

COMPÓSITOS POLIMÉRICOS DE PEAD REFORÇADOS COM FIBRAS DE COCO: EFEITO DO TRATAMENTO SUPERFICIAL DAS FIBRAS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Autores

Sérgio Roberto Montoro¹

Iago Rodrigues Chagas de Souza Santos²

Paulo Ivo Bittencourt Junior³

Jorge Luiz Rosa⁴

Cirlene Fourquet Bandeira⁵

Resumo

A crescente demanda por materiais sustentáveis e de alto desempenho tem impulsionado a pesquisa por alternativas que integrem fibras naturais a matrizes poliméricas, visando reduzir o impacto ambiental e otimizar propriedades mecânicas. Este trabalho investigou o potencial das fibras de coco, *in natura* e tratadas quimicamente, como reforço em compósitos de polietileno de alta densidade (PEAD), com o objetivo de avaliar os impactos dessa incorporação nas propriedades mecânicas dos materiais resultantes. A pesquisa buscou avaliar a eficácia do tratamento químico alcalino aplicado às fibras de coco para melhorar a compatibilidade com a matriz polimérica e, assim, otimizar o desempenho dos compósitos. Os resultados indicaram que o tratamento químico promoveu a remoção parcial de lignina, hemicelulose e outros componentes da biomassa, conferindo às fibras uma superfície mais rugosa e cristalina, o que favoreceu a interação com a matriz de PEAD. Isso resultou em aumentos significativos nas propriedades mecânicas, como tensão de escoamento e módulo de elasticidade, além de reduzir a elongação total dos compósitos reforçados com fibras tratadas. Conclui-se que a biomassa de coco tratada é uma alternativa promissora para o desenvolvimento de compósitos com propriedades otimizadas, enquanto a biomassa *in natura* oferece uma solução viável e sustentável para aplicações de menor exigência técnica.

Palavras-chave: Biomassa. Sustentabilidade. Compósitos. PEAD. NaBH₄

POLYMER COMPOSITES OF HDPE REINFORCED WITH COCONUT FIBERS: EFFECT OF FIBER SURFACE TREATMENT ON MECHANICAL PROPERTIES

Abstract

The growing demand for sustainable and high-performance materials has driven research into alternatives that integrate natural fibers into polymer matrices, aiming to reduce environmental impact and optimize mechanical properties. This study investigated the potential of coconut fibers, both untreated and chemically treated, as reinforcement in high-density polyethylene (HDPE) composites,

¹ Doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP, Diretor da Fatec Pindamonhangaba (SP) e Docente no Programa de Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda (MEMAT/UniFOA). ORCID: 0000-0002-9272-3278. E-mail: sergio.montoro@foa.org.br

² Graduação em Engenharia Mecânica pelo Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA. ORCID: 0009-0007-3578-9696

³ Graduação em andamento em Engenharia Mecânica pelo Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA. ORCID: 0000-0003-1634-525X

⁴ Doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP e docente na Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo – FATEC. E-mail: jorge.rosa@cps.sp.gov.br

⁵ Doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP e Docente no Programa de Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda (MEMAT/UniFOA). ORCID: 0000-0001-7034-2477. E-mail: cirlene.bandeira@foa.org.br

with the goal of evaluating the effects of this incorporation on the mechanical properties of the resulting materials. The research aimed to assess the effectiveness of alkaline chemical treatment applied to the coconut fibers to improve compatibility with the polymer matrix and thus enhance the performance of the composites. The results indicated that the chemical treatment promoted the partial removal of lignin, hemicellulose, and other biomass components, giving the fibers a rougher and more crystalline surface, which favored interaction with the HDPE matrix. This resulted in significant increases in mechanical properties, such as yield strength and elastic modulus, as well as a reduction in the total elongation of the composites reinforced with treated fibers. It is concluded that treated coconut biomass is a promising alternative for the development of composites with optimized properties, while untreated biomass offers a viable and sustainable solution for applications with lower technical requirements.

Keywords: Biomass. Sustainability. Composites. HDPE. NaBH_4 .

INTRODUÇÃO

As últimas décadas foram relevantes para a percepção da sociedade sobre os danos que o consumo indiscriminado dos recursos podem provocar ao meio ambiente, fazendo o consumidor a ter atitudes mais conscientes com relação as opções de consumo. Características do produtos, antes não essenciais, na opção de escolha, começaram a se destacar, privilegiando aqueles com cunho de preservação ambiental, ou seja, não tóxicos, biodegradáveis e fabricados com matéria prima reciclada (Pacheco, 2001; Bona, 2007).

O plástico corresponde 15% no peso do lixo coletado seletivamente, junto com papel, metal, vidro, alumínio e tetrapack. A tipologia de plásticos mais encontrados são polietileno, poli (cloreto de vinila), polipropileno e poli (tereftalato de etileno). Essa verificação dos tipos de plásticos oriundo da coleta seletiva, demonstra um dado de grande importancia: polietilenos (baixa e alta densidades), muitos utilizados em embalagens; e, os poli (tereftalato de etileno), o chamado PET, são de maior aplicabilidade (Bona, 2007).

O plásticos em suas diversas formas fazem parte do cotidiano da sociedade, presente em materiais utilizados na construção civil, nas indústrias automobilística, elétrica e eletrônica, em móveis e decorações, no vestuário e na indústria de embalagens, substituindo o metal, vidro, cerâmica, madeira e papel por ser vantajoso em relação aos demais. Também tem como vantagem a facilidade de transporte e processamento, demanda menos energia e tem maior durabilidade e resistência por serem rígidos ou flexíveis, leves e de fácil manipulação, além de possuírem melhores condições de higiene e conservação (Andrade *et al.*, 2019). Portanto, há muitos exemplos dos benefícios que o uso do material polimérico proporciona ao homem, porém se constitui tema de questões ambientais que envolve o uso e descarte do material para a redução dos efeitos mais negativos ao ambiente (Bona, 2007).

O polietileno de alta densidade (PEAD) é um dos polímeros termoplásticos mais utilizados no mundo que, produzido a partir do etileno, derivado do petróleo, pode ser aplicado

nos mais vastos setores da sociedade e da indústria. Diversos trabalhos têm sido publicados sobre o desenvolvimento de compósitos poliméricos de PEAD reforçados com carga mineral, com fibras vegetais ou sintéticas (De Souza, 2018). Já as fibras vegetais podem ser utilizadas como reforços em polímeros termoplásticos, termorrígidos e borrachas apresentando vantagens econômicas e ambientais (Bessadok *et al.*, 2009; Troedec *et al.*, 2008; Spinacé *et al.*, 2009).

A agressão ao meio ambiente causada pelos resíduos plásticos originados nos processos, serviços e produtos utilizados, tem se tornado uma preocupação crescente em todos os setores. Dentre as possibilidades para auxiliar na resolução deste problema, destaca-se a utilização de resíduos para formação de compósitos, uma alternativa para o estabelecimento do sistema de reciclagem (Miranda, 2011).

Desta forma, diversos países visam apresentar restrições ambientais fundamentada em política de resíduos, que não se degradam na natureza, direcionada ao princípio 3Rs: reduzir o consumo de produtos que apresente danos ao meio ambiente; reutilizar o material adquirido; e, reciclar para a criação de novos produtos (Sebio, 2003; Bona, 2007).

Com a modernização tecnológica e responsabilidades socioambientais, indústrias e grupos de pesquisas vêm buscando cada vez mais inovações no desenvolvimento de novos produtos por meio de tecnologias limpas, buscando redução de custo e impactos ambientais. Com isso, a utilização de materiais de fontes renováveis vem se destacando no mercado, aumentando o interesse no desenvolvimento de insumos reforçados com fibras naturais (Silva, 2018).

Desse modo, materiais plásticos biodegradáveis e compostáveis, provenientes de fontes renováveis originados da agricultura ou da indústria, como é o caso da fibra de coco *in natura*, constituem a inovação fundamental para o futuro da sociedade, visto que impulsionam novas pesquisas e tecnologias, impactando na economia e no meio ambiente positivamente (Lörcks, 1998; Bona, 2007).

Neste sentido, a utilização de um compósito polimérico como matriz impede o contato do reforço com o ambiente externo e seu deslocamento, distribuindo a carga gerada pelo compósito. A fibra natural sendo o reforço, por sua vez tem a função de suportar o esforço gerado nele pela matriz. Esse processo depende da interação entre reforço e matriz, com influência da capacidade de proteção do reforço durante o manuseio e sua capacidade de distribuição de carga (Silva, 2018).

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver materiais compósitos por meio de uma matriz de polietileno de alta densidade (PEAD) reforçada com fibra de coco *in natura* e

tratada, possibilitando assim, a avaliação e caracterização, viabilizando sua aplicação em novos materiais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As fibras naturais podem ser classificadas de acordo com a fonte de extração, que podem ser mineral, vegetal ou animal. Na atualidade, com o grande apelo ambiental para aproveitamento de materiais derivados de fontes renováveis, a aplicação de fibras naturais em diversos materiais tem aumentado incessantemente (Wallenberger; Weston, 2004; Harish *et al.*, 2009; Benini, 2011).

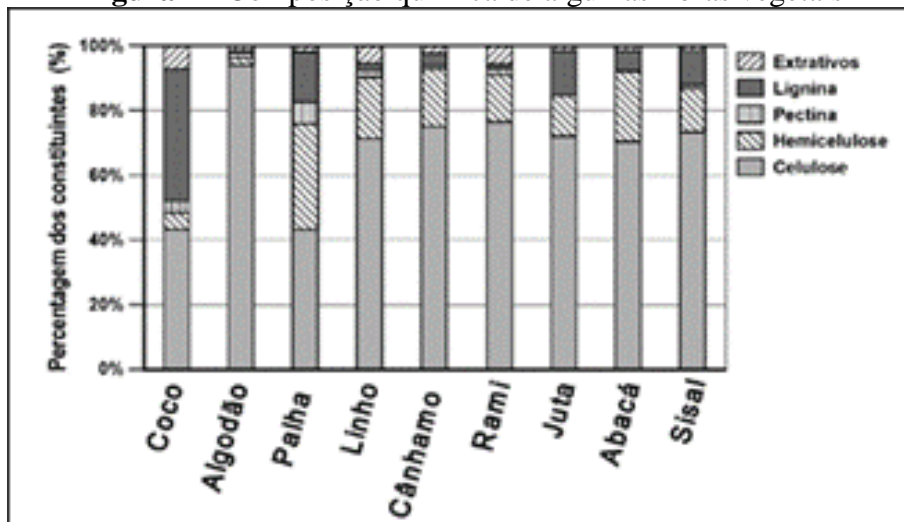
O Brasil possui grande diversidade de fibras vegetais com díspares propriedades químicas, físicas e mecânicas. Diversas fibras e cargas naturais vegetais, provenientes ou não de resíduos, são caracterizadas por materiais lignocelulósicos, que são macromoléculas orgânicas constituídas por pectinas, ligninas, hemicelulose e celuloses, podendo estar ligadas ou não entre si (Albinante *et al.*, 2013; Nogueira, 2018). Na obtenção de compósitos, esses materiais naturais costumam ser facilmente misturados a polímeros termoplásticos (Suddell, 2002; Cury, 2016). Além disso, estas fibras apresentam boas propriedades mecânicas devido à baixa densidade, são obtidas por fontes renováveis e recicláveis, possuem baixo custo e baixo investimento e são de fácil manipulação, processamento e aplicáveis como isolantes térmicos e acústicos (Spinacé, 2015; Nogueira, 2018).

De acordo com Cury (2016), por serem materiais apontados como “ecologicamente corretos”, as biomassas vegetais vêm sendo alternativa viável para utilização como reforço em matrizes poliméricas, substituindo as fibras de vidro e outras cargas e oferecendo vantagens.

A extruturação química das fibras vegetais, são também denominadas de fibras lignocelulósicas, desse modo a morfologia e as propriedades decorrem de fatores como: circuntâncias do solo onde foram cultivadas; idade da planta; e, local de extração (Mohanty; Misra; Drzal, 2005; Wallenberger; Weston, 2004).

A constituição das fibras lignocelulósicas (celulose, hemicelulose e lignina) estão ordenados nas fibras em uma complexa estrutura física. Para o desenvolvimento na aplicação de fibras como reforço em compósitos, se faz necessário conhecer esse componentes e a forma como eles estão arrançados na estrutura da fibra (Benini, 2011). As propriedades químicas e físicas das fibras estão relacionadas às diferentes proporções de acordo com cinco componentes, que variam de acordo com o tipo da fibra, que são extrativos, lignina, pectina, hemicelulose e celulose (Figura 1).

Figura 1 - Composição química de algumas fibras vegetais



Fonte: Albinante *et al.* (2013)

Assim, pelas cinco constituintes básicas das fibras naturais (hemicelulose, celulose, lignina e extrativos - sais inorgânicos, proteínas e gorduras), a celulose, que contém de 40 a 90% em massa da fibra, tem a função de resistência das fibras, em consequência ao seu elevado grau de polimerização e orientação molecular. Um polímero linear cristalino é constituído por unidades β -D-glicopiranosas ligada por ligações glicosídicas. Já a hemicelulose (1 a 30% em massa), é uma diversidade de moléculas complexas, amorfas e de unidades β -D-xilose, β -D-manose, β -D-glicose, α -L-arabinose e ácido β -D-glicurônico, constituídas por carbonos com um grupo hidroxila, menos os que podem estar na forma de carbonila ou em ligação hemiacetal. E a lignina, segundo maior componente em massa (1 a 35% em massa), é uma macromolécula constituída por um sistema aromático, reticulado, com elevada massa molar, amorfo e com unidades de fenilpropano (Albinante *et al.*, 2013).

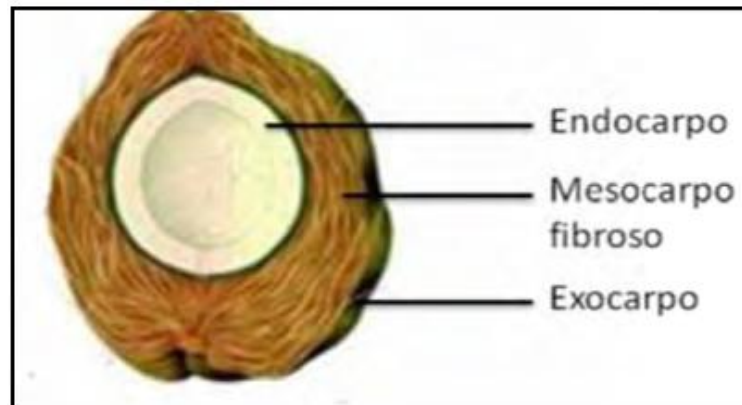
2.1 Fibra de Coco

O crescimento do consumo de coco verde no Brasil para fabricação de sua água, produz uma quantidade de rejeitos que representa cerca de 85% do peso do fruto. Desta forma, os resíduos gerados pelas cascas interferem na diminuição de vida útil dos aterros, além de refletir à saúde da população e oferecem riscos ao meio ambiente, apresentando de 10 a 12 anos para se decompor (Barbosa *et al.*, 2010)

O aproveitamento da fibra de coco verde tem sido analisada como reforço em polímeros, como por exemplo, o poliéster (Monteiro; Terrones; D'Almeida, 2008), o polipropileno (Islam *et al.*, 2010) e polímeros biodegradáveis, transformando as propriedades mecânicas, como a

tração, alongação na ruptura desses compósitos. A aplicação da fibra de coco para a aquisição de compósitos se torna importante, pois além de interferir no volume de resíduos, é um processo acessível, renovável e natural (Barbosa *et al.*, 2010; Rosa *et al.*, 2009). Conforme esquematizado na Figura 2, as fibras de coco são materiais lignocelulósicos e são adquiridas tanto do mesocarpo (parte espessa fibrosa) como do exocarpo (casca) dos cocos.

Figura 2 - Seção transversal do fruto do coqueiro



Fonte: Esmeraldo (2006)

Ainda, Esmeraldo (2006) ressalta que as fibras de coco possuem menor percentual de celulose (36 a 43%), comparada às demais fibras vegetais, apesar disso a quantidade de lignina (41% a 45%) retrata dois a quatro vezes os valores presente para a juta e o sisal, oferecendo-lhe maior rigidez e maior resistência diante a outras fibras.

A densidade (baixa), porosidade, maleabilidade e retenção de água, são umas das principais propriedades da fibra de coco verde, o que caracterizam excelentes qualidades no aproveitamento no setor de agricultura (Martins *et al.*, 2013).

Alguns escritores caracterizam materiais que servem como reforço de polímeros, como o polipropileno, o poliéster e os polímeros biodegradáveis, considerando sua capacidade de alterar as propriedades mecânicas desses compósitos, transformando-se mais resistentes à tração e rupturas (Barbosa *et al.*, 2010).

Com já citado anteriormente, a lignina, existente nas fibras de coco com maior concentração que os demais componentes, é responsável pela força, sustentação e resistência mecânica das fibras vegetais. Além disto, é vista como material de baixa abrasividade e densidade, com características atraente para uso de substituição de cargas. Desta forma, a lignina como outros polímeros, em processos adequados, podem resultar em compósitos parcialmente ou completamente biodegradáveis. Assim, diante de sua natureza fenólica, a lignina pode elevar a resistência de materiais poliméricos em relação à irradiação, oxidação e exposição a elevadas temperaturas (Silva *et al.*, 2009).

2.2 Compósitos

Compósitos são estabelecidos por uma categoria de materiais que possuem associação macroscópica de duas fases distintas denominadas de matriz e reforço. A matriz possui a relevante função de subdividir a carga pelo compósito, enquanto o reforço é encarregado de suportar aos esforços solicitados (Levy-Neto; Pardini, 2006; Cury, 2016).

O fato da matriz, ocupar os espaços vazios presentes entre os materiais e os reforços e mantê-los em suas devidas posições, é o que proporciona estrutura ao material compósito (Bandeira, 2011; Nogueira, 2018).

2.2.1 Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras Naturais

Os compósitos poliméricos, em sua maioria, apresentam matrizes termorrígidas. Essas matrizes se apresentam como uma alternativa para diversas aplicações, incluído aplicações estruturais, o que se deve, em grande parte, a tenacidade à fratura, resistência ao impacto e tolerância a danos (Nogueira, 2004; Mazur, 2010).

Com às vantagens dos polímeros sobre os demais materiais, como os metais e as cerâmicas, na facilidade de processamento, elavada aplicabilidade, baixo custo e versatilidade, os compósitos com matrizes poliméricas desenvolveram-se aceleradamente e posteriormente foram aceitos pelo mercado consumidos e pelas indústrias (Ramires, 2010; Pereira, 2016).

Cabe à matriz, não só a função de dar forma estável aos compósitos, como também conferir transmissão de esforços às fibras e preservar a superfície das mesmas. Além destes quesitos, imposto às matrizes, as fibras também devem mostrar características que possibilita reforçar os polímeros de maneira eficaz (Castro, 2013; Pereira, 2016).

As fibras devem possuir as seguintes propriedades: módulo de elasticidade superior ao do polímero a reforçar; tensão de ruptura superior à do polímero a ser reforçado, geometria adequada a uma boa adesão à matriz e resistência à deterioração em contato com a matriz (Bank, 2006).

A orientação das fibras, a quantidade e o comprimento são características que intervem de forma preponderante às características dos polímeros reforçados com fibras (Castro, 2013; Pereira, 2016).

A aquisição de materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais requerem requisitos específicos no que se refere ao processamento, uma vez que fibras naturais exibem estrutura basicamente hidrofílica, conflitando com matrizes termoplásticas

hidrofóbicas, sendo capaz de existir a criação de aglomerados de fibras (Luz, 2008; Mullinari, 2014).

Para a obtenção desses materiais compósitos é fundamental a produção de mais que uma fase de processamento, até alcançar o formato final do produto. A mistura (fibra - matriz) e moldagem são as duas principais fases executadas na confecção desses materiais compósitos (Castro, 2010; Benini, 2011).

O objetivo da etapa de mistura no processamento dos compósitos é oferecer uma mistura homogênea assegurando de maneira absoluta a distribuição da fibra incorporado na matriz. Desta maneira, existem diversos equipamentos que podem ser empregados nesta etapa de mistura, tendo como exemplos as extrusoras de rosca simples ou dupla e os misturadores internos (Castro, 2010; Benini, 2011).

Por meio da etapa de moldagem do material, Benini (2011) afirma ter o papel de assegurar a dimensão e forma final esperada, por meio de métodos como extrusão, injeção e moldagem por compressão. A elaboração desses compósitos requer condições específicas no que se refere ao processamento, uma vez que as fibras naturais exibem estrutura hidrofílica, discordante com matizes termoplásticas hidrofóbicas. Desta forma, o contato interfacial do reforço e da matriz para determinada aplicabilidade tem de ser harmonioso (Mullinari *et al.*, 2010; Hidalgo-Salazar; Herrera-Franco, 2013; Cury, 2016).

2.2.2 Tratamentos das Fibras

Para determinada aplicação, o reforço e a matriz devem atuar conjuntamente, assim o contato interfacial deve ser adequado. Muitos autores indicam a alteração superficial das fibras *in natura* para que ocorra o aumento de energia superficial, com o objetivo de melhorar a compatibilidade entre fibra e matriz, antes de ser incorporada como reforço em matrizes poliméricas. (Mullinari, 2014). Métodos químicos e físicos podem ser utilizados para alterar as fibras de reforço, aperfeiçoando a interface fibra-matriz (Brígida *et al.*, 2010; Pereira, 2016).

O problema referente às fibras naturais se dá aos agrupamentos hidrofílicos presentes em sua estrutura química. Esses grupos verificam às fibras naturais uma característica polar, já os polímeros olefinicos são apolares. Mistura entre materiais distintos apresentam uma interação interfacial muito fraca, o que deriva em produtos finais com propriedades mecânicas inferiores às dos polímeros puros. Para atingir uma mistura polimérica uniforme e com melhores propriedades e com ótimas propriedades é imprescindível elevar a interação entre os componentes, o que pode ser alcançado submetendo a fibra, ou o polímero, a um tratamento químico (Colom *et al.*, 2003; Ichazo *et al.*, 2001; Qiu *et al.*, 2005; Albinante *et al.*, 2013).

A ausência de harmonização com a matriz polimérica hidrofóbica e a aptidão de forma aglomerados no decorrer do processamento são desvantagens conhecidas. Os tratamentos superficiais são direcionados com o propósito de aperfeiçoar as condições de adesão das fibras e matriz ou modificar as propriedades como a hidrofiliabilidade e rugosidade de sua superfície. Entende-se que as fibras naturais apresentam grupos hidroxila ao longo de suas cadeias, o que oferece uma grande hidrofiliabilidade à fibra (Brígida *et al.*, 2010; Pereira, 2016).

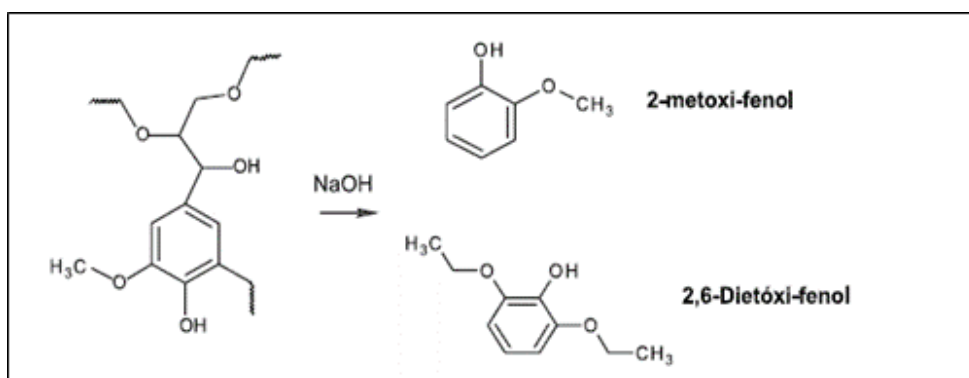
2.2.3 Tratamento de Mercerização

Os tratamentos químicos em fibras naturais vem se tornando cada vez mais pesquisados e aplicados. Entre as variedades de tratamentos, pode-se mencionar a mercerização, o tratamento com ácidos, com grupos silano, acetyl, isocianato, permanganato e peróxido. São tratamentos que atuam aperfeiçoando a interface entre a matriz e a fibra (Albinante *et al.*, 2013).

O tratamento de mercerização propõe limpar a superfície da fibra retirando parcialmente os constituintes amorfos solúveis em meio alcalino. Desta maneira, reduz o grau de agregação das fibras e proporciona uma superfície mais rugosa (Troedec *et al.*, 2008; Esmeraldo, 2006; Gomes *et al.*, 2007; Razera, 2006; Pereira, 2016)

O tratamento alcalino ou mercerização, provavelmente é o mais comum processo de modificação de fibras naturais. Seu uso prevê a solubilização de lignina e de hemicelulose, além de mudar a cristalinidade da celulose. A hemicelulose é solúvel em baixíssimas concentrações de álcali e, nessas condições, a lignina sofre hidrólise básica. O tratamento aumenta a rugosidade da superfície da fibra e melhora a aderência mecânica (Figura 3) (Albinante *et al.*, 2013).

Figura 3 - Hidrólise básica da lignina



Fonte: Albinante et al. (2013)

A celulose expõe sua estrutura sob a aparência de rede cristalina com regiões amorfas, depois da mercerização, isto é, após o tratamento de NaOH, acontece o arrefecimento das

ligações de hidrogênio da fase amorfa, elevando o intumescimento da celulose e o arrefecimento do grau de cristalinidade. Desta forma, a porcentagem de celulose identificados após o tratamento são superiores. A celulose concede mais resistência às fibras vegetais, aumentando a taxa de celulose com o tratamento químico e tornando as fibras com maior potencial de reforço para os compósitos (Albinante *et al.*, 2013).

A norma ASTM D1695 define mercerização como um processo onde as fibras vegetais são levadas ao contato com uma solução aquosa de base forte, para criar um elevado intumescimento, resultando na modificação da estrutura, da morfologia, das dimensões e propriedades mecânicas das fibras (Bledzki; Gassan, 1999).

O intumescimento causa o afastamento das cadeias celulósicas, rompendo as ligações de hidrogênio. A existência de hidroxilas, oriunda do tratamento com base forte, auxilia para a quebras destas ligações, criando ligações de hidrogênio com as cadeias celulósicas. O processo de quebra-intereção de ligações, proporciona grupos que antes eram de difícil acesso a agentes químicos, para produzirem ligações de hidrogênio inter e intramoleculares. Posteriormente ao tratamento alcalino as fibras expõe maior área de contato, contribuindo para maior intereção com demais materiais (Carvalho, 2004; Bledzki; Gassan, 1999).

A utilização de fibras de coco verde vem sendo reconhecida como uma alternativa viável para utilização em reforço em matrizes polimétricas, substituindo assim, as fibras sintéticas. Por se tratarem de materias biodegradáveis, conferem melhora nas propriedades mecânicas, a custo baixo e de fácil captação, além de favorecer para uma boa gestão de resíduos por se tratarem de um recurso renovável, se comparados aos polímeros puros. Contribuindo, portanto, para a resolução de problemas ambientais provocados pela disposição de grandes quantidades de resíduos de materiais não biodegradáveis (Silva, 2018).

As fibras de coco têm estrutura macromolecular proporciona características peculiares em condições de propriedades físicas, químicas e mecânicas. Outra condição importante para a obtenção de propriedades apropriadas do produto final é a qualidade de processamento, afetando a estrutura molecular do produto, constituindo-se como primordial a relação das características do insumo e o processamento para a transformação de materiais poliméricos (Pessan, Hage, 2002).

Neste sentido, considerando a falta de compatibilização entre a fibra e a matriz, a utilização da fibra tratada se torna um método imprescindível no sentido de diversificar o uso desta, com isso será desenvolvido compósito com fibra tratada, podendo avaliar as condições de interação entre o compósito e a fibra, possibilitando a análise da estrutura de ambos

compósitos, além de demonstrar sua compatibilidade conforme as propriedades apresentadas no produto desenvolvido.

2.3 Caracterizações Realizadas em Compósitos

Na criação de novos materiais, os ensaios são necessários para determinar se os mesmos são compostos de matérias-primas duráveis e com alto índice de aproveitamento. Desse modo, conhecer as propriedades mecânicas dos compósitos atribuindo a diversas condições de uso, tais como a temperaturas variadas, ao tipo de carga e a frequência que está sujeito a receber, ao desgaste e a vários outros fatores que influenciam no rendimento e na conservação do material, refletem diretamente no comportamento do material nas condições pretendidas, em conformidade com normas técnicas vigentes (Felix *et al.*, 2018). De acordo com Santos (2006) e Cury (2017) estudos relacionados ao comportamento mecânico de compósitos reforçados com fibras naturais mostram que esses materiais podem apresentar tanto aplicações estruturais ou não estruturais.

As propriedades mecânicas dos materiais são verificadas pela execução de ensaios cuidadosamente programados e reproduzindo o mais fielmente possível o encargo do serviço, portanto conhecer os fundamentos básicos de cada ensaio é crucial, e meramente importante (Felix *et al.*, 2018).

Assim, as propriedades mecânicas quando são analisadas devem-se levar em consideração as características sinérgicas dos materiais que dependem do reforço e da matriz, dessas, as que se destacam são a de resistência à tração e flexão que são determinadas por testes padronizados, utilizando corpos de prova com geometrias, dimensões e tolerâncias dimensionais especificadas em cada norma técnica (Canevarolo, 2017).

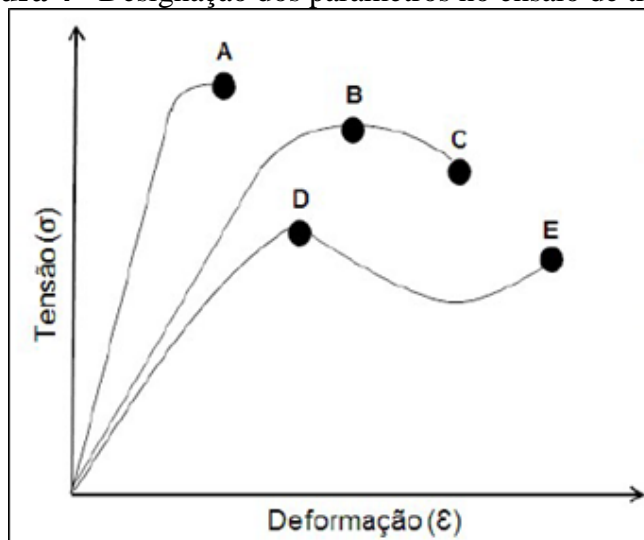
2.4 Ensaio de Tração

Nos ensaios de tração, os corpos de prova são afixados em garras, que são acopladas à travessa fixa e à travessa móvel da Máquina Universal de Ensaios. A taxa de deformação de tração é controlada pelo mecanismo de direcionamento, enquanto a tensão de tração sustentada pela amostra é registrada pela célula de carga, ambas acopladas à travessa fixa. Os ensaios de tração são feitos de acordo com o método ASTM D 638-05 (Canevarolo, 2017).

A aplicação de uma força em um corpo sólido promove uma deformação do material na direção do esforço que tende a esticá-lo ou alongá-lo. O ensaio de tração permite medir satisfatoriamente a resistência do material. A uniformidade da deformação permite ainda obter medições precisas da variação dessa deformação em função da tensão aplicada. Essa

uniformidade de deformações termina no momento em que é atingido o valor máximo para carga suportada pelo material, quando começa a aparecer o fenômeno da estricção ou diminuição da secção do corpo de prova, denominado “pescoço” (Santos, 2006).

Figura 4 - Designação dos parâmetros no ensaio de tração



Fonte: Cury (2017)

Os principais parâmetros mecânicos medidos ou calculados por meio dos ensaios de tração são resistência à tração, alongamento e módulo de elasticidade. Quando um corpo de prova é submetido a um ensaio de tração, a máquina de ensaio fornece um gráfico que mostra as relações entre a força aplicada e as deformações ocorridas durante o ensaio, que é conhecido como tensão-deformação, demonstrado (Figura 4).

Onde, A e E é a resistência à tração na ruptura (alongação na ruptura); B é a resistência à tração no escoamento (alongação no escoamento), C é a tensão à tração na ruptura (alongação na ruptura) e D é a tensão à tração no escoamento (alongação no escoamento).

3 METODOLOGIA

Polietileno de Alta Densidade (PEAD)

Para o procedimento dos compósitos foi utilizado o polietileno de alta densidade (PEAD) HC7260LS-L RSGG5G004E 8902 TG da BRASKEM, doado pela UniFOA.

Fibra de coco

A biomassa do *cocos nucifera*, utilizada neste trabalho, foi adquirida comercialmente. A mesma, foi triturada e peneirada, no laboratório da UniFOA. A fração passante na peneira de 50 mesh foi utilizada na confecção dos compósitos.

Borohidreto de Sódio (NaBH₄)

O borohidreto de sódio que foi usado nesse trabalho cedido pelo UniFOA. Foi usado o NaBH₄ PA, na forma de pó (98% de pureza) da marca Neon.

Hidróxido de Sódio (NaOH)

O hidróxido de sódio que foi usado nesse trabalho foi cedido pelo UniFOA. Foi usado NaOH em lentilhas PA (98% de pureza) da marca Neon.

Processamento dos Compósitos

Para a confecção do compósito, foi realizada a incorporação da biomassa de fibra de coco no PEAD, nas proporções de 10%, 20% e 30% de fibra através de um homogeneizador termocinético, marca *Dryzer*, modelo MH-50H, da empresa MH Equipamentos, disponível no Laboratório de Processamento de Materiais da UniFOA. Após a mistura do reforço e matriz das três famílias no homogeneizador, o material foi moído em moinho de facas da marca Plastimax. Os mesmos foram utilizados para confecção dos corpos de provas para os ensaios mecânicos e caracterizações.

Confecção dos Corpos de Provas

Após a moagem dos compósitos, os mesmos foram injetados, utilizando uma injetora termoplástica de bancada, marca RAY RAM - modelo TSMP a 300°C, para confecção dos corpos de provas e realização dos ensaios de tração (Norma ASTM D 63803, com 13 mm de largura, 165 mm de comprimento e 3 mm de espessura).

3.1 Tratamento Químico da Biomassa Proveniente da Fibra de Coco

Para a realização do tratamento alcalino da biomassa proveniente da fibra de coco foram utilizadas as metodologias descritas no trabalho de Moraes (2010), onde o autor efetuou o tratamento superficial de fibras de sisal e na dissertação de mestrado de Gehlen (2014), onde a autora realizou o tratamento superficial em fibras de açaí e curauá.

Com o objetivo de obter-se uma adesão satisfatória entre a biomassa e uma futura matriz termoplástica, a biomassa de coco foi submetida a tratamento alcalino com 5% de NaOH (m/m), com adição de 1% NaBH₄ (m/m), na função de agente protetor. A presença do NaBH₄, como um agente de proteção teve como função minimizar a degradação da fibra de coco em meio aquoso e alcalino, com relação às iguais condições apenas com NaOH.

O procedimento utilizado no tratamento com 5% NaOH + 1% de NaBH₄ consistiu no preparo de uma solução contendo 396 g de NaOH e 79,2 g de NaBH₄ em 8,0 L de água

destilada, onde 60 g de biomassa, após serem agitadas na solução alcalina ora preparada, ficaram imersas por 24 h a 25°C. Após o tratamento, a biomassa de coco foi filtrada e lavada em água corrente e, por fim, colocada em estufa com circulação de ar a 60°C por 24 h.

3.2 Análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram realizadas em um microscópio marca LEO, modelo LEO 1450VP, localizado no Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de Lorena (EEL/USP). As superfícies das amostras de biomassa de coco *in natura* e tratadas foram revestidas por uma fina camada de ouro utilizando-se uma metalizadora, marca BAL-TEC, modelo MED 020 *Coating System*, provida com o sistema MCS 010 *Multi Control System*, também localizada no Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de Lorena (EEL/USP).

3.3 Ensaio de Tração

O teste de tração foi realizado em equipamento de ensaios mecânicos, da marca EMIC disponível no laboratório da UniFOA. Com célula de carga de 100 kN, velocidade de ensaio equivalente a 5 mm/min. Os corpos de provas foram confeccionados de acordo com as dimensões estabelecidas pela norma ASTM D638. Foram analisados 3 corpos de provas de cada família, obtendo o resultado que corresponde a média para cada composição. Para este trabalho, foram investigados o módulo de elasticidade, tensão máxima de ruptura e o alongamento, que determina a propriedade de tração dos compósitos desenvolvidos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados do Tratamento Alcalino da Fibra de Coco

Após a secagem da massa de biomassa proveniente da fibra de coco que passou pelo tratamento alcalino, foi encontrada uma massa de 48 g. Dessa forma, comparando-se com o valor inicial (60 g), ocorreu uma perda de massa de 12 g. Essa redução de massa era esperada, uma vez que o tratamento alcalino promove a remoção parcial de lignina, hemicelulose e outros componentes presentes na biomassa natural (por exemplo, ceras, extrativos, etc).

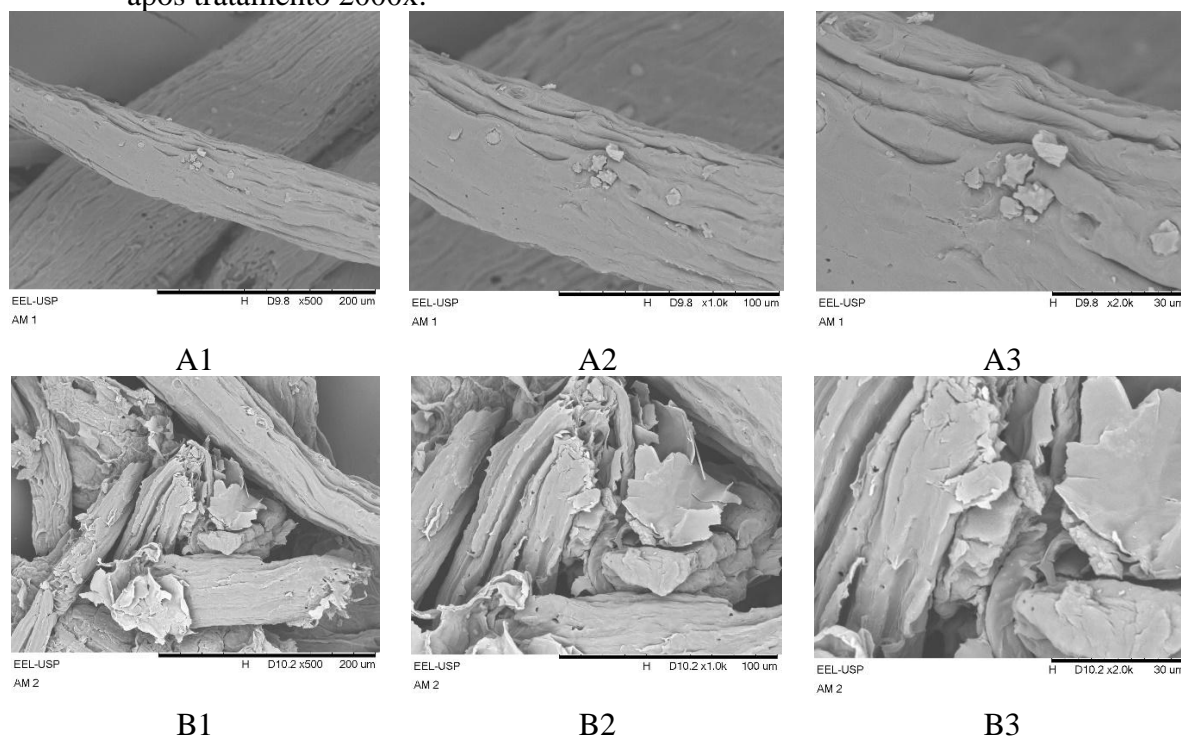
As análises por microscopia eletrônica de varredura tiveram por objetivo determinar as características das fibras “*in natura*” e tratadas quimicamente, quanto a morfologia e ao aspecto superficial, além de avaliar o efeito do tratamento químico alcalino sobre a superfície delas. As micrografias da biomassa “*in natura*” e tratada estão dispostas (Figura 5).

Analisando as imagens das fibras “*in natura*” (Figuras 5A1, 5A2 e 5A3), observou-se uma camada lisa superficial, que representa a casca da fibra, associada à presença de ceras e extrativos, além dos constituintes amorfos como a lignina e a hemicelulose.

Com o tratamento de alcalino com NaOH + NaBH₄, (Figuras 5B1, 5B2 e 5B3), as fibras mais externas apresentaram uma superfície rugosa com as fibrilas mais soltas e expostas, devido ao efeito da remoção da lignina. Considerando que a lignina atua como um ligante entre as fibrilas, ao ser retirada provocou o processo de fibrilação.

Vale ressaltar que nos trabalhos de Benini (2011) e Arantes et al. (2021) os autores também verificaram a alteração da morfologia e do aspecto superficial em fibras lignocelulósicas após passarem por tratamentos químicos de mercerização e branqueamento, tratamentos esses que objetivaram também a remoção da lignina.

Figura 5 - MEV da biomassa de fibra de coco: (A1) *in natura* 500x, (A2) *in natura* 1000x, (A3) *in natura* 2000x; (B1) após tratamento 500x, (B2) após tratamento 1000x, (B3) após tratamento 2000x.



Fonte: Autores (2025)

4.2 Resultados dos Ensaios de Tração

A adição de biomassa de coco (*in natura*) na matriz polimérica do PEAD praticamente não alterou a deformação do material até a tensão máxima, porém provocou uma redução em torno de 70% na deformação total do material. Este efeito da adição de fibras pode ser observado nos resultados apresentados a seguir (Tabela 1). Analisando os compósitos com biomassas de coco (*in natura*), observou-se que a adição de biomassas na matriz de PEAD não

provocou mudanças significativas nas propriedades mecânicas dos compósitos até a tensão máxima de resistência à tração, porém contribuiu para a redução na deformação total do material (alongamento). Com o aumento do volume de biomassa foi possível observar o aumento nos valores do módulo elástico e da tensão de escoamento com uma consequente redução na elongação total dos compósitos.

Este fenômeno foi associado ao fato de que o reforço promoveu uma redução da ductilidade do material. Assim, o caráter mais frágil do compósito foi maior de acordo com o aumento do volume de fibra, como já era de se esperar. Lembrando que a ductilidade corresponde à elongação total material devido à deformação plástica. Trabalhos da literatura também demonstraram esse comportamento devido ao aumento do volume de biomassas lignocelulósicas incorporadas em matrizes termoplásticas (Benini, 2011; Pereira, 2016; Pereira, 2017).

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de tração do PEAD puro e dos compósitos reforçados com a biomassa de coco *in natura*.

Materiais	Tensão de Escoamento (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Alongamento Percentual (%)
PEAD Puro	9,70 ± 0,6	32,33 ± 0,46	29,90 ± 0,46
PEAD + 10% FC _{in}	9,74 ± 1,17	51,26 ± 3,24	18,89 ± 3,24
PEAD + 20% FC _{in}	6,74 ± 3,95	39,65 ± 0,74	16,99 ± 0,74
PEAD + 30% FC _{in}	12,14 ± 0,25	86,71 ± 0,82	13,63 ± 0,82

(*) valores médios

FC_{in}: Fibra de Coco *in natura*

Fonte: Autores (2025)

Conforme pode ser observado (Tabela 1), apenas o compósito contendo 20% em massa de biomassa de coco *in natura* não apresentou a tendência de aumento nos valores do módulo elástico e da tensão de escoamento. Por esse motivo, o compósito contendo 20% de biomassa de coco *in natura* será reprocessado e novamente ensaiado para conferência.

Já a adição de biomassa de coco tratada na matriz polimérica do PEAD promoveu uma melhora significativa nas propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras tratadas, quando comparados com os valores que foram obtidos nos compósitos reforçados com as fibras *in natura*. Este efeito da adição de fibras tratadas pode ser observado nos resultados apresentados a seguir (Tabela 2).

Por exemplo, comparando os valores das propriedades mecânicas do compósito PEAD + 30% FC_{in} ($\sigma_{esc} = 12,14$ MPa e $E = 86,71$ MPa) com o compósito PEAD + 30% FC_{trat} ($\sigma_{esc} = 14,93$ MPa e $E = 123,40$ MPa), ocorreu um aumento de 23% no valor da tensão de escoamento e um aumento de 42% no valor do módulo de elasticidade.

Foi observado também que no uso da fibra de coco tratada ocorreu a tendência de aumento nos valores da tensão de escoamento e do módulo elástico com o aumento do teor de fibras tratadas no compósito. Isso pode ser justificado pelo fato de a fibra tratada ter um aspecto mais cristalino, devido à remoção de lignina (amorfa) e foi capaz de promover uma melhor dispersão na matriz do PEAD, promovendo uma uniformidade das propriedades mecânicas devido ao aumento gradual do teor de reforço em cada formulação de compósito estudada.

Com o aumento do volume de biomassa tratada também foi possível observar uma menor redução na elongação total dos compósitos, se comparado com os compósitos reforçados com a biomassa *in natura*.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios de tração do PEAD puro e dos compósitos reforçados com a biomassa de coco tratadas.

Materiais	Tensão de Escoamento (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Alongamento Percentual (%)
PEAD Puro	9,70 ± 0,6	32,33 ± 0,46	29,90 ± 0,46
PEAD + 10% FC _{trat}	11,83 ± 0,19	99,21 ± 3,19	27,62 ± 6,65
PEAD + 20% FC _{trat}	12,11 ± 0,15	105,70 ± 1,78	20,29 ± 3,82
PEAD + 30% FC _{trat}	14,93 ± 0,23	123,40 ± 0,50	18,25 ± 1,17

(*) valores médios

FC_{trat}: Fibra de Coco Tratada

Fonte: Autores (2025)

Portanto, quando se comparam os valores das propriedades entre os dois tipos de fibras que foram estudadas (*in natura* e tratada), pode-se notar que as propriedades mecânicas nos compósitos PEAD/FC_{Trat} foram superiores quando comparado com o compósito PEAD/FC_{in}. Esses resultados já eram esperados, uma vez que, a partir das imagens de MEV, pode-se notar que a fibra de coco tratada apresentou um aspecto mais rugoso, quando comparada com fibra *in natura*. E esse aspecto mais rugoso da fibra de coco tratada pode ser contribuído para maximizar o efeito de ancoragem da fibra tratada na matriz polimérica do PEAD, promovendo uma melhor interação reforço/matriz no compósito formado. No trabalho realizado por Benini

(2010), a autora também observou esse ganho nas propriedades mecânicas em compósitos de HIPS reforçados com fibra de coco tratadas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O tratamento químico alcalino na biomassa proveniente da fibra de coco, teve como objetivo melhorar a compatibilidade da biomassa natural quando utilizada como agente de reforço em compósitos poliméricos de matrizes termoplásticas.

Após a secagem da massa de biomassa de coco que passou pelo tratamento alcalino, foi possível avaliar a eficiência do tratamento químico, uma vez que foi verificada uma perda de massa que, por sua vez, pode ser atribuída a remoção parcial de lignina, hemicelulose e outros componentes presentes na biomassa natural. A partir das imagens de MEV, pode-se verificar que as fibras apresentaram uma superfície rugosa, devido ao efeito da remoção da lignina. Considerando que a lignina atua como um ligante entre as fibrilas, ao ser retirada provocou o processo de fibrilação.

Dessa forma, a biomassa de fibra de coco após sofrer o tratamento alcalino com NaOH e NaBH₄ pode ser uma alternativa eficiente para ser utilizada como agente de reforço em compósitos poliméricos, melhorando a interface fibra/matriz e, com isso, promovendo melhoras significativas nas propriedades mecânicas e térmicas dos compósitos, quando comparadas com compósitos onde são usadas fibras *in natura* como agente de reforço.

Em relação à resistência a tração dos compósitos reforçados com fibras de coco *in natura*, verificou-se que a adição de biomassa de coco na matriz polimérica do PEAD praticamente não alterou a deformação do material até a tensão máxima, porém provocou uma redução em torno de 70% na deformação total do material. Também foi constatado que a adição de biomassa de coco *in natura* na matriz de PEAD não provocou mudanças significativas nas propriedades mecânicas dos compósitos até a tensão máxima de resistência à tração, porém contribuiu para a redução na deformação total do material (alongamento). Com o aumento do volume de biomassa foi possível observar um aumento nos valores do módulo elástico e da tensão de escoamento com uma consequente redução na elongação total dos compósitos.

Agora sobre a resistência a tração dos compósitos reforçados com fibras de coco tratada, com base nos resultados apresentados, conclui-se que a adição de biomassa de coco tratada na matriz polimérica de PEAD promoveu melhorias significativas nas propriedades mecânicas dos compósitos. Os compósitos reforçados com fibras tratadas demonstraram aumentos consideráveis na tensão de escoamento e no módulo de elasticidade em relação aos reforçados com fibras *in natura*, evidenciando a eficácia do tratamento da fibra. Esses ganhos podem ser

atribuídos à remoção de lignina durante o processo de tratamento, que resultou em uma fibra mais cristalina e com melhor interação com a matriz polimérica. Além disso, a tendência de aumento das propriedades mecânicas com o teor crescente de fibras tratadas reforça a viabilidade do uso da biomassa tratada para aprimorar o desempenho mecânico dos compósitos. Por fim, a menor redução na elongação total observada nos compósitos com biomassa tratada destaca o potencial dessa abordagem na produção de materiais com maior equilíbrio entre rigidez e ductilidade.

Com base na análise dos resultados apresentados neste trabalho, conclui-se que a utilização de biomassa de coco, tanto *in natura* quanto tratada, como agente de reforço em compósitos de PEAD apresenta potencial promissor, especialmente em termos de sustentabilidade e eficiência de custo. O tratamento químico das fibras de coco revelou-se eficaz para melhorar a compatibilidade entre fibra e matriz polimérica, resultando em significativas melhorias nas propriedades mecânicas, como tensão de escoamento e módulo de elasticidade, além de reduzir a elongação total dos compósitos.

REFERÊNCIAS

- ALBINANTE, S. R. et al.: Revisão dos Tratamentos Químicos da Fibra Natural para Mistura com Poliolefinas. **Quim. Nova**, v. 36, n. 1, p. 114 – 122, 2013.
- BARBOSA JR, V.; RAMIRES, E. C.; RAZERA, I. A. T.; FROLLINI, E. **Biobased composites from tannin-phenolic polymers reinforced with coir fibers**. Industrial Crops and Products, In press, 2010.
- BENINI, K.C.C.C. **Development and characterization of polymeric composites reinforced with lignocelulosic fibers: HIPS/ green coconut husk and sugarcane bagasse fibers**. 2011. 125f. *Thesis (Master in Mechanical Engineering)* – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.
- CURY, T.R.P., **Obtaining And Characterizing High Density Polyethylene Compositions Incorporated With Organosolv Sugarcane Bagasse Pulp**. 2016. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha – Campus Três Poços, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda.
- ESMERALDO, M. A. **Preparação de novos compósitos suportados em matriz de fibra vegetal/natural**. 2006, 119f. Dissertação (Mestrado em Química Inorgânica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.
- SPINACÉ, M.A.S.: **Compósitos poliméricos com fibras vegetais: Produção dos compósitos, tipos, propriedades, aplicações, desafios, limitações e perspectivas**. UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC- Centro de Ciências Naturais e Humanas, São Bernardo do Campo Maio / 2015.
- TROEDEC, M.L.; SEDAN, D.; PEYRATOUT, C.; BONNET, J. P.; SIMITH, A.; GUINEBRETIRRE, R.; GLOAGUEN, V.; KRAUSZ, P. **Influence of various chemical treatments on the composition and structure of hemp fibres**. **Composites: Part A**, v.39, p. 514-522, 2008.

TROEDEC, M.L.; SEDAN, D.; PEYRATOUT, C.; BONNET, J. P.; SIMITH, A.; GUINEBRETIRRE, R.; GLOAGUEN, V.; KRAUSZ, P. *Influence of various chemical treatments on the composition and structure of hemp fibres*. **Composites: Part A**, v.39, p. 514-522, 2008.

WALLENBERGER, F. T.; WESTON, N. Natural Fibers, *Plastics and Composites*. **Kluwer Academic Publishers**, cap 14,249-274, 2004.