

## **TENDÊNCIAS ATUAIS SOBRE A INCORPORAÇÃO DE FIBRAS VEGETAIS EM MATRIZES POLIMÉRICAS: INFLUÊNCIA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS**

**Lucas Rafael Carneiro da Silva<sup>1\*</sup>, Themistocles de Sousa Campelo<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal do Piauí, Teresina, Piauí, Brasil. Correo electrónico: [vlrcs.carneiro@gmail.com](mailto:vlrcs.carneiro@gmail.com)

<sup>2</sup> Engenheiro de Materiais, Universidade Federal do Piauí, Teresina, Piauí, Brasil

*Recibido: Junio de 2021; Aceptado: Septiembre 2021*

### **RESUMO**

Atualmente, a comunidade científica tem empregado diferentes tipos de fibras vegetais como material de reforço para o desenvolvimento de compósitos poliméricos, uma vez que, tais fibras possuem características favoráveis para a produção de produtos sustentáveis, a saber: grande disponibilidade, renovabilidade, biodegradabilidade, baixo custo, atoxicidade e bom comportamento mecânico. Devido as aplicações promissoras com a utilização dessas fibras, este trabalho de cunho bibliográfico explanou fundamentado em diversas pesquisas atuais os diferentes tipos de fibras vegetais (algodão, bambu, cânhamo, coco, curauá, juta, pupunha, rami e sisal) e a sua atuação como material de reforço nas propriedades mecânicas finais de compósitos poliméricos. Observou-se nos trabalhos os benefícios resultantes do uso de fibras no comportamento mecânico dos compósitos, evidenciando as suas vantagens em termos de conservação ambiental, energética e de recursos.

**Palavras-chave:** Compósitos Poliméricos; Fibras Vegetais; Propriedades Mecânicas.

### **ABSTRACT**

Currently, the scientific community has used different types of vegetable fibers as reinforcement material for the development of polymeric composites, since such fibers have favorable characteristics for the production of sustainable products, namely: high availability, renewability, biodegradability, low cost, non-toxicity and good mechanical behavior. Due to the promising applications with the use of these fibers, this bibliographical work explained, based on several current researches, the different types of vegetable fibers (cotton, bamboo, hemp, coconut, curauá, jute, peach palm, ramie and sisal) and their performance as reinforcement material in the final mechanical properties of polymeric composites. It was observed in the works the benefits resulting from the use of fibers in the mechanical behavior of composites, showing its advantages in terms of environmental, energy and resource conservation.

**Keywords:** Polymeric composites; Vegetable fibers; Mechanical properties.

### **INTRODUÇÃO**

Diversos processos industriais juntamente com o público em geral e o setor comercial geram, anualmente, enormes quantidades de resíduos e subprodutos, o que compromete o seu manuseio com as tecnologias disponíveis devido à excessiva quantidade desses resíduos, portanto, são necessárias soluções para o reaproveitamento desses materiais visando atingir o desenvolvimento econômico de modo sustentável. Atualmente, os pesquisadores tem procurado novas aplicações para esses resíduos e subprodutos, no qual, os produtos produzidos terão um valor agregado em função do uso de matéria-prima ecologicamente correta [1, 2]. Há inúmeros tipos de resíduos industriais, no entanto, o interesse dos pesquisadores se concentra na utilização de fibras naturais em vez de fibras sintéticas na produção de compósitos poliméricos [3–6]. Foi relatado que as fibras naturais são caracterizadas como materiais abundantes, sustentáveis, biodegradáveis e de

baixa densidade (1,25–1,50 g/cm<sup>3</sup>) [7, 8]. A resistência das fibras naturais é menor do que a resistência das fibras de vidro, entretanto, o módulo de *Young* apresenta-se como sendo da mesma ordem de magnitude. Se o módulo específico (módulo por unidade de gravidade específica) das fibras naturais é levado em consideração, é então observado que para as fibras naturais os valores são semelhantes ou até melhores do que os das fibras de vidro. Outro ponto interessante é que as fibras naturais possuem o preço cerca de 70% inferior ao das fibras de vidro [9], além de serem cerca de 35–40% mais leves [10]. As principais funções que uma fibra deve desempenhar quando incorporadas ao compósito polimérico são: evitar fenômenos de rachadura por contração, aumentar a tenacidade à fratura de materiais frágeis e desenvolver comportamento de endurecimento por deformação. Apesar das vantagens ambientais das fibras naturais em comparação com as fibras sintéticas, as suas desvantagens apresentam-se como uma maior absorção de umidade, baixa estabilidade térmica e menor resistência ao impacto [11–13]. De acordo com *Ferreira et al.* [14] a absorção de umidade provoca uma instabilidade volumétrica, resultando em uma perda parcial da interação entre a fibra–matriz e prejudicando a zona de transição interfacial.

Os compósitos desenvolvidos com a incorporação de fibras naturais tem as suas propriedades finais influenciadas por diversos fatores, como a origem da fibra (folha, fruta etc.), o alinhamento da fibra (multidirecional e/ou unidirecional), o tipo de matriz polimérica, o tamanho do cristalito e índice de cristalinidade da fibra, a fração de peso da fibra, os grupos funcionais superficiais e se a fibra foi ou não modificada quimicamente (fibra tratada ou *in natura*). É importante salientar que grande parte dos compósitos poliméricos incorporados com fibras naturais são produzidos empregando uma matriz sintética, resultando em materiais com baixa biodegradabilidade [15, 16]. O material polimérico serve de ligante para as fibras de reforço, sendo a matriz escolhida conforme a aplicação final do compósito produzido [17–19]. Os polímeros são os materiais mais conhecidos no qual as fibras naturais são incorporadas para alterar a sua forma produzindo, deste modo, compósitos poliméricos sustentáveis [20]. Vale também ressaltar que os polímeros desempenham um importante papel como materiais de aplicações modernas em vários setores de manufatura, sendo as suas principais vantagens em relação a outros materiais atribuídas ao fácil processamento, as altas razões entre resistência/densidade, a sua resistência à degradação química e física e ao custo relativamente baixo de muitas resinas. O consumo de polímeros em escala mundial cresce a uma taxa anual de 5%, sendo o consumo total anual superior a 300 milhões de toneladas [21].

As pesquisas sobre os compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais foram iniciadas por volta da década de 1970 [22]. As fibras naturais são constituídas, principalmente, por diferentes teores de celulose, hemicelulose, lignina, pectina, cinzas e umidade que,

consequentemente, alteram as características das paredes celulares, estrutura cristalina e aplicação da fibra [23–25]. As fibras com um alto teor de celulose possui os maiores valores de resistência [7]. Sobre a umidade das fibras foi relatado que a sua presença influencia na durabilidade do compósito, ou seja, em “compósitos secos” as fibras apresentam um comportamento de fratura frágil e em “compósitos saturados” ocorre um maior mecanismo de arrancamento das fibras [26]. Como reforço para a matriz polimérica existem disponíveis três tipos de fibras naturais de diferentes origens, isto é, animal, mineral e vegetal, tendo a maior aplicação as fibras de origem vegetal [27]. A seda e a lã são os exemplos de fibras animais, e para as fibras minerais os representantes são o amianto e a wollastonita. Já para as fibras vegetais existem inúmeros exemplos, como o algodão, a juta, o sisal etc. Os benefícios da utilização em larga escala de fibras vegetais como matéria-prima para compósitos são imensos, sobretudo, em termos de conservação ambiental, energética e de recursos [28]. A estrutura de uma única fibra vegetal tem em sua composição o lúmen, uma cavidade central (responsável pela absorção de água da planta) e várias camadas de parede (microfibrilas de celulose revestidas com hemicelulose) [29]. As perspectivas para a aplicação de compósitos reforçados com fibras vegetais incluem as seguintes áreas: de embalagens, automotiva, engenharia aeroespacial etc. [30, 31].

Inúmeras pesquisas foram realizadas utilizando técnicas de modificação química com o intuito de aperfeiçoar a ligação interfacial entre a matriz polimérica e a fibra, uma vez que, o não tratamento químico da superfície da fibra acarreta em sua má adesão e dispersão na matriz, além de uma limitada estabilidade térmica dos compósitos desenvolvidos. Portanto, tais desvantagens podem ser superadas pelo tratamento adequado das fibras [32–35]. As técnicas mais empregadas são os tratamentos químicos, físicos e biológicos, bem como, o uso de agentes de acoplamento, tendo os do tipo químico recebido o maior destaque. Dentre esses tratamentos, o tratamento alcalino vem sendo apontado como a técnica mais efetiva na remoção de hemicelulose, lignina e pectina das fibras, pois a remoção desses componentes expõe a celulose e aumenta a rugosidade superficial, melhorando a ligação interfacial. Essa melhoria ocorre porque a celulose exposta na superfície fornece grupos hidroxila (OH) capazes de reagirem com os agentes de acoplamento, a título de exemplo, o anidrido maléico [30, 36–38]. Em geral, cada tipo de fibra vegetal possui uma morfologia e um desempenho característico quando submetido a um tratamento superficial, sendo o diâmetro variável e ainda não controlável [39].

Diante desse contexto, o número de artigos publicados sobre o tema e os diferentes resultados obtidos em termos de propriedades mecânicas nos levaram a preparar o presente artigo bibliográfico, no qual, descreve fundamentado em pesquisas atuais os diferentes tipos de fibras

vegetais e seu papel como reforço em compósitos poliméricos, seja de matriz termoplástica ou termofixa.

## FIBRAS VEGETAIS COMO REFORÇO PARA COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

**Fibra de algodão.** O algodão é constituído majoritariamente por celulose, correspondendo a 90% em peso, tendo a porcentagem de seus componentes variando em função do tipo de algodão e da época de colheita [23, 40]. A América, Ásia e África possuem os maiores locais de produção de algodão e a China se consagrou como o país com a maior produção do mundo [41]. Estima-se que aproximadamente um terço da produção mundial de algodão diz respeito a fibras de algodão, que são bastante utilizadas no setor têxtil para a produção de roupas jeans. Em 2014 foram produzidas 25,8 milhões de toneladas de algodão em escala mundial, e o prognóstico é que nos próximos 10 anos ocorra um crescimento anual de 2,1% [42, 43]. As fibras de algodão tem recebido uma grande atenção para a sua incorporação em compósitos em função de seu bom desempenho mecânico [44], entretanto, na indústria de materiais plásticos o potencial dessas fibras ainda não é explorado eficientemente, pois existe uma dificuldade durante o processamento devido as altas temperaturas e a necessidade da utilização de estabilizantes, compatibilizantes e outros aditivos [23].

*Mahdi e Dean* [45] estudaram a influência do teor de fibra de algodão (0, 10, 20, 30, 40 e 50% em peso) nas propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno/fibra de algodão (PP/FA) e poli(cloreto de vinila)/fibra de algodão (PVC/FA). Os resultados obtidos exibiram que a capacidade de absorção de energia diminuiu com o aumento do teor de fibra. Os compósitos à base de PP e PVC apresentaram o índice de ductilidade baixo, caracterizando um comportamento frágil, bem como, uma resistência à tração que foi reduzida, salvo algumas exceções. Houve um aumento na rigidez (módulo de elasticidade) para ambos os compósitos. Os autores observaram que as características de danos em microescala resultantes do teste de tração indicaram que o material apresentou falha por cisalhamento, rachadura da matriz e quebra, fratura e arrancamento da fibra. *Kamble e Behera* [46] desenvolveram compósitos à base de resina epóxi reforçados com fibras de algodão e poliéster (0,1; 0,2; 0,3 e 0,4%). Os compósitos de epóxi/fibras de poliéster apresentaram a resistência à tração e ao impacto mais alta do que os compósitos de epóxi/fibras de algodão, contudo, a resistência à flexão dos reforçados com fibras de algodão foi superior. A resistência do rolamento em uma junta fixada para os compósitos de epóxi/fibras de poliéster foi maior do que para os compósitos de epóxi/fibras de algodão.

**Fibra de bambu.** O bambu é uma planta que tem um rápido crescimento em comparação com as outras plantas, tornando-o amplamente disponível. É constituído por cerca de 60% de celulose com um alto teor de lignina [47], e por isso pertence à família das fibras de celulose [48], contudo, o bambu possui outros componentes, como o amido, sacarídeo desoxidado, gordura e

proteína. Conforme *Asrafuzzaman et al.* [49] as fibras de bambu também são conhecidas como “fibra de vidro natural” e estão recebendo cada vez mais consideração da comunidade científica. Toda essa consideração se deve ao fato de que essas fibras possuem uma baixa densidade, alta rigidez e resistência, todavia, é importante frisar que as fibras de bambu não podem ser obtidas diretamente do colmo de bambu, sendo necessário diversos tratamentos para a sua obtenção [50]. Esses colmos são caracterizados como sendo ocos e com vários diafragmas que dividem cada colmo internamente, onde, tais divisões são visualizadas externamente na forma de anéis, e a região entre os anéis é denominada de “entrenó”, que é onde os ramos crescem [49]. Os compósitos reforçados com fibra de bambu são aplicados na área farmacêutica, automotiva, moveleira, biomédica, construção e eletrônica [51].

No trabalho de *Chin et al.* [50] foram produzidos compósitos à base de três resinas termofixas (epóxi, poliéster e vinil éster) e fibras de bambu (*Gigantochloa scortechinii*), com frações de volume de fibra variando de 0 a 40%. As propriedades mecânicas por meio dos testes de tração e flexão foram investigadas. Os resultados mostraram que as propriedades de tração e flexão dos compósitos foram consideradas diretamente proporcionais às frações de fibra, tendo o compósito produzido a partir de epóxi/fibra de bambu (40%) alcançado a maior resistência à tração e flexão em comparação as outras resinas. *Hong et al.* [52] desenvolveram compósitos de polibutileno succinato/fibras de bambu (5 g) modificadas com (3-aminopropil) trietoxissilano e polidopamina. Uma melhoria no reforço foi obtida juntamente com ganhos no desempenho: resistência à tração (70%), flexão (37%) e ao impacto (63%), bem como, módulo de tração (25%) e flexão (24%). Os compósitos do trabalho de *Hussain et al.* [53] foram produzidos à base de epóxi/fibras de bambu (10, 20 e 30% em peso) e tiveram as propriedades mecânicas avaliadas (resistência à tração, flexão e ao impacto). A resistência à tração aumentou de 13,51 MPa para 33,50 MPa, tal como, a resistência à flexão (24,25 MPa para 44,5 MPa) e ao impacto (41 kJ/m<sup>2</sup> para 69 kJ/m<sup>2</sup>).

**Fibra de cânhamo.** A *Cannabis sativa* é a espécie de cânhamo mais empregada para a produção de fibras vegetais, por isso possui uma grande importância industrial [54], tendo aplicação em diversas áreas, como na construção, têxtil, alimentos, automóveis etc. [32]. Podem ser encontradas para esse tipo de fibra duas formas principais, a saber: industrial (extraída do líber) e manila (extraída das folhas) [55]. Ressalta-se que essas fibras são mais ecológicas do que a maioria das fibras, uma vez que, podem ser cultivadas sem o uso de pesticidas e herbicidas [56]. Informações arqueológicas mostram que a fibra de cânhamo é a fibra mais antiga já descoberta, pois conforme a *Columbia History of the World* uma das relíquias mais antigas são pedaços de tecido de cânhamo encontrados em tumbas que datam em torno de 8.000 a.C [57]. A fibra de cânhamo é

considerada como sendo uma das mais fortes e rígidas, desta maneira, possui um grande potencial para ser aplicado como material de reforço em compósitos. Alguns dados de suas propriedades mecânicas são: resistência à tração em torno de 690 MPa; módulo de *Young* de 30 a 60 GPa e tensão de tração final de cerca de 1,6%. Em sua composição há aproximadamente 74% de celulose, 14% de hemicelulose, 5% de lignina, 1% de pectina e 6% de outras substâncias. Os caules do cânhamo são, normalmente, degradados para permitir que a fibra seja separada do núcleo lenhoso em um processo chamado de amarração [11, 58]. A fibra de cânhamo dispõe de aplicações históricas que contribuíram para o seu grande uso, como em 1941 quando *Henry Ford* tentou utilizar compósitos poliméricos incorporados com fibras de cânhamo no setor automotivo, bem como, as esquadrias e os revestimentos de piso produzidos de compósitos poliméricos reforçados com fibras de cânhamo das *Olimpíadas de Pequim* em 2008 [57].

*Koushki et al.* [59] desenvolveram um compósito elastomérico inovador através de impressão 3D reforçado com fibras de cânhamo (10, 15 e 20% em peso) no silicone. Os resultados exibiram que o teor de 15% de fibra provocou o aumento na resistência à tração em 61% e no módulo em 89% dos compósitos, em comparação com o silicone puro. *Neves et al.* [60] produziram compósitos à base de epóxi e poliéster reforçados com fibras de cânhamo (10, 20 e 30% em volume). Com 30% de fibra os compósitos de matriz epóxi apresentaram a resistência superior em relação com os de matriz poliéster. Para os compósitos epóxi a resistência à flexão (76,7 MPa) e tração (50,5 MPa), são maiores do que 49,1 e 25,4 MPa, respectivamente, para os compósitos de matriz poliéster. No trabalho de *Angulo et al.* [61] os compósitos foram produzidos utilizando sacolas de supermercado recicladas de polietileno de alta densidade e fibras de cânhamo (30, 40 e 50% em peso). Um aumento de cerca de 10 MPa na resistência à tração e flexão foi alcançado ao utilizar a combinação otimizada dos materiais de matriz reciclada e virgem com 40 e 50% em peso de reforço, respectivamente.

**Fibra de coco.** Em áreas tropicais e subtropicais o cultivo de coco é abundante em diversos países, e por isso esse fruto desempenha um papel importante no desenvolvimento econômico [62]. Em solo brasileiro, o coco verde (*Cocos nucifera* L.) faz parte de monoculturas plantadas para obtenção de alimentos em larga escala e, como resultado, os resíduos em forma de fibras são abundantes, pois o mesocarpo do coco possui uma apreciável fração desse material. Em torno de 80 a 85% do peso bruto do coco está relacionado com a casca (mesocarpo) que ainda não foi totalmente aproveitada pela indústria, e a sua fibra é composta por lignina (35–45%), celulose (23–43%) e hemicelulose (3–18%) [63–65]. Dois tipos de fibras de coco são conhecidas, isto é, a fibra marrom proveniente de cocos maduros e a fibra branca extraída de cocos prematuros. As fibras marrons são grossas, fortes e possuem alta resistência à abrasão, já as fibras brancas são lisas,

finas e fracas [66]. Foi relatado que as fibras de coco possuem a maior tenacidade entre todas as fibras naturais, sendo capazes de suportar de 4 a 6 vezes mais tensão [67, 68]. A utilização da casca para a obtenção de fibras e, posteriormente, a aplicação dessas fibras em matrizes poliméricas, é uma solução possível para a redução dos danos ao meio ambiente.

*Amoako et al.* [69] desenvolveram um material compósito empregando polietileno e fibras de coco (30% em peso). Os resultados mostraram que com o aumento do teor de fibra a carga necessária para comprimir a amostra também aumentou, indicando um aumento na resistência do compósito. A capacidade de suporte de carga aumentou em 120% com a incorporação de 450,5 g de fibras à amostra controle, e aumentou ainda mais para 800% quando o teor de fibra foi aumentado para 804,4 g. Com 100 g de fibras incorporadas na matriz de polietileno a flexão aumentou cerca de 5,73% e em 31,46% com 450 g. *Moura et al.* [63] avaliaram mecanicamente o compósito produzido de polihidroxibutirato e fibras de coco (10 e 20% em peso). Os resultados de tração exibiram que o módulo de tração desses compósitos aumentou com o aumento do teor de fibras. A incorporação de 10% de fibras contribuiu para o aumento do módulo de elasticidade, entretanto, a estrutura longitudinal da fibra não colaborou para o aumento da ductilidade dos compósitos em relação a matriz polimérica pura. *Hidalgo-Salazar et al.* [70] produziram compósitos à base de uma blenda (polipropileno/polietileno de alta densidade) e fibras de coco (10, 20 e 30% em peso). A incorporação de fibras provocou um aumento no módulo de tração (78%) e flexão (99%) em relação a blenda pura. A análise dinâmico mecânica mostrou que a fibra de coco melhorou a capacidade de mistura da blenda para absorver cargas externas mais altas, enquanto exibiu um desempenho elástico mantendo suas características em maiores temperaturas.

**Fibra de curauá.** As folhas da planta *Ananas erectifolius* é uma fonte para a extração de fibras de curauá, que é caracterizada como sendo uma bromélia muito cultivada na região amazônica do *Norte do Brasil* [71–73], com o diâmetro da fibra variando de 50 a 120  $\mu\text{m}$  [74]. Depois de um ano de plantio as folhas já podem ser colhidas, e essa colheita varia de 7 a 20 folhas por planta, dependendo da disponibilidade das folhas maduras (comprimento médio de 1,5 m) que produzem de 7 a 10% de fibra seca [75]. Após a extração das folhas, a próxima etapa é a de lavagem para remover os resíduos e impurezas que são chamadas de mucilagem. Essa etapa é relevante para que as fibras possam ter uma maior durabilidade, pois os resíduos podem causar o crescimento de fungos em sua superfície, reduzindo o seu tempo de uso. É necessário que as fibras após a lavagem sejam secas em condições naturais por 48 h, logo após, as fibras são amarradas em feixes prontas para serem utilizadas. Das folhas podem ser extraídas dois tipos de fibras: a fibra poligonal (localizada perto das bordas) que proporciona rigidez e resistência e a fibra em arco ou ferradura (localizada no meio da seção transversal da folha), também chamada de fibra vascular,

sendo responsável pelo transporte de água e nutrientes [76]. A composição das fibras de curauá engloba a celulose (65%), hemicelulose (15%) e lignina (7,3%), e essa fibra possui um alto grau de cristalinidade (67–75%) [77]. Em comparação com outras fibras, como juta, sisal e cânhamo, a fibra de curauá não é muito conhecida, entretanto, as suas propriedades de tração estão entre as mais altas, tornando promissora a sua incorporação como reforço em matrizes poliméricas para aplicações de engenharia [78–80]. Algumas de suas propriedades são: uma densidade relativamente baixa de 0,57–0,92 g/cm<sup>3</sup>; alta resistência à tração de 3.000 MPa e módulo de *Young* de 80 GPa [81].

*Delgado–Aguilar et al.* [82] desenvolveram compósitos à base de polipropileno incorporados com fibras de curauá (20, 30, 40, 50 e 60% em peso) frente à fibra de vidro. Os compósitos reforçados com curauá apresentaram propriedades de tração similares aos compósitos reforçados com fibras de vidro com 20% em peso a menos do teor de reforço. Os autores propuseram como teste uma maçaneta para o interior de um carro com o objetivo de avaliar a possibilidade de substituição de um compósito de polipropileno/fibras de vidro para um material reforçado com fibras de curauá. Os resultados desse teste mostraram que essa substituição foi possível na seguinte condição: polipropileno/fibras de vidro (20% em peso) por um material reforçado com 40 ou 50% em peso de fibras de curauá del *Pino et al.* [83] investigaram a influência de uma argila organofílica (2,5; 5 e 10% em peso) e fibras de curauá tratadas (20% em peso) nas propriedades mecânicas de compósitos de matriz epóxi. As propriedades de resistência à tração, à flexão e ao impacto aumentaram em 24, 44 e 47%, respectivamente, quando comparadas aos compósitos com fibras não tratadas. Os melhores resultados de resistência à tração e flexão foram obtidos pelos compósitos híbridos reforçados com 5% de argila e 20% de fibras tratadas. Por outro lado, o módulo de tração mais significativo foi alcançado no compósito híbrido com fibras não tratadas e 10% de argila. A maior resistência ao impacto foi obtida pelo compósito reforçado com fibras de curauá tratadas e sem a argila, pois a argila levou a redução da resistência ao impacto.

**Fibra de juta.** A juta é uma planta pertencente à família *Tiliaceae* que dispõe de cerca de 30–40 espécies de juta, sendo as mais cultivadas a juta branca (*Corchorus capsularis*) e juta tossa (*Corchorus olitorius*). A fibra de juta na planta tem a função de floema, ou seja, é responsável por carregar a seiva produzida pela planta. Os principais constituintes da fibra são a celulose (61–73%), hemicelulose (13,6–23%) e lignina (12–16%), porém, também estão presentes pequenos teores de pectina, gorduras e ceras. Tais constituintes tem o seu teor variado em decorrência da época de colheita, das condições do solo e das técnicas de maceração utilizadas, podendo ser maceração com água, orvalho ou enzimas [84–87]. A *Índia, China, Bangladesh, Tailândia e Nepal* são os principais países do mundo que produzem as fibras de juta e juntos representam cerca de 95% da produção

mundial, sendo aplicadas nos setores de construção, naval, aeroespacial e automotivo [88]. Em relação ao seu desempenho mecânico, a sua resistência à tração está entre a faixa de 393–773 MPa [89]. Outras características como o baixo custo e a não abrasividade da fibra de juta permitem a utilização de altos níveis de enchimento, resultando em uma economia de custos na manufatura de compósitos [90].

No trabalho de Wang *et al.* [91] foi discutido a influência do tratamento químico das fibras de juta nas propriedades físicas e mecânicas de compósitos de epóxi/fibras de juta (8, 10, 12% em peso). Segundo os resultados obtidos os compósitos produzidos com fibras tratadas apresentaram melhores propriedades de resistência à tração, alongamento na ruptura, fração de vazios e adesão interfacial. Os resultados sugeriram que o tratamento químico realizado nas fibras melhorou a ligação interfacial à matriz, acarretando em melhores propriedades mecânicas. Reddy *et al.* [92] prepararam compósitos à base de poli(ácido láctico)/fibras de juta (5, 10, 15 e 20% em peso) e avaliaram a resistência à tração e flexão. No teor de 15% de fibras a resistência à tração foi de 25% e flexão de 116% maior do que o PLA puro, bem como, o módulo de tração e flexão do compósito com esse mesmo teor foi de 1,55 e 1,87 vezes maior, respectivamente. Ocorreu uma mudança significativa nas propriedades de tração e flexão da matriz de PLA quando reforçada com as fibras de juta. Yokesahachart *et al.* [93] produziram compósitos de amido termoplástico/poli(ácido láctico)/poli(butileno adipato co-tereftalato)/fibras de juta (5, 10 e 15% em peso), com a razão da blenda ternária de 60:30:10, respectivamente. O material resultante mostrou um maior módulo de Young e de armazenamento com o aumento do teor de fibras, entretanto, o alongamento na ruptura e a resistência ao impacto sofreram uma redução em comparação com o compósito sem a incorporação de fibras.

**Fibra de pupunha.** O país que mais produz e consome palmito é o Brasil [94], correspondendo em torno de 85% da demanda mundial. A palmeira *Bactris gasipaes* utilizada para a produção de palmito é a que mais tem sido cultivada no país, contudo, existe uma preocupação em relação aos resíduos produzidos na etapa de extração do palmito [95]. Para se ter um entendimento dessa realidade, foi dito que o volume de resíduos gerados durante a extração é cerca de 37% de toda a matéria vegetal que chega à indústria, sendo esses resíduos, geralmente, aplicados na alimentação animal ou compostados para uso posterior como fertilizante [96]. A palmeira que fornece o palmito é formada por três camadas principais, que são as bainhas interna, intermediária e externa, sendo as duas últimas bainhas altamente fibrosas [39]. Por essa razão, encontrar aplicações para essas fibras é muito atraente do ponto de vista ambiental e econômico. Alguns esforços têm sido realizados para tal objetivo, como o desenvolvimento de novos compósitos ou na fabricação de painéis aglomerados [97, 98].

Cordeiro *et al.* [99] produziram compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras de pupunha (50–70% em peso) oriundas da produção agroindustrial do palmito pupunha. Os resultados mostraram que o Módulo de Young dos compósitos aumentou em comparação com a resina pura. Em função do tratamento químico das fibras, ocorreu uma melhoria da resistência ao impacto, graças a interação da fibra/matriz que atingiu o desempenho mecânico citado. A incorporação das fibras acarretou em um aumento considerável do módulo de armazenamento na região borrachosa, obtido com base na análise dinâmico–mecânica. Martins *et al.* [100] produziram compósitos (A, B, C e D) de amido de mandioca com a incorporação de nanofibrilas de celulose extraídas da bainha externa da pupunha (A = 0,25 g; B = 0,29 g; C = 0,33 g; D = 0,37 g). O compósito reforçado com 0,37 g (D) de nanofibrilas de celulose exibiu a maior resistência à tração e o menor alongamento, e o compósito com o menor teor (A) teve a resistência à tração aumentada em 90% e uma redução de 78% no alongamento. Além disso, a baixa diferença no teor entre os compósitos A e D (0,12%), proporcionou um aumento de aproximadamente 113% na resistência à tração, isto é, de 6,42 MPa (A) para 13,70 MPa (D).

**Fibra de rami.** O rami (*Boehmeria nivea*) é uma planta herbácea perene da família *Urticaceae* nativa da *Ásia Oriental*, sendo também chamado de “grama chinesa”. Em torno de 90% do rami produzido no mundo é cultivado na *China*, podendo ser colhido três vezes por ano. O tempo de vida do rami é cerca de 7–20 anos, podendo crescer até 2,5 m de altura [101, 102]. Do rami é extraída a fibra de rami [103], que dispõe de duas variedades principais: fibra de rami da *China* e da *Índia*. A fibra da *China* é conhecida como “rami branco” e a da *Índia* como “rami verde” [104]. As células de fibra das fibras de rami são longas com o comprimento variando entre 110 e 140  $\mu\text{m}$ , sendo quase seis vezes maior do que a fibra de algodão e quase oito vezes maior do que a fibra de seda [105]. Através de um processo denominado de “degomagem” os materiais gomosos das fibras de rami são eliminados, antes que o processamento industrial efetivo ocorra. A fibra de rami apresenta uma alta resistência, propriedades antibacterianas e retardantes de chamas [106, 107]. O diâmetro da fibra influencia diretamente a resistência à tração, foi relatado que as fibras de rami com 60–140  $\mu\text{m}$  possui a resistência por volta de 400 a 938 MPa, e com 25  $\mu\text{m}$  foi obtido uma resistência de 1.500 MPa. Possuindo um desempenho mecânico favorável, os compósitos com fibras de rami são materiais estruturais atraentes para aplicação em portas, painéis e móveis, bem como, podem competir com outros compósitos incorporados com fibra lignocelulósica para componentes automotivos [108].

Kumar e Anand [104] desenvolveram compósitos à base de matriz epóxi reforçados com fibra de rami indiana (0 a 40% em peso). Os resultados apresentaram que os compósitos com 30% de fibra obtiveram as maiores propriedades mecânicas entre os compósitos desenvolvidos. Foi

alcançado um aumento na resistência à tração (75%), flexão (163%) e impacto (94%) em comparação a matriz pura. *Yang et al.* [109] manufacturaram compósitos de poli(ácido láctico)/fibra de rami através de uma nova tecnologia que está fundamentada em trançado bidimensional (2D) e tecelagem tridimensional (3D). A resistência à tração dos compósitos de fio de camada de fibra de rami sofreu um aumento e, depois, reduziu com o aumento da razão de torção, atingindo a resistência máxima (60,4 MPa) quando a razão foi de 0,3. As propriedades de flexão e cisalhamento dos compósitos à base de poli(ácido láctico)/fibra de rami 3D (50% em peso) atingiram o máximo sob condições ideais de cura (190°C/5 MPa/30 min). *Zhan et al.* [110] avaliaram a resistência mecânica dos compósitos de poli(ácido láctico)/fibra de rami (30% em peso) com a incorporação do compatibilizante triglicidilisocianurato (TGIC) ou tratando as fibras com silano, hidróxido de sódio (NaOH) ou a combinação de silano e NaOH. Tanto o tratamento químico quanto a mistura de TGIC melhoraram o desempenho mecânico dos compósitos produzidos. A resistência à tração e à flexão aumentaram em 49,8 e 46,5%, respectivamente.

**Fibra de sisal.** A fibra de sisal é extraída das folhas da planta *Agave sisalana* [111], onde, uma folha de sisal em geral tem entre 1–1,5 m de comprimento e 10 cm de largura, e possui uma cor que varia do branco cremoso ao verde amarelado [112]. O sisal é largamente cultivado na Índia, Brasil, África Oriental e Indonésia, e após a colheita das folhas as fibras de sisal são produzidas mediante as seguintes etapas: secagem, escovação e remoção da sujeira. As fibras superiores extraídas da camada superior da folha são fortes e as interiores são fracas. A sua composição consiste em 43–56% de celulose, 21–24% de hemicelulose, 7–9% de lignina e 0,6–1,1% de cinzas, tendo como as principais aplicações a indústria automobilística, de chinelos e carpetes [27, 112, 113]. A fibra de sisal possui propriedades desejáveis associadas à sua baixa densidade (1,26–1,50 g/cm<sup>3</sup>), alta resistência (287–913 MPa) e alto módulo de elasticidade (9–28 GPa) [114].

*Ngaowthong et al.* [115] produziram compósitos à base de polipropileno e poli(ácido láctico) reforçados com fibra de sisal (10, 20 e 30% em peso). A incorporação de fibras de sisal não afetou de forma significativa a resistência à tração, porém, aumentou o Módulo de Young dos compósitos. No trabalho de *Samouh et al.* [116] foi investigado a influência do teor de fibra de sisal (5, 10 e 15% em peso) nas propriedades mecânicas de compósitos à base de poli(ácido láctico). Os resultados exibiram que o aumento do teor de fibra de sisal melhorou a resistência à tração, o módulo de tração flexural e as propriedades de impacto. É interessante ressaltar que o poli(ácido láctico) é um polímero rígido, e o aumento do teor de fibra provocou uma melhoria das propriedades de impacto charpy, portanto, o compósito resultante tem uma maior resistência e resistência ao impacto ao mesmo tempo. *Liang et al.* [117] produziram dois tipos de compósitos de poli(ácido láctico) reforçados com fibra de sisal (10, 20, 30 e 40% em peso) com diferentes

comprimentos de fibra. Segundo os resultados alcançados, o compósito com fibras longas exibiu uma melhoria na resistência à tração e flexão ou módulo com o aumento do teor de fibra. Em virtude da baixa compatibilidade entre a matriz e a fibra, a incorporação de fibras curtas acarretou em uma redução da resistência à tração. O alongamento na ruptura de ambos os compósitos diminuiu com a incorporação de fibras, contudo, a diminuição nos compósitos de fibras longas foi menor do que nos de fibras curtas. A resistência ao impacto dos compósitos de fibras longas foi significativamente melhorada em comparação com a matriz pura e os compósitos de fibras curtas.

## CONCLUSÕES

O emprego de materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais tem atraído a atenção de inúmeros pesquisadores e indústrias, visto que, esses materiais exibem diversas vantagens, como baixa densidade, biodegradabilidade, abundância, boas propriedades mecânicas e menor custo quando comparados aos compósitos sintéticos. Tais vantagens proporcionam a esses materiais a sua aplicação em diferentes áreas, a saber: automotiva, biomédica, engenharia aeroespacial, embalagens, farmacêutica, moveleira, eletrônica etc. Embora as fibras vegetais apresentem todas essas vantagens, foi constatado uma limitação em comum das fibras aqui explanadas: a baixa resistência à umidade e a fraca compatibilidade entre matriz e fibra. À vista disso, observou-se que os autores, normalmente, utilizam algum tipo de tratamento químico objetivando diminuir a absorção de umidade das fibras e melhorar a ligação interfacial formada pela matriz-fibra. A utilização de fibras vegetais como reforço apresentou resultados positivos em muitas propriedades mecânicas, com base em diferentes matrizes poliméricas e variados teores de fibra. Vale ressaltar que para acontecer novos avanços nessa área de estudo, é necessário a realização de mais pesquisas para um melhor entendimento das interações entre as fibras vegetais e a matriz.

## REFERÊNCIAS

- [1] Eduardo AF, Nóbrega MV, Ferreira RLS, *Matéria*, **26**(2), 1 (2021)
- [2] Taye EA, Roether JA, Schubert DW, Redda DT, Boccaccini AR, *Materials*, **14**(3), 511 (2021)
- [3] Pereira AL, Banea MD, Neto JSS, Cavalcanti DKK, *Polymers*, **12**(4), 866 (2020)
- [4] Ferrara G, Pepe M, Toledo Filho RD, Martinelli E, *Polymers*, **13**(5), 715 (2021)
- [5] Lima LDPFC, Rodríguez CDC, Hernandez JHM, *Polymers*, **13**(12), 2007 (2021)
- [6] Lopes MDM, Pádua MS, Carvalho JPRG, Simonassi NT, Lopez FPD, Colorado HA, Vieira CMF, *J. Mater. Res. Technol.*, **12**, 2317 (2021)
- [7] Sanivada UK, Mármol G, Brito FP, Fangueiro R, *Polymers*, **12**(10), 2373 (2020)
- [8] Yang T, Hu L, Xiong X, Petru M, Noman MT, Mishra R, Militký J, *Sustainability*, **12**(20), 8477 (2020)
- [9] Sepe R, Bollino F, Boccarusso L, Caputo F, *Compos. B: Eng.*, **133**, 210 (2018)
- [10] Sanvezzo PB, Branciforti MC, *Ind. Crops Prod.*, **168**, 113568 (2021)
- [11] Candamano S, Crea F, Coppola L, De Luca P, Coffetti D, *Constr. Build. Mater.*, **273**, 121720 (2021)
- [12] Manral A, Bajpai PK, *Mater. Today: Proc.*, **34**, 546 (2021)
- [13] Venkatarajan S, Athijayamani A, *Mater. Today: Proc.*, **37**, 3620 (2021)
- [14] Ferreira SR, Andrade Silva F, Lima PRL, Toledo Filho RD, *Constr. Build. Mater.*, **139**, 551 (2017)
- [15] Al-Maharma AY, Sendur P, *Mater. Res. Express*, **6**(2), 022001 (2018)
- [16] Venkatarajan S, Subbu C, Athijayamani A, Muthuraja R, *Mater. Today: Proc.*, 1 (2021)
- [17] Ababayehu SG, Engida AM, *Int. J. Polym. Sci.*, **2021**, 1 (2021)

- [18] Hsissou R, Seghiri R, Benzekri Z, Hilali M, Rafik M, Elharfi A, *Compos. Struct.*, **262**, 113640 (2021)
- [19] Mahmud S, Hasan KMF, Jahid MA, Mohiuddin K, Zhang R, Zhu J, *J. Mater. Sci.*, **56**, 7231 (2021)
- [20] Tonk R, *Mater. Today: Proc.*, **37**, 3087 (2021)
- [21] Zhang C, Garrison TF, Madbouly SA, Kessler MR, *Prog. Polym. Sci.*, **71**, 91 (2017)
- [22] Jeyapragash R, Srinivasan V, Sathiyamurthy S, *Mater. Today: Proc.*, **22**, 1223 (2020)
- [23] Oliveira SA, Macedo JRN, Rosa DS, *J. Cleaner Prod.*, **217**, 32 (2019)
- [24] Asim M, Paridah MT, Chandrasekar M, Shahroze RM, Jawaid M, Nasir M, Siakeng R, *Iran. Polym. J.*, **29**, 625 (2020)
- [25] Souza LO, Souza LMS, Silva FA, *Mag. Concr. Res.*, **73**(3), 135 (2021)
- [26] Zukowski B, Mendonça YGS, Silva FA, Toledo Filho RD, *Mater. Struct.*, **53**(49), 1 (2020)
- [27] Benin SR, Kannan S, Bright RJ, Moses AJ, *Mater. Today: Proc.*, **33**, 798 (2020)
- [28] Onuaguluchi O, Banthia N, *Cem. Concr. Compos.*, **68**, 96 (2016)
- [29] Camargo MM, Taye EA, Roether JA, Redda DT, Boccaccini AR, *Materials*, **13**(20), 4603 (2020)
- [30] Kashizadeh R, Esfandeh M, Rezaoust AM, Sahraeian R, *Polym. Compos.*, **40**(9), 3657 (2019)
- [31] Munde YS, Ingle RB, Siva I, *Mater. Res. Express*, **6**(8), 085307 (2019)
- [32] Grubeša IN, Marković B, Gojević A, Brdarić J, *Constr. Build. Mater.*, **184**, 473 (2018)
- [33] Sanchez ML, Patiño W, Cardenas J, *J. Build. Eng.*, **28**, 101058 (2020)
- [34] Narayana VL, Rao LB, *Mater. Today: Proc.*, **44**, 1988 (2021)
- [35] Parashar S, Chawla VK, *Mater. Today: Proc.*, **46**, 6541 (2021)
- [36] Cruz-Riño LJ, Quintero-Giraldo LJ, García-Guzmán JA, Alcaraz-Zapata A, González-Castrillón EDS, Osorio-Saraz JA, *Polym. Compos.*, **42**(1), 474 (2020)
- [37] Viscusi G, Barra G, Gorrasi G, *Cellulose*, **27**(15), 8653 (2020)
- [38] Oliveira MAS, Pickering KL, Sunny T, Lin RJT, *J. Polym. Res.*, **28**(2), 1 (2021)
- [39] Lima RAA, Cavalcanti DK, Silva Neto JS, Costa HM, Banea MD, *Polym. Compos.*, **41**(1), 314 (2020)
- [40] Serra A, Tarrés Q, Chamorro M-À, Soler J, Mutjé P, Espinach FX, Vilaseca F, *Polymers*, **11**(10), 1725 (2019)
- [41] Theivasanthi T, Christma FLA, Toyin AJ, Gopinath SCB, Ravichandran R, *Int. J. Biol. Macromol.*, **109**, 832 (2018)
- [42] Peña-Pichardo P, Martínez-Barrera G, Martínez-López M, Ureña-Núñez F, Reis JML, *Constr. Build. Mater.*, **177**, 409 (2018)
- [43] Xiao G, Zhao P, Zhang Y, *Front. Plant Sci.*, **10**, 87 (2019)
- [44] Costa RRC, Sato ES, Ribeiro ML, Medeiros R, Vieira AFC, Guedes RM, Tita V, *J. Compos. Mater.*, **54**(22), 3125 (2020)
- [45] Mahdi E, Dean A, *Materials*, **13**(3), 753 (2020)
- [46] Kamble Z, Behera BK, *Polym. Compos.*, **42**(6), 3025 (2021)
- [47] Yeh C-H, Yang T-C, *Polymers*, **12**(3), 636 (2020)
- [48] Kumar J, Chaudhary S, Goyat V, Goyal A, *Advances in Materials and Mechanical Engineering*, 61 (2021)
- [49] Asrafuzzaman, Amin KF, Sharif A, Hoque ME, *Bamboo Fiber Composites*, 215 (2021)
- [50] Chin SC, Tee KF, Tong FS, Ong HR, Gimbin J, *Mater. Today Commun.*, **23**, 100876 (2020)
- [51] Ramesh M, RajeshKumar L, Bhuvaneshwari V, *Bamboo Fiber Composites*, 1 (2021)
- [52] Hong G, Cheng H, Zhang S, Rojas OJ, *J. Cleaner Prod.*, **296**, 126587 (2021)
- [53] Hussain MK, Abbas SH, Younis YM, Rahman MA, Jamil T, *J. Appl. Eng. Sci.*, **19**(1), 119 (2021)
- [54] Çomak B, Bideci A, Bideci ÖS, *Constr. Build. Mater.*, **169**, 794 (2018)
- [55] Siva R, Nemali SSR, Kunchapu SK, Gokul K, Kumar TA, *Mater. Today: Proc.*, 1-5 (2021)
- [56] Sunny T, Pickering KL, Lim SH, *Cellulose*, **27**(5), 2569 (2020)
- [57] Ribeiro MP, Neuba LM, Silveira PHPM, Luz FS, Figueiredo AB-HS, Monteiro SN, Moreira MO, *J. Mater. Res. Technol.*, **12**, 221 (2021)
- [58] Väisänen T, Batello P, Lappalainen R, Tomppo L, *Ind. Crops Prod.*, **111**, 422 (2018)
- [59] Koushki P, Kwok T-H, Hof L, Wuthrich R, *Compos. Sci. Technol.*, **194**, 108139 (2020)
- [60] Neves ACC, Rohen LA, Mantovani DP, Carvalho JPRG, Vieira CMF, Lopes FPD, Simonassi NT, Luz FS, Monteiro SN, *J. Mater. Res. Technol.*, **9**(2), 1296 (2020)
- [61] Angulo C, Brahma S, Espinosa-Dzib A, Peters R, Stewart KME, Pillay S, Ning H, *Environ. Prog. Sustainable Energy*, **40**(4), e13617 (2021)
- [62] Hasan KMF, Horváth PG, Bak M, Alpár T, *RSC Adv.*, **11**(18), 10548 (2021)
- [63] Moura AS, Demori R, Leão RM, Frankenberg CLC, Santana RMC, *Mater. Today Commun.*, **18**, 191 (2019)
- [64] Putrino FM, Tedesco M, Bodini RB, Oliveira AL, *Bioresour. Technol.*, **309**, 123387 (2020)
- [65] Kumar NS, Buddi T, Lakshmi AA, Rajesh KVD, *Mater. Today: Proc.*, **44**, 2482 (2021)
- [66] Mishra D, Verma MM, *Int. J. Res. Trends Innov.*, **6**(6), 62 (2021)

- [67] Ahmad W, Farooq SH, Usman M, Khan M, Ahmad A, Aslam F, Yousef RA, Abduljabbar HA, Sufian M, *Materials*, **13**(5), 1075 (2020)
- [68] Syed H, Nerella R, Madduru SRC, *Mater. Today: Proc.*, **27**, 1104 (2020)
- [69] Amoako G, Mensah-Amoah P, Sam F, Sackey SS, *Energy Environ. Res.*, **8**(1), 1–9 (2018)
- [70] Hidalgo-Salazar MA, Correa-Aguirre JP, García-Navarro S, Roca-Blay L, *Polymers*, **12**(7), 1507 (2020)
- [71] Castro DO, Passador F, Ruvolo-Filho A, Frollini E, *Compos. A: Appl. Sci. Manuf.*, **95**, 22 (2017)
- [72] Maciel NOR, Ferreira JB, Vieira JS, Ribeiro CGD, Lopes FPD, Margem FM, Monteiro SN, Vieira CMF, Silva LC, *J. Mater. Res. Technol.*, **7**(4), 561 (2018)
- [73] Premkumar T, Siva I, Munde Y, Rajesh S, Amico SC, *Mater. Today: Proc.*, **28**, 258 (2020)
- [74] Zukowski B, Santos ERF, Mendonça YGS, Silva FA, Toledo Filho RD, *Cem. Concr. Compos.*, **94**, 116 (2018)
- [75] Soltan DG, Neves P, Olvera A, Savastano Junior H, Li VC, *Ind. Crops Prod.*, **103**, 1 (2017)
- [76] Zukowski B, Silva FA, Toledo Filho RD, *Cem. Concr. Compos.*, **89**, 150 (2018)
- [77] Teixeira LA, Dalla Junior LV, Luz SM, *Plast., Rubber Compos.*, **50**(4), 189 (2021)
- [78] Azevedo ARG, Klyuev S, Marvila MT, Vatin N, Alfimova N, Lima TES, Fediuk R, Olisov A, *Fibers*, **8**(11), 69 (2020)
- [79] Costa UO, Nascimento LFC, Garcia JM, Bezerra WBA, Costa GFF, Luz FS, Pinheiro WA, Monteiro SN, *J. Mater. Res. Technol.*, **9**(6), 13390 (2020)
- [80] Salgado IP, Silva FA, *Constr. Build. Mater.*, **286**, 122890 (2021)
- [81] Monteiro SN, Braga FO, Lima EP, Louro LHL, Drelich JW, *Polym. Eng. Sci.*, **57**(9), 947 (2017)
- [82] Delgado-Aguilar M, Tarrés Q, Marques MFV, Espinach FX, Julián F, Mutjé P, Vilaseca F, *Materials*, **12**(24), 4185 (2019)
- [83] del Pino GG, Bezazi A, Boumediri H, Kieling AC, Silva CC, Dehaini J, Rivera JLV, Valenzuela MGS, Díaz FRV, Panzera TH, *J. Compos. Mater.*, **55**(1), 57 (2021)
- [84] Ganesan K, Kailasanathan C, Sanjay MR, Senthamaraiannan P, Saravanakumar SS, *J. Nat. Fibers*, **17**(4), 482 (2020)
- [85] Chandekar H, Chaudhari V, Waigaonkar S, *Mater. Today: Proc.*, **26**, 2079 (2020)
- [86] Sultana N, Hossain SMZ, Alam MS, Hashish MMA, Islam MS, *Constr. Build. Mater.*, **243**, 118216 (2020)
- [87] Sadangi A, Panda KK, Kumari K, Srivatsava M, Dalai N, *Mater. Today: Proc.*, 1–6 (2021)
- [88] Ramakrishnan S, Krishnamurthy K, Rajeshkumar G, Asim M, *J. Polym. Environ.*, **29**(4), 1076 (2021)
- [89] Dinesh S, Kumaran P, Mohanamurugan S, Vijay R, Singaravelu DL, Vinod A, Sanjay MR, Siengchin S, Bhat KS, *J. Polym. Res.*, **27**(9), 1 (2020)
- [90] Dilfi A, Balan A, Bin H, Xian G, Thomas S, *Polym. Compos.*, **39**(S4), E2519 (2018)
- [91] Wang H, Memon H, Hassan EAM, Miah MS, Ali MA, *Materials*, **12**(8), 1226 (2019)
- [92] Reddy SRT, Prasad AVR, Ramanaiah K, *Mater. Today: Proc.*, **44**, 917 (2021)
- [93] Yokesahachart C, Yoksan R, Khanonkon N, Mohanty AK, Misra M, *Cellulose*, **28**(9), 5513 (2021)
- [94] Belniaki AC, Michelon TB, Vieira ESN, Panobianco M, *J. Seed Sci.*, **42**, 1 (2020)
- [95] Franco TS, Potulski DC, Viana LC, Forville E, Andrade AS, Muniz GIB, *Carbohydr. Polym.*, **218**, 8 (2019)
- [96] Carvalho EA, Nunes LV, Goes LMS, Silva EGP, Franco M, Gross E, Uetanabaro APT, Costa AD, *Chem. Eng. Commun.*, **205**(7), 975 (2018)
- [97] Silva JSP, Silva JMF, Soares BG, Livi S, *Compos. B: Eng.*, **129**, 117 (2017)
- [98] Pinheiro APP, d'Almeida JRM, *Mater. Today: Proc.*, **33**, 1869 (2020)
- [99] Cordeiro EP, Pita VJRR, Soares BG, *J. Polym. Environ.*, **25**(3), 913 (2017)
- [100] Martins MP, Dagostin JLA, Franco TS, Muñoz GIB, Masson ML, *Food Biophys.*, 1–12 (2020)
- [101] Dong S, Xian G, Yi X-S, *Aerospace*, **5**(3), 81 (2018)
- [102] Ramesh M, *Handbook of Properties of Textile and Technical Fibres*, 301 (2018)
- [103] Singh T, Kumar N, Raj A, Grewal JS, Patnaik A, Fekete G, *Mater. Res. Express*, **6**(11), 115701 (2019)
- [104] Kumar R, Anand A, *Mater. Res. Express*, **6**(5), 055303 (2019)
- [105] Siregar JP, Zalinawati M, Cionita T, Rejab MRM, Mawarnie I, Jaafar J, Hamdan MHM, *Mater. Today: Proc.*, **46**, 1729 (2021)
- [106] Dang C-Y, Shen X-J, Nie H-J, Yang S, Shen J-X, Yang X-H, Fu S-Y, *Compos. B: Eng.*, **168**, 488 (2019)
- [107] Hasan KMF, Horváth PG, Alpár T, *Polymers*, **12**(5), 1072 (2020)
- [108] Simonassi NT, Pereira AC, Monteiro SN, Margem FM, Rodríguez RJS, Deus JF, Vieira CMF, Drelich J, *Mater. Res.*, **20**, 51 (2017)
- [109] Yang X, Fan W, Ge S, Gao X, Wang S, Zhang Y, Foong SY, Liew RK, Lam SS, Xia C, *Ind. Crops Prod.*, **162**, 113312 (2021)
- [110] Zhan J, Wang G, Li J, Guan Y, Zhao G, Naceur H, Coutellier D, Lin J, *Compos. Commun.*, 100843 (2021)

- [111] Rangappa SM, Parameswaranpillai J, Yorseng K, Pulikkalparambil H, Siengchin S, *Constr. Build. Mater.*, **271**, 121843 (2021)
- [112] Bernard SS, Suresh G, Srinivasan T, Srinivasan S, Kaarmugilan N, Naveed LM, Kiranmouli N, Mahalakshmi CS, *Mater. Today: Proc.*, **45**, 569 (2021)
- [113] Oladele IO, Makinde–Isola BA, Adediran AA, Oladejo MO, Owa AF, Olayanju TMA, *Mater. Res. Express*, **7**(4), 045304 (2020)
- [114] Braga FO, Bolzan LT, Ramos FJHTV, Monteiro SN, Lima Jr. ÉP, Silva LC, *Mater. Res.*, **20**(2), 767 (2017)
- [115] Ngaowthong C, Borůvka M, Běhálek L, Lenfeld P, Švec M, Dangtungee R, Siengchin S, Rangappa SM, Parameswaranpillai J, *Waste Manag.*, **97**, 71 (2019)
- [116] Samouh Z, Molnar K, Boussu F, Cherkaoui O, Moznine RE, *Polym. Adv. Technol.*, **30**(3), 529 (2019)
- [117] Liang Z, Wu H, Liu R, Wu C, *Polymers*, **13**(7), 1124 (2021)