



## PROPRIEDADES MECÂNICA E QUÍMICA DAS FIBRAS VEGETAIS RESINADAS: CANA DE AÇÚCAR E BAMBU

JORGE MIGUEL DE OLIVEIRA<sup>1</sup>, ROBERTO OUTA<sup>1,2</sup>, FABIO ROBERTO CHAVARETTE<sup>3</sup>, APARECIDO CARLOS GONÇALVES<sup>2</sup>, FAUZE AHMAD AOUADA<sup>4</sup>, MÁRCIA REGINA DE MOURA AOUADAD<sup>4</sup>; MÁRIO JEFFERSON QUIRINO LOUZADA<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Faculdade de Tecnologia de Araçatuba – FATEC

Department of Biofuels

Araçatuba, Av. Prestes Maia, 1764 - Jd. Ipanema, CEP: 16052-045, Araçatuba, Brasil

<sup>2</sup>UNESP - Univ.Estadual Paulista

Faculty of Engineering of Ilha Solteira, Mechanical Engineering Department,  
Brasil Avenue, 56, 15385-000, Ilha Solteira, SP, Brasil

<sup>3</sup>UNESP - Univ.Estadual Paulista,

Faculty of Engineering of Ilha Solteira, Department of Mathematics,  
Brasil Avenue, 56, 15385-000, Ilha Solteira, SP, Brasil

<sup>4</sup>UNESP - Univ.Estadual Paulista

Faculty of Engineering of Ilha Solteira, Department of Physics and Chemistry, Brasil Avenue, 56, 15385-000, Ilha Solteira, SP, Brasil

<sup>5</sup>Unisalesiano – Araçatuba

Department of Engineering

Rod. Sen. Teotônio Vilela, 3821 - Alvorada, Araçatuba - SP, 16016-500, Brasil

(Recibido 15 de noviembre de 2018, revisado 18 de febrero de 2019, para publicación 21 de febrero de 2019)

**Resumo** – O objetivo deste trabalho de pesquisa é obter referências quantitativas e qualitativas das características físicas e químicas das fibras alongadas Mercerizadas da cana e bambu com aplicação superficial de um adesivo industrial. O processo de obtenção destas características se inicia da mercerização das fibras utilizando hidróxido de sódio (NaOH) e a sobreposição da resina industrial nas fibras Mercerizadas, após as fibras são submetidas aos esforços de tração para a análise das características mecânicas, e por fim, a análise química por difração de raios-X, DRX. O resultado deste processo inovador mostra que a fase matriz-reforço foi bem-sucedida na fibra de bambu, sendo o valor de resistência a tração de 110.28 MPa e o módulo de elasticidade de 6.09 GPa, com características de um compósito estrutural tornando possível sua aplicação no mercado industrial, porém, para a fibra de cana, os resultados foram inversos.

**Palavras-chave** – Ensaio Mecânico, fibra de cana e bambu, DRX, mercerização, matriz polimérica.

### 1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho são apresentados resultados do ensaio mecânico das fibras sobrepostas com resinas industriais de cana de açúcar e bambu, cujo resultado mostra boas referências qualitativas e quantitativas para aplicação industrial.

As fibras vegetais, de uma forma geral, têm sido introduzidas como materiais de aplicações em diferentes áreas da engenharia, por serem biodegradáveis e de fácil acesso. Com isso, as matrizes poliméricas se tornaram relevantes nos campos da aeronáutica, aeroespacial, construção civil, bioengenharia, automobilística, entre outras, por combinarem as características básicas de matriz e reforço, proporcionando maleabilidade aos produtos e atendendo as necessidades dos projetos [1, 2], além de serem de baixo custo.

Diferentes pesquisadores têm dedicado o tempo de pesquisa para adquirir informações sobre as características e comportamentos físicos e químicos das matrizes poliméricas compostas de fibras vegetais em diferentes aplicações. Estes estudos ocorrem porque as fibras são materiais ligados a sustentabilidade. Com isso, podemos citar alguns trabalhos relacionados principalmente com as fibras de cana de açúcar e bambu, e outras fibras vegetais.

Em um dos trabalhos se utiliza as fibras de algodão, sisal e bagaço da cana de açúcar como reforço de matriz polimérica, devido ao baixo custo e afinidade das fibras lignocelulósicas, cujo resultado do ensaio mecânico mostra que o compósito polimérico de algodão, e do bagaço da cana de açúcar demonstram uma resistência alta a flexão; os compósitos poliméricos de sisal, mostram um aumento de resistência continua a flexão, dado o aumento do volume da fibra; já os compósitos poliméricos de algodão cru apresentam valores altos de resistência a rigidez. Na aplicação da microscopia de varredura eletrônica (MEV) todos os compósitos têm boa adesão entre a fibra e matriz [3].

Em um outro trabalho, é estudado as propriedades físico-mecânicas de painéis fabricados com madeira, bambu, e casca de arroz, adicionando uréia-formaldeído na proporção de 8% de massa seca, também foram confeccionados diferentes tipos de compósitos de proporções diferentes, incluindo parafina. Todos os tipos de compósitos foram submetidos ao ensaio mecânico para análise de resistência e rigidez, apresentando resultados satisfatórios para a produção de painéis só com partículas de bambu e misturadas com partículas de madeira. No entanto, para os compósitos com partículas de arroz o resultado não foi muito promissor [4].

Neste trabalho, foi mostrado a aplicação do compósito epóxi reforçado com fibra de bambu gigante como apoio no revestimento cerâmico de uma armadura à prova de balas, este protótipo atua com eficiência, diminuindo a energia de impacto dos fragmentos do projétil [5].

Em um outro trabalho, as fibras de cana de açúcar e bambu Mercerizadas em uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 10%, foram submetidas ao teste destrutivo chamado ensaio mecânico, e mostraram boas qualidades de resistência mecânica em ambas as fibras quando comparadas a materiais de alto impacto e de alta e baixa densidade, podendo assim ser utilizadas em aplicações ligadas a utensílios domésticos, brinquedos, entre outros [6]. Seguindo a linha de pesquisa, em um outro trabalho, as fibras de cana de açúcar e bambu são utilizadas como absorvedores acústicos, sendo que, essas fibras foram Mercerizadas em uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 10% para propiciar à fibra um aumento de volume e possível alívio de tensões internas. O resultado encontrado, mostrou que as fibras têm significância qualitativa e quantitativa como materiais de absorção acústica [7].

Neste trabalho, as fibras vegetais de linho, juta ou cânhamo, são utilizados como reforços em compósitos poliméricos de aplicação estrutural, cuja análise foi direcionada ao teste de fogo sob aquecimento radiante unilateral combinado a carga de tração estática. O resultado desta experimentação mostrou que essas fibras vegetais inseridas como reforços poliméricos podem aumentar o risco de incêndio, e também possuem propriedades inferiores à tração, em relação aos materiais de fibra de vidro E, ou seja, de uma forma geral, apresentam riscos de falha estrutural [8].

Num outro estudo, foram aplicados testes mecânicos para analisar a resistência à tração e compressão das fibras de cana de açúcar e bambu com aplicabilidade em materiais de reforço estrutural. Estes testes mostraram que a fibra de bambu tem uma melhor resistência mecânica e módulo de elasticidade quando comparado ao protótipo do concreto com a fibra de cana [9].

Como visto nestes diferentes trabalhos, os compósitos de fibras vegetais têm diversas aplicações e estas podem ser tratadas de forma a atender a necessidade de projeto. Em específico, neste projeto, as fibras serão Mercerizadas e sobrepostas por uma resina industrial, e a adesividade e o comportamento de resistência a tração no ensaio destrutivo serão analisadas. Por fim, o compósito fibroso de cada fibra vegetal, cana de açúcar e bambu, serão analisadas por difração de raio-X (DRX).

## 2. COMPÓSITOS DE FIBRAS NATURAIS E MATRIZ POLIMÉRICA

As fibras de um modo geral podem ser entendidas como um composto natural ou sintético que possui a sua forma alongada maior que a área de secção transversal, cujas medidas variam de  $10\mu\text{m}$  a  $50\mu\text{m}$  de diâmetro e comprimento superior a  $10\text{mm}$ . Possuem formas de tubos microscópicos, cuja paredes celula-

res, se formam ao redor do lúmen central, propiciando a absorção de água. As paredes celulares são formadas à partir do reforço de microfibras de celulose semicristalinas, justapostas em forma matricial de hemicelulose e lignina de diferentes composições [10, 11].

A hemicelulose é solúvel em concentrações baixas de álcali e a lignina sofre hidrólise básica, resultando no aumento da rugosidade superficial da fibra e melhora de aderência mecânica [12]. O tratamento com o NaOH promove ao aumento da quantidade de celulose amorfa e, na presença de água, esta tem um aumento de volume alterando a cristalinidade de monoclinica para polimórfica [12]. O método de tratamento químico pode melhorar a qualidade da resistência da fibra e da deterioração, considerando o tempo e quantidade de exposição em uma solução química [12, 13]. A Mercerização é um desses processos químicos que atuam na fibra vegetal proporcionando resistência às fibras, através do aumento de volume da fibra e alívio das tensões da mesma [12, 14, 15].

As fibras naturais consideradas como reforço da matriz polimérica e são divididas em dois grupos, sendo o primeiro, baseados nas fibras das plantas consideradas de maior abundância e de fácil acesso; e o segundo, baseado nas fibras dos animais difíceis de se obter [16].

Os materiais compósitos são a união de dois ou mais materiais, cuja finalidade é a de atender um projeto em específico, contribuindo com a melhora de características dos materiais, como dureza, densidade, resistência mecânica, entre outros. Esses materiais compósitos, geralmente, são representados pela junção de um material e de partículas, considerados a fase matriz e fase dispersa, respectivamente [16]. A importância dos estudos em compósitos, surge quando um material compósito altera o seu comportamento desde a estrutura atômica, até a macroscópica, modelados por equações matemáticas [17]. Portanto, os materiais compósitos contém propriedades de diversidade nas aplicações estruturais, semiestruturais e não-estruturais, assim, apresentando elevada relação peso-resistência; baixa densidade; boa influência a fadiga; tempo de vida útil elevado; produção de peças de forma líquida; amortecimento interno; projetado para expansão térmica desejada; boa estabilidade dimensional; boa resistência ao desgaste sob carga pesada; alta resistência ao impacto; e pode ser fabricado conforme necessidade de tamanho variando os componentes; entre outros [18].

Os materiais compósitos comuns têm uma fase continua, chamada de matriz, e uma fase dispersa na forma de partículas, fibras, e/ou camadas de folhas, que são incorporadas na matriz como reforço. De uma forma geral, para se formar um compósito fibroso, a distribuição entre o polímero e a fibra vegetal é feita considerando de 10% a 20% de polímero, e de 80% a 90% da fibra. Se o compósito de fibra vegetal for constituído por folhas, é chamado de compensado; se for constituído por fibras, é chamado de painéis de fibras; se for constituído por partículas, é chamado de aglomerado [16]. A matriz é reforçada por fibras rígidas e sistematicamente dispostas, anisotrópicas, e tem as fibras longas se comparadas ao diâmetro, com a proporção de 50% de fibras [19].

Com isso, esses materiais propiciam maior resistência a fadiga, melhoram da relação resistência-peso, melhoram na rigidez, resultando em um conjunto que contém características de maior maleabilidade e ductilidade [20].

Os polímeros podem ser divididos em duas categorias: os polímeros naturais e os sintéticos, sendo que os polímeros naturais são sintetizados por organismos vivos e chamados de biopolímeros [21], o polímero sintético é produzido sinteticamente, com composição estrutural similar ao natural, e pode ser chamado de plástico [22]. Os polímeros naturais podem ser oriundos da lignocelulose formada pela celulose, hemicelulose e lignina, já os polímeros sintéticos são formados por duas reações químicas conceituadas, sendo a primeira, formado pela junção de monômeros idênticos entre si que formam uma molécula final, cujo processo é considerado o polimerização por adição; e a segunda, formado pela combinação de dois monômeros distintos entre si, eliminando a molécula simples, cujo processo é considerado polimerização por condensação [22]. Os polímeros sintéticos são também comumente chamados de plástico.

### 3. ADESÃO E ADESIVIDADE

A definição de adesivo pode ser entendida como um determinado material aplicado na superfície de diferentes materiais, resultando na união permanentemente através de um processo de colagem, assim, o adesivo é uma substância que forma ligações para cada um dos dois ou mais materiais transformando-os

em um único objeto final. A partir de que dois corpos sejam unidos pela adesividade é possível que existam forças mecânicas unindo-as, chamadas de forças de van der Waals ou ligações químicas, cujo resultado é a resistência mecânica do sistema localizado na região de interface entre as partes. As tensões internas, localizadas na região de contato, transmitem tensões uniformemente e em muitos casos a ligação adesiva é mais forte que a resistência de aderência dos materiais [13].

Os adesivos podem ser de origem natural e produzidos sinteticamente. A produção dos sintéticos variam conforme as especificações e necessidades de aplicação. O adesivo natural pode ser de origem animal, vegetal, amido e éter celulósico, enquanto os sintéticos termoplásticos são poliacetato de vinila (PVAc), polietileno, borracha sintética, hot-melt, entre outros. Os adesivos sintéticos termoendurecedores são fenol-formaldeído, fenol-melanina, uréia-formaldeído, isocianato, entre outros [13, 23].

A adesividade, interação entre os átomos e moléculas, ocorre quando se tem uma aproximação estreita ou inferior a 1 nm, e as forças de adesão são calculadas desta energia de interação, cujos valores teóricos (MPa), em relação a uma dada unidade de superfície, são mais elevados do que a resistência do adesivo de substâncias orgânicas [24]. O cálculo de adesão é baseado no ângulo de contato, geralmente chamado  $\alpha$ , que é formado por uma gota líquida de baixa viscosidade aplicada em um material no estado sólido [24].

Este novo método para medição de ângulos de contado em fibras naturais [25], baseia-se no cálculo do ângulo de contato, em forma líquida de uma meia lua esférica na coluna morfológica, formado entre duas fibras paralelas, e separadas por um espaçamento pequeno. Este ângulo de contato auxilia a prever o comportamento da penetração do fluido entre as fibras, nas superfícies não uniforme da secção transversal, diâmetros não uniformes, e superfícies rugosas [25]. A equação para determinar a altura da meia lua, utiliza a teoria de Clanet e Quéré, e pode ser demonstrada através da equação (1),

$$z \approx r \cos \theta \ln \left( \frac{4k}{r + r \operatorname{sen} \theta} \right) \quad (1)$$

onde  $z$  é a altura da meia lua da resina,  $r$  é a metade do diâmetro da fibra,  $k$  é o comprimento da capilaridade, e  $\theta$  é o ângulo de contato da altura da meia lua. A Fig. 1 mostra as referências da meia lua e o ângulo de contato  $\theta$ .

Nota-se que, nesta fig.,  $h$  é a medida que representa um raio de curvatura,  $d$  é a distância entre as fibras, e a fig. em azul representa o fluido. A Fig. 2 mostra a referência geométrica, especificando o método para se obter o raio da meia lua do fluido entre as fibras [25].

É possível de se medir o ângulo de contato entre a meia lua e a fibra utilizando a seguinte equação [25],

$$\theta = 90 - 2 \tan^{-1} \left( \frac{2h}{d} \right) \quad (2)$$

Esta equação demonstra que se  $\theta = 0^\circ$  o espalhamento é completo, e que o diâmetro da fibra atua diretamente na transição da gotícula, portanto, a distância máxima,  $d_m$ , entre a duas fibras paralelas de diâ-

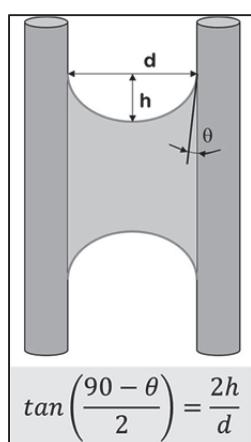


Fig. 1. Referências do ângulo de contato e formação da meia lua entre as fibras.

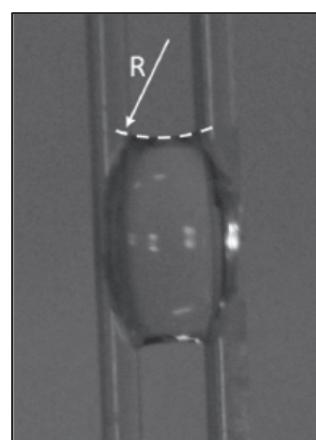


Fig. 2. Especificação do raio da meia lua.

metro  $a$ , que assegura a queda da gota transitando na morfologia da coluna, e pode ser representada como [24],

$$\frac{d_m}{a_1} = \sqrt{2 \frac{a_2}{a_1}} \quad (3)$$

Se as fibras forem compostas do mesmo diâmetro aproximado, utiliza-se a equação (4) [25],

$$\frac{d_m}{a} = \sqrt{2} \quad (4)$$

Portanto, a distância entre as fibras deve ser menor que  $1,414 a$  para a gota se espalhar na coluna morfológica [25].

Este método prevê limitações no sucesso do resultado, quando a qualidade da fibra interfere na formação da meia lua. Neste caso, as fibras não podem ter separações entre elas, e nas secções não se podem formar pontas duplas, e ainda, é necessário averiguar as condições entre as distâncias e os diâmetros das fibras, mantendo-os dentro das condições iniciais e simuladas numericamente [25]. De uma forma geral, as fibras naturais variam a secção transversal, dimensões e propriedades físicas e possuem superfícies rugosas, e durante as medições do ângulo de contato, o líquido é frequentemente absorvido pelas fibras naturais e os resultados podem demonstrar insucesso [25].

#### 4. PROPRIEDADES MECÂNICAS EM MATERIAIS ADESIVOS

O conceito das propriedades mecânicas dos materiais geralmente são o conceito do módulo de elasticidade, conceitos de fratura, fadiga do material, e também informações da análise de flexão de vigas, entre outros, todos aplicados na adesividade do aglutinante. As forças físicas que podem ser aplicadas no adesivo ou qualquer material relacionado a este, podem ser demonstradas adotando como referência um desenho geométrico na forma de paralelepípedo, e as forças atuantes sobre a superfície desta fig. serão forças de tração e/ou compressão, cisalhamento, forças tangenciais (momento torsor) e clivagem [26].

As forças incidentes na superfície do material, principalmente a força de cisalhamento tem grande importância nos testes de performance dos materiais com adesivos aglutinantes, sendo que a maioria dos adesivos aglutinantes são especificamente desenvolvidos para aplicações específicas das forças envolvidas. A força de clivagem tem relação direta com materiais anisotrópicos, o qual tem relação direta com a cristalinidade do material e dos possíveis nós na direção do alongamento da fibra [26]. A força de tensão pode ser calculada como,

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5)$$

sendo  $\sigma$  a tensão resultante da força aplicada no material,  $F$  a força aplicada no material, e  $A$  a área da secção transversal do material. O alongamento também pode ser calculado, assim,

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (6)$$

e  $\varepsilon$  é a tensão elástica,  $l$  o comprimento alongado, e  $l_0$  é o comprimento original. Através deste equacionamento é possível parametrizar informações de diferentes materiais e mostrá-las em um gráfico tensão-deformação. A Fig. 3 mostra o gráfico tensão-deformação [26].

A força de cisalhamento, pode ser calculada como,

$$\tau = \frac{E}{2.(1+\nu)} \quad (7)$$

onde  $\tau$  é a tensão de cisalhamento,  $E$  é o módulo de Young,  $\nu$  é o coeficiente de Poisson de um material homogêneo e isotrópico. Na adesividade os materiais têm comportamento físico similar ao conceito de deformação de vigas, portanto, qualquer modelo físico que possa se enquadrar nesta condição, pode ser calculado matematicamente utilizando diferentes conceitos, como o conceito de resistência de materiais por Timoshenko [26].

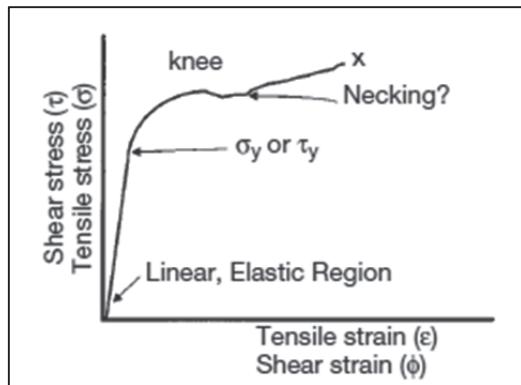


Fig. 3. Gráfico tensão-deformação.

## 5. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

### 5.1. Medição de Ângulo de Contato de Fibras Naturais

A princípio, este método é aplicado a fluidos que se espalham sobre as fibras, cujo ângulo resultante do contato seja inferior a  $90^\circ$  [25]. Com isso, as fibras alongadas Mercerizadas de cana e bambu foram submetidas a deposição superficial da resina RQF100, RQF110, e RQF120 para análise do comportamento do angulo de contato entre a resina e as respectivas fibras.

A resina é uma resina sintética epóxi líquido transparente, bi componente, formado pela proporção de resina (100%) e endurecedor (45%), que pode ser aplicado a frio temperatura ambiente de  $15^\circ$  a  $45^\circ\text{C}$ , ou, a quente em estufa de  $40^\circ$  a  $60^\circ\text{C}$ , fornecida pela empresa Alpha Resiqualy. Esta resina contém três características distintas, sendo a primeira, RQF100 uma resina rígida; a segunda, RQF110 uma resina semi-rígida; e a terceira, RQF120 uma resina flexível. A medição do ângulo de contato  $\theta$ , foi feita baseando-se na técnica apresentada por [24] e a distância média entre as fibras é de 2,0 mm, o qual, atende as condições de distância máxima dada pela equação  $d_m = \sqrt{2} a$ , cujo resultado  $d_m < 2,828$ . A Fig. 4 a 5, lado esquerdo e direito, LE e LD respectivamente, mostram a resina RQF100 sobre a fibra da cana de açúcar.

As aplicações para as resinas RQF110 e RQF120, também foram desenvolvidas e contém o formato e geometria similares aos das Fig. 4 e Fig. 5, tanto para as fibras de cana de açúcar, como as de bambu.

A tabela 1 mostra o resultado do ângulo de contato entre as fibras de cana e bambu para as resinas RQF100, RQF110 e RQF120.

O resultado da medição dos ângulos de contato das diferentes resinas sintéticas nas fibras vegetais, mostra que todos os resultados encontrados são inferiores a  $90^\circ$ , portanto, estes resultados se enquadram na técnica apresentada. A resina pode ser aplicada com segurança sobre as fibras de cana de açúcar e bambu.

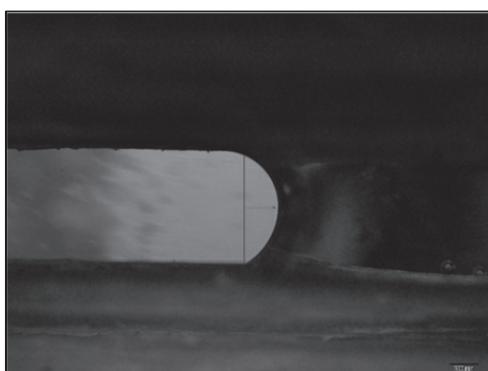


Fig. 4. RQF100 LE Fibra Cana.

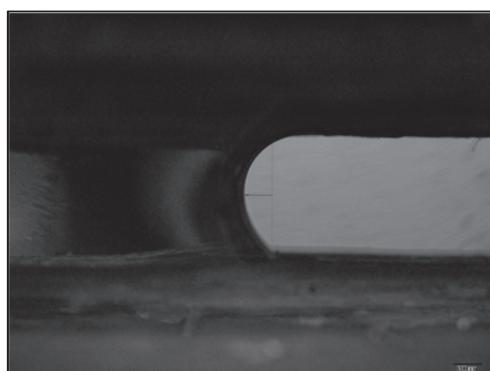


Fig. 5. RQF100 LD Fibra Cana.

Tabela 1. Medição do ângulo de contato da resina sintética x fibras vegetais.

Fibras Vegetais	Angulo de Contato da Resina Sintética		
	RQF100 ( ° )	RQF110 ( ° )	RQF120 ( ° )
Fibra de Cana	88,54	88,34	88,86
Fibra de Bambu	87,13	88,10	88,92

## 5.2. Ensaio Mecânico da Fibra de Cana e Bambu com Resina Sintética

O ensaio mecânico foi feito baseando-se na norma ASTM C1557-14, *Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers*, que especifica condições de trabalho para a fibra individual a temperatura ambiente, determinando a resistência a tração e módulo de Young. A máquina utilizada para este teste mecânico é da marca EMIC modelo DL3000, com capacidade de 30 kN, de duas colunas guias cilíndricas paralelas, de velocidade de 0,01 a 1000 mm/min, de classe de medição e força – classe 1 - ISO7500-1.

Os testes destrutivos com as fibras de cana de açúcar e bambu, foram repetitivos até conseguir coletar, para cada fibra vegetal, 10 amostras com 819 dados de deslocamento. Essas amostras apresentavam boa qualidade, porque foi considerado o seguindo o critério: a fibra não deve se romper no local de fixação, entre o dispositivo e a fibra, conforme especificado na norma ASTM C1557-14, item 4.3. Assim, foram escolhidas três amostras de cada fibra para compor os respectivos gráficos.

As diferentes resinas sintéticas, RQF100, RQF110 e RQF120, são formadas por um epóxi líquido, bi-componente, de composição de mistura proporcional, para 100% de resina se adiciona 45% de endurecedor. Estas resinas foram aplicadas a temperatura ambiente e colocadas individualmente sobre cada fibra de cana e bambu. O processo de sobreposição da resina na fibra, foi feito considerando as especificações do fabricante, utilizando uma seringa de uso genérico. A fibra alongada mercerizada de cana e bambu tem diâmetro aproximado de 2.0 mm, e comprimento aproximado de 150.0 mm.

As fibras de cana e bambu mercerizadas, sobrepostas com as resinas sintéticas RQF100, RQF110, e RQF120, não sofreram alterações dimensionais significativas, continuando a ter formas dimensionais irregulares, porém, a superfície da fibra adquiriu um aspecto brilhante e liso. As Fig. 6 e 7 mostram as fibras de cana de açúcar (FC), e fibras de bambu (FB) sobrepostas com a resina sintética.

Para o teste de tensão das fibras foi utilizado um dispositivo mandril, ligado a célula de carga, cuja função do dispositivo mandril é a de distribuir uniformemente a pressão de fixação sobre a fibra vegetal utilizando as castanhas. Desta forma, é possível evitar a dobra e rompimento da fibra vegetal. A Fig. 8 mostra a máquina EMIC e o dispositivo mandril, conjuntamente com a fibra posicionada nos dispositivos mandris, sendo a parte superior acoplada na célula de carga.

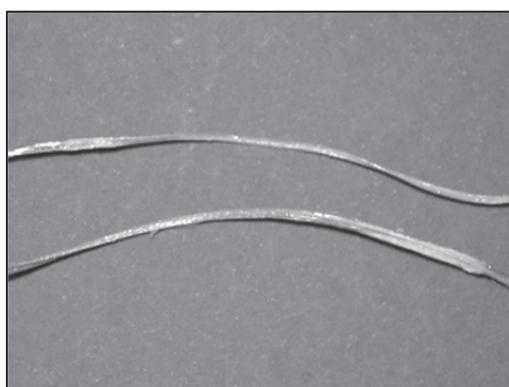


Fig. 6. FC com Resina Sintética.

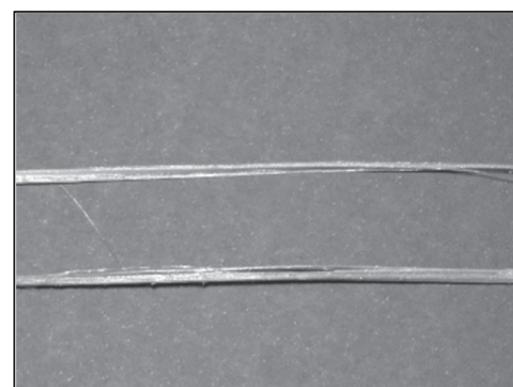


Fig. 7. FB com Resina Sintética.



Fig. 8. Teste de Ensaio Mecânico.

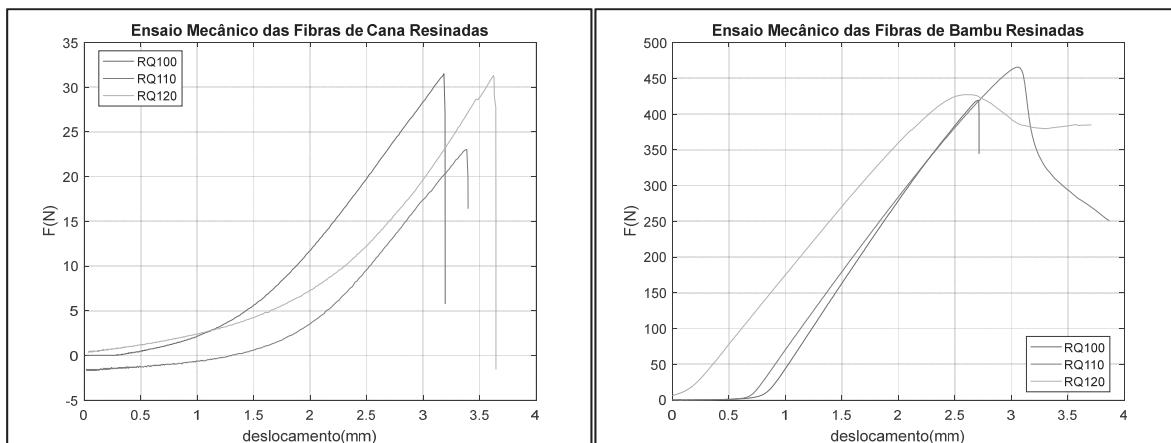


Fig. 9. Ensaio Mecânico das Fibras da Cana de Açúcar Resinada.

Fig. 10. Ensaio Mecânico das Fibras de Bambu Resinado.



Fig. 11. Rompimento da fibra de bambu.



Fig. 12. Rompimento da fibra de cana.

O resultado do teste de ensaio mecânico pode ser mostrado na Fig. 9 e 10, com os resultados das fibras de cana e bambu resinados, respectivamente.

Para que o ensaio mecânico seja validado, e os dados das amostras sejam utilizados, as fibras de cana de açúcar e bambu devem se romper a uma distância acima do local de fixação do dispositivo que fixa a fibra. No caso adotamos uma distância media central entre as pinças de fixação. Esta condição é determinada pela norma ASTM C1557-14, item 4.3. As Fig. 11 e 12 mostram o rompimento da fibra de bambu e cana de açúcar, respectivamente, após submetidos a força de tração na máquina de ensaio mecânico.

Tabela 2. Resultado do Ensaio Mecânico das Fibras Resinadas.

Resina Sintética	Característica da Fibra	Cana	Bambu
RQF100	Força de Tração (N)	31,5	419,2
	Tensão de resistência a tração (MPa)	8,3	110,3
	Deformação elástica (mm)	0,0213	0,0181
	Módulo de Elasticidade (GPa)	0,4	6,1
RQF110	Força de Tração (N)	23,0	465,5
	Tensão de resistência a tração (MPa)	6,1	122,5
	Deformação elástica (mm)	0,0227	0,0258
	Módulo de Elasticidade (GPa)	0,3	4,7
RQF120	Força de Tração (N)	31,3	427,0
	Tensão de resistência a tração (MPa)	8,2	112,3
	Deformação elástica (mm)	0,0243	0,0247
	Módulo de Elasticidade (GPa)	0,3	4,5

Tabela 3. Resultado Média, Variância e Desvio Padrão das Fibras Resinadas.

Fibra	Resina Sintética	Média	Variância	Desvio Padrão
Cana	RQF100	0,75	0,78	0,88
	RQF110	0,80	0,89	0,94
	RQF120	0,91	1,15	1,07
Bambu	RQF100	0,81	0,46	0,68
	RQF110	1,01	0,97	0,98
	RQF120	0,83	0,96	0,98

Os valores de força de tração (N), tensão de deformação (MPa), deformação elástica (mm), e módulo de elasticidade (GPa), podem ser mostrados na tabela 2.

O erro amostral foi feito utilizando o teorema de cálculo amostral finito, considerando que foram medidos 819 pontos, e que, seriam necessários 611 pontos de medições, para garantir 95% de confiança, cujo erro é de 2%. Na tabela 3 pode ser visto a média, variância e desvio padrão dos dados do ensaio mecânico.

### 5.3. Discussão Geral do Trabalho

Um dos propósitos de aplicação direta destes compósitos estruturais, está ligado na continuidade deste trabalho, definido na engenharia acústica, em que o material pode ser utilizado como absorvedor acústico, cuja energia de propagação da onda sonora pode ser dissipada conforme a montagem do produto. Por isso, as características qualitativas e quantitativas desses compósitos representam informações que podem alterar a aplicação em diferentes projetos. Pode-se citar que o coeficiente de absorção sonoro para as fibras alongadas e Mercerizadas de cana de açúcar e bambu, ambas sem resina, absorvem a energia acústica entre 10% a 21%, considerando as frequências de 500Hz, 1000Hz e 2000Hz [7].

O ensaio mecânico, neste trabalho, foi aplicado para determinar as características mecânicas dos compósitos das fibras Mercerizadas alongadas e resinadas, pois esta qualidade, determina o desempenho destes materiais como compósito estrutural. Desta visão, pode-se explicar que o processo de Mercerização

Tabela 4. Resultado Comparativo entre Fibras Vegetais sem Resina e Sobrepostas com Resina Sintética.

Fibras Característica		Força Tração (N)	Tensão de resistência a tração (MPa)	Deformação Elástica	Módulo de Elasticidade (GPa)
<b>Bambu</b>	fibra seca sem resina Outa et al., (2016)	288,08	91,70	0,03	3,09
	RQF100	419,22	110,28	0,02	6,09
	RQF110	465,49	122,46	0,03	4,75
	RQ120	427,01	112,33	0,02	4,54
<b>Cana de Açúcar</b>	fibra seca sem resina Outa et al., (2016)	85,60	27,25	0,03	1,04
	RQF100	31,50	8,29	0,02	0,39
	RQF110	23,03	6,06	0,02	0,27
	RQF120	31,30	8,23	0,02	0,34

auxilia na diminuição das impurezas superficiais das fibras vegetais, e que a fibra de bambu sem resina tem uma maior resistência a tração em relação a fibra da cana de açúcar sem resina, dado pela quantidade de xilema de função estrutural [6].

Os resultados encontrados no ensaio mecânico das fibras alongadas Mercerizadas sobrepostas com resinas RQF100, RQF110, e RQF120, de uma forma geral, mostram que as características das fibras de bambu resinadas adquiriram um melhor comportamento mecânico que o das fibras da cana. A tensão de resistência a tração da fibra da cana de açúcar resinada é bem baixa, se comparar ao das fibras de bambu resinadas, porém a deformação elástica, de ambas as fibras resinadas são similares.

Um estudo anterior foi feito utilizando a resina RQ-0100RF (resina epóxi rígida do tipo diglicidil éter do bisfenol A,) com endurecedor RQ0164RF PLUS (à base de polieteramina), também fornecido pela empresa Alpha Resiqualy, e foi aplicada na fibra de sisal e na fibra de bananeira, de maneira em que os protótipos confeccionados seguindo as normas ASTM D638 (2003) e ASTM D790 (2007) [27]. Portanto, até então, o resultado da pesquisa do autor que utiliza a resina RQ-0100RF e o endurecedor RQ0164RF PLUS, difere do trabalho que está sendo mostrado, dado as diferentes normas e resinas.

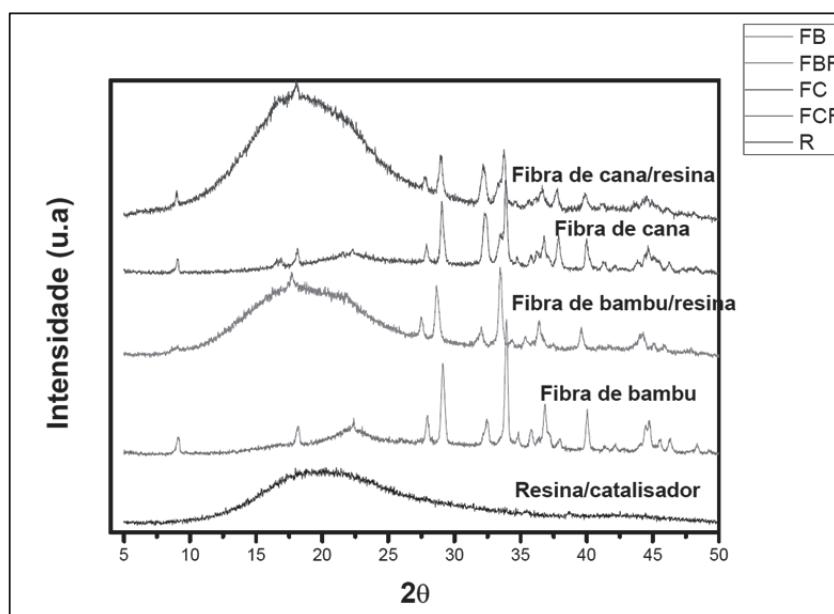
A tabela 4 mostra o resultado comparativo da força de tração (N), tensão de deformação (Mpa), deformação elástica (mm), e módulo de elasticidade (GPa), obtido das fibras sem a resina sintética por [6], com os resultados das fibras sobrepostas com a resina sintética.

Observe que, na tabela 4, os resultados da fibra de bambu sobreposta com a resina sintética são superiores ao da fibra de bambu e de cana sem resina, na força de tração, na tensão de resistência a tração, e até no módulo de elasticidade. A fibra da cana sobreposta com a resina sintética é muito inferior na força de tração, na tensão de resistência a tração, e até no módulo de elasticidade. O resultado comparativo que não teve alteração muito divergente entre as fibras de cana e bambu sobrepostas com resinas, e as fibras de cana e bambu sem resinas, é a deformação elástica.

Neste caso é possível afirmar que a sobreposição da resina, na fibra de bambu alongada mercerizada, contribui com o aumento da força de tração, na tensão de resistência a tração, e no módulo de elasticidade. Já a sobreposição da resina, na fibra de cana de açúcar alongada mercerizada, pode ter contribuído para a diminuição da força de tração, tensão de resistência a tração, e o módulo de elasticidade.

Considerando que os dados encontrados no ensaio mecânico mostram diferenças significativas na propriedade mecânica de tensão de resistência a tração das fibras sem resina e com resina, é importante investigar maiores detalhes destas alterações. Para isso, foi feito uma análise química no equipamento de difração de raios-X (DRX), na Unesp campus Ilha Solteira, a fim de averiguar o comportamento químico da resina sobre as fibras de cana e bambu.

Fig. 13. Difratogramas de raios-X das Diferentes Amostras Analisadas.



A princípio, através dos resultados de DRX, foi possível observar que a composição da fibra da cana e bambu sem a resina tem similaridade nas respectivas curvas, já a curva da resina/catalisador tem uma curva bem diferente das fibras sem resina. A Fig. 13 mostra o resultado de difração de raios-X nas fibras de cana e bambu sem e com resina.

De uma forma geral, quando a resina foi sobreposta nas fibras Mercerizadas de cana de açúcar e bambu, estas mostraram predominância amorfa, ou seja, sem uma ordem estrutural a curto alcance, cujo material compósito pode ser considerado, na sua grande maioria, como heterogêneo. A condição heterogênea, neste caso, pode ser entendida como a mistura de uma determinada quantidade de resina e fibra de cana de açúcar ou bambu que não se misturam em nível molecular, formando uma composição de duas fases distintas.

Observe que, no gráfico de raio-X, o eixo  $2\theta$ , entre os valores de  $7,5^\circ$  a  $50^\circ$ , as curvas das fibras de canas e bambu sem resina, respectivamente, contém picos, dos quais estão associados a cristalinidade, ou seja, ordenação de planos em curto alcance

Nas curvas, azul e verde, as fibras de cana e bambu, respectivamente, no eixo  $2\theta$ , entre os valores de  $5^\circ$  a  $10^\circ$ , nota-se em ambas as fibras que a curva tem comportamento linear e é composta de um pico cristalino entre os valores  $7,5^\circ$  e  $10^\circ$ . Este pico também aparece na fibra de cana com resina, curva marrom, mas na fibra de bambu sem resina, curva vermelha, é quase imperceptível. Esta observação, pode ser entendida como que a identificação de uma quantidade maior de resina no material, considerando a leitura da difração de raios-X sobre a fibra de bambu com resina. Enquanto que, na fibra de cana com resina, o pico está associado a cristalinidade e simetria (ou ordenação) e tem comportamento similar ao da fibra de cana sem resina. Este, resulta na identificação de uma maior quantidade de fibra do que resina, visto na leitura da difração de raio-X.

Nota-se ainda que, a linearidade da curva das fibras de cana e bambu sem resina (o eixo  $2\theta$ ) entre  $5^\circ$  a  $25^\circ$ , quando comparadas a curva da fibra de cana e bambu com resina, assumem o mesmo comportamento angular da curva da resina-catalisador, o que pode ser entendido como que, a existência da resina em ambas as fibras.

## 6. CONCLUSÃO DO TRABALHO DE PESQUISA

Este trabalho tem uma abordagem única e exclusiva, quando a resina industrial RQF100, RQF110, e RQF120 são aplicadas as fibras mercerizadas alongadas de cana de açúcar e bambu.

Notadamente sabe-se que as propriedades mecânicas das fibras de cana de açúcar e bambu com resina, são diferentes das fibras de cana e bambu sem resina. Estas são diferenciadas em duas condições distintas, sendo: a primeira condição é a de que a propriedade mecânica da fibra de bambu com resina é superior ao da fibra de bambu sem resina. A segunda condição é a de que a propriedade mecânica da fibra de cana com resina é inferior ao da fibra de cana sem resina. Para explicar este fenômeno físico será utilizado as informações contidas no resultado de difração de raios-X.

No caso da primeira condição, observa-se que, na curva vermelha, o pico entre os valores de 7,5° a 10°, no eixo 2θ, tem um comportamento quase retilíneo, sem similaridade com o da curva verde. Isso pode ser analisado como que, a resina na fibra teve uma melhor aderência e distribuição uniforme, justificando assim, uma maior resistência mecânica.

No caso da segunda condição, observa-se que, na curva marrom, o pico entre os valores de 7,5° a 10°, no eixo 2θ, tem um comportamento de pico similar ao da curva azul. Isso pode ser analisado como que, a resina na fibra não foi de boa distribuição e aderência. Uma hipótese é que, a resina pode ter se localizado entre as cadeias poliméricas formadoras da fibra, resultando em um material não uniforme, descontinuado (resina sem continuidade estrutural), oposto aos materiais compósitos de composição uniforme, constante e homogênea.

Portanto, conclui-se que, a fibra de bambu Mercerizada alongada e resinada, pode ser considerada um compósito estrutural, de capacidade estável, limitado pelos valores do ensaio mecânico e da resina utilizada nesta pesquisa.

Este material pode ser utilizado na aplicação de reforços de trançados e na fabricação de lâminas e placas. Já a fibra de cana Mercerizada alongada e resinada não teve uma capacidade estável, dado o tipo de resina, resultando em um material, até então, sem efeito de aplicação tecnológica.

Este resultado demonstra um processo em que a fase matriz-reforço teve uma excelente junção entre a fibra Mercerizada alongada de bambu e a resina industrial, sendo limitado pelos valores do ensaio mecânico e pelas características da resina industrial. A fibra da cana de açúcar Mercerizada alongada e resinada não teve uma capacidade estável, dado o tipo de resina, resultando em um material, até então, sem efeito de aplicação tecnológica. A fibra Mercerizada alongada resinada de bambu pode ser utilizada na aplicação de reforços de trançados e na fabricação de lâminas e placas, estendendo o uso de sua característica em projetos específicos e tecnológicos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a agência de fomento CNPq, CAPES e Fapesp, e aos Laboratórios LAPO, SISPLEXOS, Laboratório de Biocombustíveis FATEC e o Grupo de Compósitos e Nanocompósitos Híbridos (GCHN), onde cada qual contribuiu para com os resultados experimentais, bem como, à UNESP e FATEC Araçatuba pelo suporte técnico e acadêmico.

## REFERÊNCIAS

- [1] Wallenberger, F.T., Weston, N.E., *Natural Fibers, Plastics and Composites*, Kluwer Academic Publishers, Massachusetts (2004)
- [2] Mallick, P.K., *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*, CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton (2008)
- [3] Zárate, C.N., Aranguren, M.I., Reboreda, M.M., “Resol–vegetable fibers composites”, *Journal of Applied Polymer Science*, **77**(8), 1832-1840 (2000)
- [4] Melo, R.R., Stangerlin, D.M., Santana, R.R.C., Pedrosa, T.D., “Physical and mechanical properties of particleboard manufactured from wood, bamboo and rice husk”, *Materials Research*, **17**(3), 682-686 (2014)
- [5] Cruz, R.B., Lima Junior, E.P., Monteiro, S.N., Louro, L.H.L., “Giant Bamboo Fiber Reinforced Epoxy Composite in Multilayered Ballistic Armor”, *Materials Research*, **18**(2), 70-75 (2015)
- [6] Outa, R., Chavarette, F.R., Louzada, M.J.Q., “Resistência Mecânica da Fibra Vegetal Mercerizada da Cana de Açúcar e Bambu”, *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, **10**(3), 288-304 (2016)

- [7] Outa, R., Chavarette, F.R., Basquerotto, C.H.C.C., Gonçalves, A.C., “Análise das características de absorção acústica e mecânicas das fibras vegetais沿adas mercerizada da cana e bambu”, *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, **21**(2), 73-84 (2017)
- [8] Bhat, T., Kandare, E., Gibson, A.G., Di Modica, P., Mouritz, A.P., “Tensile properties of plant fibre-polymer composites in fire”, *Journal Fire and Materials*, **41**(8), (2017)
- [9] Ferreira, C.R., Tavares, S.S., Ferreira, B.H., Fernandes, A.M., Fonseca, S.J.G., Oliveira, C.A.S., Teixeira, R.L.P., Gouveia, L.L.A., “Comparative Study About Mechanical Properties of Structural Standard Concrete and Concrete with Addition of Vegetable Fibers”, *Materials Research*, **20**(2), 102-107 (2017)
- [10] Kalia, S., Kaith, B. S., Kaur, I., *Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites Green Chemistry and Technology*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2011)
- [11] Akihiro ABE, A., Dušek, K., Kobayashi, S., *Biopolymers: Lignin, Proteins, Bioactive Nanocomposites*, Springer-Verlag, Heidelberg (2010)
- [12] Albinante, S.R., Acordi, E.B., Pacheco, V., Visconte, L.L.Y., “Revisão dos tratamentos químicos da fibra natural para mistura com poliolefinas” *Revista Química Nova*, **36**(1), 114-122 (2013)
- [13] Ebnesajjad, S., *Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding*, Elsevier, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, OX5 1GB 225 Wyman Street, Waltham, MA 02451, USA (2014)
- [14] Cook, J.G., *Handbook of Textile Fibres*, Woodhead Publishing, Cambridge (2001)
- [15] Bunsell, A.R., *Handbook of Properties of Textile and Technical Fibres*, 2 ed., Elsevier, Cambridge (2018)
- [16] Lau, A.K., Hung, A.P., *Natural Fiber-Reinforced Biodegradable and Bioresorbable Polymer Composites*, Elsevier, Duxford (2017)
- [17] Milton, G.W., *The Theory of Composites: Cambridge Monographs On Applied And Computational Mathematics*, Cambridge University Press, UK (2004)
- [18] Salit, M.S., *Tropical Natural Fibre Composites: Properties, Manufacture and Applications*, Springer Science+Business, Singapore (2014)
- [19] Spencer, A.J.M., *Continuum Theory Of The Mechanics Of Fibre-Reinforced Composites*, Springer-Verlag Wien, New York (1984)
- [20] Askeland, D.R., Fulay, P.P., Bhattacharrya, D.K., *Essentials of Materials Science and Engineering*, 2 ed., Cengage Learning, Stamford (2010)
- [21] Meyers, R.A., *Encyclopedia of Physical Science and Technology: Polymers*, 2 ed., Academic Press (2001)
- [22] Stokke, D.D., Wu, Q., Han, G., *Introduction to Wood and Natural Fiber Composites*, John Wiley & Sons, West Susset (2014)
- [23] Oliver, J.F., *Adhesion in cellulosic and wood-based composites*, Plenum Press, New York (1981)
- [24] Brockmann, T.H., *Theory of Adaptive Fiber Composites: From Piezoelectric Material Behavior to Dynamics of Rotating Structures*, Springer, New York (2009)
- [25] Schellbach, S.L., Monteiro, S.N., Drelich, J.W., “A novel method for contact angle measurements on natural fibers”, *Materials Letters*, **164**(1), 599-604 (2016)
- [26] Pocius, A.V., *Adhesion and Adhesives Technology: An Introduction*, Ohio: Hanser Publications (2012)
- [27] Da Silva, L.J., Estudo experimental e numérico das propriedades mecânicas de compósitos poliméricos laminados com fibras vegetais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de São João del-Rei. São João del-Rei,

## MECHANICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF RESIN VEGETABLE FIBERS: SUGAR CANE AND BAMBOO

**Abstract** – The objective of this research is to obtain quantitative and qualitative references of the physical and chemical characteristics of elongated mercerized cane and bamboo fibers with superficial application of an industrial adhesive. The process of obtaining these characteristics starts from the mercerization of the fibers using sodium hydroxide (NaOH) and the overlap of the industrial resin in the mercerized fibers, after the fibers are submitted to the tensile stresses for the analysis of the mechanical characteristics, and, finally, the X-ray diffraction chemical analysis, XRD. The result of this innovative process shows that the matrix-reinforcement phase was successful in the bamboo fiber, with one of the results being 110.28 MPa of tensile strength, and modulus

of elasticity of 6.09 GPa, with characteristics of a structural composite making possible its application in the industrial market, however, for the cane fiber, the results were inverse.

**Keywords** – Mechanical Testing, Cane and Sugar Sugar and Bamboo, XRD, Mercerization, Polymer Matrix.