

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL - CAMPUS FELIZ

GUILHERME GUSTAVO HEPP

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS UTILIZANDO
POLIÉSTER E BAGAÇO DE MANDIOCA E COMPARAÇÃO COM
POLIÉSTER E CARBONATO DE CÁLCIO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de
bacharelado em Engenharia Química.

Orientadora: Daiane Romanzini

FELIZ

2022

GUILHERME GUSTAVO HEPP

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS UTILIZANDO
POLIÉSTER E BAGAÇO DE MANDIOCA E COMPARAÇÃO COM
POLIÉSTER E CARBONATO DE CÁLCIO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de bacharelado em Engenharia Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel(a) em Engenharia Química.

BANCA EXAMINADORA

Prof. André Zimmer

Prof^a. Flávia Dagostim Minatto

ORIENTADORA

Prof^a. Daiane Romanzini

Feliz, 21 de julho de 2022.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por estar ao meu lado nos momentos mais solitário e difíceis, durante o TCC e sempre.

Agradeço à minha família, por entender minhas ausências e me apoiar em cada passo, com entusiasmo maior que o meu muitas vezes. Especialmente à minha mãe, que me entendeu e me apoiou como ninguém, mesmo demonstrando, por vezes, não ter a certeza de como fazer isso.

Agradeço à minha orientadora Daiane Romanzini por ter tanta paciência e ser tão dedicada na tarefa de me orientar nessa etapa. Sem toda essa ajuda e paciência, eu não teria conseguido chegar ao fim do meu TCC.

Agradeço aos meus colegas e amigos, pelas horas de desabafo. Sem esses momentos seria difícil recuperar as energias para voltar a trabalhar e escrever.

RESUMO

A *manihot sculenta*, conhecida como mandioca, é uma planta cultivada em praticamente toda a América, desde os Estados Unidos até a Argentina, tendo diversas denominações mesmo aqui no Brasil, como aipim e macaxeira. Considerando que a Região Sul é responsável por grande parte da fécula produzida no país, é natural a busca por um encaminhamento correto dos resíduos industriais de tal produção, e o bagaço da mandioca desperta interesse, uma vez que seu encaminhamento comum é o trato de animais e adubamento, porém, em excesso, isso pode ser prejudicial aos animais e ao solo. Uma possibilidade de aplicação é o seu uso em materiais compósitos, e diversos trabalhos reportam o uso de matriz polimérica reforçada por cargas particuladas, geralmente com variações ou incrementos à carga de carbonato de cálcio. Deste modo, o presente trabalho tem como objetivo a obtenção e caracterização de compósito de resina poliéster contendo bagaço de mandioca e os resultados foram comparados com compósitos produzidos com carbonato de cálcio, que é uma carga tradicional usada na indústria. O bagaço foi desidratado e moído, e foi caracterizado através da análise termogravimétrica, apresentando resultados semelhantes aos encontrados na literatura. O compósito foi obtido através da técnica de *casting*, com teores de 9,1% e 16,6% em massa. As análises de caracterização do compósito obtido foram de ensaios de viscosidade, tempo de gel, densidade, absorção de água e de flexão. O teste de viscosidade demonstrou que a incorporação de bagaço de mandioca aumenta a viscosidade, bem como a densidade e absorção de água do compósito. Já o tempo de gel permaneceu estável em relação à matriz poliéster, e superior ao do poliéster contendo carbonato de cálcio. Já a resistência à flexão e o módulo de elasticidade demonstraram resultados inferiores aos da matriz poliéster com carbonato de cálcio. Desta forma, o bagaço de mandioca se apresenta como potencial carga para ser usada em matriz poliéster.

Palavras-chave: Bagaço de mandioca. Matriz poliéster. Carbonato de cálcio.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma de obtenção da fécula da mandioca.....	10
Figura 2: Esquema de obtenção e caracterização dos corpos de prova.	18
Figura 3: Algumas etapas do processo de obtenção da farinha de mandioca.	19
Figura 4: Moldes de silicone utilizados para a obtenção dos corpos de prova, respectivamente para flexão, absorção de água e para densidade..	21
Figura 5: Amostras da análise de tempo de gel, respectivamente RP-CaCO ₃ -9,1 (a), RP-CaCO ₃ -16,6 (b), RP-100 (c), RP-BagMand-9,1 (d) e RP-BagMand (e).	24
Figura 6: Análise de absorção de água.....	26
Figura 7: Corpos de prova e máquina utilizados para teste de flexão, em que (a) RP-BagMand-16,6, (b) RP-CaCO ₃ -16,6, (c) RP-BagMand-9,1, (d) RP-CaCO ₃ -9,1 e (e) RP-100.....	27
Figura 8: Curva de perda de massa do bagaço da mandioca (linha vermelha) e derivada da curva (linha verde).	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Compósitos de matriz poliéster e respectivos reforços a serem incorporados.	22
Tabela 2: Proporção em gramas de reforço adicionado para teste de gel.	23
Tabela 3: Tempo (s) e viscosidade da análise de copo Ford.	29
Tabela 4: Dados da análise de tempo de gel.	30
Tabela 5: Densidade das amostras.	31
Tabela 6: Absorção de água.	32
Tabela 7: Resultados de resistência à flexão e módulo de elasticidade para as amostras estudadas.	33

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.1.1 OBJETIVO GERAL.....	3
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
2 REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1 MANDIOCA	5
2.1.1 PRODUÇÃO DA MANDIOCA	6
2.1.2 FÉCULA DE MANDIOCA	7
2.1.3 PROCESSO INDUSTRIAL DE OBTENÇÃO DA FÉCULA DE MANDIOCA	8
2.1.4 BAGAÇO DA MANDIOCA.....	10
2.2 COMPÓSITOS	11
2.2.1 MATRIZ POLIMÉRICA.....	12
2.2.2 MATRIZ POLIÉSTER.....	12
2.3 ESTUDOS SOBRE MATERIAIS COMPÓSITOS REFORÇADOS COM BAGAÇO DE MANDIOCA E OUTROS MATERIAIS PARTICULADOS	14
2.3.1 COMPÓSITOS CONTENDO BAGAÇO DE MANDIOCA	15
2.3.2 COMPÓSITOS REFORÇADOS POR CARGA PARTICULADA	16
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
3.1 MATERIAIS	18
3.2 MÉTODOS	18
3.2.1 OBTENÇÃO DO BAGAÇO DE MANDIOCA	18
3.2.2 CARACTERIZAÇÃO DO BAGAÇO DE MANDIOCA	20
3.2.3 OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	20
3.2.4 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS	22
3.2.4.1 VISCOSIDADE	22
3.2.4.2 TEMPO DE GEL	23
3.2.4.3 DENSIDADE	24
3.2.4.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	25

3.2.4.5 FLEXÃO	26
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO BAGAÇO.....	28
4.2 ANÁLISES DOS CORPOS DE PROVA	29
4.2.1 VISCOSIDADE	29
4.2.2 TEMPO DE GEL	30
4.2.3 DENSIDADE	31
4.2.4 ABSORÇÃO D'ÁGUA.....	32
4.6 FLEXÃO	32
REFERÊNCIAS.....	37

1 INTRODUÇÃO

A mandioca é uma planta de origem desconhecida, embora já fosse cultivada e cultuada pelos povos indígenas com a chegada dos portugueses ao Brasil em meados de 1500 (SANTOS, 2010). Segundo Neubert (2013) há estimativas de sua produção na região amazônica nas regiões norte e centro oeste do Brasil desde entre 10 e 12 mil anos atrás. Sua relevância local era tanta que lendas sobre sua origem surgiram (MARANHÃO et al., 2015), e sua plantação e colheita teve papel fundamental no progresso da colonização das terras brasileiras, uma vez que era utilizada para demarcar territórios e pontos de retorno, bem como alimentar os colonizadores quando estes retornavam de suas investidas terras brasileiras adentro (SANTOS, 2010). Os povos indígenas já trabalhavam com a mandioca há muito tempo, tendo descoberto muitas de suas propriedades, bem como as técnicas para eliminar as possíveis toxinas presentes na planta (MARANHÃO et al., 2015).

Desde o Arizona no Estados Unidos até o extremo sul da América do Sul, a mandioca é produzida, sendo que a produção brasileira em 2016 correspondeu a aproximadamente 10% da produção mundial, enquanto a produção de mandioca na região sul do Brasil correspondeu a aproximadamente 20% da produção no país. A região sul ainda apresenta a maior média de produção por hectare do país, média essa que vem crescendo ao longo das últimas décadas (de 18.000 kg/ha entre 1994-1995 para 24.000 kg/he entre 2014-2015) (COELHO, 2018).

Um dos principais produtos obtidos através da mandioca é a fécula de mandioca, produto esse que foi industrializado no Brasil desde a década de 50, com a maior concentração da sua produção se dando na região sul, com 72,3% da produção nacional em 2009 (FELIPE et al., 2010). Porém, a produção de mandioca incute num enorme montante de resíduos que não são ambientalmente amigáveis, com o resultado de aproximadamente 930 kg de resíduo para cada tonelada de raiz utilizada no processo, considerando as partes da mandioca e a água utilizada no processo, resíduos que vêm sendo alvo de

pesquisa visando decrescer os impactos ambientais e ampliar os lucros de produção (FIORDA et al., 2013).

O bagaço da mandioca corresponde a uma considerável parcela dos resíduos industriais sólidos da obtenção de fécula de mandioca, rico em fibras e o amido não removido na obtenção da fécula comercializada, resíduo esse que não possui valor comercial considerável (FIORDA et al., 2013). Dentre os métodos de eliminação do bagaço de mandioca, encontram-se a alimentação de animais e adubação (BETIOL, 2016). Porém, as pesquisas envolvendo o resíduo industrial da produção de fécula vêm se tornando recorrente (BETIOL, 2016), entre as quais se encontram a obtenção de filme biodegradável através da fibra do bagaço de mandioca e amido de caroço de abacate feita por Brito et al. (2019) e o desenvolvimento de compósito de bagaço de mandioca e polietileno de baixa densidade por Travalini et al. (2015).

Compósitos, por sua vez, são materiais advindos da junção de no mínimo dois componentes, que contenham características distintas aos seus constituintes. Dentre os usos da matriz polimérica na obtenção de compósitos, destaca-se o uso nas indústrias automobilística e aeronáutica, sendo reforçados por fibras. Uma característica que desperta o interesse ao uso de matrizes poliméricas na obtenção de compósitos é a capacidade de agregar resistência mecânica e leveza ao material. O poliéster insaturado é utilizado na obtenção de compósitos, passando por reações catalíticas que o fazem se tornar um polímero termo fixo que possui elevadas propriedades elétricas, mecânicas e químicas, além de um baixo custo.

Diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos utilizando como matéria prima a matriz poliéster e o bagaço da mandioca na obtenção de compósitos. Como exemplo, Haameem et al. (2015) desenvolveu um compósito laminado de matriz poliéster usando como reforço uma fibra natural da grama Napier, e Bon et al. (2019), avaliou compósitos de polipropileno contendo farinha de bagaço de mandioca.

A utilização de carbonato de cálcio (CaCO_3) como carga é recorrente em compósitos de matriz polimérica, ou seja, é uma carga de uso tradicional.

Wahono et al. (2018) usou CaCO_3 e nano fibra de Celulose de rami em matriz de poliéster e Masson et al. (2021) usou conchas de ostras (ricas em CaCO_3) em matriz de polipropileno. Também há relatos de outros materiais vegetais utilizados como reforço particulado em matriz polimérica, como relatado por Ferreira (2017), que utilizou sabugo de milho triturado como reforço em compósito de matriz poliéster. Além disso, compósitos de matriz poliéster podem ser utilizados na obtenção de estruturas, como em protótipos de eólicos e solares (OLIVEIRA, 2015).

Portanto, o presente trabalho tem como objetivo a obtenção de um compósito termofixo de matriz poliéster reforçado por bagaço de mandioca em pó. O bagaço de mandioca foi produzido a partir de mandioca colhida na região, e depois de seco em estufa e moído, o pó resultante foi misturado à resina poliéster antes da cura. Os corpos de prova foram obtidos por técnica de *casting*, em moldes de silicone, e foram caracterizados a fim de verificar se a adição do bagaço de mandioca à matriz poliéster altera as propriedades físicas (densidade, absorção d'água) e mecânicas (resistência à flexão) do material, e comparados com compósitos contendo resina poliéster e uma carga tradicional usada na indústria, que é o carbonato de cálcio.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Produzir e caracterizar compósito de poliéster e bagaço de mandioca e comparar os resultados com os obtidos a partir de compósito convencional de poliéster e carbonato de cálcio (CaCO_3).

1.1.2 Objetivos específicos

- Obter bagaço de mandioca através de mandioca produzida na agricultura familiar da cidade de São José do Hortêncio;
- Preparar bagaço de mandioca para análise e para a confecção de compósito polimérico;
- Caracterizar o bagaço obtido por meio de análise termogravimétrica;

- Preparar amostras de resina poliéster e compósitos poliméricos contendo diferentes teores de bagaço de mandioca e carbonato de cálcio, por meio da técnica de *casting*;

- Caracterizar compósito polimérico por meio de ensaios de densidade, viscosidade, teor de umidade, absorção d'água, flexão;

- Comparar as propriedades dos compósitos contendo bagaço de mandioca com aqueles contendo uma carga tradicional, que é o carbonato de cálcio.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Mandioca

Estudos arqueológicos apontam que a mandioca já era cultivada entre 10 a 12 mil anos atrás, na região amazônica, que agora fica entre os estados do Acre, Rondônia, Tocantins, Goiás e Mato Grosso (NEUBERT, 2013). E, em meados de 1500, no começo da colonização do Brasil, Pero Vaz de Caminha, em relato a Portugal, descreve como os nativos se alimentavam apenas de sementes, frutos e um certo “inhame” (SANTOS, 2010). Segundo Edhirej et al. (2016), a mandioca possui aproximadamente 80% da sua composição em amido, o que a torna um alimento ricamente energético. O inhame é na realidade uma variedade de origem africana, e foi introduzido no Brasil somente no século XVI, trazido da Ilha de São Tomé, Cabo Verde (MARANHÃO et al., 2015).

Os povos indígenas tinham a mandioca amplamente disseminada em sua cultura, e já haviam feito a seleção, uma vez que eram cientes da toxicidade da planta, usando não só o tubérculo como até a folha para a obtenção de alimentos como a maniçoba e tapioca, e bebidas como cauim e caiçuma. Os principais derivados da mandioca eram beijus e farinhas, que serviam desde acompanhamentos para carnes como inclusive de alimento em guerras. Na produção do tucupi, feito pelas mulheres da tribo, a mandioca brava era arrancada e deixada mergulhada em água para que a casca se soltasse. Então, a mandioca era descascada, ralada e pressionada manualmente em peneiras, sob corrente de água para retirar o veneno presente na raiz (MARANHÃO et al., 2015).

A mandioca tinha tamanha relevância para os povos indígenas que era considerada uma dádiva divina e entre os séculos XVI e XIX viajantes coletaram diversas lendas sobre a origem da planta. Uma das lendas fala sobre Mani, uma criança de pele branca que nasceu da filha virgem do cacique de uma tribo. Após um ano do seu nascimento, Mani morreu pacificamente, e foi enterrada dentro de sua casa. Como de costume da tribo, o local do seu enterro era sempre

regado, até que dali nasceu uma planta desconhecida, cujos frutos foram comidos pelos animais. Ao rachar da terra, o povo de Mani desenterrou as raízes das quais se alimentaram, passando a então conhecer a mandioca (MARANHÃO et al., 2015).

A mandioca também se tornou importante no processo de colonização, uma vez que enquanto se adentrava a então colônia, plantações de mandioca eram deixadas no caminho para se ter alimento no retorno (SANTOS, 2010).

2.1.1 Produção da mandioca

A mandioca, também conhecida como aipim e macaxeira, tem sua produção desde o Arizona nos Estados Unidos até o sul da América do Sul, na Argentina e Uruguai. A produção total de mandioca no Mundo em 2016 foi de 281.897 mil toneladas, com 21.086 mil toneladas no Brasil, das quais 4.620 mil toneladas são da região Sul e 980 mil toneladas são do Rio Grande do Sul (COELHO, 2018).

O ponto de maior produção aparece na região central do Brasil, nos arredores do Distrito Federal e também no México. Porém, a principal fonte de produção da mandioca vem de pequenos produtores, em mais de 100 países. A mandioca é uma planta que se adapta bem aos climas tropicais e subtropicais, devido à sua tolerância a secas e poucos insumos (LANDAU et al., 2020).

O sul do Brasil apresenta o maior rendimento médio na relação feita entre quilogramas (kg) de mandioca por hectare (ha) plantado nos últimos anos, com um aumento de 18.000 kg/ha nos anos 1994-1995 para 24.000 kg/ha em 2015-2016. Segundo fontes do IBGE (2017), desde 2010, a Região Sul é a única no país com rendimento médio superior a 20.000 kg/ha (LANDAU et al., 2020).

O Paraná, onde a produção da mandioca é majoritariamente industrial, é o estado com o maior rendimento médio entre 2010 e 2016, que foi de 24.719 kg/ha. Já o Rio Grande do Sul tem dois municípios com os maiores rendimentos médios por hectare em 2015-2016: Agudo (40.000 kg/ha) e Porto Mauá (35.000 kg/ha). Além dos rendimentos médios altos, o Rio Grande do Sul também aparece com significativa produção em toneladas, uma vez que o município de

Montenegro representa 0,26% da produção anual de mandioca do Brasil, com 60.606 toneladas produzidas por ano, entre 2010 e 2016 (LANDAU et al., 2020).

2.1.2 Fécula de mandioca

Lied (2012) traz a definição de fécula como o amido obtido através da mandioca, bem como indica que a mandioca seja a segunda maior fonte de amido do mundo, ficando atrás apenas da produção de amido obtido através do milho.

Devido a sua fácil adaptação aos variados tipos de solo, a mandioca é uma matéria prima de interesse para a indústria e pequenos produtores. Um dos principais produtos industriais obtidos a partir da mandioca é a fécula, sendo que 542,2 mil toneladas foram produzidas no Brasil, no ano 2011 (FIORDA et al., 2013).

Embora a fécula de mandioca tenha se tornado um produto industrial no Brasil desde meados de 1950, esta passou a se desenvolver a partir da década de 90. Embora a produção de fécula de mandioca se dê por todo o país, a concentração maior de sua produção se encontra na região Sul, correspondendo a 72,3% da produção em 2009 (FELIPE et al., 2010).

Porém, o processo de obtenção da fécula de mandioca gera problemas ambientais devido à alta quantia de resíduos produzidos, como a casca e entrecasca da mandioca, água vegetal e o bagaço. Para cada tonelada de raiz de mandioca utilizada na obtenção de fécula, são gerados aproximadamente 928,6 kg de bagaço úmido (85% de umidade), totalizando em torno de 2,09 milhões de toneladas desse resíduo por ano (FIORDA et al., 2013). Para a obtenção de uma tonelada de amido, estima-se que sejam necessários aproximadamente 40 m³ de água. Essa água, se não receber o tratamento adequado, é prejudicial ao meio ambiente (BOTELHO et al., 2010). Silva et al. (2003) também indica que as fecularias são altamente poluidoras, devido ao seu alto descarte de material orgânico.

Desta forma, a busca por um melhor aproveitamento desses resíduos tem como intuito um aumento na obtenção de lucros, além de diminuir os impactos

ambientais decorrentes (FIORDA et al., 2013). Portanto, uma das estratégias adotadas para amenizar os custos gerados pela produção de resíduos industriais é a opção pela construção de unidades de produção menores e mais próximas da extração das raízes de mandioca (BOTELHO et al., 2010).

2.1.3 Processo industrial de obtenção da fécula de mandioca

Peixoto (2018) indica as etapas do processo de obtenção da fécula de mandioca como os seguintes: recepção, lavagem/descascamento, trituração/ralação, prensagem, peneiramento/esfarelamento, torração/secagem, resfriamento, peneiramento/classificação, acondicionamento e estocagem. Segundo Botelho et al. (2010), o processo de obtenção da fécula começa pela recepção das raízes, onde é feita uma pesagem e avaliação do teor de amido. Na segunda etapa as raízes são lavadas em sistema de rosca sem-fim. Nessa etapa apenas a casca externa da mandioca é removida pelo processo de raspagem, e parte da água é reutilizada na etapa, enquanto outra vai para o processo de tratamento de efluentes da fábrica. Já a terceira etapa consiste na trituração das raízes descascadas por marteladas. Os pedaços de até 3 cm de diâmetro são conduzidos por roscas automáticas até um depósito.

Segundo Botelho et al. (2010), na quarta etapa ocorre a desintegração, e os pedaços são triturados em um cilindro rotativo com lâminas dentadas ou marteletes com rotação entre 1200 e 1500 rpm. Nesse processo ocorre rompimento celular da mandioca, o que gera uma desintegração homogênea e liberação do amido. A massa ralada é então bombeada para o próximo processo.

A quinta etapa é a de extração e peneiramento, e nela o amido é separado do bagaço em peneiras cônicas rotativas, em malhas de 100 a 220 *mesh* e velocidade de 1200 a 1400 rpm. Metade da água utilizada nessa etapa é água limpa e a outra metade vem em contracorrente da etapa de centrifugação, vindo em formas de esguicho. Enquanto o amido líquido segue para a próxima etapa, o bagaço segue para mais uma etapa nas peneiras cônicas rotativas com

número maior em *mesh*, a fim de se extrair parte do amido ainda retido nele. Por fim o bagaço é separado para o devido descarte (BOTELHO et al., 2010).

Lied (2012) também traz o recebimento da mandioca, mas indica o início do processo com as etapas de lavagem e descascamento das raízes, descascamento que é feito por jatos de água e descascadores semicilíndricos com pás giratórias. A etapa seguinte consiste em reduzir os pedaços de mandiocas e então encaminhá-los para a moagem em cilindro rotativo com serras giratórias. Nesta etapa o amido é extraído através do rompimento das células da mandioca, e separado das fibras por peneiras.

A sexta etapa é a de concentração, onde o amido recebe nova adição de água para sua purificação e depois é centrifugado para remoção de água vegetal, amidos solúveis e partículas estranhas. Na etapa de purificação do amido, o amido concentração segue para hidrociclones, que além de purificá-lo irão clareá-lo, recebendo um afluente de água 100% limpa. A oitava etapa é a de desidratação e o amido purificado segue para um desidratador rotativo que funciona girando uma cesta de filtragem em um eixo, ocasionando uma separação por densidade, permitindo que o amido (sólido) se assente na cesta (BOTELHO et al., 2010).

Lied (2012) cita a utilização de hidrociclones para a retirada de sólidos do leite contendo o amido. Em seguida esse leite é encaminhado para duas centrífugas, a primeira na qual é adicionada água para purificação do leite de amido, e a segunda que remove a água adicionada na primeira. É possível reutilizar a água desse processo para a lavagem das raízes no começo do processo.

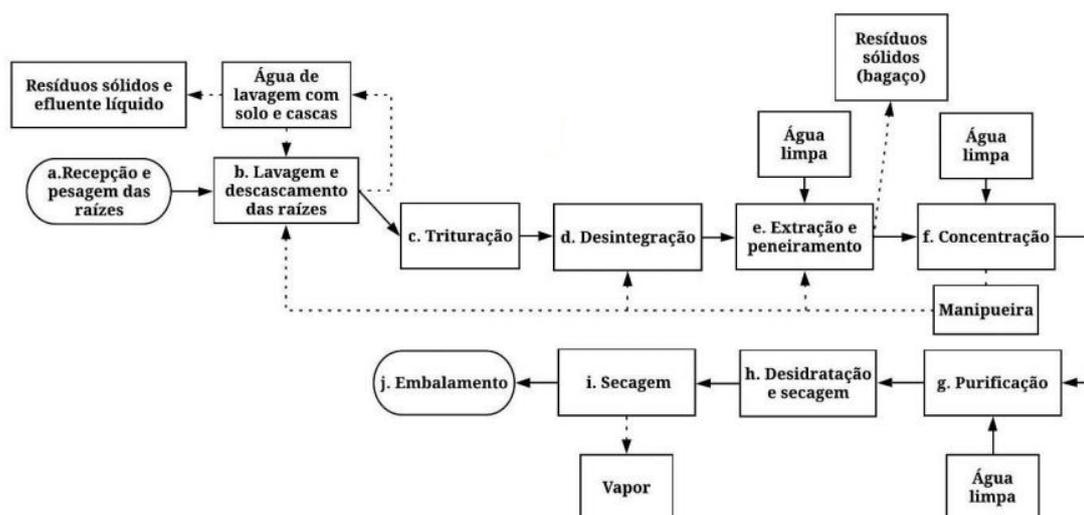
Na etapa de secagem o amido desidratado passa por uma rosca automática que dosa a quantia através da sua velocidade de rotação até um secador a vapor. Com uso de ciclones é possível conduzir o amido a seco por uma corrente de ar quente, obtendo-se um produto com umidade de 11 a 14%. A etapa final é a de embalamento (BOTELHO et al., 2010).

Segundo Lied (2012) existem dois caminhos possíveis para a secagem do amido: a utilização de uma centrífuga concentradora de cesta ou filtro a vácuo.

Após passar pela centrífuga ou pelo filtro, o amido segue para um secador pneumático de corrente contínua, que é provido de ciclones de recuperação para evitar perdas de amido.

A Figura 1 apresenta o esquema completo de como se dá a obtenção da fécula da mandioca:

Figura 1: Fluxograma de obtenção da fécula da mandioca. Fonte: Botelho (2019).



2.1.4 Bagaço da mandioca

No processo de obtenção de fécula da mandioca, um dos resíduos obtidos é o bagaço, cuja composição sólida é de fibras e do amido que não foi devidamente extraído. Ele possui um alto teor de umidade, chegando a cerca de 85% (FIORDA et al., 2013). Edhirej et al. (2016) também descreve o bagaço da mandioca como um dos principais resíduos da produção de fécula, e indica que o bagaço seco traz em sua composição entre 50-60% de amido residual.

Apesar do alto teor de fibras, o bagaço não possui um valor comercial elevado (FIORDA et al., 2013). Betiol (2016) indica que alguns dos métodos adotados para o encaminhamento do bagaço é a alimentação animal e adubação, porém devido ao seu alto teor de água, o material precisa passar por processos de secagem, que pode ser feita em estufas ou mesmo por exposição direta ao sol. Entretanto, Brosch (2015), escreve que os animais alimentados por

bagaço da mandioca apresentam um desempenho inferior aos animais que tenham na sua dieta alimentos como soja e milho.

Jasko et al. (2011) fez a caracterização do bagaço de mandioca após a secagem, obtendo as seguintes porcentagens para os compostos presentes no bagaço in natura: 11,5% (umidade), 1,9% (proteínas), 0,1% (lipídios), 1,9% (cinzas), 42% (amido), 11,1% (carboidratos).

Zannata et al. (2016) afirmam que o bagaço de mandioca não é aproveitado de forma eficiente. Eles relatam que bagaço de mandioca foi obtido no sul do Brasil para a pesquisa, e então foi caracterizada a sua biomassa. Os dados experimentais foram coletados utilizando a técnica termogravimétrica em atmosfera inerte de nitrogênio puro e obtiveram as energias de ativação. Filmes plastificados eco compatíveis à base de fécula de mandioca e bagaço de mandioca como material de reforço foram desenvolvidos e caracterizados por Edhirej et al. (2016), e Travalini et al. (2019) produziram nanofibras de lignocelulose a partir do bagaço da mandioca.

2.2 Compósitos

Compósitos são materiais com características únicas (SHAW et al., 2010), resultado da combinação de duas ou mais fases distintas que mantêm suas características individuais, como resistência mecânica e rigidez (SHUVO et al., 2015). A partir da Segunda Guerra Mundial os compósitos de matriz polimérica reforçados por fibras passaram a receber destaque nas áreas da indústria aeroespacial e de peças automobilísticas (NETO et al., 2007), enquanto que os compósitos reforçados com fibra natural, além de serem leves, têm consideráveis propriedades de isolamento acústico e térmico (DEWAN et al., 2012), bem como aumentam a resistência e a tenacidade do material, além de se mostrar uma alternativa ambientalmente amigável, busca essa que tem aumentado nos últimos anos (GUDAPATI et al., 2019).

2.2.1 Matriz polimérica

A matriz tem como função evitar danos, abrasão e de modo geral a degradação do reforço. Uma vez que as matrizes poliméricas tem maior versatilidade e baixo custo de processamento, acabam sendo mais utilizadas do que as metálicas e cerâmicas. É importante esclarecer que polímeros são o resultado da reação entre meros, pequenas moléculas que interagem entre si formando longas cadeias, os monômeros, daí a expressão polímero: muitos (poli) meros. Os polímeros podem admitir ramificações ou serem lineares, o que acaba conferindo propriedades ímpares, como na capacidade de solubilidade deste produto. As cadeias ramificadas, por exemplo, acabam dificultando a aproximações que ocasionam interação molecular, o que pode resultar em uma plastificação do polímero ramificado (Costa, 2016).

Devido a característica de agregar leveza, ductilidade e resistência mecânica, a matriz polimérica é vastamente utilizada na obtenção de compósitos. Quando reforçadas por fibras, as matrizes poliméricas atuam na transferência de tensão entre as fibras, bem como estabilizando-as e alinhando-as. As resinas poliméricas utilizadas em compósitos podem ser termorrígidas (poliéster por exemplo) ou termoplásticas (como a resina polietileno). As resinas termorrígidas costumam ser utilizadas na obtenção de compósito tendo como reforço de fibras, fibras contínuas, devido a possuírem maior estabilidade térmica, rigidez e resistência à deformação sob carregamento (Assis, 2016).

2.2.2 Matriz poliéster

A condensação de glicóis com ácidos carboxílicos (dependendo do ácido, a molécula será saturada ou insaturada) gera a resina poliéster, polímero de alto peso molecular, e dentre seus usos encontram-se laminações, recobrimentos, plastificantes e borrachas. Para a obtenção de um poliéster saturado a reação necessária ocorre entre um diálcool e um diácido saturado, enquanto o poliéster insaturado origina-se da reação de um polímero alquídico que contém insaturações vinílicas que estejam dissolvidas em monômero reativo (ASSIS, 2016).

Os poliésteres saturados são termoplásticos compostos por cadeia molecular formada por ligações simples de carbono, razão pela qual dão origem a produtos flexíveis, como filmes, fibras sintéticas e plastificantes. Já os poliésteres insaturados originam produto termofixo líquido que possui cadeias duplas e simples. Após a adição de peróxido orgânico (catalisador) encontra-se no estado sólido, e é utilizado como resina termofixa para a obtenção de compósitos devido às suas propriedades mecânicas, elétricas e químicas além do menor custo (ASSIS, 2016).

Haameem et al. (2015) desenvolveu compósito laminado de matriz poliéster usando como reforço uma fibra natural extraída de uma planta abundante e disponível na Malásia, a grama Napier. Cientificamente conhecida como *Pennisetum purpureum*, a grama Napier é uma planta recém-identificada que forma bambus robustos e é altamente sustentável. A extração das fibras ocorreu através de maceração em água com subsequente tratamento alcalino. O compósito obtido foi submetido a testes de tração e flexão, cujos resultados foram comparados com outros compósitos tendo como reforço fibras naturais.

Glória et al. (2017) usaram a matriz poliéster para obtenção de compósito polimérico tendo como reforço a fibra extraída da folha do pé de abacaxi, *Ananas comosus* (PALF). Estudos anteriores apontavam que a introdução de 30% de volume de PALF em compósitos de matriz epóxi elevava o desempenho das propriedades de tração e resistência ao impacto, embora o efeito do PALF tenha sido nulo ao se adicionar em matriz de polipropileno. Glória et al. (2017) procurou investigar as alterações da propriedade de resistência à tração (MPa), módulo elástico (GPa) e deformação total (%) do compósito de matriz poliéster tendo em sua composição 10%, 20% e 30% de volume de PALF como reforço. A melhora encontrada para a resistência à tração do compósito contendo 30% de PALF quando comparado ao poliéster puro foi de 103,25 MPa contra apenas 27,72, e a melhora no módulo elástico foi de 0,31 GPa para 1,99 GPa.

Buscando reduzir os custos e melhorar as propriedades mecânicas do compósito de matriz poliéster, Akaluzia et al. (2021) desenvolveu material compósito de matriz poliéster com reforço de partículas de carvão vegetal, com

quatro tamanhos diferentes de partícula, buscando melhorar a resistência ao impacto, dureza e estrutura do material. O estudo pode ser útil nas áreas aeroespaciais, elétricas e eletrônicas, onde se procura materiais leves, resistentes à corrosão, biodegradáveis e de baixo custo.

Durante o processo de cura da resina poliéster insaturada, as insaturações da cadeia polimérica são os pontos reativos, e a obtenção de um polímero termofixo é possível através do uso de ativadores como o metil-etil-cetona (MEKP), juntamente com dimetilanilina (DMA) (COSTA, 2016).

2.3 Estudos sobre materiais compósitos reforçados com bagaço de mandioca e outros materiais particulados

Desde a segunda guerra mundial os compósitos de matriz polimérica contendo como reforço fibras receberam atenção, principalmente nas áreas automobilísticas e aeroespaciais. As fibras atuam como reforço em compósitos, uma vez que há transferência de tensões da matriz polimérica para as fibras, que possuem maior resistência e módulo (NETO et al., 2007).

No ano de 1972 o termo “desenvolvimento sustentável” foi criado como conceito na Conferência da ONU aconteceu em Estocolmo, visando conciliar tanto o desenvolvimento econômico através da produção advinda de produtos de origem natural de forma a preservar o meio ambiente como promover o todo elemento humano envolvido na produção. Esse conceito requer o desenvolvimento de materiais econômicos (no âmbito de matéria prima e custos de produção) e ecológicos, e nesse cenário os materiais compósitos desenvolvidos a partir de materiais que possuam fibras naturais aparecem com destaque no Brasil (NETO et al., 2007). Segundo Edhirej et al. (2016), o bagaço da mandioca se encaixa nos critérios observados por Neto et al. (2007), uma vez que apresenta baixo custo, é um material fibroso e ambientalmente amigável. Segundo Betiol (2016) os estudos para a utilização de resíduos agroindustriais vêm se tornando mais recorrentes recentemente, e o bagaço da mandioca é um deles.

2.3.1 Compósitos contendo bagaço de mandioca

Travalini et al. (2015) estudou a obtenção de celulose nanocristalina a partir da fibra do bagaço da mandioca e compósito com a fibra de bagaço de mandioca e polietileno de baixa densidade, alegando que a fibra presente no bagaço da mandioca é uma matéria prima promissora. O estudo tem como objetivo agregar valor ao resíduo industrial, além de ser um projeto ambientalmente amigável, uma vez que visa a redução de descarte de bagaço de mandioca indevido e consequente poluição ambiental. Além de desenvolver o compósito, o estudo caracterizou o bagaço da mandioca e extraiu a fibra através de hidrólise, fibra essa que foi modificada quimicamente para consequente obtenção do compósito.

Silvestre et al. (2017) também obteve nano fibras de celulose. As nano fibras foram obtidas a partir de tratamentos químicos alcalino, ácido e de branqueamento. O tratamento alcalino foi necessário para retirar o amido residual, além de proteínas, lipídeos e hemiceluloses de baixa estabilidade térmica. A hidrólise ácida removeu parte da lignina e hemicelulose, e os autores concluíram que quanto mais forte o ácido, mais eficiente é a remoção de tais componentes. Por fim, o branqueamento efetuou a remoção de lignina do bagaço de mandioca.

Brito et al. (2019) utilizou a fibra do bagaço de mandioca para obtenção de filme biodegradável com amido de caroço de abacate. Para o estudo foram determinadas as composições centesimais do bagaço de mandioca, bem como suas propriedades térmicas e morfológicas. Os testes feitos apresentaram um teor de 67% de carboidrato e 16,31% de fibras. Foi feita caracterização dos filmes produzidos para se obter as propriedades térmicas, estruturais, morfológicas e mecânicas.

Bon et al. (2019) avaliou compósitos de polipropileno contendo farinha de bagaço de mandioca. Uma vez que a farinha de mandioca é hidrofílica e o polipropileno hidrofóbico, foi necessário um agente compatibilizante, polipropileno grafitizado com anidrido maleico, de modo a melhorar a interação interfacial da matriz polimérica com a farinha de bagaço de mandioca. O

polipropileno grafitizado anidrido maleico atua reduzindo a absorção de água e melhora as propriedades de tração e flexão dos compósitos de polipropileno e fibras lignocelulosicas.

2.3.2 Compósitos reforçados por carga particulada

Segundo Masson et al. (2021), compósitos poliméricos têm recebido como reforço materiais particulados com o propósito de se obter melhores propriedades como temperatura de distorção ao calor e resistência. Masson et al. (2021) utilizou como matriz polimérica o polipropileno reciclado, devido ao elevado número de descarte que o este polímero gera e seu consequente impacto ambiental. O reforço particulado utilizado foi pó de ostras, uma vez que a casca de ostras é um material de origem natural rico em CaCO_3 . O polipropileno foi obtido através de copos descartáveis. Foi utilizado um misturador para adicionar o pó de ostra no polipropileno, nas seguintes proporções: 3%, 7% e 10%. Os corpos de prova foram preparados por fusão e moldados por injeção. O compósito obtido foi submetido às caracterizações de resistência à tração, resistência à flexão, resistência ao impacto Izod, temperatura de Distorção Térmica, temperatura de amolecimento Vicat, e concluiu-se que a aplicação do compósito é viável.

Ferreira (2017) desenvolveu material compósito de matriz poliéster com reforço de sabugo de milho triturado em partículas finas (44 μm), partículas médias (850 μm) e partículas grandes (2360 μm), com variação de 5%, 10% e 20% em massa. Visando aplicação em setores da engenharia, o objetivo era obter um compósito de baixa deformação elástica e com boas propriedades térmicas. A granulometria do sabugo de milho triturado foi analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), e a estabilidade térmica por análise termogravimétrica (TGA). O compósito obtido passou por ensaios de tração e flexão, tenacidade ao impacto, MEV, TGA e de condutividade térmica. Os compósitos obtidos com partículas finas demonstraram maior estabilidade térmica. Porém, os estudos de análise de interação da interface carga/matriz foi baixa para os compósitos contendo as partículas grande de sabugo de milho.

Wahono et al. (2018) produziu compósito com matriz poliéster insaturada com reforço de nano fibra de Celulose Rami (CNF) e CaCO_3 . Foi adicionado à matriz poliéster com uma proporção em peso de 1% de peróxido de metiletilcetona, e a agitação ocorreu de forma manual. Os ensaios feitos foram o de tração, MEV, TGA e Transformada de Fourier (FT-IR). A conclusão foi de que a adição de CNF e CaCO_3 à matriz poliéster aumentou a estabilidade térmica e as propriedades mecânicas do compósito.

Santos (2013), desenvolveu compósito de matriz polimérica utilizando resina de mamona reforçada com fibra de curauá e resíduos de madeira amazônica para obter painéis industriais, analisando o desempenho mecânico e físico do compósito obtido. O compósito foi obtido com 15% em massa de resina, com 7,5% em massa de resina poliuretana à base de mamona biocomponente e 7,5% em massa de pré-polímero a base de petróleo. O resíduo utilizado possui 0,25 mm de diâmetro.

Bittencourt (2002), desenvolveu compósito a partir de resíduo particulado de madeira de fabricação de móveis reforçados por fibras de sisal, pseudocaule da bananeira, de madeira de pinus e de sorgo-vassoura, a fim de obter chapas aglomeradas. As propriedades reveladas nas análises demonstram que as chapas obtidas podem ser utilizadas na confecção de móveis.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

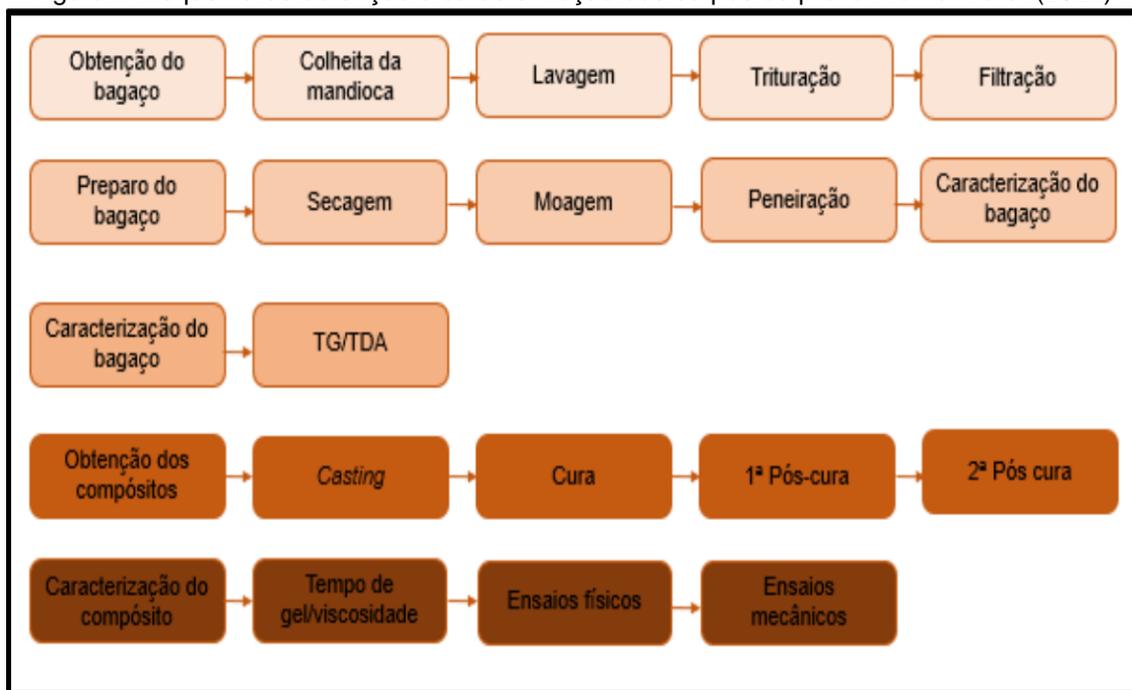
3.1 Materiais

A mandioca utilizada para a obtenção do bagaço foi colhida na propriedade no interior do município de São José do Hortêncio. A resina poliéster, o iniciador peróxido de metil etil cetona e o agente desmoldante poli (álcool vinílico) (PVA) foram adquiridos na Redelease (São Paulo, SP, Brasil). O carbonato de cálcio foi adquirido na empresa Metaquímica (Jaraguá do Sul, SC, Brasil).

3.2 Métodos

A Figura 2 apresenta o esquema de obtenção das amostras e respectivas caracterizações. A seguir, segue detalhamento de cada uma das etapas.

Figura 2: Esquema de obtenção e caracterização dos corpos de prova. Fonte: Autor (2022).



3.2.1 Obtenção do bagaço de mandioca

A mandioca foi colhida no interior do município de São José do Hortêncio, e a casca externa da mandioca, de coloração amarronzada foi removida com

auxílio de uma esponja e água. Depois da remoção da casca externa, a mandioca passou por mais uma limpeza com água e por fim foi enxaguada com água destilada. A Figura 3 apresenta algumas etapas do preparo do bagaço.

Figura 3: Algumas etapas do processo de obtenção da farinha de mandioca. Fonte: Autor (2022).



Após devidamente limpa, a mandioca foi dividida de modo a se obter uma melhor proporção para a sua trituração, e empiricamente a melhor proporção de água para mandioca foi a de 100 g de mandioca para 400 mL de água. A mandioca foi triturada em liquidificador por 60 s. Após triturado, o bagaço passou por filtragem dupla com coadores, com auxílio de uma espátula de metal. Em seguida, o bagaço foi distribuído uniformemente em uma placa cerâmica e levado até a estufa (Lucadema) a 105 °C por 2 h. Depois da desidratação, o

bagaço foi triturado em um moedor (Philco) por 30 s, e em seguida peneirado em peneira de metal de *mesh* 35.

3.2.2 Caracterização do bagaço de mandioca

O bagaço de mandioca foi caracterizado por análise termogravimétrica (TG/DTA). Após a desidratação do bagaço em estufa, o ensaio de análise termogravimétrica foi realizado a uma temperatura inicial de 25 °C e uma taxa de aquecimento de 10 °C.min⁻¹ até 800 °C, em atmosfera de nitrogênio (IFRS – Campus Farroupilha), adaptado conforme Travalini et al. (2015).

3.2.3 Obtenção dos corpos de prova

A obtenção da amostra contendo resina poliéster (RP) se deu pela técnica de *casting*, ou seja, a mistura foi vazada em moldes e solidificada neles, na qual foi adicionado 1% de iniciador peróxido de metil-etil-cetona (MEKP), para que ocorresse a reticulação em temperatura ambiente.

Os compósitos foram obtidos através da técnica de *casting*, na qual após ser devidamente processado, conforme descrito no item 3.2.1, o bagaço de mandioca foi incorporado na resina poliéster ainda líquida, nos teores de 9,1 e 16,6% (em massa). Após agitação e homogeneização com bastão de vidro durante 15 min, o poliéster reforçado com bagaço de mandioca foi vertido em moldes de silicone previamente revestidos com desmoldante PVA (Figura 2). Após a cura à temperatura ambiente por 24 h, os corpos de prova foram removidos dos moldes. Para fins de comparação das propriedades finais obtidas, também foram preparados compósitos contendo carbonato de cálcio a 9,1 e 16,6% (em massa), bem como corpos de prova contendo apenas poliéster.

Figura 4: Moldes de silicone utilizados para a obtenção dos corpos de prova, respectivamente para flexão, absorção de água e para densidade. Fonte: Autor (2022).



As condições de cura para a resina poliéster foram de 24 h a 25 °C, pós-cura de 6 h a 80 °C e 2 h a 120 °C, definidas de acordo com os melhores resultados obtidos na literatura por Romanzini et al. (2012). A primeira pós-cura ocorreu de modo a evitar eventuais modificações químicas após a cura, e a segunda cura tem como objetivo eliminar a tensão química. A Tabela 1 apresenta uma descrição para a nomenclatura utilizada para a resina e para os compósitos produzidos.

Tabela 1: Compósitos de matriz poliéster e respectivos reforços a serem incorporados. Fonte: Elaborada pelo Autor (2022).

Denominação	Resina poliéster (% em massa)	Bagaço de mandioca (% em massa)	Carbonato de Cálcio (% em massa)
RP-100	100	--	--
RP-CaCO ₃ -9,1	90,9	--	9,1
RP- CaCO ₃ -16,6	83,4	--	16,6
RP-BagMand-9,1	90,9	9,1	--
RP-BagMand-16,6	83,4	16,6	--

3.2.4 Caracterização dos compósitos

Os compósitos foram caracterizados através de ensaios físicos (de densidade, viscosidade, teor de umidade e de absorção de água), e mecânicos (flexão).

3.2.4.1 Viscosidade

A viscosidade da resina poliéster reforçada por teores de 9,1 e 16,6 % (em massa) de bagaço de mandioca, bem como por 9,1 % e 16,6 % (em massa) de carbonato de cálcio e também para a resina pura foi calculada utilizando o método do copo Ford, segundo os padrões e dados encontrados na ASTM D1200-10. Para determinação da viscosidade, o copo Ford foi preenchido até a borda com o líquido, e então foi marcado o tempo (em segundos) até que a primeira gota se formasse no fim do escoamento. O copo Ford foi calibrado utilizando um nível (Ramada), e o orifício utilizado foi o de número 5. A equação para a viscosidade é apresentada na Equação 1:

$$V = 12,1 * (t - 2,00) \quad (\text{Equação 1})$$

Em que V é a viscosidade (cSt) e t é o tempo, em segundos. A equação é definida segundo o número do orifício utilizado para o experimento.

3.2.4.2 Tempo de gel

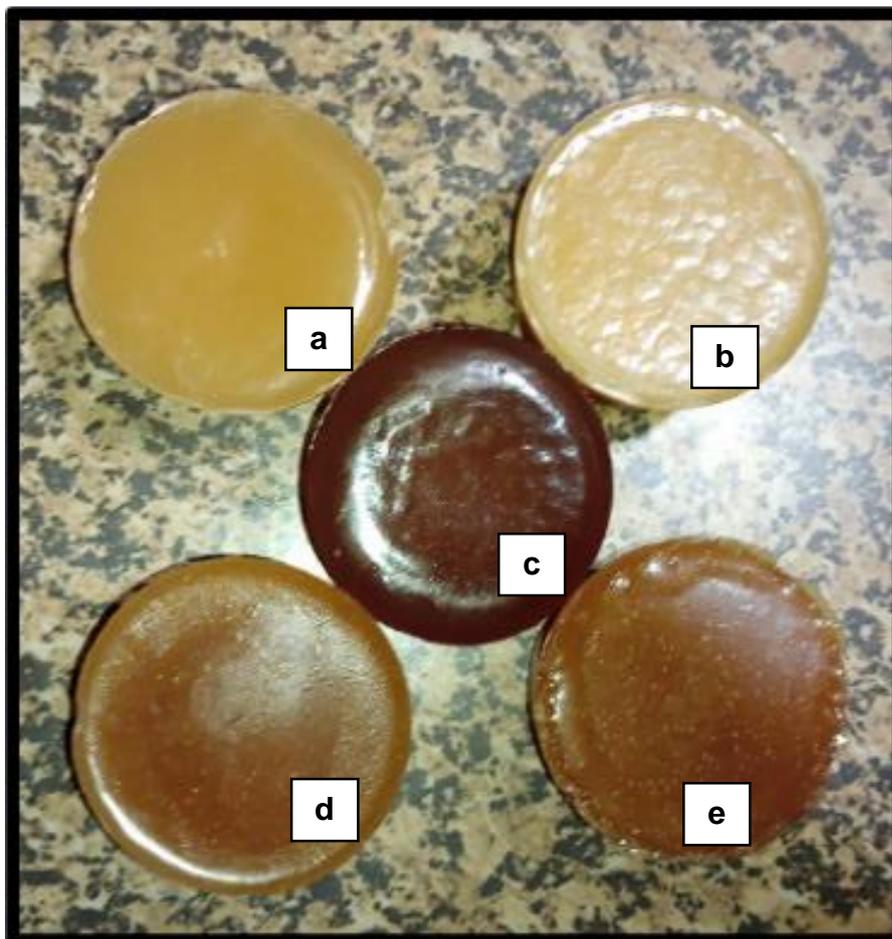
O tempo de gel da resina e da resina contendo bagaço de mandioca e carbonato de cálcio foi determinado de acordo com adaptações da ASTM D 2471-22, utilizando 120 ml de resina para cada variação de proporção de bagaço de mandioca e de CaCO_3 . O ensaio para determinação do tempo de gel foi realizado utilizando recipientes de polipropileno, e a leitura da temperatura foi realizada utilizando um termômetro de infravermelho (X ZHANG ELETRONICOS, modelo GM400). Após adicionar o ativador na proporção de 50 gotas de ativador à resina, a mistura foi agitada por 3 min com auxílio de um bastão de vidro, com o recipiente apoiado em uma superfície firme, de modo a evitar que o calor da mão interferisse na aceleração da reação. Após, a temperatura da resina foi monitorada regularmente utilizando o termômetro infravermelho. Quando a temperatura começou a se elevar, a resina iniciou o processo de gelificação, sendo então marcado o tempo de gel. Após a gelificação da resina, a temperatura continuou a ser monitorada, e o pico da temperatura da reação foi registrado.

Tabela 2: Proporção em gramas de reforço adicionado para teste de gel.

Amostra	Poliéster (g)	Reforço (g)
RP-100	141,6	0
RP-CaCO₃-16,6	118,1	23,5
RP-CaCO₃-9,1	128,7	12,9
RP-BagMand-16,6	118,1	23,5
RP-BagMand-9,1	128,7	12,9

A Figura 5 apresenta os corpos de prova obtidos após determinação do tempo de gel:

Figura 5: Amostras da análise de tempo de gel, respectivamente RP-CaCO₃-9,1 (a), RP-CaCO₃-16,6 (b), RP-100 (c), RP-BagMand-9,1 (d) e RP-BagMand-16,6 (e). Fonte: Autor (2022).



3.2.4.3 Densidade

Os ensaios de densidade foram realizados de acordo com adaptações da norma ASTM D 792-95. Os corpos de prova para o ensaio de densidade ($25 \times 13 \times 4 \text{ mm}^3$) foram pesados em balança analítica. Após, foi aferida a massa do picnômetro de metal utilizado, o qual foi em seguida preenchido até a borda com água e pesado novamente. Para determinar o volume das amostras, estas foram inseridas no picnômetro, deslocando o seu volume em água. O picnômetro foi seco externamente com papel toalha e então pesado novamente. O ensaio foi realizado em triplicata e o cálculo da densidade foi realizado conforme a Equação 2:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que: ρ é a densidade da amostra (g/cm³), m é a massa (g) e V é volume (cm³).

3.2.4.4 Absorção de água

Os corpos de prova para o ensaio de teor de umidade e absorção de água com dimensões de 76,2 x 25,4 x 4 mm³ foram preparados de modo a atender a ASTM D 570-98(2010). As amostras foram pesadas e imersas em água destilada em béqueres de 500 ml (Figura 5) durante 24 h. Após, as amostras foram retiradas e o excesso de água foi removido com o auxílio de lenços de papel, e os corpos de prova foram novamente pesados, e então mergulhados novamente. A etapa de secar e pesar os corpos de prova se repetiu por mais duas vezes, com intervalos de duas semanas, totalizando 15 dias de experimento.

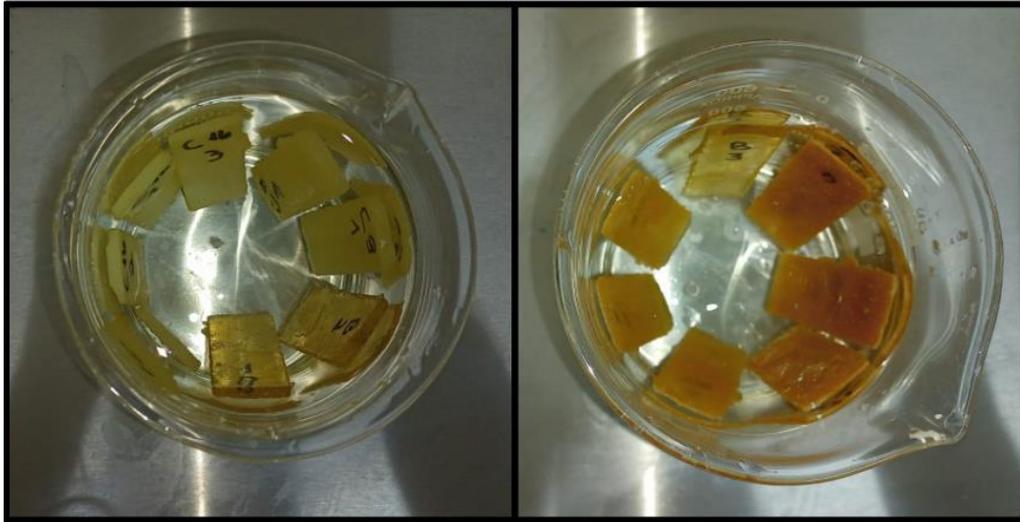
O ensaio foi realizado em triplicata, e o percentual de absorção de água (w) foi calculado de acordo com a Equação 3:

$$w = \frac{M_f - M_i}{M_i} * 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Em que w é a absorção de água em porcentagem (%) M_i e M_f são as massas (g) inicial e final das amostras respectivamente.

A inserção dos corpos de prova nos béqueres bem como o manuseio nas pesagens posteriores se deu com o auxílio de uma pinça metálica.

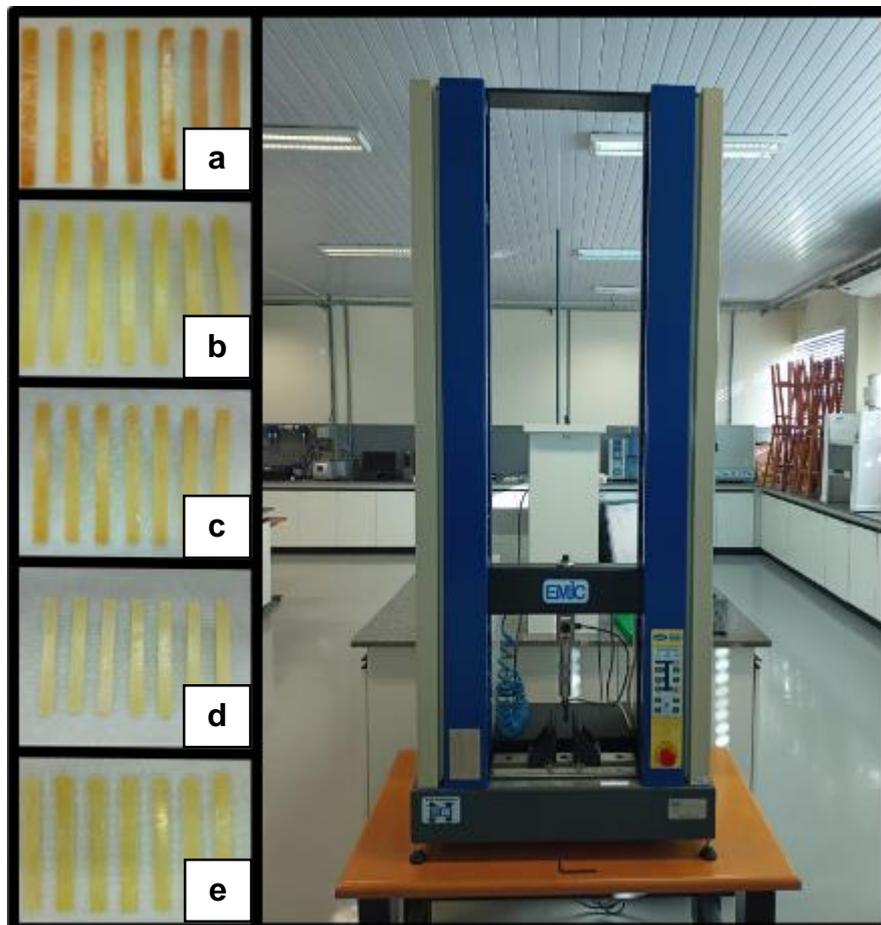
Figura 6: Análise de absorção de água. Fonte: Autor (2022).



3.2.4.5 Flexão

O ensaio de flexão em três pontos (configuração *three point bending*) foi realizado em uma máquina universal de ensaios mecânicos EMIC DL-2000, no IFRS campus Caxias do Sul, de acordo com a norma ASTM D 7264 M-07 e o teste foi conduzido usando célula de carga de 5 kN. A velocidade foi calculada para cada uma das amostras. Sete amostras de 128 x 13 x 4 mm³ foram preparadas para cada teste, e previamente lixadas em uma lixadeira Ferrari LCM-4x6 para remover rebarbas e irregularidades, bem como para melhorar a padronização das amostras. As medidas de comprimento, largura e espessura foram feitas com o auxílio de um paquímetro manual. A Figura 7 apresenta a máquina universal de ensaios mecânicos e os corpos de prova utilizados para realização do ensaio:

Figura 7: Corpos de prova e máquina utilizados para teste de flexão, em que (a) RP-BagMand-16,6, (b) RP-CaCO₃-16,6, (c) RP-BagMand-9,1, (d) RP-CaCO₃-9,1 e (e) RP-100. Fonte: Autor (2022).

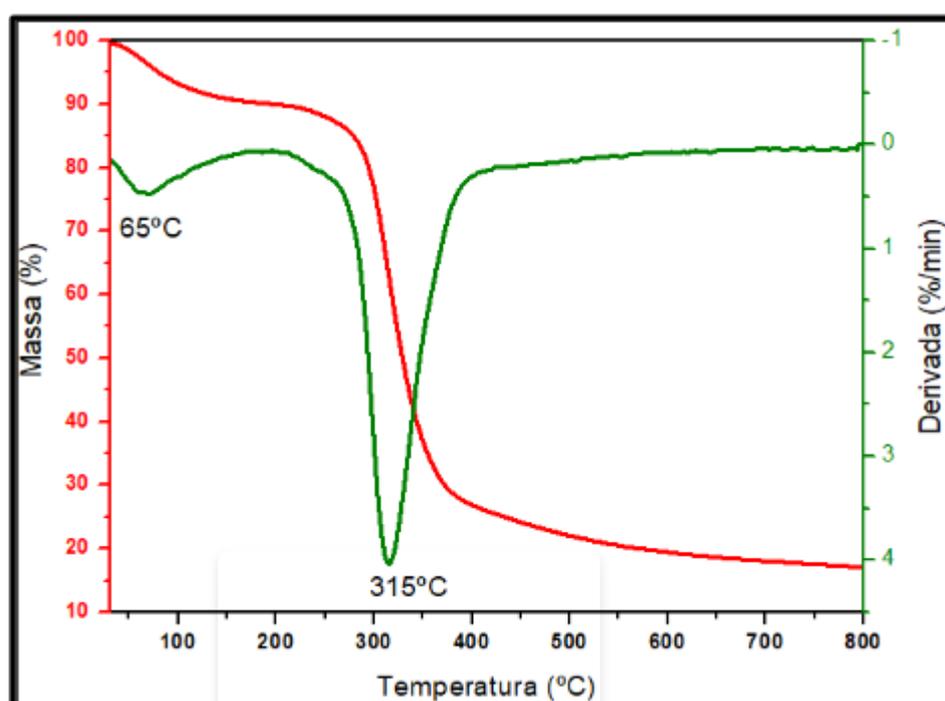


4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização do bagaço

A caracterização do bagaço de mandioca foi realizada por análise termogravimétrica, que permite analisar o comportamento térmico do bagaço, como pode ser observado na Figura 8:

Figura 8: Curva de perda de massa do bagaço da mandioca (linha vermelha) e derivada da curva (linha verde). Fonte: Elaborada pelo Autor (2022).



Segundo Brito (2019), o primeiro evento de perda de massa se deve à perda de água da amostra, demonstrando que apesar da etapa de desidratação do bagaço em estufa e preservação em um dessecador, parte da água permaneceu no bagaço (aproximadamente 10%). Já o segundo evento representa a degradação térmica do bagaço de mandioca, em que ocorre a despolimerização da matéria prima. Segundo Santana et al. (2017), há uma terceira etapa na qual ocorre a oxidação da amostra. Porém, como pode ser observado, há apenas dois principais eventos de perda de massa, pois as análises foram realizadas em atmosfera inerte, e não oxidativa.

Através da derivada da curva de degradação térmica é possível identificar os eventos de máxima velocidade de degradação, verificados aos 65 °C (desidratação da amostra) e aos 315 °C. O segundo evento de perda de massa é compatível com a literatura, uma vez que Santana et al. (2017) aponta que a despolimerização de amidos se dá por volta dos 300 °C, e Edhirej et al. (2016) diz que o bagaço de mandioca possui entre 50 e 60% de amido em sua composição.

4.2 Análises dos corpos de prova

4.2.1 Viscosidade

Os resultados encontrados para o teste de copo Ford são mostrados na Tabela 3:

Tabela 3: Tempo (s) e viscosidade da análise de copo Ford. Elaborada pelo Autor (2022).

Amostras	RP-100	RP- CaCO₃- 9,1	RP- CaCO₃- 16,6	RP- BagMand- 16,6	RP- BagMand- 9,1
Tempo, s	60	64	66	91	65
Viscosidade, cSt	701,8	750,2	774,4	1076,9	762,3

Segundo a ASTM D1200-10, a viscosidade para fluidos escoados em copo Ford com orifício de número 5 tem de permanecer entre 200 e 1200 cSt, de modo que é possível afirmar que a viscosidade de todas as amostras ficou dentro da esperada. Silva (2012) relatou um aumento da viscosidade da resina poliéster com o incremento de um reforço, utilizando pó de coco.

Segundo Garay et al. (2019), a interação do carbonato de cálcio e a resina poliéster diminui a temperatura, o que ocasiona uma menor energia cinética média entre as moléculas. Isso faz com que as forças intermoleculares se tornem mais fortes, resultando num aumento de viscosidade. Garay et al.

(2019) também afirma que o carbonato de cálcio ainda atua aumentando o atrito entre as moléculas da resina, o que faz com a viscosidade aumente.

O aumento de viscosidade, sobretudo para o teste com 16,6% (em massa) de bagaço de mandioca, representa um aspecto negativo, pois segundo Silva et al. (2012), o aumento de viscosidade representa uma dificuldade no processamento da resina.

4.2.2 Tempo de gel

Os ensaios de tempo de gel se deram à uma temperatura de 17 °C, utilizando copos de polipropileno como recipientes para temperatura de gel e máxima de cura da resina poliéster pura bem com para a resina reforçada com as cargas de bagaço de mandioca e de carbonato de cálcio.

A Tabela 4 traz os resultados obtidos para os ensaios de tempo de gel.

Tabela 4: Dados da análise de tempo de gel. Fonte: Elaborada pelo Autor (2022).

Amostras	RP -100	RP-CaCO₃- 9,1	RP-CaCO₃- 16,6	RP- BagMand-9,1	RP-BagMand -16,6
Tempo de gel (min)	23,12	18,44	12,23	23,52	26,49
Temperatura de pico (°C)	164	160	164	163	162

A irregularidade na variação de temperatura de uma amostra para outra, ainda que pequena, pode ser entendida como um erro de operação, uma vez que a temperatura variava de forma considerável ao ser incidida em pontos diferentes da resina. Porém os resultados obtidos para a temperatura de pico da resina reforçada por carbonato de cálcio são semelhantes com as encontradas por Garay et al. (2019), que traz poliéster reforçado por carbonato em cargas de 10 a 15% (em massa) com temperaturas de pico variando entre 153 e 150 °C.

Entretanto, Garay et al. (2019) verificou que o tempo de gel aumenta com a adição de carbonato de cálcio, o que não ocorre no presente trabalho. Segundo Garay et al. (2019) o carbonato atua como inibidor da reação, uma vez que possui um coeficiente de condutividade baixo.

Silva et al. (2012) incorporou pó de coco à matriz poliéster e Lavoratti (2015) inseriu nanocelulose ao poliéster. Os autores relataram valores para o tempo de gel da resina poliéster entre 15 e 20 min. Os trabalhos trazem um resultado dentro do qual se encaixa o presente trabalho com a adição de 9,1 % (em massa) de carbonato de cálcio à resina poliéster, ainda que a adição de 16,6 % (em massa) tenha obtido um tempo de gel inferior.

4.2.3 Densidade

Os valores de densidade das amostras estudadas são apresentados na Tabela 5. Como pode ser observado, a densidade das amostras contendo bagaço de mandioca se mostrou inferior à das amostras contendo carbonato de cálcio, conferindo assim uma maior leveza para o material. Porém, a densidade média das amostras contendo bagaço de mandioca aumentou em relação à da resina poliéster pura. Isso representa um aspecto negativo do agregamento de bagaço em pó à resina poliéster, uma vez que segundo Travalini et al. (2015) a baixa densidade dos polímeros se apresenta como uma vantagem desses materiais.

Tabela 5: Densidade das amostras. Fonte: Elaborada pelo Autor (2022).

Amostras	RP-100	RP- CaCO₃-9,1	RP- CaCO₃- 16,6	RP- BagMand-9,1	RP- BagMand- 16,6
Densidade	1,21±0,016	1,24±0,045	1,32±0,01	1,21±0,003	1,23±0,01

4.2.4 Absorção d'água

A Tabela 6 apresenta um gráfico elaborado a partir dos dados processados para análise de absorção d'água. O percentual de água absorvida foi calculado após os 15 dias de análise:

Tabela 6: Absorção de água. Fonte: Elaborada pelo Autor (2022).

Amostras	RP-100	RP- CaCO₃- 9,1	RP- CaCO₃- 16,6	RP- BagMand- 9,1	RP- BagMand- 16,6
Água absorvida (%)	1,43 ± 0,05	0,59 ± 0,02	0,76 ± 0,02	4,19 ± 0,10	5,72 ± 0,15

Como pode ser visto na Tabela 6, a absorção de água diminui com a adição de carbonato de cálcio à matriz poliéster, porém a adição de bagaço de mandioca acaba aumentando a absorção de água. Edhirej et al., (2016) observou que a adição de bagaço de mandioca em filmes de amido termoplástico aumenta a hidrofiliabilidade do material devido à presença de grupos hidroxila nas moléculas do bagaço de mandioca.

4.6 Flexão

A Tabela 7 apresenta os resultados encontrados para a resistência à flexão e módulo de elasticidade em flexão, respectivamente. A resistência à flexão apresentou baixa variação, considerando o desvio padrão. Porém, as amostras contendo bagaço de mandioca apresentaram uma tendência de redução na resistência à flexão, quando comparado com as amostras contendo carbonato de cálcio e para a resina poliéster. Também, foi possível verificar que as amostras contendo 9,1% de bagaço de mandioca e carbonato de cálcio tiveram melhores resultados que as amostras contendo 16,6%.

Tabela 7: Resultados de resistência à flexão e módulo de elasticidade para as amostras estudadas. Fonte: Elaborada pelo Autor (2022).

Amostras	RP-100	RP-CaCO₃- 9,1	RP-CaCO₃- 16,6	RP- BagMand- 9,1	RP- BagMand- 16,6
Resistência					
à flexão (MPa)	32,41±2,54	34,46±2,41	28,60±9,73	29,28±2,82	28,04±2,30
Módulo de elasticidade (MPa)	2730±423	3047±373	3517±716	2411±311	2760±303

Ferreira (2017) também observou uma menor resistência à flexão ao adicionar sabugo de milho triturado à matriz poliéster, e que em teores maiores de sabugo triturado, a resistência diminuía. Ele atribui esse efeito à baixa interação entre a matriz e o reforço, bem como o aumento de vazios na compósito, gerado pela granulidade do sabugo triturado. Segundo Ferreira (2017), os reforços particulados acabam gerando pontos de maior concentração de tensão quando inseridos em matrizes poliméricas.

Bon et al. (2019) obteve resultados de resistência à flexão positivos ao adicionar farinha de bagaço de mandioca à matriz polimérica de polipropileno, mas percebeu que em teores elevados de bagaço de mandioca a resistência à flexão voltava a diminuir. O uso de agente compatibilizante ajudou a aumentar a resistência à flexão, uma vez que este aumenta a dispersão e homogeneidade da mistura bem como atua melhorando a interação interfacial dos componentes.

Em relação ao módulo de elasticidade, as amostras contendo 16,6% (em massa) de carbonato de cálcio tiveram um resultado maior em relação às outras amostras. A resina reforçada por 16,6% (em massa) de bagaço de mandioca teve o resultado mais semelhante ao da resina poliéster pura, e superior às amostras reforçadas por 9,1% (em massa) de bagaço de mandioca.

Ferreira (2017) obteve um aumento gradual do módulo de elasticidade com o incremento de resíduo particulado à matriz poliéster. Segundo Candido

(2014) isso se deve à baixa adesão entre a matriz e o reforço, e Ferreira (2017) afirma que a quanto menores forem as forças de ligação interatômicas da matriz e do reforço, maior será o módulo de elasticidade e conseqüentemente, maior a rigidez do material e menor sua deformação elástica.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos para a análise térmica do bagaço de mandioca se mostraram condizentes com os da literatura. O teste de viscosidade apontou que não há uma diferença positiva para a substituição do carbonato de cálcio pelo bagaço de mandioca, uma vez que com 16,6% (em massa) de bagaço de mandioca inserido à matriz poliéster a viscosidade aumentou, enquanto não houve variação significativa quando 9,1% (em massa) foi inserido. Já os resultados obtidos para tempo de gel, ainda que tenham se mostrado diferentes aos encontrados na literatura para as amostras contendo carbonato de cálcio, devido às particularidades da resina poliéster utilizada se comparada com a da literatura, foram positivas se tratando das amostras contendo bagaço de mandioca como reforço. Uma vez que os ensaios de tempo de gel contendo bagaço de mandioca apresentaram um tempo de gelificação semelhante ao da resina poliéster pura, o tempo de manuseio da resina não se altera.

Nos testes de densidade, as amostras contendo bagaço de mandioca se mostraram melhores que as que continham carbonato de cálcio, uma vez que a leveza é um aspecto positivo dos compósitos poliméricos. Por outro lado, como o esperado, devido ao caráter hidrofílico do bagaço de mandioca, houve uma absorção de água superior à das amostras contendo carbonato de cálcio.

Os testes de resistência à flexão e de módulo de elasticidade mostram que a incorporação de bagaço de mandioca, principalmente no teor de 16,6%, não afeta de modo considerável as propriedades da resina pura. Ou seja, seria uma alternativa para substituir parte da resina poliéster, que tem um valor agregado, por uma carga que é resíduo de um processo. Isso contribui para a redução de custo do produto final, sem o comprometimento das propriedades mecânicas. No entanto, a aplicação deste produto fica limitada pelos maiores valores de absorção de água encontrados. Quando comparados com os resultados de resistência à flexão e módulo de elasticidade, as amostras contendo carbonato de cálcio apresentaram um melhor desempenho.

Os resultados gerais encontrados nas análises demonstram que o objetivo de utilizar bagaço de mandioca como reforço de matriz poliéster não foi

alcançado. Entretanto, o bagaço de mandioca se mostrou como uma carga que ao ser adicionada nas proporções de 9,1 % (em massa) e 16,6 % (em massa) à matriz poliéster resulta em compósito que não possui propriedades inferiores às de material com 100% de resina poliéster, o que indica um desenvolvimento sustentável, uma vez que o bagaço de mandioca é um material de descarte e ambientalmente amigável.

Como sugestões para trabalhos futuros seria reduzir a granulometria da partícula de bagaço de mandioca, oferecendo assim uma maior área de contato entre o reforço e matriz polimérica, o que aumentaria a capacidade interação. Outra possibilidade seria a utilização de tratamento no bagaço, com o objetivo de melhorar a interação reforço/matriz.

REFERÊNCIAS

AKALUZIA, R. O. et al. Avaliação do efeito de tamanhos de partículas de reforço nas propriedades de impacto e dureza dos compósitos de resina de particulado-poliéster de carvão de madeira. **Materiais Hoje: Processo**, v. 38, p. 570-577, 2021.

ASSIS, Foluke Salgado de. **Comportamento balístico de blindagem multicamadas com compósitos de poliéster reforçados com fibra de juta**. 2016. Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016.

BETIOL, Lilian Fachin Leonardo. **Estudo das isotermas de adsorção do bagaço de mandioca proveniente da indústria de fécula**. 2016. Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, São José do Rio Preto, 2016.

BITTENCOURT, Evandro. **Processamento e caracterização de compósitos lignocelulósicos a partir de resíduo de madeira particulado e fibras vegetais**. 2002. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

BON, Alexsandro Bussinger et al. **Avaliação das propriedades do compósito de polipropileno carregado com farinha do bagaço de mandioca**. 2019. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

BOTELHO, André Campos Colares et al. **Coagulantes orgânicos no tratamento da manipueira de fecularia de mandioca**. 2019. Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2019.

BRITO, Jéssica Hoffmann et al. **Produção e caracterização estrutural, morfológica e térmica de filmes biodegradáveis utilizando amido de caroço de abacate (*Persea americana* Mill) e bagaço de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz)**. 2019. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2019.

BROCH, Jomara et al. **Resíduo seco de fecularia na alimentação de frangos de corte suplementados ou não com carboidratos**. 2015. Dissertação de Mestrado, Universidade do Oeste do Paraná, Mareschal Cândido Rondon, 2015

CANDIDO, V. S. **Caracterização e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de bagaço de cana-de-açúcar**. Tese apresentada para obtenção do título de Doutorado em Ciência dos Materiais. Instituto Militar de Engenharia. 2014.

COELHO, Jackson Dantas. Produção de mandioca: raiz, farinha e fécula. **Caderno Setorial ETENE**, v. 3, n 44, p. 1-11, set, 2018.

COSTA, Deibson Silva da. **Estudo da influência de resíduos gerados pela indústria de mineração nas propriedades de compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras naturais**. 2016. 227 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

DA SILVA, Frederico Fonseca et al. Flutuação das características químicas do efluente industrial de fecularia de mandioca. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 25, n. 1, p. 167-175, 2003.

DEWAN, M. W., HOSSAIN, M. K., HOSSUR, M., JEELANI, S., Thermomechanical Properties of Alkali Treated Jute-Polyester/Nanoclay Biocomposites Fabricated by VARTM Process, **J. APPL. POLYM. SCI.** p. 4110-4123, oct, 2013.

EDHIREJ, Ahmed et al. Preparation and characterization of cassava bagasse reinforced thermoplastic cassava starch. **Fibers and Polymers**, v. 18, n. 1, p. 162-171, 2017.

FELIPE, Fábio Isaías; ALVES, Lucílio Rogério Aparecido; DE CAMARGO, Samira Gaiad Cibim. Panorama e perspectivas para a indústria de fécula de mandioca no Brasil. **Revista Raízes e Amidos Tropicais**, v. 6, p. 134-146, nov, 2010.

FERREIRA, Edson A. **Avaliação das Propriedades Mecânicas e Térmicas de um Compósito Polimérico Reforçado por Particulados de Sabugo de Milho Triturado**. 2017. 147 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procopio, 2017.

FIORDA, Fernanda Assumpção et al. Farinha de bagaço de mandioca: aproveitamento de subproduto e comparação com fécula de mandioca. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, p. 408-416, dez, 2013;

GARAY, André C.; SÁ, Fabrício L.; AMICO, Sandro C. ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DE INTERESSE DO SISTEMA POLIÉSTER/CARBONATO DE CÁLCIO PARA O PROCESSO RTM.

GLÓRIA, Gabriel Oliveira et al. Tensile strength of polyester composites reinforced with PALF. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 6, n. 4, p. 401-405, 2017.

GUDAPATI, S. P. K; CHIDAMBARANATHAN, S. and PRASAD, A. V. R. Influence of nanoclay on thermal properties of wild cane grass fiber reinforced polyester composites, **Materials Today: Proceedings**, v. 23, p. 2214-7853, mai, 2019.

Haameem, M. J. A. et al. Mechanical properties of Napier grass fibre/polyester composites. **Composite Structures**, v. 136, p. 1-10, oct, 2016.

JASKO, Ariana Crasnhak et al. Caracterização físico-química de bagaço de mandioca in natura e após tratamento hidrolítico. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v. 05, p. 427-441, jun, 2011.

KUK, Roger Santana et al. Thermal, structural and pasting properties of brazilian ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) starch. **Ukrainian food journal**, n. 6, Issue 4, p. 674-685, 2017.

LANDAU, Elena Charlotte; DA SILVA, Gilma Alves; ROCHA, Michele Silva. Evolução da produção de mandioca (*Manihot esculenta*, Euphorbiaceae). **Embrapa Milho e Sorgo-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2020.

LIED, Eduardo Borges et al. **Tratamento de efluente industrial de fecularia utilizando macrófita aquática *Eichhornia crassipes* e coagulante natural**. 2012. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2012.

LIMA, Suelen de Jesus. DESENVOLVIMENTO DE VERNIZ PU BICOMPONENTE DE ALTA TECNOLOGIA PARA SUBSTRATO EM MADEIRA. **Engenharia Química**, 2019.

MARANHÃO, Ricardo Frota de Albuquerque; BASTOS, Senia Regina; MARCHI, Marília Malzoni. Cultura e sociedade no sistema culinário da mandioca no Brasil. **Revista Sociais e Humanas**, v. 28, n. 2, p. 54-68, 2015.

MARINELLI, Alessandra 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, jun, 2008.

MASSON, Terezinha Jocelen; LIMA, RSL. Reciclagem do polipropileno para obtenção do compósito polimérico reforçado com pó de ostra. **Engenharias: Metodologias e Práticas de Caráter Multidisciplinar**, v. 4, p. 40-57, mar, 2021.

NEUBERT, Enilto de Oliveira. Santa Catarina: o berço da industrialização da mandioca. **Agropecuária Catarinense**, v. 26, n. 1, p. 14-16, mar, 2013.

NETO, J. R. A., CARVALHO, L. H. de. Influência de Adição de uma Carga Nanoparticulada no Desempenho de Compósitos Poliuretano/Fibra de Juta, **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 17, n. 1, p. 10-15, 2007.

RIEDNER, Lilian Navrotzki et al. Dimensão social da sustentabilidade: Uma análise a partir de propriedades produtoras de mandioca. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v. 14, n. 3, nov, 2018.

ROMANZINI, D. **Efeito da organossilanização de argilas montmorilonita (Mt) nas propriedades de nanocompósitos Mt/poliéster e Mt/poliéster/fibra de vidro moldados por RTM**. 2016. 124 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Minas.

SANTOS, Flávia Regina Silva dos et al. **Desenvolvimento e aplicação de compósitos à base de matriz polimérica reforçado com fibras de curauá (*Ananás erectifolius*) e resíduos de madeira amazônicas**. 2013. Tese Mestrado, Universidade Federal do Amazonas – UFAM, Manaus, 2013.

SANTOS, V. da S. Mandioca: a raiz das nossas raízes. **Embrapa Mandioca e Fruticultura-Artigo de divulgação na mídia (INFOTECA-E)**, p. 1-2, dez, 2010.
SHAW, A. et al., A critical reliability evaluation of fibre reinforced composite materials based on probabilistic micro and macro-mechanical analysis, **Composites: Part B**, v. 41, p. 446–453, set, 2010.

SHUVO, S. N., SHOROWORDI, M., ISLAM, M. A., Effect of Nanoclay on Jute Fiber Reinforced Polyester Composites, **International Journal of Advanced Engineering and Nano Techn** ISSN: 2347-6389, Volume-2 Issue-8, July 2015.

SILVA, Anderson Ezequiel; BORGES, Patrícia Gomes de Andrade; BATISTA, Wilton Walter. Taxa de incorporação de pó de coco à matriz de poliéster. 2012.

SILVESTRE, Isabella S.; DE CÁSSIA BERGAMASCO, Rita. Preparação e Caracterização de Nanofibras de Celulose a partir de Bagaço de Mandioca. **Revista Processos Químicos**, v. 11, n. 22, p. 95-100, jul, 2017.

TRAVALINI, Ana Paula et al. **EXTRAÇÃO, MODIFICAÇÃO E APLICAÇÃO DA FIBRA DO BAGAÇO DE MANDIOCA (*Manihot esculenta* Crantz)**. 2015. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2015.

WAHONO, S. et al. Preparation and characterization of ramie cellulose nanofibers/CaCO₃ unsaturated polyester resin composites. **ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 13, n. 2, p. 746-51, 2018.

ZANATTA, Elciane Regina et al. Kinetic studies of thermal decomposition of sugarcane bagasse and cassava bagasse. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 125, n. 1, p. 437-445, 2016.