many applications. Chemical abbreviation according to ISO 1043-1: POM Please also see Hostaform® C 9021.

<b>Propriedades reológicas</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>	<b>Método de ensaio</b>
Índice de fluidez volumétrico, MVR	<b>8</b>	cm <sup>3</sup> /10min	ISO 1133
Temperatura	<b>190</b>	°C	ISO 1133
Carga	<b>2.16</b>	kg	ISO 1133
Contração após a moldagem, paralelo	<b>2.0</b>	%	ISO 294-4, 2577
Contração após a moldagem, perpendicular	<b>1.9</b>	%	ISO 294-4, 2577
<b>Propriedades mecânicas</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>	<b>Método de ensaio</b>
Módulo de tração	<b>2760</b>	MPa	ISO 527-1/-2
Tensão no escoamento	<b>65</b>	MPa	ISO 527-1/-2
Deformação no escoamento	<b>10</b>	%	ISO 527-1/-2
Módulo de tensão de fluência, 1h	<b>2450</b>	MPa	ISO 899-1
Módulo de tensão de fluência, 1000h	<b>1350</b>	MPa	ISO 899-1
Resistência ao impacto Charpy, +23°C	<b>188</b>	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eU
Resistência ao impacto Charpy, -30°C	<b>181</b>	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eU
Res. impacto Charpy c/entalhe, +23°C	<b>6</b>	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eA
Res. impacto Charpy c/entalhe, -30°C	<b>6</b>	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eA
<b>Propriedades térmicas</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>	<b>Método de ensaio</b>
Temperatura de fusão, 10°C/min	<b>165</b>	°C	ISO 11357-1/-3
Temperatura de deflexão térmica, 1.80 MPa	<b>101</b>	°C	ISO 75-1/-2
Temperatura de deflexão térmica, 0.45 MPa	<b>158</b>	°C	ISO 75-1/-2
Coef.de expansão térmica linear, paralelo	<b>120</b>	E-6/K	ISO 11359-1/-2
Coef.de expansão térmica linear, perpend.	<b>120</b>	E-6/K	ISO 11359-1/-2
Flamabilidade conforme índice de oxigênio	<b>14.9</b>	%	ISO 4589-1/-2
<b>Propriedades elétricas</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>	<b>Método de ensaio</b>
Resistividade volumétrica específica	<b>8E12</b>	Ohm*m	IEC 62631-3-1
Resistividade superficial específica	<b>&gt;1E15</b>	Ohm	IEC 62631-3-2
<b>Outras propriedades</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>	<b>Método de ensaio</b>
Absorção de água	<b>0.75</b>	%	Sim. to ISO 62
Absorção de umidade	<b>0.2</b>	%	Sim. to ISO 62
Densidade	<b>1410</b>	kg/m <sup>3</sup>	ISO 1183

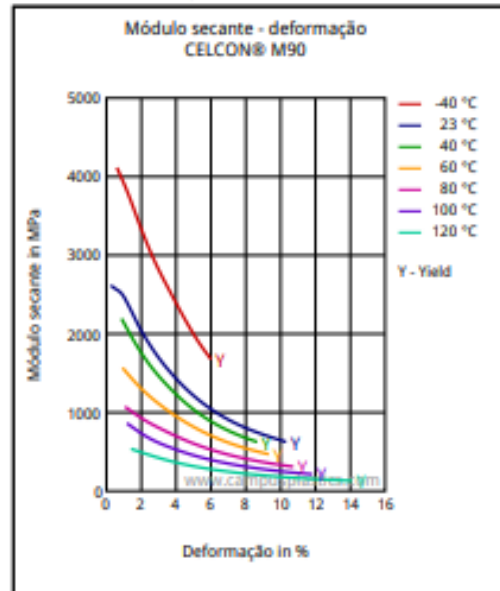
**CELCON® M90 - POM**  
Celanese

**Diagrama**

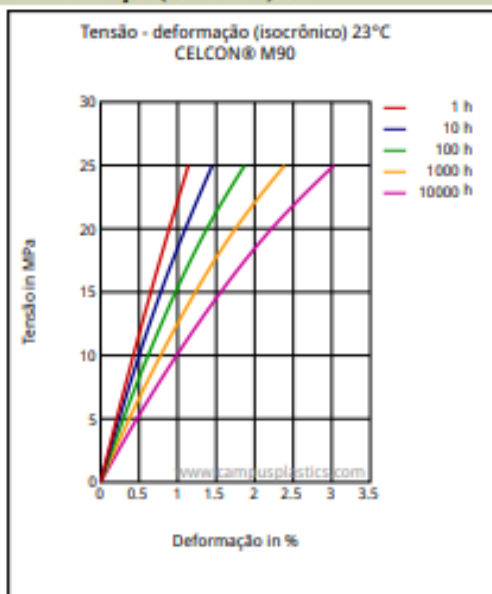
**Tensão - deformação**



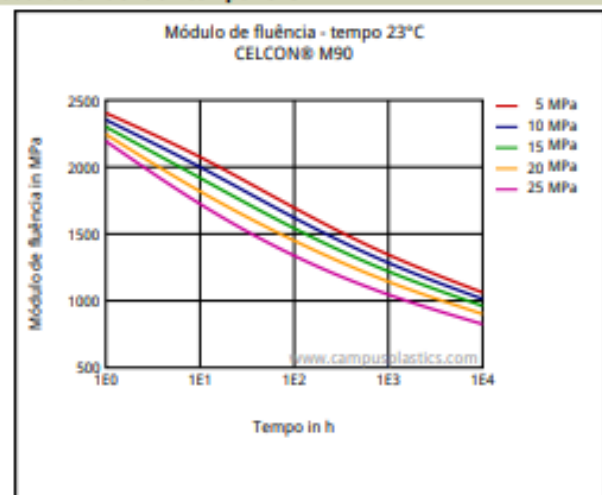
**Módulo secante - deformação**



**Tensão - deformação (isocrônico) 23°C**

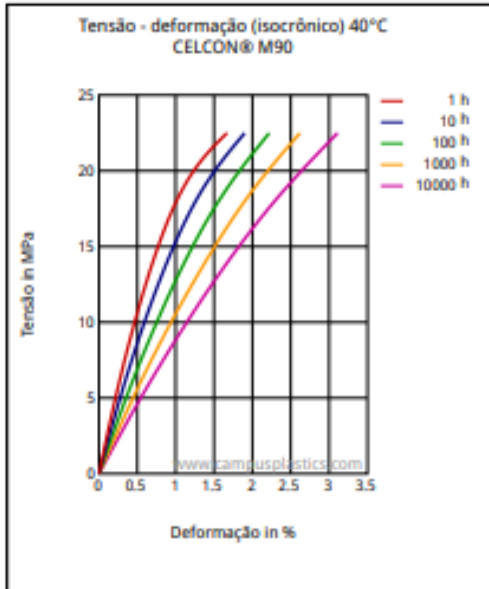


**Módulo de fluência - tempo 23°C**

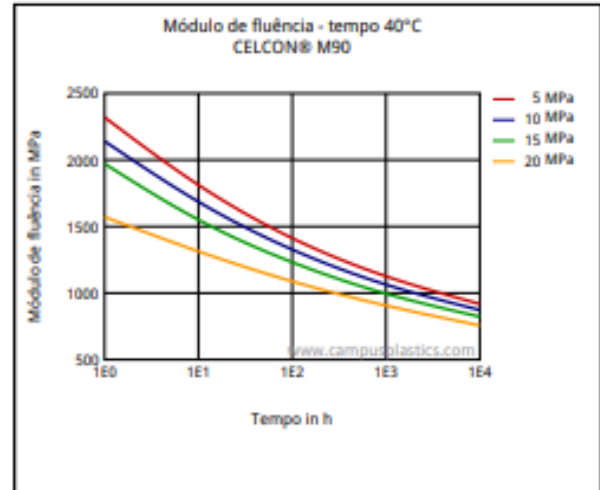


## CELCON® M90 - POM Celanese

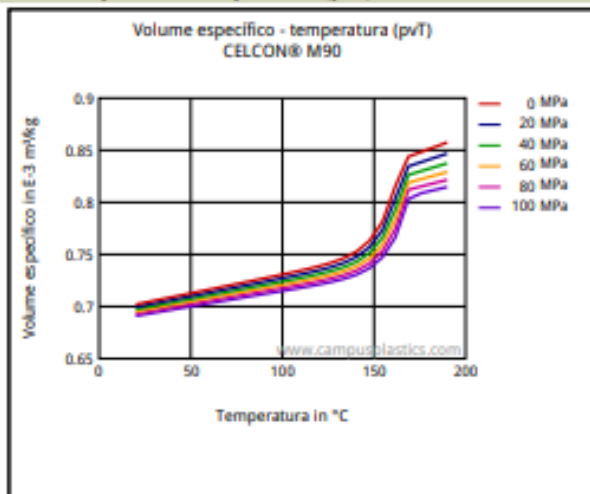
### Tensão - deformação (isocrônico) 40°C



### Módulo de fluência - tempo 40°C



### Volume específico - temperatura (pvT)



### Características

#### Processamento

Moldagem por injeção, Extrusão de laminas, Extrusão de perfis, Extrusão de chapas, Outros tipos de extrusão, Moldagem por sopro, Calandragem

#### Forma de entrega

Granulos

#### Outras informações

#### Moldagem por injeção

#### Preprocessing

#### Disponibilidade regional

América do Norte, Europa, Ásia Pacífico, América Central e do Sul

## **CELCON® M90 - POM**

### **Celanese**

Drying is generally not required because Celcon® and Hostaform® acetal copolymers are not hygroscopic nor are they degraded by moisture during processing. Excessive moisture can lead to splay (silver streaking) in molded parts. For better uniformity in molding especially when using regrind or material that has been stored in containers open to the atmosphere, recommended drying conditions are 80 C (180 F) for 3 hours. Desiccant hopper dryers are not required. Maximum water content = 0.35%

#### **Processing**

Standard reciprocating screw injection molding machines with a high compression screw (minimum 3:1 and preferably 4:1) and low back pressure (0.35 Mpa/50 PSI) are favored. Using a low compression screw (i.e. general purpose 2:1 compression ratio) can result in unmelted particles and poor melt homogeneity. Using a high back pressure to make up for a low compression ratio may lead to excessive shear heating and deterioration of the material.

Melt Temperature: Preferred range 182-199 C (360-390 F). Melt temperature should never exceed 230 C (450 F).

Mold Surface Temperature: Preferred range 82-93 C (180-200 F) especially with wall thickness less than 1.5 mm (0.060 in.). May require mold temperature as high as 120 C (250 F) to reproduce mold surface or to assure minimal molded in stress. Wall thickness greater than 3mm (1/8 in.) may use a cooler (65 C/150 F) mold surface temperature and wall thickness over 6mm (1/4 in.) may use a cold mold surface down to 25 C (80 F). In general, mold surface temperatures lower than 82 C (180 F) may hinder weld line formation and produce a hazy surface or a surface with flow lines, pits and other included defects that can hinder part performance.

#### **Postprocessing**

Postprocessing conditioning and moisturizing are not required. It may be necessary to fixture large or complicated parts with varying wall thickness to prevent warpage while cooling to ambient temperature.

### **Extrusão de lâminas**

#### **Preprocessing**

Drying is generally not required because Celcon materials are not hygroscopic nor are they degraded by moisture during processing. Excessive moisture can cause surface defects on the extruded film. For better uniformity especially when using regrind or material that has been stored in containers open to the atmosphere, recommended drying conditions are 3 Hrs. at 80 C (180 F). Desiccant hopper dryers are not required. Max. moisture content = 0.35%.

#### **Processing**

Standard extruders with a length to diameter ratio of at least 20:1 are recommended. The screw should be a high compression ratio of at least 3:1 and preferably 4:1 to assure good melting and melt homogeneity. The design should be approximately 35% each for feed and metering sections with the remaining 30% as the transition zone.

Melt temperature: 160-220 C (320-430 F)

#### **Postprocessing**

Postprocessing conditioning or moisturizing is not required.

### **Outros tipos de extrusão**

#### **Preprocessing**

Drying is generally not required because Celcon materials are not hygroscopic nor are they degraded by moisture during processing. Excessive moisture can cause surface defects. For better uniformity especially when using regrind or material that has been stored in containers open to the atmosphere, recommended drying is 3 hours at 80 C (180 F). Desiccant hopper dryers are not required. Max. moisture content = 0.35%

#### **Processing**

Standard extruders with a length to diameter ratio of at least 20:1 are recommended. The screw should be a high compression ratio of at least 3:1 and preferably 4:1 to assure good melting and uniform melt homogeneity. The design should be approximately 35% each for the feed and metering sections with the remaining 30% as transition zone.

Melt temperature 180-220 C (355-430F)

## **CELCON® M90 - POM** **Celanese**

### **Postprocessing**

Postprocessing conditioning or moisturizing are not required. For thick walled sections (>3mm or 1/8 in.), annealing is recommended to reduce internal stresses.

Annealing temperature: 130-140 C (265-285 F)

Annealing time: 10 min/mm thickness

### **Extrusão de perfis**

#### **Preprocessing**

Drying is generally not required because Celcon materials are not hydroscopic nor are they degraded by moisture during processing. Excessive moisture can cause surface defects on the extrusion. For better uniformity especially when using regrind or material that has been stored in containers open to the atmosphere, recommended drying conditions are 3 Hrs. at 80 C (180 F). Desiccant hopper dryers are not required. Max. moisture content = 0.035%.

#### **Processing**

Standard extruders with a length to diameter ratio of at least 20:1 are recommended. The screw should be a high compression ratio of at least 3:1 and preferably 4:1 to assure good melting and melt homogeneity. The design should be approximately 35% each for feed and metering sections with the remaining 30% as the transition zone.

Melt temperature: 180-220 C (360-430 F).

#### **Postprocessing**

Postprocessing or moisturizing is not required. For thick walled extrusions (>3 mm or 1/8 in.), annealing is recommended to reduce internal stresses.

Annealing temperature: 130-140 C (265-285 F)

Annealing time: 10 min/mm thickness

### **Extrusão de chapas**

#### **Preprocessing**

Drying is generally not required because Celcon materials are not hydroscopic nor are they degraded by moisture during processing. Excessive moisture can lead to surface defects. For better uniformity in sheet extrusion especially when using regrind or material that has been stored in containers open to the atmosphere, recommended drying is 3 hours at 80 C (180 F). Desiccant hopper dryers are not required. Max. water content = 0.35%.

#### **Processing**

Standard extruders with a length to diameter ratio of at least 20:1 are recommended. The screw should be a high compression ratio (at least 3:1 and preferably 4:1) to assure good melting and uniform melt homogeneity. The screw design should be approximately 35% each for the feed and metering sections with the remaining 30% as the transition zone.

Melt temperature 180-190 C (355-375 F).

#### **Postprocessing**

Postprocessing conditioning or moisturizing is not required. For thick walled sections (>3mm or 1/8 in.), annealing is recommended to reduce internal stresses.

Annealing temperature: 130-140 C (265-285 F)

Annealing time: 10 min/mm wall thickness

### **Moldagem por sopro**

#### **Preprocessing**

Consult product information services.

## **CELCON® M90 - POM**

### **Celanese**

#### **Processing**

Consult product information services.

#### **Postprocessing**

Consult product information services.

#### **Calandragem**

#### **Preprocessing**

Consult product information services.

#### **Processing**

Consult product information services.

#### **Postprocessing**

Consult product information services.

**NOTICE TO USERS:** Values shown are based on testing of laboratory test specimens and represent data that fall within the standard range of properties for natural material. These values alone do not represent a sufficient basis for any part design and are not intended for use in establishing maximum, minimum, or ranges of values for specification purposes. Colorants or other additives may cause significant variations in data values. Properties of molded parts can be influenced by a wide variety of factors including, but not limited to, material selection, additives, part design, processing conditions and environmental exposure. Other than those products expressly identified as medical grade (including by MT® product designation or otherwise), Celanese's products are not intended for use in medical or dental implants. Regardless of any such product designation, any determination of the suitability of a particular material and part design for any use contemplated by the users and the manner of such use is the sole responsibility of the users, who must assure themselves that the material as subsequently processed meets the needs of their particular product or use. To the best of our knowledge, the information contained in this publication is accurate; however, we do not assume any liability whatsoever for the accuracy and completeness of such information. The information contained in this publication should not be construed as a promise or guarantee of specific properties of our products. It is the sole responsibility of the users to investigate whether any existing patents are infringed by the use of the materials mentioned in this publication. Moreover, there is a need to reduce human exposure to many materials to the lowest practical limits in view of possible adverse effects. To the extent that any hazards may have been mentioned in this publication, we neither suggest nor guarantee that such hazards are the only ones that exist. We recommend that persons intending to rely on any recommendation or to use any equipment, processing technique or material mentioned in this publication should satisfy themselves that they can meet all applicable safety and health standards. We strongly recommend that users seek and adhere to the manufacturer's current instructions for handling each material they use, and entrust the handling of such material to adequately trained personnel only. Please call the telephone numbers listed for additional technical information. Call Customer Services for the appropriate Materials Safety Data Sheets (MSDS) before attempting to process our products.

© 2024 Celanese or its affiliates. All rights reserved. Celanese®, registered C-ball design and all other trademarks identified herein with ®, TM, SM, unless otherwise noted, are trademarks of Celanese or its affiliates. Fortron is a registered trademark of Fortron Industries LLC. KEPITAL is a registered trademark of Korea Engineering Plastics Company, Ltd.

## ANEXO 2 – Carta de Parceria da iTech.



São Caetano do Sul, 15 de maio de 2024.

A

UNIFOA – Centro Universitário de Volta Redonda  
Mestrado Profissional em Materiais - MEMAT  
Campus Olézió Galotti – Avenida Dauro Peixoto Aragão, 1325  
Três Poços, Volta Redonda – CEP 27240-560

*Ref.: Projeto Final – Dissertação – Confecção e caracterização de materiais compósitos com base de poliacetal reforçados por biomassa da casca da castanha do pará, visando seu uso na fabricação de engrenagens.*

Prezados,

Vimos através desta, formalizar a realização de uma parceria entre o UniFOA – Centro Universitário de Volta Redonda e a iTech Analytics para fomentar o desenvolvimento do projeto supracitado a ser apresentado como dissertação pela aluna Julia Cardoso Landim para obtenção do título de Mestre em Materiais.

A iTech Analytics, por meio da presente parceria firmada, autoriza a utilização de seus equipamentos e laboratórios para desenvolvimento de ensaios de caracterização da matéria-prima e compósito final.

Adicionalmente, a iTech Analytics autoriza a utilização de seu nome e de dados relacionados às suas atividades na dissertação e eventuais artigos científicos produzidos com base no presente projeto, cabendo uma avaliação preliminar do conteúdo do texto por parte da empresa.

Atenciosamente,

Itech Analytics  
Gerente Geral

