
Biodegradable containers made from mesquite pods *Prosopis juliflora* (Sw.) DC for the production of plant seedlings

Recipientes biodegradáveis produzidos de vagens de algaroba *Prosopis juliflora* (Sw.) DC para produção de mudas de plantas

Received: 05-04-2024 | Accepted: 08-05-2024 | Published: 16-05-2024

Jéssica Felipe do Nascimento

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5464-8214>

Federal University of Paraíba, Brazil

E-mail: nascimento.jessica@cear.ufpb.br

Kerolayne Santos Leite

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0277-4539>

Federal University of Paraíba, Brazil

E-mail: kerolprof@gmail.com

Kelly Cristiane Gomes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0255-8740>

Federal University of Paraíba, Brazil

E-mail: gomes@cear.ufpb.br

ABSTRACT

Currently there is a tireless search for sustainable solutions to minimize plastic waste in the environment. In this sense, this work aimed to develop a biodegradable packaging from mesquite pods (*Prosopis juliflora*), to act as a potential replacement for commercial packaging in the agro-industrial sector. To this end, mesquite pod flour (FV) was obtained to produce containers for plant seedlings. During processing, the flour was mixed with an adhesive solution of wheat starch, glycerol and NPK, molded manually and dried in an oven. The containers were evaluated by X-ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared (FTIR), Ultraviolet-Visible Spectrophotometry (UV-Vis), Mechanical Resistance, Contact Angle (AC) and Water Absorption. The packages obtained semi-crystalline behavior, due to the presence of lignocellulosic compounds and the addition of NPK did not influence the chemical interactions between the adhesive solution and the FV. With the increase in the concentration of FV in the containers, the ultraviolet light absorption properties were intensified, but resulted in packages with lower tensile strength and greater water absorption.

Keywords: Sustainability, Composites, Fiber.

RESUMO

Atualmente existe uma busca incansável por soluções sustentáveis para minimizar os resíduos plásticos no meio ambiente. Neste sentido, este trabalho teve como objetivo desenvolver uma embalagem biodegradável a partir de vagens de algaroba (*Prosopis juliflora*), para atuar como potencial substituto de embalagens comerciais no setor agroindustrial. Para tanto, foi obtida farinha de vagem de algaroba (FV) para produção de recipientes para mudas de plantas. Durante o processamento, a farinha foi misturada com solução adesiva de amido de trigo, glicerol e NPK, foi moldada manualmente e seca em estufa. Os recipientes foram avaliados por Difração de Raios X (DRX), Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Espectrofotometria Ultravioleta-Visível (UV-Vis), Resistência Mecânica, Ângulo de Contato (AC) e Absorção de Água. As embalagens obtiveram comportamento semicristalino, devido à presença de compostos lignocelulósicos e a adição de NPK não influenciou nas interações químicas entre a solução adesiva e o FV. Com o aumento da concentração de FV nos recipientes, as propriedades de absorção da luz ultravioleta foram intensificadas, mas resultaram em embalagens com menor resistência à tração e maior absorção de água.

Palavras-chave: Sustentabilidade, Compósitos, Fibra.

INTRODUÇÃO

A produção agrícola em todo o mundo visa a obtenção de plantas vigorosas seja para a produção de alimentos, reflorestamento, ornamentação de ambientes ou mesmo para obtenção de matérias-primas destinadas aos setores de transformação (Inubushi *et al.*, 2022). Segundo Haase *et al.* (2021) o processo produtivo destas plantas, em muitos casos, é realizado a partir da produção de mudas em recipientes ou sacos plásticos, fato considerado preocupante em virtude dos problemas causados pelo descarte inadequado destes tipos de materiais no meio ambiente.

Na atualidade a utilização de recipientes plásticos na produção de mudas é considerada uma prática insustentável, uma vez que esse tipo de material é oriundo de fonte não renovável a base de petróleo. Assim, como alternativa para substituir este tipo de material surgem os recipientes biodegradáveis que apresentam vantagens ambientais e econômicas, pois não geram resíduos, não prejudicam o solo devido sua rápida decomposição e, além disso, ao se decomporem podem reforçar o adubo do solo, pois são ricos em carbono e outros nutrientes importantes para o crescimento da planta (Ferreira, Molina e Pelissari, 2020).

Mwangi, Wagara e Kariuki (2021) ressaltam que a utilização de recipientes biodegradáveis na agricultura ajuda a minimizar os impactos ambientais e contribui para diminuição do uso de sacos e tubetes plásticos no plantio de mudas. Além disso, os recipientes biodegradáveis podem reduzir o tempo de plantio, uma vez que as mudas são plantadas diretamente no solo e por conseguinte necessita de menos mão de obra (Haase *et al.*, 2021).

De acordo com Gabira *et al.* (2020), outros aspectos favoráveis são observados na utilização de recipientes biodegradáveis como o mais rápido e melhor desenvolvimento das mudas, devido ao menor estresse no momento do plantio, a preservação da integridade das raízes, já que o material é composto de fibras orgânicas, as raízes conseguem ultrapassar as paredes do recipiente, não se restringindo ao interior do mesmo (Zhang; Wang; Chen, 2019). Deste modo, é evidente que este tipo de recipiente evita os problemas causados às mudas por sacos e tubetes plásticos, além de contribuir para sustentabilidade do planeta (Parida *et al.*, 2021).

No meio acadêmico estudos (Zhang *et al.*, 2019., Tamodini *et al.*, 2020., Fuentes *et al.*, 2021) estão sendo realizados, desenvolvidos e testados a respeito de recipientes biodegradáveis para produção de mudas, visando a melhoria das propriedades intrínsecas

e extrínsecas do material. Fibras de diversas espécies estão sendo caracterizadas, a fim de avaliar as vantagens e desvantagens, resultantes das interações formadas dentro da embalagem (Tian; Gao; Liang, 2019).

Nesta perspectiva a espécie *Prosopis juliflora* (SW.) DC vulgarmente conhecida como algaroba é uma leguminosa com alto valor nutritivo, que produz frutos em forma de vagens ricos em proteínas, fibras, sais minerais, carboidratos e açúcares, que variam de 3 cm a 10 cm de comprimento (Torres *et al.*, 2020). A algaroba é uma espécie vegetal abundante no nordeste brasileiro por ser capaz de se desenvolver em regiões áridas e semiáridas, ambiente que dificilmente outras leguminosas conseguiriam sobreviver, em razão da escassez hídrica e da baixa permeabilidade do solo (Nascimento *et al.*, 2020).

Os autores Bigne, Puppo e Ferrero (2018) ressaltam que a algaroba apresenta potencial elevado, de modo que vem sendo utilizada para alimentação animal, produção de madeira, carvão vegetal, estacas, álcool, melação, reflorestamento e recentemente aparece como uma possível fonte de matéria prima para o desenvolvimento de embalagens biodegradáveis.

Tendo em vista as características positivas e as utilizações da algaroba, o objetivo desta pesquisa foi produzir e caracterizar recipientes biodegradáveis para produção de mudas, utilizando como matéria-prima a farinha de vagem de algaroba.

METODOLOGIA

Obtenção da farinha das vagens de algaroba

Neste estudo foram utilizadas vagens maduras de algaroba *Prosopis juliflora* previamente selecionadas, descartando-se as atacadas por insetos e fungos. Com o intuito de facilitar o processo de moagem, as vagens foram manualmente fragmentadas e imersas em água na proporção de 1:2 (m/v) por aproximadamente 24 horas, a cada 6 horas foi realizada a troca de água. Em seguida as vagens foram trituradas em um liquidificador industrial e colocadas para secar a $30^{\circ} \pm 3^{\circ}$ por aproximadamente 48 horas. Após esse procedimento, as vagens foram encaminhadas ao laboratório e moídas em moinho de facas do tipo willy com peneira 30 *mesh* para obtenção da farinha de vagem (FV).

Produção dos recipientes biodegradáveis para mudas

Baseado em Ferreira, Molina e Pelassari (2020) para elaborar os recipientes biodegradáveis foi produzida inicialmente uma solução adesiva, composta por amido de trigo e água em uma proporção de 1:10 (m/v), que foi aquecida em temperatura entre 60 e 70 °C com agitação manual constante por 30 minutos até a completa gelatinização dos grânulos de amido. Após o resfriamento da solução adesiva, foi adicionado 0,4 mL de ácido acético, à farinha de vagem algaroba, à glicerina e ao fertilizante NPK (Nitrogênio, Fósforo e Potássio) formulação 10:10:10.

A incorporação do fertilizante nos protótipos foi pensada para ajudar no desenvolvimento da planta, visto que esse tipo de recipiente pode ser plantado junto com a muda. Assim, observou-se, por meio de pesquisas à literatura, que o aditivo que poderia ser testado à priori seria o NPK, pois esse teoricamente auxiliaria na degradação da celulose presente no protótipo e forneceria nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio, contribuindo para melhorar o desenvolvimento das mudas.

No desenvolvimento dos recipientes foram elaboradas 6 formulações, variando-se a quantidade de farinha e glicerina conforme a Tabela 1. Para preparação de cada formulação os componentes foram misturados manualmente por aproximadamente 5 minutos, até a completa homogeneização, em seguida as misturas foram moldadas manualmente em recipientes plásticos e colocados para secar em estufa com circulação de ar (Modelo MA-SL-100, Solab, Brasil) a 50 °C por aproximadamente 48 horas. Para fins comparativos dois tipos de embalagens comerciais (Sacos plásticos para mudas (SPM) e Vaso plástico para mudas (VPM)) foram utilizadas nas análises de resistência mecânica, ângulo de contato e biodegradabilidade.

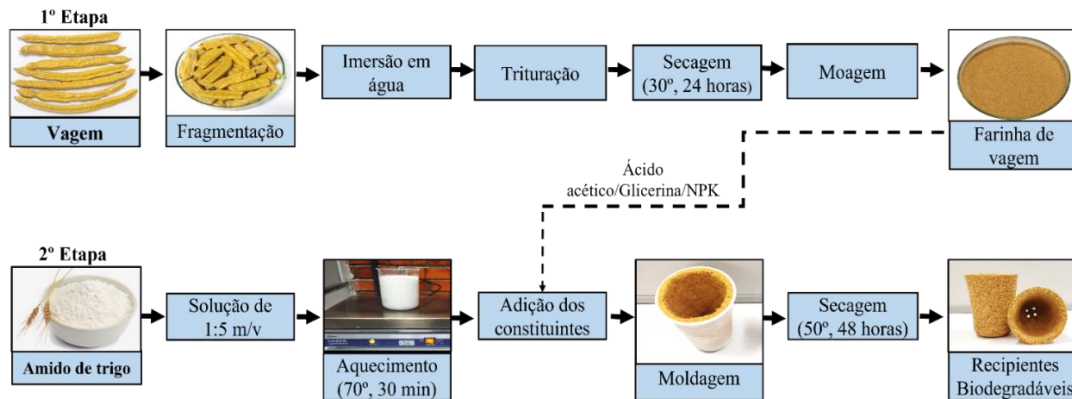
Tabela 1 – Composição das formulações para produção dos recipientes biodegradáveis.

Formulação	Farinha de Vagem (g)	Solução Adesiva (g)	Glicerina (mL)	NPK (g)
T1	140	150	-	-
T2	70	150	-	-
T3	140	150	10	5
T4	70	150	10	5
T5	140	150	20	5
T6	70	150	20	5

Os parâmetros envolvidos no processo de produção dos recipientes, como a concentração de componentes das formulações (amido, água, farinha, glicerina e NPK), o tempo, a temperatura e a quantidade de massa colocada no molde foram determinadas

em ensaios preliminares. Os recipientes biodegradáveis foram fabricados conforme o fluxograma apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma para dos recipientes biodegradáveis.



Fonte: Nascimento; Leite e Gomes, (2024)

Caracterização dos recipientes biodegradáveis

As análises de cristalinidade dos recipientes foram realizadas através de difração de raios x, utilizando-se um Difratorômetro do fabricante Shimadzu modelo Lab X/XRD-6000, operando com voltagem de 40 kV e corrente de 40 mA, utilizando a radiação $K\alpha$ de cobre como fonte de radiação monocromática. As varreduras foram realizadas no intervalo 2θ entre 2 a 60° , incremento de $0,01^\circ$, velocidade de 1° min^{-1} e utilização de fenda de 1 mm.

Os espectros de Espectroscopia na região do Infravermelho foram obtidos em um Espectrômetro da Shimadzu, modelo IR Tracer-100. Para realização desta análise as amostras (forma de pó) foram prensadas para formação de pastilhas com composição de aproximadamente 1:100 (mg) de amostra: brometo de potássio (KBr), sendo realizadas no modo de transmitância na região do infravermelho médio (4000 a 400 cm^{-1}) com resolução de 4 cm^{-1} .

As amostras foram submetidas a caracterização óptica através da técnica de Espectrofotometria na região do Ultravioleta, Visível (UV-Vis) utilizando-se um Espectrômetro, da marca Shimadzu, modelo UV-2600, equipado com acessório de esfera de integração. Os resultados foram detectados no modo absorvância entre os comprimentos de onda de 220 a 1400 nm.

Os ensaios de resistência mecânica foram realizados em uma máquina de ensaios mecânicos universais Shimadzu modelo AG-X com célula de carga de 10 KN. Nesta análise a velocidade utilizada foi de 50 mm/min, sendo a distância inicial entre as garras de 10 mm. Os parâmetros utilizados para os testes foram escolhidos de acordo com a norma da ASTM D882-12 (2012) e foi realizado em triplicata para cada formulação dos recipientes, para isso corpos de prova foram preparados com dimensões conhecidas e fixados na máquina de ensaios mecânicos.

As análises de Ângulo de Contato (AC) foram realizadas em um sistema composto por luz fixa, pipeta de volume regulável e um aparato para amostra. Sobre a superfície de cada amostra uma gota de água destilada foi depositada e imagens foram capturadas com o auxílio de uma câmera do celular iPhone 11 com resolução de 12 MP. As medidas dos valores do ângulo de contato foram realizadas com o auxílio do programa computacional, de acesso livre, ImageJ, através de medidas de diâmetro da base da gota e da altura da mesma, cada gota foi medida 5 vezes.

O percentual de absorção de água foi realizado em triplicata utilizando amostras com dimensões de 15 x 15 mm que foram pesadas e submersas em 50 mL de água destilada durante 1, 5, 10 e 15 min. Após isso foi realizada a remoção do excesso de água com auxílio de papel absorvente, novamente as amostras foram pesadas em balança analítica. A quantidade de água adsorvida pela amostra foi calculada através da diferença entre a massa inicial e final da amostra e expressa em porcentagem conforme a Equação 1.

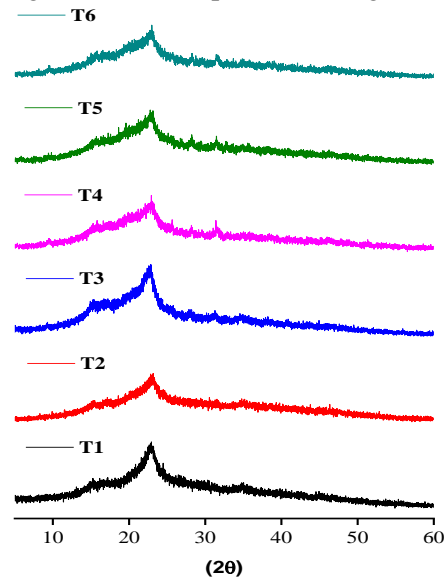
$$\% \text{ água absorvida} = \frac{\mu - ms}{ms} \times 100 \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde: μ é a massa da amostra úmida e ms é a massa da amostra seca.

RESULTADOS

Difração de Raios-X (DRX)

Na Figura 2 estão apresentados os difratogramas dos recipientes biodegradáveis produzidos.

Figura 2 – Difratogramas dos recipientes biodegradáveis fabricados.

O índice de cristalinidade é um parâmetro importante a ser considerado no desenvolvimento de novos produtos, pois pode interferir nas propriedades físicas, mecânicas, químicas e tecnológicas dos materiais (Lomelí-Ramírez *et al.*, 2018).

Nos difratogramas obtidos (Figura 2) verifica-se que apesar das diferentes formulações utilizadas, os padrões de difração foram semelhantes e característicos de materiais semicristalinos. O pico largo observado no ângulo (2θ) de 22° pode ser atribuído a presença de celulose, bem como a galactomanana, ambos constituintes da farinha da vagem de algaroba. Os resultados aqui apresentados estão coerentes com os de Engel *et al.* (2019).

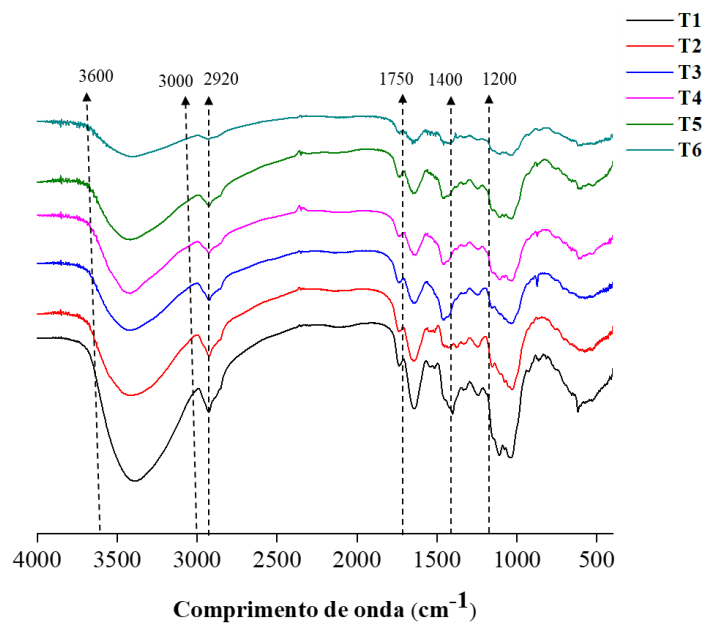
Nos perfis de difração (T3, T4, T5 e T6) observa-se que a incorporação do fertilizante NPK às formulações não contribuiu para o aparecimento de picos cristalinos, indicado que não ocorreu interação significativa entre as matérias-primas, isso provavelmente se deu em virtude da baixa concentração de NPK adicionada às formulações e devido ao processo de gelatinização do amido durante o processo de aquecimento, que resultou em materiais semicristalinos cujos padrões de difração são predominantemente na região amorfa. Estes resultados corroboram com os observados na análise de FTIR.

Os resultados indicam que os cristais dos grânulos de amido presentes na solução adesiva foram totalmente destruídos após o aquecimento a 70 °C durante a preparação da solução adesiva. De acordo com Xu *et al.* (2018) quando aquecidos em água, os grânulos de amido sofrem uma transição de fase, que causam ruptura e desorganização estrutural, bem como mudanças ou perdas de cristalinidade.

Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier foi aplicada neste estudo para identificar possíveis interações entre os componentes (amido, glicerina, farinha de vagem e NPK) utilizados na produção dos recipientes biodegradáveis. Na Figura 3 estão apresentados os espectros de FTIR dos recipientes biodegradáveis obtidos pelas 6 (seis) diferentes formulações.

Figura 3 – Espectros de infravermelho por transformada de Fourier dos recipientes fabricados.



De modo geral, o amido, a glicerina e os compostos lignocelulósicos presentes nos recipientes apresentam grupos funcionais semelhantes, o que conseqüentemente gerou bandas próximas e espectros similares.

Na Figura 3 todos os espectros obtidos apresentam bandas largas de absorção entre 3600 e 3000 cm^{-1} característica da deformação axial do grupo OH, porém, observa-se a ocorrência de deslocamento das bandas indicando a existência de interações das ligações de hidrogênio entre os constituintes dos recipientes produzidos (Santos *et al.*, 2021).

Nos espectros as bandas observadas em torno de 2920 cm^{-1} com maior ou menor intensidade representam estiramento do tipo C-H e podem estar relacionadas a celulose, lignina e a glicerina presente nas amostras (Rafidison *et al.*, 2020). Na região de 1400-1200 cm^{-1} aparecem vibrações angulares conjugadas de H-C-H e C-O-H também

pertencentes ao grupo CH. Estes resultados então em conformidade com os descritos por Santos e colaboradores (2021) ao avaliarem biocompósitos biodegradáveis.

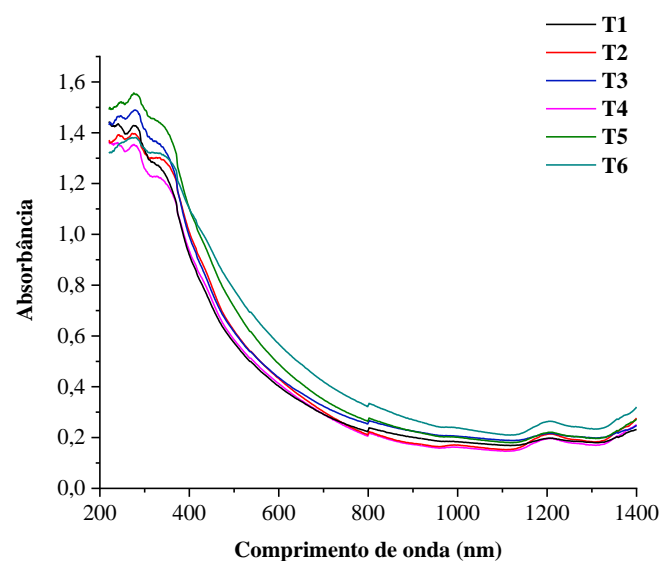
Em todas as formulações verifica-se a presença de bandas em torno de 1540 cm^{-1} associadas a formação do grupo aromático (C-C) que podem corresponder a lignina, já as bandas em torno de 1750 cm^{-1} referem-se aos grupamentos C=O e C-O geralmente encontrados na hemicelulose (Ferreira *et al*, 2020). Espectros semelhantes aos obtidos neste trabalho foram encontrados por Silva-Guzmán *et al* (2018) ao analisar as propriedades de compósitos verdes à base de amido de milho termoplástico reforçados com fibras de cevada.

Ao avaliar de maneira geral os resultados obtidos, é possível observar que mesmo com a incorporação do fertilizante NPK, os perfis dos espectros de infravermelho dos recipientes não foram alterados e sim intensificados em alguns casos, com intensidade aumentada ou diminuída principalmente na banda característica do estiramento O-H (3600 e 3000 cm^{-1}) e na banda característica do estiramento H-C-H e C-O-H (1400 - 1200 cm^{-1}).

Espectrofotometria na Região do Ultravioleta e Visível (UV-Vis)

Os espectros de absorção ultravioleta dos recipientes biodegradáveis estão apresentados na Figura 4.

Figura 4 – Espectros de UV-Vis dos recipientes biodegradáveis fabricados.



É possível observar que os recipientes biodegradáveis apresentaram uma ampla faixa espectral de absorção entre 200 e 800 nm devido à presença de grupos cromóforos

-C=C ou -C=O nos polissacarídeos. De acordo com Rafidison et al (2020) a ampla faixa de absorvância destes polímeros está associada as ligações conjugadas dos monossacarídeos.

Nos espectros obtidos verifica-se que os recipientes resultantes das formulações T1, T3 e T5 apresentaram maior amplitude de absorção se comparado aos T2, T4 e T6. Este comportamento está relacionado ao aumento da concentração de FV nas formulações e justifica-se pelo o incremento dos teores de lignina nos recipientes. A lignina tem seu potencial de absorção efetivado na faixa da região UV-Vis devido à transição $\pi \rightarrow \pi^*$ de suas ligações duplas C=C (Amorim *et al.*, 2019). Segundo Cazón *et al* (2019) a intensidade de absorção de um material depende da probabilidade de interação entre a radiação incidente e as moléculas, como também da diferença entre o estado fundamental e o estado excitado.

Na literatura, estudos (Xie; Hung, 2018; Assis *et al.*, 2020; Sani *et al.*, 2021) utilizando a técnica de UV-Vis estão sendo difundidos com foco em embalagens do tipo filme, destinadas a conservação de alimentos, para avaliar a transparência e opacidade desse material. Contudo, relatos não são encontrados de utilização dessa técnica para caracterizar embalagens biodegradáveis destinadas a produção de mudas de plantas. Destaca-se que, conhecer as propriedades ópticas deste tipo de material é importante, uma vez que no desenvolvimento de mudas, a luz pode interferir ou induzir a germinação de sementes.

Propriedades mecânicas

Na Tabela 2 estão apresentados os resultados para tensão de ruptura e alongamento dos recipientes biodegradáveis fabricados.

Tabela 2 – Tensão de Ruptura (MPa) e Alongamento (%) dos recipientes biodegradáveis fabricados.

Formulações	Tensão de Ruptura δ (MPa)	Alongamento (%)
T1	0,22 \pm 0,04	7,30
T2	0,24 \pm 0,03	9,39
T3	0,50 \pm 0,10	10,23
T4	1,28 \pm 0,28	12,28
T5	0,58 \pm 0,20	16,97
T6	1,13 \pm 0,39	18,08
VPM	22,00 \pm 1,87	20,72
SPM	0,75 \pm 0,03	192,53

Segundo Chacón *et al.* (2019) conhecer as propriedades mecânicas dos materiais poliméricos é importante em razão das exigências que estes devem atender no momento de sua aplicação.

De acordo com os resultados obtidos, na Tabela 2 é possível observar que uma redução acentuada ocorreu na tensão de ruptura e no alongamento dos recipientes produzidos apenas com farinha de vagem e solução adesiva (T1 e T2). Nestas formulações a redução na resistência mecânica observada, pode ser atribuída à fraca adesão interfacial entre a farinha de vagem e a solução adesiva, indicando a necessidade da incorporação do agente plastificante.

Dentre as amostras analisadas, os recipientes das formulações T4 e T6, com menor proporção de FV, apresentaram maiores resistências a tração, com valores de $1,28 \pm 0,28$ e $1,13 \pm 0,39$ MPa, respectivamente. Resultado semelhante ao deste trabalho foram encontrados nos estudos de Salim, Rihayat e Riskina (2020), em que a presença de fibras associada ao plastificante glicerol reduziu as forças coesivas na matriz polimérica, diminuiu as características frágeis e conseqüentemente aumentou a resistência à deformação. Segundo Cruz-Tirado *et al.* (2019) altas variações nas proporções de fibras podem interferir na expansibilidade e produzir descontinuidade na matriz do amido, resultando em recipientes com menor resistência à quebra.

Em relação ao percentual de alongamento, as amostras T4 e T6 também obtiveram os melhores resultados (14,28 e 16,08%). Entretanto, verifica-se que o aumento na concentração de glicerina na formulação T6 proporcionou maior flexibilidade do material antes de sua ruptura. Comportamento inverso foi observado para resistência a tração em que o aumento da glicerina resultou em diminuição na resistência do material.

De modo geral, percebe-se que a interação entre os constituintes das formulações T4 e T6 pode ter promovido maior entrelace entre as fibras presentes no material e conseqüentemente maior compactação dos recipientes. Conforme Juanga-Labayen e Yuan (2021) a maior compactação e, conseqüentemente, maior homogeneidade de um material faz com que esse apresente maior resistência mecânica. A fim de confirmar essa hipótese, posteriormente serão realizadas análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para avaliar a microestrutura do material. Comparativamente as embalagens comerciais VPM e SPM apresentaram maior resistência a tração e maior alongamento respectivamente, porém, este resultado não inviabiliza a utilização dos recipientes biodegradáveis obtidos neste trabalho.

Para fins de aplicação os recipientes da formulação T4 apresentam propriedades mecânicas com potencial para substituir os recipientes tradicionalmente encontrados no mercado. Visto que no plantio, transporte e manuseio de mudas, as embalagens utilizadas necessitam de uma maior resistência a tração. Portanto, em termos de resistência mecânica os resultados mostram que a utilização de farinha de vagem (FV) foi eficiente no desenvolvimento de recipientes biodegradáveis.

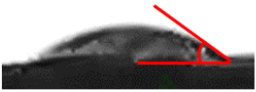

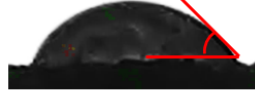
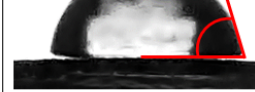
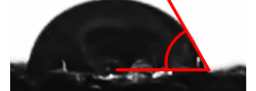
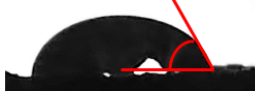
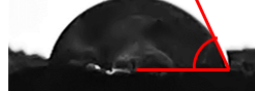
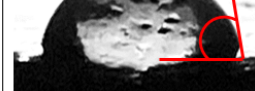
Determinação do ângulo de contato

Tendo em vista que os recipientes biodegradáveis, nas condições de uso, estarão expostos ao contato com água, a análise de molhabilidade é extrema importância para verificar a integridade dos mesmos quando submetidos a essas condições. A Tabela 3 apresenta as médias obtidas para o ângulo de contato das diferentes formulações. A Figura 5 apresenta as imagens dos ângulos de contato formado entre a gota de água e os recipientes produzidos.

Tabela 3 – Valores de Ângulo de Contato (AC) dos recipientes biodegradáveis produzidos.

Formulação	Ângulo de Contato (°)
T1	43,03 ± 3,77
T2	54,29 ± 3,86
T3	59,88 ± 2,15
T4	82,16 ± 3,56
T5	63,52 ± 2,96
T6	78,16 ± 2,46
VFM	98,92 ± 4,21
SPM	96, 90 ± 3,89

Figura 5 – Imagens da determinação do ângulo de contato dos recipientes biodegradáveis produzidos

Formulações			Controle
T1	T2	T3	VPM
43,03 ± 3,77 	54,29 ± 3,86 	59,88 ± 2,15 	98,92 ± 4,21 
T4	T5	T6	SPM
82,16 ± 3,56 	63,52 ± 2,96 	78,16 ± 2,46 	96,90 ± 3,89 

Através da análise de ângulo de contato é possível analisar a afinidade seletiva de uma superfície com uma substância líquida e caracterizar o comportamento cinético, em média, da molhabilidade de um material a nível macroscópico (Pulla *et al.*, 2021). Em vista disso esta análise foi aplicada nesta pesquisa para estudar a hidrofobicidade da superfície dos recipientes produzidos.

Na Tabela 3 observa-se que os recipientes biodegradáveis das formulações (T4 e T6) foram os que obtiveram o maior valor do ângulo de contato ($82,16 \pm 3,56$ e $78,16 \pm 2,46$) quando comparado as demais formulações (T1, T2, T3, T5). Porém, observar-se que apesar de próximo o valor do ângulo de contato da formulação T6 foi inferior a T4, de forma que o aumento da concentração do agente plastificante (glicerina) proporcionou uma pequena redução de 4° no ângulo de contato. Esta diminuição pode estar relacionada ao aumento da concentração de grupos polares provenientes da glicerina.

Segundo Xu *et al.* (2018), a presença deste tipo de plastificante aumenta a molhabilidade da superfície, uma vez que a glicerina apresenta grupos $-OH$ polares, que interagem com moléculas de água via interações de ligação de hidrogênio. Na análise de absorção de água o mesmo comportamento foi observado.

Todos os recipientes analisados nesta pesquisa apresentaram valores de ângulo de contato menores que 90° , conforme apresentado na Figura 5, indicando que as amostras apresentam características hidrofílicas. De acordo com Machado, Benalli e Tessaro (2020) quando o ângulo é menor que 90° , os materiais apresentam molhabilidade considerável e estes são chamados de hidrofílicos. Superfícies hidrofílicas como a deste

trabalho, foram obtidas por Li et al. (2019) ao produzirem biocompósitos reforçados com fibras de bambu.

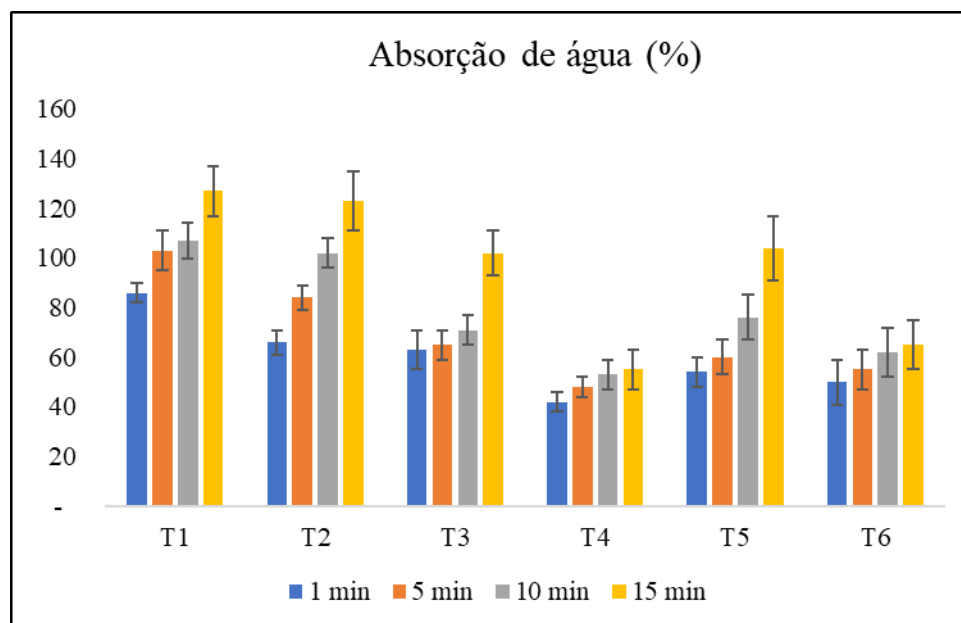
Os valores de ângulo de contato obtidos para SPM e VPM comerciais foram superiores aos encontrados neste trabalho para recipientes biodegradáveis, evidenciando que esses materiais apresentam maior resistência a absorção de umidade e conseqüentemente menor hidrofiliçidade. No entanto, os mesmos são produzidos de fonte petrolíferas e acarretam grandes impactos ambientais.

No contexto geral, observa-se que entre os recipientes analisados o da formulação T4 apresenta os melhores resultados em termos de molhabilidade e se destaca com propriedades que possibilitam sua aplicação como embalagens para mudas de plantas.

Capacidade de absorção de água (CAA)

Na Figura 6 estão expressos os resultados de capacidade de absorção de água (CAA) dos recipientes biodegradáveis em diferentes tempos (1, 5, 10 e 15 min).

Figura 6 – Capacidade de absorção de água (CAA) dos recipientes biodegradáveis fabricados.



Ao avaliar os resultados obtidos (Figura 6), observa-se que as formulações (T1 e T2), produzidas apenas com solução adesiva e farinha de vagem foram as que apresentaram maior captação de água em todos os tempos, quando comparada às outras

formulações. Segundo Fourati *et al.* (2020) este fato pode ser explicado devido à ausência de glicerina na formulação, que facilitou a entrada de água nas fibras de celulose, pois embora o glicerol seja solúvel em água, o mesmo pode lubrificar as fibras de celulose tornando-as mais firmes e contribuir para melhorar a resistência à absorção de água do biocompósito.

As amostras T4 e T6 com menor concentração de farinha de vagem foram aquelas que apresentaram os menores percentuais de capacidade de absorção de água. Conforme Worku *et al.* (2024) a baixa concentração de farinha provavelmente proporcionou recipientes menos porosos com diâmetros de células menores que dificultaram a entrada de água, enquanto as altas concentrações de FV diminuiu a massa de amido na mistura, reduziu a interação da fibra com a matriz e conseqüentemente produziu uma estrutura menos compacta.

Comportamento similar ao obtido neste trabalho foi observado por Frecz *et al.* (2021), onde o aumento da proporção de fibras à matriz polimérica ocasionou aumento da absorção de água nos biocompósitos. As formulações T4 e T6 quando comparadas entre si, evidenciam que a T4, com menor concentração de glicerina, apresenta os melhores resultados com menor capacidade de absorção de água.

Deste modo, observa-se que a menor concentração de farinha associada aos outros constituintes dos biocompósitos, proporcionou uma melhor homogeneidade do material e fez com que este apresentasse menor capacidade de absorção de água em todos os tempos avaliados. Destaca-se, ainda, que as variações nas proporções de farinha de vagem não prejudicaram a moldagem das amostras e a obtenção dos recipientes, evidenciando a eficiência desta matéria-prima na obtenção de embalagens rígidas.

Na Figura 6 observa-se que a maior absorção de água em todas as amostras ocorreu no tempo de 15 minutos. Resultados comparáveis a esta pesquisa foram relatados por Zhang, Wang e Chen (2019) ao avaliar recipientes produzidos com fibra de madeira e fibra de cânhamo.

CONCLUSÃO

A farinha de vagem de algaroba utilizada nesta pesquisa apresentou afinidade com a matriz de amido de trigo e criou embalagens biodegradáveis com boa interação entre seus componentes, preferencialmente quando utilizada em baixas concentrações.

Nesta pesquisa observou-se que as diferentes concentrações das matérias-primas utilizadas não provocaram alterações significativas no estado estrutural dos recipientes biodegradáveis, nem influenciaram no comportamento das interações químicas.

Em termos de propriedades mecânicas, verifica-se que os recipientes com formulação T4 apresentaram os maiores valores de tensão de ruptura, com potencial para substituir embalagens comerciais. Este comportamento também foi observado nas análises de ângulo de contato e absorção de água, nas quais os recipientes da formulação T4 obtiveram as melhores propriedades de barreira à água.

Os resultados indicam que a farinha de vagem de algaroba possui alto potencial para utilização em biocompósitos de amido, permitindo-nos sugerir ao mercado uma nova opção de matéria-prima renovável.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, L.; MELO, S. L. S.; PAIVA, J. S. L. M.; DE DEUS, E. P. Characterization of sisal fibers by infrared, UV-Vis Diffuse Reflectance and Scanning Electron Microscopy. **Periódico Tchê Química**, v. 16, n. 5, p. 111-125, 2019. <http://www.deboni.he.com.br/Periodico31.pdf>
- Assis, R. Q. et al. Biodegradable packaging of cellulose acetate incorporated with norbixin, lycopene or zeaxanthin. **Industrial Crops and Products**, v. 147, n.5, p. 112-212, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112212>
- BIGNE, F.; PUPPO, M. C.; FERRERO, C. Mesquite (*Prosopis alba*) flour as a novel ingredient for obtaining a “panettone-like” bread. *Applicability of part-baking technology*. **LWT**, v. 89, n. 5, p. 666-673, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.11.029>
- CAZÓN, P.; VELAZQUEZ, G.; VÁZQUEZ, M. Novel composite films from regenerated cellulose-glycerol-polyvinyl alcohol: Mechanical and barrier properties. **Food Hydrocolloids**, v. 89, n. 9, p. 481-491, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.11.012>

CHACÓN, J. M. et al. Additive manufacturing of continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties. **Composites science and technology**, v. 181, n. 2, p. 107-688, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107688>

CRUZ-TIRADO, J. P. et al. The addition of sugarcane bagasse and asparagus peel enhances the properties of sweet potato starch foams. **Packaging Technology and Science.**, v. 32, n. 5, p. 227-237, 2019. <https://doi.org/10.1002/pts.2429>

ENGEL, J. B.; AMBROSI, A.; TESSARO, I. C. Development of biodegradable starch-based foams incorporated with grape stalks for food packaging. **Carbohydrate polymers**, v. 225, n. 5, p. 115-234, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115234>

FERREIRA, D. C. M.; MOLINA, G.; PELISSARI, F. M. Biodegradable trays based on cassava starch blended with agroindustrial residues. **Composites Part B: Engineering**, v. 183, n. 5 p. 107-120, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107682>

FOURATI, Y. et al. One-step processing of plasticized starch/cellulose nanofibrils nanocomposites via twin-screw extrusion of starch and cellulose fibers. **Carbohydrate polymers**, v. 229, n. 8, p. 1-26, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115554>

FRECZ, W. et al. The Influence of Chosen Plant Fillers in PHBV Composites on the Processing Conditions, Mechanical Properties and Quality of Molded Pieces. **Journals Polymers**, v. 13, n. 7, p. 1-19, 2021. <https://doi.org/10.3390/polym13223934>

FUENTES, R. A. et al. Development of biodegradable pots from different agroindustrial wastes and byproducts. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 30, n. 33, p. 10-26, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00338>

GABIRA, M. M. et al. Alternative substrates and containers for *Ilex paraguariensis* seedlings. **Acta Iguazu**, v. 9, n. 4, p. 78-87, 2020. <https://doi.org/10.48075/actaiguaz.v9i4.25492>

HAASE, D. L. et al. The High Cost of the Low-Cost Polybag System: A Review of Nursery Seedling Production Systems. **Land.**; v. 10, n. 826, p. 826-835, 2021. <https://doi.org/10.3390/land10080826>

INUBUSHI, K. et al. Effects of biodegradable plastics on soil properties and greenhouse gas production. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 68, n. 1, p. 183-188, 2022. <https://doi.org/10.1080/00380768.2021.2022437>

JUANGA-LABAYEN, J. P.; YUAN, Q. Making Biodegradable Seedling Pots from Textile and Paper Waste—Part A: Factors Affecting Tensile Strength. **International**

- Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 13, p. 1-9, 2021.
<https://doi.org/10.3390/ijerph18136964>
- LI, W. et al. Study on the compatible interface of bamboo fiber/polylactic acid composites by in-situ solid phase grafting. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 141, n. 16, p. 325-332, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.09.005>
- LOMELÍ-RAMÍREZ, M. G. et al. Comparative study of the characteristics of green and brown coconut fibers for the development of green composites. **BioResources**, v. 13, n. 6, p. 13: 1637-1660, 2018.
- MACHADO, C. M.; BENELLI, P.; TESSARO, I. C. Study of interactions between cassava starch and peanut skin on biodegradable foams. **International journal of biological macromolecules**, v. 147, n. 9, p. 1343-1353, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.098>
- MWANGI, W. et al. Substitution of Plastics with Organic Pots in Tree Seedlings Production for Sustainable Environmental Conservation. **East African Journal of Science, Technology and Innovation**, v. 2, n. 3, p. 1-15, 2021. <https://doi.org/10.37425/eajsti.v2i3.207>
- NASCIMENTO, C. E. S. et al. Seed germination and early seedling survival of the invasive species *Prosopis juliflora* (Fabaceae) depend on habitat and seed dispersal mode in the Caatinga dry forest. **Plant Biology**, v. 3, n. 1, p. 1-25, 2020.
- PARIDA, S. et al. Performance of Teak Seedlings in Different Biodegradable Containers. **Indian Forester**, v. 147, n. 7, p. 615-620, 2021. <http://indianforester.co.in/index.php/indianforester/article/view/155020>
- Rafidison, B. H. Using infrared spectrum analyses to predict tensile strength of fibres in a group of closely related plant species: case of *Mascarenes Pandanus* spp. **Applied Sciences**, v. 2, n. 22, p. 1-15, 2020. <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-020-03667-1>
- Salim, S.; Rihayat, T.; Riskina, S. Enhanced mechanical properties of natural fiber bamboo/pineapple leaf/coconut husk reinforced composites for application in bio-board. **Geomate Journal**, v. 19, n. 10, p. 168-174, 2020. : <https://doi.org/10.21660/2020.75.25955>
- Sani, M. A. et al. Carbohydrate-based films containing pH-sensitive red barberry anthocyanins: Application as biodegradable smart food packaging materials. **Carbohydrate Polymers**, v. 255, n. 4, p. 117-135, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117488>

- Santos, T. A. et al. Properties of chitosan–papain biopolymers reinforced with cellulose nanofibers. **Food Processing and Preservation**, v. 45, n. 7, p. 1-11, 2021. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15740>
- SILVA-GUZMÁN, J. A. et al. Properties of thermoplastic corn starch based green composites reinforced with Barley (*Hordeum vulgare* L.) straw particles obtained by thermal compression. **Fibers and Polymers**, v. 19, n. 3, p. 1970-1979, 2018.
- TAMODINI, B. et al. Biodegradable Materials for Planting Pots. *Advanced Applications of Bio-degradable*. **Green Composites**, v. 68, n. 7., p. 85-103, 2020. <https://doi.org/10.21741/9781644900659-4>
- TIAN, M; GAO, J; LIANG, H. Preparation and performance of biomass seedling containers made with straw and cow manure. **BioResources**, v. 14, n. 4, p. 9968-9980, 2019.
- TORRES, S. S. et al. Drying technology of mesquite pods (*Prosopis laevigata*) and microstructural insights. **British Food Journal**, v. 122, n. 9, p. 2953-2963, 2020. <https://doi.org/10.1108/BFJ-07-2019-0487>
- WORKU, L. A. et al. Experimental investigations on PVA/chitosan and PVA/chitin films for active food packaging using *Oxytenanthera abyssinica* lignin nanoparticles and its UV-shielding, antimicrobial, and antiradical effects. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 254, n. 20, p. 135-148, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127644>
- XIE, J; HUNG, Y. UV-A activated TiO₂ embedded biodegradable polymer film for antimicrobial food packaging application. **Lwt**, v. 96, n. 3, p. 307-314, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.05.050>
- XU, M. et al. The effect of repeated versus continuous annealing on structural, physicochemical, and digestive properties of potato starch. **Food Research International**, v. 111, n. 6, p. 324-333, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.05.052>
- ZHANG, X.; WANG, C.; CHEN, Y. Properties of selected biodegradable seedling plug-trays. **Scientia Horticulturae**, v. 249, n. 30, p. 177-184, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.01.055>
- ZHANG, X.; WANG, C.; CHEN, Y. Properties of selected biodegradable seedling plug-trays. **Scientia Horticulturae**, v. 249, n. 4, p. 177-184, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.01.055>