

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE
CAMPUS DE SOROCABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
“PLANEJAMENTO E USO DE RECURSOS RENOVÁVEIS”

JULIETTE PEREIRA DA SILVA

**POTENCIAL DE USO DE FIBRAS DE *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake NA
PREPARAÇÃO DE COMPÓSITOS DE POLIPROPILENO**

Sorocaba

2018

CAMPUS DE SOROCABA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
“PLANEJAMENTO E USO DE RECURSOS RENOVÁVEIS”

JULIETTE PEREIRA DA SILVA

**POTENCIAL DE USO DE FIBRAS DE *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake NA
PREPARAÇÃO DE COMPÓSITOS DE POLIPROPILENO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em “Planejamento e Uso de Recursos Renováveis”, para obtenção do título de mestre em “Planejamento e Uso de Recursos Renováveis”.

Orientação:

Dr^a. Franciane Andrade de Pádua

Co-orientação: Dr^a. Alessandra de Almeida Lucas

Sorocaba

2018

Pereira da Silva, Juliette

Potencial de uso de fibras de *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake na preparação de compósitos de polipropileno. / Juliette Pereira da Silva. -- 2018.

65 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador: Franciane Andrade de Pádua

Banca examinadora: Fábio Minoru Yamaji, Walbert Chrisostomo

Bibliografia

1. Compósitos poliméricos. 2. Guapuruvu. 3. Fibras vegetais. I. Orientador. II. Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

JULIETTE PEREIRA DA SILVA

**POTENCIAL DE USO DE FIBRAS DE *Schizolobium parahyba*
(Vell.) Blake NA PREPARAÇÃO DE COMPÓSITOS DE
POLIPROPILENO**

**Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação para obtenção do título de
mestre em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis.
Universidade Federal de São Carlos.
Sorocaba, 29 de janeiro de 2018.**

Orientadora:



Profa. Dra. Franciane Andrade de Pádua
Universidade Federal de São Carlos – UFSCar *Campus* Sorocaba

Examinadores:



Prof. Dr. Fábio Minoru Yamaji
Universidade Federal de São Carlos – UFSCar *Campus* Sorocaba



Dr. Walbert Chrisostomo
Universidade de Sorocaba - UNISO

*Dedico este trabalho
aos meus queridos pais, Isabel e
Luis, às minhas irmãs, Janaína e
Patrícia, e ao meu esposo Jackson.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, pois sem Seu amor incondicional e misericórdia eu não estaria aqui para escrever esse texto. A Ele minha eterna gratidão por ter me sustentado até aqui.

Aos meus pais e minhas irmãs pelo carinho e paciência e por todo o apoio oferecido;

Ao meu esposo pelo incentivo, amor, paciência e carinho;

À minha orientadora, Prof. Dra. Franciane Andrade de Pádua, pela oportunidade, ensinamentos, paciência, amizade e confiança;

À minha co-orientadora, Dra. Alessandra de Almeida Lucas, pelos ensinamentos, pela atenção, disponibilidade, por ceder gentilmente seu laboratório e sua equipe para auxiliar na preparação e caracterização mecânica dos compósitos;

Ao Prof. Dr. Fábio Minoru Yamaji pelos ensinamentos, paciência, amizade, por ceder o laboratório e reagentes para as análises químicas, por me agregar ao laboratório mais produtivo e divertido da UFSCar-Sorocaba.

Ao Prof. Dr. Cláudio Roberto Thiersch pelos ensinamentos, paciência e colaboração;

À Selma Lopes Goulart pelos valiosos ensinamentos sobre medição de ângulo de microfibrilas, por sua paciência e disponibilidade;

À Maria Aparecida R. C. Bermudez pelo auxílio na preparação das lâminas histológicas.

Aos queridos amigos e parceiros nestes anos de mestrado, especialmente a Livia (que está presente desde o primeiro ano da graduação), Gabis, Ana Larissa, Gabizona, Tatuí, Lúcio, Thiago, Letícia, Ivonir, Karina, Roberta, Diogo, Isis;

Ao pessoal do Laboratório de Materiais Lignocelulósicos por todo suporte e companheirismo;

Ao Laboratório Nacional de Nanotecnologia para o Agronegócio da Embrapa Instrumentação Agropecuária.

Aos queridos colegas do Programa de Pós-Graduação de Planejamento e Uso de Recursos Renováveis;

Aos professores e à secretária Luciana, do Programa de Pós-Graduação de Planejamento e Uso de Recursos Renováveis pela orientação e apoio;

À Universidade Federal de São Carlos, Campus Sorocaba, pela oportunidade; À CAPES, pela bolsa concedida.

A todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

Arthur Schopenhauer

RESUMO

SILVA, Juliette Pereira. Potencial de uso de fibras de *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake na preparação de compósitos de polipropileno. 2017. 62 f. Dissertação (Mestrado em “Planejamento e uso de recursos renováveis”) – Centro de Ciências e Tecnologias para Sustentabilidade, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2017.

A utilização de materiais lignocelulósicos como reforço de polímeros termoplásticos tem despertado grande interesse mundial, visto que as fibras naturais oferecem vantagens econômicas, de processamento e ambientais. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades da madeira e das fibras de *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake em idade precoce, oriunda de plantio experimental, como reforço de compósitos de matriz de polipropileno (PP). Para tanto, foi determinada a densidade básica, o teor de celulose, hemiceluloses, lignina, extrativos e cinzas, bem como as dimensões das fibras e angulação de microfibrilas da madeira de quatro árvores de guapuruvu (A1, A2, A3 e A4). Adicionalmente foi avaliado o comportamento mecânico à tração e sob impacto) dos compósitos de matriz de polipropileno reforçados com diferentes proporções de fibra em massa (0%, 20% e 30%) e 2% de agente compatibilizante Polybond 3200. De cada caule foi retirada uma seção equivalente à posição da base até 25% da altura do fuste. Estas, por sua vez, foram seccionadas em pequenos fragmentos, secas em estufa, trituradas e peneiradas. Sendo utilizada apenas a fração de partículas que passou pela peneira de 10 mesh e ficou retida na de 14 mesh. Os compósitos foram preparados em extrusora de bancada de rosca dupla co-rotacional. As composições extrudadas foram granuladas e, em seguida, moldadas por injeção. A densidade básica do guapuruvu variou de 0,237 g.cm⁻³ a 0,243 g.cm⁻³. No que tange as características anatômicas, não houve variações nos resultados de comprimento da fibra, largura da fibra e diâmetro do lume entre as diferentes árvores estudadas. A espessura da parede das fibras foi superior nas amostras de A1 e A2 e o ângulo de microfibrilas foi maior na A3 e inferior na A2. Ademais, não houve diferença estatística nos resultados de razão de aspecto entre as árvores. Em relação a composição química, não houve variações nos resultados para lignina, celulose, hemiceluloses e extrativos entre as árvores estudadas. Já para cinzas, a maior concentração foi encontrada em A1 e as menores em A2 e A3. Os resultados mostraram que, no geral, a tensão de ruptura e o módulo de elasticidade à tração aumentaram com o incremento percentual de fibras. Já o alongamento na ruptura diminuiu em comparação ao PP puro e com o aumento percentual de fibras. Os valores de resistência ao impacto Izod com entalhe dos compósitos não sofreram variação significativa em relação ao polímero puro. Por meio dos resultados obtidos pode-se deduzir que as fibras de guapuruvu, provenientes de espécie nativa, de rápido crescimento, fácil adaptação, cuja madeira apresenta baixa densidade, podem ser utilizadas como carga em compósitos de PP, exercendo uma ação reforçante. Tendo o compósito preparado com 30% em massa de fibras de guapuruvu e 2% de Polybond 3200 apresentado melhores propriedades.

Palavras-chave: guapuruvu, fibras vegetais, compósitos poliméricos, reforço.

ABSTRACT

SILVA, Juliette Pereira. Potential use of *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake fibers in the preparation of polypropylene composites. 2017. 62 f. Dissertação (Mestrado em “Planejamento e uso de recursos renováveis”) – Centro de Ciências e Tecnologias para Sustentabilidade, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2017.

The use of plant fibers as reinforcement of thermoplastic polymers in recent years has aroused great worldwide interest, since natural fibers offer economic, processing and environmental advantages. In this context, the objective of this study was to evaluate the properties of wood and fibers of *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake at early age, from experimental planting, as reinforcement of polypropylene (PP) matrix composites. The basic density, cellulose content, hemicelluloses, lignin, extractives and ashes, as well as the fiber size and microfibril angulation of the wood of four guapuruvu trees (A1, A2, A3 and A4) were determined. Then, the mechanical behavior of reinforced polypropylene matrix composites with different fiber contents was evaluated in order to establish their relation between the characteristics of the wood and the fibers. The contents of guapuruvu fibers used were 0; 20 and 30% by mass and the compatibilizing agent was 2%. The composites were prepared in a co-rotational double-threaded extruder. The extrudate compositions were granulated and then injection molded. The basic density of guapuruvu ranged from 0.237 g.cm⁻³ to 0.243 g.cm⁻³, with a clear tendency to reduce wood density with tree height. Regarding the anatomical characteristics, there were no variations in the results of fiber length, fiber width and lumen diameter among the different trees studied. The wall thickness of the fibers was higher in samples A1 and A2 and the angle of microfibrils was higher in A3 and lower in A2. In addition, there was no statistical difference in the results of aspect ratio among the trees. Regarding the chemical composition, there were no variations in the results for lignin, cellulose, hemicelluloses and extractives among the studied trees. As for ash, the highest concentration was found in A1 and the lowest in A2 and A3. The results showed that the tensile strength increased with the percentage increase of fibers for all samples, except for sample A1, where tensile strength values were similar in the compositions of 20% and 30%. Similarly, the modulus of elasticity also increased with the addition of fibers in all samples, and this effect was more pronounced for the 30% percentage of guapuruvu fiber. Already the elongation at the break decreased in comparison to the pure PP and with the percentage increase of fibers. The Izod impact strength values of the composites did not change significantly in relation to the pure polymer. By the results obtained it can be deduced that the guapuruvu fibers from native species, rapid growth, easy adaptation, which has a low density wood can be used as filler in PP composites, exerting a reinforcing action. Having the composite prepared with 30% by weight guapuruvu fibers and 2% Polybond 3200 presented better properties.

Keywords: guapuruvu, vegetable fibers, polymer composites, reinforcement.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Aspectos gerais sobre compósitos	15
2.1.1	<i>Classificação dos compósitos</i>	<i>16</i>
2.2	Polipropileno	18
2.3	Qualidade da matéria-prima vegetal para produção de compósitos.....	19
2.3.1	<i>Comprimento de fibras.....</i>	<i>20</i>
2.3.2	<i>Razão de aspecto</i>	<i>21</i>
2.3.3	<i>Parede celular.....</i>	<i>22</i>
2.3.4	<i>Superfície das fibras e adesão termoplástico/madeira.....</i>	<i>23</i>
2.3.5	<i>Influência da composição química nas propriedades mecânicas do compósito</i>	<i>24</i>
2.4	Caracterização mecânica e morfológica dos compósitos	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1	Materiais	29
3.1.1	<i>Farinha de madeira</i>	<i>29</i>
3.1.2	<i>Polipropileno</i>	<i>29</i>
3.1.3	<i>Agente compatibilizante (Polybond 3200).....</i>	<i>30</i>
3.2	Métodos.....	30
3.2.1	<i>Características de crescimento</i>	<i>30</i>
3.2.2	<i>Amostragem.....</i>	<i>30</i>
3.2.3	<i>Determinação da densidade básica da madeira</i>	<i>31</i>
3.2.4	<i>Caracterização anatômica</i>	<i>31</i>
3.2.5	<i>Composição química da madeira de guapuruvu</i>	<i>33</i>
3.2.6	<i>Extrusão dos compósitos</i>	<i>35</i>
3.2.7	<i>Injeção dos compósitos.....</i>	<i>36</i>

3.2.8	<i>Caracterização mecânica dos compósitos</i>	37
3.2.9	<i>Densidade dos compósitos</i>	37
3.2.10	<i>Análises estatísticas</i>	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1	Características de crescimento.....	38
4.2	Densidade básica da madeira	39
4.3	Características anatômicas da madeira.....	40
4.4	Composição química	47
4.5	Caracterização mecânica dos compósitos.....	49
4.6	Densidade dos compósitos.....	53
5	CONCLUSÕES.....	55
6	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos as pesquisas sobre a utilização de fibras vegetais e farinha de madeira como reforço para polímeros termoplásticos tem se intensificado (LOPES, 2017), visto que estas oferecem muitas vantagens, tais como (i) são provenientes de fontes renováveis, e ao contrário das fibras de vidro e de carbono, o consumo de energia para produzi-las é muito pequeno; (ii) são menos abrasivas que as fibras sintéticas usualmente utilizadas como reforço; (iii) apresentam baixo custo em relação as fibras de carbono, vidro, aramida e boro; (iv) possuem baixa densidade e alta deformabilidade; (v) apresentam isolamento acústico e (vi) geram menores quantidades de gases responsáveis pelo efeito estufa. (TITA et al., 2002; KU et al., 2011; HUDA et al., 2013).

A matriz, por sua vez, apresenta uma diversidade de aplicações no mercado devido à facilidade de produção; boas propriedades mecânicas, decorrentes da sua natureza semicristalina e principalmente por ser passível de reprocessamento, o que a torna reciclável. Frente a isso, o emprego de materiais compósitos obtidos pela união desses materiais proporciona uma crescente perspectiva de economia de energia consumida por tonelada de produto produzido (MULINARI, 2009).

No entanto, apesar das propriedades atraentes, a utilização de reforços lignocelulósicos ocorre de forma limitada nas práticas industriais, principalmente devido às dificuldades associadas à interação fibra/matriz (DUFRESNE et al., 2000). A natureza polar e higroscópica inerente à celulose e as características não polares e hidrofóbicas da maioria dos termoplásticos são alguns dos inconvenientes que reduzem o potencial das fibras naturais para serem utilizadas como reforço, pois dificultam a dispersão da fibra na matriz, comprometendo desse modo o reforçamento do compósito devido a transferência ineficiente de esforços (DUFRESNE et al., 2000). Nesse sentido, com o intuito de melhorar a adesão da fibra no polímero da matriz, pode-se fazer o uso de um terceiro componente no compósito, o agente compatibilizante, que atua no sentido de evitar o processo de delaminação ou modificar superficialmente as fibras (ou matriz) (SAHEB et al, 1999).

As propriedades e o desempenho de um material compósito são fortemente influenciados pela arquitetura da fibra (comprimento, diâmetro e espessura de parede), pelos seus constituintes (celulose, lignina e hemiceluloses), pelo grau de cristalinidade, ângulo microfibrilar, além do ritmo de crescimento do vegetal (RAZERA, 2006), que por sua vez, é influenciado pelas condições climáticas, técnicas de manejo, entre outros fatores. Por consequência, a performance destas fibras como reforço pode variar, sendo necessário avaliar

a estrutura e o comportamento de diferentes fibras para uma mesma matriz (RAZERA, 2006). Nesse sentido, a escolha do tipo de matriz e reforço depende das características que se deseja fornecer ao produto final, bem como de sua disponibilidade e custo.

No Brasil, existe uma diversidade de espécies florestais nativas com potencial econômico a ser explorado, no entanto muitas não são conhecidas sob o ponto de vista tecnológico para sua aplicação como reforço em compósitos. Como exemplo, destaca-se a espécie *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake, conhecida popularmente como guapuruvu, a qual é natural da Floresta Ombrófila Densa e Floresta Estacional Semidecídua e pertence à Família Fabaceae (Leguminosae Caesalpinioideae) (CARVALHO, 2005). O guapuruvu é uma espécie classificada como pioneira, possui baixa exigência quanto à fertilidade do solo e é considerada uma das espécies nativas de mais rápido crescimento das regiões Sul e Sudeste do país (CARVALHO, 2003), chegando a apresentar incremento médio anual de até 45m³.ha⁻¹.ano⁻¹ (TRIANOSKI, 2010). Sua madeira é leve, com densidade básica variando de 0,24 a 0,27 g.cm⁻³, de fácil secagem e fácil trabalhabilidade (TRIANOSKI, 2010). Tais características são semelhantes às da madeira de balsa, cujo potencial para uso como reforço em matrizes termoplásticas foi constatado por Marinelli et al. (2009) e Martins et al. (2011). Diante do seu rápido crescimento, fácil adaptação e características da madeira, a avaliação das fibras de guapuruvu é essencial para a sua qualificação de uso como reforço em compósitos.

Na área de compósitos reforçados com fibras vegetais, a maioria dos trabalhos diz respeito à preparação e à caracterização físico-mecânica do compósito. Todavia, poucos são os trabalhos que têm sido desenvolvidos considerando a caracterização do material vegetal com o intuito de selecionar fibras potenciais para a produção de compósitos com características finais desejáveis. Dentre estes trabalhos, destacam-se os estudos realizados por Guimarães Jr. et al. (2010), que caracterizaram anatomicamente a fibra de bambu (*Bambusa vulgaris*) visando fornecer subsídios para a melhor utilização da espécie em compósitos poliméricos e os estudos desenvolvidos por Spinacé et al. (2011), que avaliaram as características físico-mecânicas das fibras de sisal e curauá, bem como o desempenho dos compósitos de polietileno de alta densidade e polipropileno com diferentes quantidades de fibras com o intuito de comparar as propriedades finais de tais compósitos.

Assim, uma caracterização detalhada das fibras é fundamental para a utilização bem-sucedida destes materiais em compósitos. Neste contexto, o presente trabalho foi conduzido com o objetivo geral de avaliar as propriedades da madeira e da farinha de madeira de *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake em idade precoce, oriunda de plantio experimental, como reforço de compósitos de matriz de polipropileno.

Como objetivos específicos, destacam-se:

- Caracterizar a madeira de guapuruvu, por meio de análises de densidade básica, composição química, dimensões das fibras e angulação das microfibrilas de celulose.
- Estudar composições variáveis da farinha de madeira de guapuruvu (FMG) na matriz de polipropileno, visando avaliar as propriedades mecânicas dos compósitos.
- Verificar o comportamento mecânico dos compósitos de matriz de polipropileno reforçados com farinha de madeira de guapuruvu em relação à tensão de ruptura, alongamento na ruptura, módulo de elasticidade e resistência ao impacto Izod.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Aspectos gerais sobre compósitos

Os compósitos surgiram no mercado visando atender os setores da indústria como materiais alternativos com combinações não-usuais de propriedades, as quais não podem ser atendidas pelos chamados materiais de engenharia convencionais, como metais, cerâmicos e polímeros (CALLISTER, 2002).

Um compósito consiste em dois ou mais constituintes, que quando juntos, tem como resultado um material com algumas propriedades de interesse superiores à de seus componentes individuais (CALLISTER, 2002). Geralmente, é um composto sintético constituído por duas fases quimicamente diferentes e separadas por uma interface distinta, sendo uma fase dispersa, de material rígido e forte, incorporado a uma fase de matriz contínua, a qual tem como principais funções servir de elemento de conformação básica da peça, transmitir cargas por meio de tensões para o reforço, podendo criar uma proteção contra danos ambientais e mecânicos (FOWLER et al., 2006).

Assim, devido à natureza e à morfologia dos materiais compósitos, seu desempenho e propriedades serão determinados pelas propriedades dos elementos que constituem a matriz e o reforço, de suas quantidades relativas, bem como pela geometria da fase dispersa (formato, tamanho, distribuição e orientação) (RAMSTEINER; THEYSOHN, 1984; FOWLER et al., 2006; VENTURA, 2009).

Rosário et al. (2011), estudaram as propriedades térmicas e mecânicas de compósitos de polipropileno, virgem e reciclado, reforçados com fibras residuais de sisal. Para ambos os compósitos a adição das fibras, resultou na redução significativa do alongamento na ruptura. Tais compósitos com os resíduos de sisal apresentaram melhor desempenho em relação à matriz reciclada sem fibra, no que se refere à resistência à tração, módulo de Young e sobretudo resistência ao impacto, cujo aumento foi de 140%.

Em estudo realizado por Spinacé et al. (2010), ao avaliarem as propriedades mecânicas de compósitos de polietileno de alta densidade ou polipropileno com 20% em massa de fibras curtas de sisal ou de curauá na presença ou ausência de agentes de acoplamento, observaram que fibras de curauá apresentaram resistência à tração superior às fibras de sisal e os compósitos com fibras de curauá apresentaram resistência à tração e flexão superior aos compósitos com fibra de sisal, já em relação à resistência ao impacto a situação se inverteu.

Fu e Lauke (1996), analisaram o efeito de três comprimentos médios de fibras em compósitos poliméricos. Os autores verificaram que a resistência mecânica dos compósitos aumenta conforme o comprimento médio das fibras aumenta.

2.1.1 Classificação dos compósitos

Na engenharia, os compósitos são comumente classificados pela natureza dos materiais que os compõem. Quanto à natureza da matriz podem ser divididos em três grupos principais:

- Compósitos de matriz metálica: Os materiais metálicos destacam-se pela excelente ductilidade e conformabilidade, alta condutividade térmica e elétrica, elevada resistência mecânica e módulo de elasticidade, maior temperatura de trabalho e alta resistência ao desgaste (CALLISTER, 2002). No entanto, possuem elevado custo de produção, fator importante na fabricação de compósitos de matriz metálica.

- Compósitos de matriz cerâmica: Os materiais cerâmicos apresentam elevados valores de dureza e resistência a compressão quando comparados aos materiais poliméricos e metálicos (YADAV; RAVICHANDRAN, 2003). Além disso, tem suas aplicações em elevadas temperaturas devido ao seu alto ponto de fusão (CHAWLA, 1998), característica que só é eficaz quando se utiliza reforços com a mesma propriedade. Contudo, apesar de suportarem elevadas cargas de tensões, esses materiais possuem predisposição à fratura, visto que apresentam baixos valores de tenacidade (VENTURA, 2009).

- Compósitos de matriz polimérica: Este grupo de materiais se divide em duas categorias: termoplásticos e termorrígidos. Os termoplásticos são polímeros capazes de serem moldados diversas vezes devido às suas características de se fundirem sob ação da temperatura e pressão e depois se solidificarem quando há uma redução de temperatura, o que facilita sua reciclagem (SHALIN, 1995). Já os termorrígidos, uma vez transformados, não se fundem com o aumento de temperatura devido à presença de ligações cruzadas entre as cadeias macromoleculares (SHALIN, 1995).

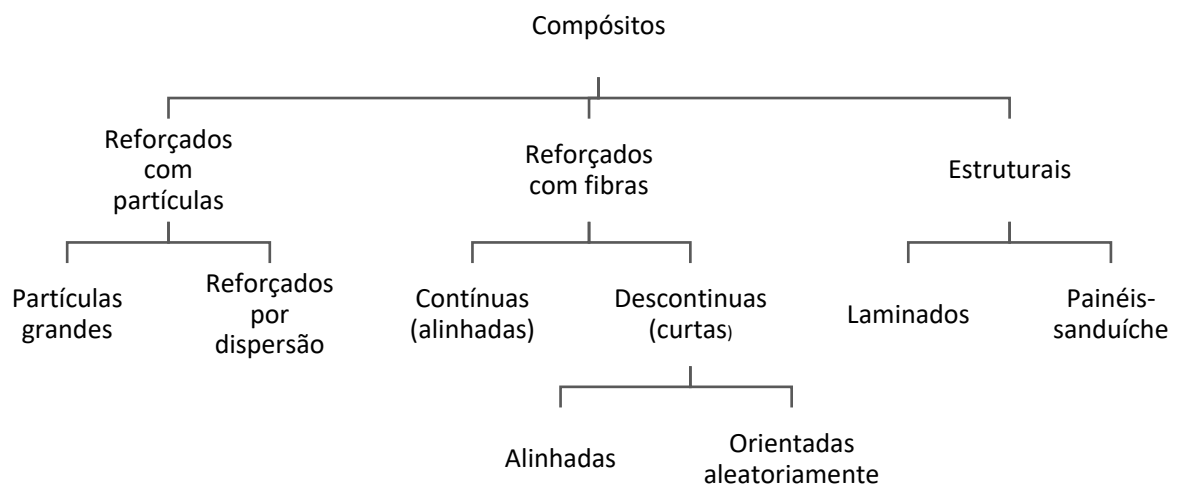
Portanto, em virtude das propriedades que apresentam, os polímeros são usados em uma ampla diversidade de aplicações dos compósitos (VENTURA, 2009). Frente aos materiais cerâmicos e metálicos, geralmente, os materiais poliméricos possuem propriedades mecânicas como dureza e resistência à tração baixas. No entanto, suas características como densidade e ponto de fusão, facilitam o processamento dos compósitos poliméricos, visto que

não existe a necessidade da utilização de altas pressões e temperaturas, evitando desse modo, problemas associados à degradação do reforço (VENTURA, 2009).

Segundo a Abiplast (2016), atualmente a produção de resinas termoplásticas no mundo é de aproximadamente 260 milhões de toneladas. A América Latina representa 5% da dessa produção mundial, sendo que o Brasil responsável por quase metade dessa produção concentrada em polietileno (PE), polipropileno (PP), poli (cloreto de vinila) (PVC) e poli (tereftalato de etileno) (PET).

Ainda no âmbito da classificação de materiais compósitos, uma outra classificação pode ser dada de acordo com a estrutura da fase dispersa, como descrito na Figura 1.

FIGURA 1: Classificação dos compósitos segundo às características da fase dispersa (CALLISTER, 2002).



Do ponto de vista tecnológico, os compósitos mais importantes são aqueles cuja fase dispersa se encontra na forma de fibra. Isso porque a forma fibrosa do material apresenta elevada resistência à tração e alto módulo de elasticidade (VENTURA, 2009).

As principais fibras utilizadas como reforços em materiais compósitos são:

- Fibra de vidro: essas fibras têm como principais vantagens seu baixo custo, alta resistência à tração, elevada resistência química, e excelentes propriedades de isolamento. Já como desvantagens as fibras de vidro apresentam módulo de elasticidade relativamente baixo, alta densidade (quando comparada às demais fibras comerciais), sensibilidade à abrasão

durante o manuseio (que frequentemente reduz sua resistência à tração), possui resistência à fadiga relativamente baixa e dureza elevada (VENTURA, 2009).

- Fibras de carbono: as fibras de carbono apresentam como vantagens a alta rigidez, elevada resistência a ataques químicos, baixo coeficiente de expansão térmica, alta resistência à fadiga, reduzido peso, além da alta condutividade térmica (CARNEIRO; TEIXEIRA, 2008). Por outro lado, possuem baixa resistência ao impacto, alta condutividade elétrica, além de elevado custo, característica essa que faz com que as fibras de carbono sejam utilizadas principalmente em indústrias aeroespaciais, onde a redução do peso é considerada mais importante do que o custo (VENTURA, 2009; CARNEIRO; TEIXEIRA, 2008).

- Fibras de aramida: como reforço, as fibras de aramida são empregadas, principalmente, em aplicações marinhas e aeroespaciais, onde leveza, alta resistência à tração e ao impacto são importantes. Ademais, essas fibras possuem baixa condutividade elétrica e moderada resistência a ataques químicos. No entanto, como desvantagens é possível citar seus baixos valores de resistência à compressão, além da dificuldade de corte ou usinagem (CARNEIRO; TEIXEIRA, 2008).

- Fibras vegetais: uma das inúmeras vantagens (como as citadas anteriormente) da utilização das fibras vegetais é que existe uma grande variedade de espécies a serem pesquisadas. Por outro lado, as fibras lignocelulósicas sofrem degradação em altas temperaturas, o que restringe a escolha do tipo de matriz. Desse modo, matrizes que possuem temperaturas de processamento inferiores a 200° C são as mais adequadas para esse tipo de compósito (PEREIRA et al., 2015).

2.2 Polipropileno

O polipropileno é um polímero termoplástico de estrutura semicristalina pertencente ao grupo das poliolefinas e é obtido por meio da polimerização do monômero propileno (C_3H_6), utilizando-se catalisadores estereoespecíficos. Foi sintetizado pela primeira vez no ano de 1954, por Giulio Natta, todavia sua aplicação industrial e a viabilidade de sua produção, em grande escala, tornaram-se possíveis somente a partir de 1957 com a produção de polímeros estereorregulares (configuração isotática) devido ao desenvolvimento dos catalisadores do tipo *Ziegler-Natta* (MOORE, 1996).

Nos dias atuais, todos os processos de polimerização do PP empregam catalisadores *Ziegler-Natta* com alta atividade e capazes de controlar a configuração polimérica, dando

origem à formação de um polímero final de estrutura regular. Dependendo da posição do grupo metila na cadeia polimérica do polipropileno, o mesmo pode ser classificado como isotático, sindiotático e atático. Na estrutura isotática, que é a forma comercial mais comum do PP e também mais regular, os grupos metila estão dispostos em apenas um lado da cadeia principal do polímero. Na estrutura sindiotática, os grupos metila se apresentam alternados e embora possua uma boa tenacidade é menos interessante do que o PP isotático, devido a sua baixa rigidez. Já na estrutura atática, os grupos metila estão dispostos aleatoriamente. Este PP é de pouca importância comercial, sendo aplicado comercialmente apenas como adesivos (MOORE, 1996; KARIAN, 2003).

Os arranjos das cadeias de polipropileno afetam fortemente as propriedades físicas, mecânicas e termodinâmicas dos polímeros semicristalinos, visto que existe uma estreita relação entre a regularidade da estrutura molecular e a cristalinidade de materiais poliméricos. Quanto maior a cristalinidade, maior também é a densidade, rigidez, estabilidade dimensional, resistência química, resistência à abrasão, temperatura de fusão e a temperatura de cristalização. Por outro lado, são diminuídas as propriedades de resistência ao impacto, alongação na ruptura e particularmente a contração e as consequências da anisotropia se tornam mais acentuados (CANEVAROLO, 2006).

A cadeia do PP isotático exibe cristalinidade cuja proporção oscila de 40-70%, formando um polímero com boas propriedades físico-químicas, mecânicas e térmica que, aliadas à sua baixa densidade ($\sim 0,90 \text{ g.cm}^{-3}$) e reduzido custo, resultam em distintos produtos e um amplo campo de aplicações comerciais. O PP utilizado na fabricação de acessórios para o setor automobilístico, em embalagens, sacaria, caixas d'água, tampas, produtos para uso doméstico, revestimento de silos de armazenagem, piso tipo carpete, seringas de injeções descartáveis, ventiladores, carcaças de eletrodomésticos, brinquedos, etc. (MOORE, 1996).

2.3 Qualidade da matéria-prima vegetal para produção de compósitos

O potencial de compósitos poliméricos reforçados com fibras foi reconhecido há mais de 50 anos e é aplicado, atualmente, em quase todos os setores da indústria, incluindo construção, aeroespacial, automotiva e de eletrônicos (DHAL; MISHRA, 2012). No entanto, é importante salientar que a utilização de fibras vegetais como reforço de compósitos, apesar de ser uma prática antiga, somente nos últimos anos tem despertado grande interesse mundial.

Isso ocorre devido as vantagens econômicas, de processamento, ambientais que essas fibras apresentam, bem como pelas propriedades específicas comparáveis às das fibras de vidro (TITA et al., 2002; KU et al., 2011; HUDA et al., 2013), tornando-se assim, uma alternativa para diversas utilizações, especialmente para a indústria de plásticos.

Diante disso, a avaliação das propriedades físico-químicas e anatômicas das fibras é crucial no que tange a sua qualificação para atender as exigências do mercado de compósitos, evitando assim seu emprego inadequado e fornecendo informações importantes para às empresas consumidoras dessa matéria-prima.

2.3.1 Comprimento de fibras

A relação entre as dimensões das fibras e idade cambial é frequentemente discutida (TOMAZELLO FILHO, 1985; TRUGILHO et al., 1996; PALERMO et al., 2013). De acordo com Tomazzello Filho (1987), as células do cambio, ou seja, células meristemáticas capazes de gerar novos elementos celulares, passam a produzir, durante determinado período, fibras com maiores dimensões até alcançar a sua estabilização, em idades mais avançadas, ao longo do raio. Em razão disso, a variação nas dimensões das fibras pode ser dividida em duas fases: (i) uma fase inicial, na qual próximo a medula (correspondente a madeira juvenil) há um rápido aumento nas dimensões das fibras e (ii) uma segunda fase que reflete o período de estabilidade de funcionamento do cambio maduro, na qual o comprimento das fibras é mais ou menos constante (PANSIN; DE-ZEEUW, 1980).

A otimização das propriedades mecânicas de um compósito depende estritamente da eficiência da transferência de tensões entre as fibras e a matriz (TZE et al., 2007), ou seja, quanto maior a tensão de tração transferida, maior a eficiência. Por sua vez, esta transferência é, frequentemente, definida em termos do comprimento da fibra e da magnitude das interações físico-químicas na interface fibra-matriz (SAHEB et al, 1999).

De acordo com Joseph et al. (1999), um comprimento mínimo (ou comprimento crítico) é necessário para que se desenvolva na fibra uma tensão (ou força) igual à sua resistência (ou força de ruptura). Assim, todo o potencial da fibra só será utilizado se o comprimento da fibra for maior que o comprimento crítico, pois o comprimento será suficiente para gerar uma tensão igual à resistência a tração. No entanto, se o comprimento da fibra empregada como reforço for inferior ao comprimento crítico, uma ruptura do compósito promoverá um arranque da fibra da matriz polimérica ao invés da fragmentação, pois não haverá comprimento suficiente para gerar uma tensão igual a resistência da

fibra à tração, fragilizando, desse modo, a matriz, reduzindo assim a resistência mecânica do compósito (JOSEPH et al., 1999).

No sentido de avaliar a influência do tamanho das fibras nas propriedades mecânicas de compósitos de polietileno de alta densidade (HDPE) ou polipropileno (PP), Yuan et al. (2008) prepararam compósitos com diferentes tamanhos de fibra de madeira de carvalho (125, 180 e 250 μm). Os autores constataram que os compósitos contendo fibras de 180 μm de comprimento apresentaram propriedades mecânicas superiores àqueles com 125 μm . No entanto, quando o tamanho da fibra passou de 180 para 250 μm , ocorreu uma perda nas propriedades, evidenciando, assim, a existência de um comprimento ótimo para esse tipo de fibra.

2.3.2 Razão de aspecto

A razão de aspecto de uma fibra é definida como a relação entre seu comprimento e seu diâmetro (FOWLER et al., 2006). Este coeficiente traduz a performance das fibras na distribuição das tensões, influenciando assim, as propriedades mecânicas finais do material compósito (WAGNER; VAIA, 2004).

Renner et al. (2010) ao avaliarem compósitos com diferentes cargas vegetais, consideraram a razão de aspecto das partículas como sendo o fator mais importante que afeta as propriedades mecânicas destes materiais, uma vez que verificaram diferenças significativas entre os compósitos preparados com partículas menores e compósitos preparados com partículas maiores.

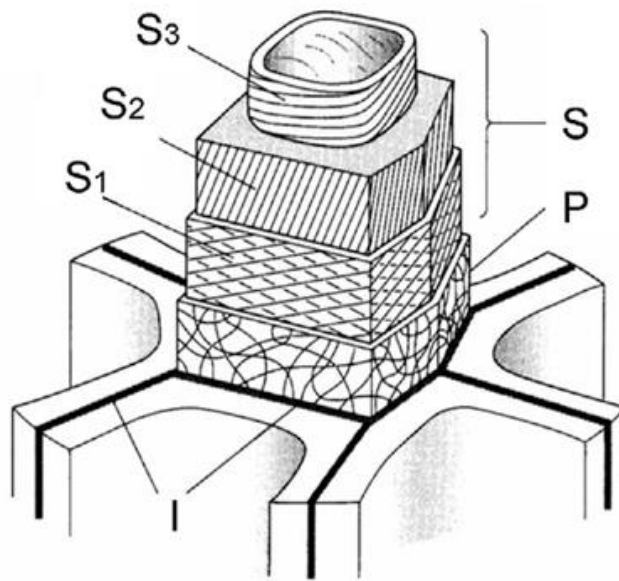
Nesse sentido, quando o objetivo é aumentar a resistência, o reforço fibroso deve possuir elevada razão de aspecto (STARK; ROWLANDS, 2003; PEREIRA et al., 2015), visto que quanto maior for esse coeficiente, mais elevada será a aderência das fibras à matriz e maior a flexibilidade das mesmas (WAGNER; VAIA, 2004).

De acordo com Busigin et al. (1984), as tensões de cisalhamento que se desenvolvem durante os processos (refino, mistura, extrusão, injeção) de fabricação dos compósitos termoplásticos reforçados com fibras lignocelulósicas podem ocasionar alterações nas dimensões de tais fibras. Contudo, as deformações e o dano sofrido pelas mesmas podem variar dependendo de como for a sua geometria.

2.3.3 Parede celular

A estrutura da parede celular tipicamente encontrada em madeiras consiste de uma camada intercelular, também chamada de lamela média, cuja função é manter as células adjacentes unidas. Em seguida, uma parede celular primária, constituída por uma fina e flexível camada, é depositada sobre a lamela média à medida que cresce o tecido da planta, enquanto que a parede secundária, a qual é composta por três camadas consecutivas que se distinguem facilmente pelo grau de inclinação do ângulo de microfibrilas, é depositada sobre a parede primária (Figura 2). Esse arranjo das microfibrilas de celulose desempenha um importante papel na determinação de diversas propriedades da madeira (CAVE, 1997).

FIGURA 2: Estrutura em camadas da parede celular da madeira (OBATAYA, 2016)



P: parede primária; S: parede secundária; S1: camada S1 da parede secundária; S2: camada S2 da parede secundária; S3: camada S3 da parede secundária; L: lamela média.

Na parede primária, as microfibrilas estão dispostas aleatoriamente, enquanto que na camada mais externa (S1) da parede secundária, exibem um arranjo helicoidal com ângulos de inclinação que podem variar de 50° a 70° em relação ao eixo longitudinal da fibra. Em contrapartida, na camada intermediária (S2), as microfibrilas de celulose são orientadas praticamente paralelas ao eixo da fibra, com ângulos que vão de 10° a 30° em coníferas e de

5° a 20° em folhosas. E por fim, a camada mais interna (S3) possui orientação similar à camada S1, com ângulos de inclinação entre 60° e 90° (WIEDENHOEFT, 2010).

A camada S2 é, geralmente, muito mais espessa do que as demais e, conseqüentemente, a inclinação média das microfibrilas de celulose nessa camada é um dos principais determinantes das propriedades físicas e mecânicas da parede celular e, portanto, da qualidade da madeira e da fibra em si (BOOKER, 1993). Por exemplo, a resistência e dureza podem ser afetadas pela angulação das microfibrilas, onde pequenos ângulos são responsáveis por maiores resistências, enquanto que ângulos maiores proporcionam maior elasticidade (TIENNE et al., 2009). Estudos desenvolvidos por Barber e Neylan (1964) mostraram que o ângulo de microfibrilas da camada S2 influencia as propriedades elásticas e estabilidade dimensional da madeira.

Diante disso, quanto mais espessa a camada S2, maior é a concentração de celulose, hemicelulose e lignina, menor é o diâmetro do lúmen e, conseqüentemente, menor o coeficiente de flexibilidade da fibra, que é dado pela razão percentual do diâmetro do lúmen (d) sobre o diâmetro da fibra (D).

2.3.4 Superfície das fibras e adesão termoplástico/madeira

A utilização de reforços lignocelulósicos em matriz termoplástica ocorre de forma limitada nas práticas industriais, principalmente devido às dificuldades associadas à interação fibra/matriz (MAHLBERG et al., 2001), que envolve a existência de uma transição química e física na fronteira desses componentes. A natureza polar e higroscópica inerente à celulose e as características não polares e hidrofóbicas da maioria dos termoplásticos são alguns dos inconvenientes que reduzem o potencial das fibras naturais para serem utilizadas como reforço (DUFRESNE et al., 2000).

De acordo com Chawla (2012), em materiais compósitos a adesão da interface fibra/matriz pode se dar por: encaixe mecânico das cadeias da matriz polimérica em rugosidades presentes na superfície da fibra, atração eletrostática, forças de *van der Waals* ou formação de ligações químicas mais fortes.

Durante a fase de mistura da fibra de madeira e do termoplástico, por exemplo, na ausência de compatibilidade, a celulose, que é o principal componente da parede da célula, tende a reagir com outras moléculas de polissacarídeos ou moléculas de água (ROWELL et al., 2005). Assim, a matriz termoplástica rodeia as fibras de madeira sem se aderir a elas, o

que resulta em uma falta de transferência de carga ao nível da interface, e consequentemente, na produção de um material frágil (BOUAFIF, 2009).

Em vista disso, ressalta-se que a força de adesão em uma interface é um fator de grande importância para o desempenho mecânico do compósito, uma vez que é responsável pela transferência de cargas entre a matriz e o reforço (FOWLER et al., 2006).

2.3.5 Influência da composição química nas propriedades mecânicas do compósito

A análise da estrutura molecular da parede celular é essencial para uma melhor compreensão do potencial tecnológico das fibras como reforço e também dos meios para a melhoria de sua compatibilidade com as matrizes poliméricas.

De acordo com Pereira et al. (2003), os componentes químicos da madeira podem ser divididos em dois grandes grupos: os componentes estruturais, que engloba substâncias macromoleculares (celulose, hemiceluloses e lignina) e os componentes não estruturais, compostos por substâncias de baixa massa molecular como os extrativos e substâncias inorgânicas, e que se encontram no lúmen das células e nos espaços vazios existentes na estrutura da madeira. A proporção destes componentes numa fibra depende da idade, origem da fibra e das condições de extração utilizadas para obter as fibras (PEREIRA et al., 2015).

A celulose é considerada o principal componente estrutural da parede celular dos vegetais. É um homopolímero linear constituído por unidades de D-glucose unidas por ligações β -1,4-glucosídicas que são, muitas vezes, organizadas de maneira altamente ordenada, semelhantes a cristais (EMONS; MULDER, 2000). Estas unidades cristalinas são atreladas umas às outras por fortes ligações de hidrogênio, formando as microfibrilas de celulose (RODRIGUES, 2007). Assim, devido ao seu alto grau de polimerização e orientação molecular, a celulose é responsável pela elevada rigidez e resistência das fibras (THAKUR; SINGHA, 2010).

Em compósitos de matrizes poliméricas, fibras vegetais com altos teores de celulose são desejáveis devido ao seu alto grau de cristalinidade, boa estabilidade química e alta polaridade (GUIMARÃES JR et al., 2011). De acordo com Chand e Hashmi, 1993, fibras com grande quantidade de celulose possuem alta resistência a tração e elevado módulo de elasticidade.

Depois da celulose, as hemiceluloses (ou polioses) constituem o grupo de polissacarídeos mais importantes das células vegetais, representando, em geral, entre 15 e 35% da sua composição (GÍRIO et al., 2010). É uma variedade de moléculas complexas,

ramificadas, amorfas e de baixo peso molecular, que podem apresentar em sua composição unidades de β -D-xilose, β -D-manose, β -D-glicose, α -L-arabinose e ácido β -D-glicurônico. Na parede celular, as hemiceluloses, juntamente com a lignina, exercem o papel de matriz de suporte das microfibrilas, conferindo à madeira elasticidade e resistência a compressão (TSOUMIS, 1991).

Já a lignina, segundo maior componente em massa, corresponde a cerca de 20-30% da parede celular (PEREIRA et al., 2003). É uma macromolécula constituída por um arranjo estrutural complexo, composto por um sistema aromático, reticulado, com elevada massa molar, amorfo e com unidades de fenilpropano ligadas a grupos metoxílicos e hidroxílicos (PETTERSEN, 1984). Como resultado da sua estrutura química, a lignina é um polímero com fortes ligações covalentes constituindo uma estrutura que confere rigidez e coesão à parede da célula, bem como resistência à compressão à madeira (PEREIRA et al., 2003). No entanto, no que se refere a resistência à tração, à ruptura e ao choque conforme o conteúdo de lignina aumenta a resistência diminui (ZHANG et al., 2013).

As fibras vegetais também contêm quantidades menores de substâncias de baixa massa molecular, incluindo componentes orgânicos (extrativos) e inorgânicos (cinzas) (FENGEL; WEGENER, 1983).

As substâncias inorgânicas são formadas pelos componentes minerais da madeira. Já as substâncias orgânicas encontram-se acumuladas nas células do parênquima e em concentrações muito reduzidas nos espaços intercelulares, na lamela média e na parede da célula, no entanto sem pertencerem aos componentes estruturais da mesma (FENGEL; WEGENER, 1983). Isso explica a facilidade da remoção dessas substâncias por meio de solventes polares e apolares, sem prejuízos das características mecânicas da madeira (RIO et al., 1998).

Contudo, apesar da sua baixa concentração, essas substâncias extraíveis marcam profundamente as características da madeira. Em compósitos, por exemplo, os extrativos são considerados contaminantes da superfície das fibras, uma vez que afetam a compatibilidade madeira/polímero (GUIMARÃES JR. et al., 2011). Saputra et al. (2004), ao analisarem a influência da remoção de extrativos da madeira de duas espécies de coníferas nas propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno reforçados com farinha de madeira, verificaram que apenas a extração resultou em um aumento significativo da resistência à flexão e do módulo de elasticidade desses materiais. Os autores atribuem esse resultado as altas temperaturas utilizadas durante a preparação do compósito, visto que a elevadas temperaturas os extrativos podem tender a migrar para a superfície da farinha de madeira,

ocasionando um acúmulo dessas substâncias na interfase plástico-madeira, o que afeta a compatibilidade madeira/polímero.

De acordo com Guimarães Jr. et al. (2011), altos teores de extrativos, cinzas e lignina diminuem as propriedades mecânicas dos compósitos, visto que esses componentes prejudicam a aderência fibra-matriz e interferem na cura das matrizes.

Ou et al. (2014a) demonstraram que a composição química da parede celular afeta o comportamento reológico de compósitos de partículas de madeira/polietileno de alta densidade, visto que a extração da lignina e/ou hemicelulose alterou a cristalinidade e microestrutura das paredes celulares, influenciando diretamente na viscosidade do compósito. Em outro trabalho, os mesmos autores também constataram que a remoção de hemiceluloses aumenta a resistência à água e a extração de α -celulose aumenta as propriedades mecânicas de resistência à tração e de resistência ao impacto (OU et al., 2014b).

Resultados semelhantes foram obtidos por Hosseinaei et al. (2012) ao realizaram experimentos incorporando 50% de farinha de madeira numa matriz de PP no processo de injeção, com e sem extração de hemiceluloses, obtendo resultados superiores nas propriedades mecânicas dos compósitos cujas hemiceluloses da madeira foram removidas.

Trugilho et al. (1996) estudaram as características físico-químicas da madeira de *Eucalyptus saligna* e constatou que o teor de lignina apresentou correlação negativa com a densidade básica e o teor de holocelulose, indicando que quanto menor for o teor de lignina maior será o teor de holocelulose e menor será a densidade básica da madeira.

2.4 Caracterização mecânica e morfológica dos compósitos

O estudo das propriedades mecânicas dos materiais é imprescindível no processo de seleção da matriz e do reforço para o projeto de uma peça ou produto. O comportamento mecânico de um material reflete a relação entre a resposta que este apresenta a uma carga ou tensão que esteja sendo aplicada (GARCIA et al., 2012). Os principais ensaios mecânicos realizados para a avaliação das propriedades dos compósitos são: ensaios de tração, flexão e impacto, sendo o ensaio de tração o mais usual, uma vez que este é relativamente simples e de rápida realização, além de fornecer informações fundamentais para o projeto e a fabricação de diferentes produtos.

No ensaio de tração uma amostra é deformada, geralmente até sua ruptura, por meio de uma carga de tração crescente que é aplicada uniaxialmente ao longo do eixo do corpo de prova. Este teste fornece como resultado a curva tensão de tensão *versus* deformação, a qual

evidencia as relações entre a força aplicada e as deformações sofridas pelo corpo de prova durante o ensaio (GARCIA et al., 2012).

Os principais parâmetros mecânicos medidos ou calculados através dos ensaios de tração são tensão e deformação no escoamento; tensão máxima, tensão e deformação na ruptura e módulo de Young ou de elasticidade (CANEVAROLO, 2006). As deformações no escoamento e na ruptura definem o poder de escoamento das moléculas durante o estiramento. A tensão máxima corresponde à tensão máxima aplicada ao material antes da ruptura. O módulo de elasticidade ou módulo de Young é medido pela razão entre a tensão e a deformação, dentro do limite elástico, em que a deformação é completamente reversível e proporcional à tensão. Está diretamente relacionado à rigidez do material, sendo que quanto maior for o módulo, maior será a rigidez do material ou menor é a deformação elástica quando aplicada uma dada tensão (CANEVAROLO, 2006).

O estudo do comportamento de materiais sob impacto é de grande importância, visto que diversas aplicações práticas estão sujeitas a solicitações dessa ordem. Por exemplo, muitos materiais considerados satisfatórios em algumas situações são rejeitados para outras por apresentarem tendência à fratura frágil sob impacto (CANEVAROLO, 2006). O principal parâmetro para medir ou avaliar a resistência ao impacto é a energia de impacto, ou seja, a energia consumida para romper o corpo de prova por uma solicitação de impacto. Os ensaios mais utilizados para isso são Izod e Charpy, cujas especificações estão descritas nas normas ASTM D256 e ASTM D6110, respectivamente e que consistem de um pêndulo de martelo liberado de uma altura fixa, que oscila para bater e fraturar a amostra posicionada no ponto mais baixo da oscilação, e que depois continua seu movimento até uma altura máxima medida no final da primeira oscilação.

A energia requerida para romper o corpo de prova é a soma das energias necessárias para deformá-lo, para iniciar a ruptura e para propagar a trinca através de sua secção transversal. O valor obtido na escala da máquina de impacto dividido pela espessura do corpo de prova ao longo do entalhe corresponde à resistência necessária para romper o material sob impacto e é expressa em Joule/metro (J/m) (CANEVAROLO, 2006).

Borsoi et al (2011) avaliaram a influência de diferentes teores de carga de reforço (0; 10 e 20%) com ou sem adição de agente compatibilizante por meio de ensaio de tração em compósitos de poliestireno com fibras de algodão e constataram que a adição de 20% de fibra de algodão fez com que essas propriedades aumentassem, sendo esse efeito intensificado em presença de compatibilizante. Observaram, também, através de ensaio de impacto um

aumento da resistência ao impacto com adição de carga e um decréscimo na presença de compatibilizante.

Da Luz et al. (2006) ao estudarem as propriedades mecânicas e morfológicas de compósitos de polipropileno reforçados com celulose de bagaço e palha observaram que os valores de deformação até ruptura dos materiais compósitos decrescem em relação ao polipropileno puro, independentemente da quantidade de reforço (20 a 30 % em massa). Já para resistência a tração os compósitos contendo 20% em massa apresentaram resistência muito semelhante ao polipropileno puro e os com 30% em massa tiveram uma diminuição nessa propriedade. No que se refere ao módulo de elasticidade, com a inserção do reforço, o módulo aumentou em relação ao polipropileno puro.

Em estudo para avaliar a influência de diferentes teores de casca (0; 10; 20; 30; 40 e 50%) de aveia em compósitos de matriz de polipropileno, Furlan et al. (2012) constataram que o módulo elástico dos compósitos não é influenciado significativamente pela quantidade de casca de aveia e que a adição das fibras ao PP resulta em uma diminuição da resistência do material, pois os compósitos suportam uma tensão máxima inferior ao PP puro.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 *Farinha de madeira*

Foram amostradas quatro árvores de guapuruvu provenientes de um plantio experimental com 38 meses de idade e espaçamento de 1,0m x 1,0m, em área pertencente a Universidade Federal de São Carlos, campus de Sorocaba/SP. A área está localizada a, aproximadamente, 23°35' de latitude sul e 47°31' de longitude oeste, a uma altitude média de 649 metros. O clima da região caracteriza-se como tropical quente e úmido com verão chuvoso atingindo temperaturas médias superiores a 22°C e inverno predominantemente seco com temperaturas médias abaixo de 18°C. De acordo com a classificação de Köppen o clima é, predominante, do tipo *Cwa* na depressão periférica e *Cwb* nas áreas mais elevadas (PINHEIRO et al., 2011).

3.1.2 *Polipropileno*

Para a preparação dos compósitos foi utilizado como matriz o polipropileno virgem (H301 - Braskem), cujas propriedades informadas pelo fabricante se encontram listadas na Tabela 1.

TABELA 1: Propriedades do PP utilizado para confecção dos compósitos.

Propriedade	Método ASTM	Valor	Unidade
Índice de Fluidez (230°C/2,16 kg)	D – 1238	10	g/10 min
Densidade	D – 792	0,905	g/cm ³
Resistência à tração no Escoamento	D – 638	34	MPa
Alongamento no Escoamento	D – 638	11	%
Resistência ao impacto IZOD a 23°C	D – 256	25	J/m

Fonte: Braskem, 2015.

Segundo o fabricante, o H 301 é um polipropileno que possui um índice de fluidez médio, é indicado para processos de moldagem por injeção e extrusão de fibras, apresenta excelente processabilidade, bom balanço rigidez/impacto, bem como baixa transferência de sabor e odor.

3.1.3 Agente compatibilizante (Polybond 3200)

Como agente de acoplamento interfacial entre a fibra e o polímero foi utilizado o polipropileno funcionalizado com anidrido maleico (PP-g-MA) fabricado pela Chemtura e comercializado com o nome de Polybond 3200, com 1% de anidrido maleico e índice de fluidez de 115 dg/min (ASTM D1238, 190 °C/2,16 kg). O teor usado de agente compatibilizante foi de 2%.

3.2 Métodos

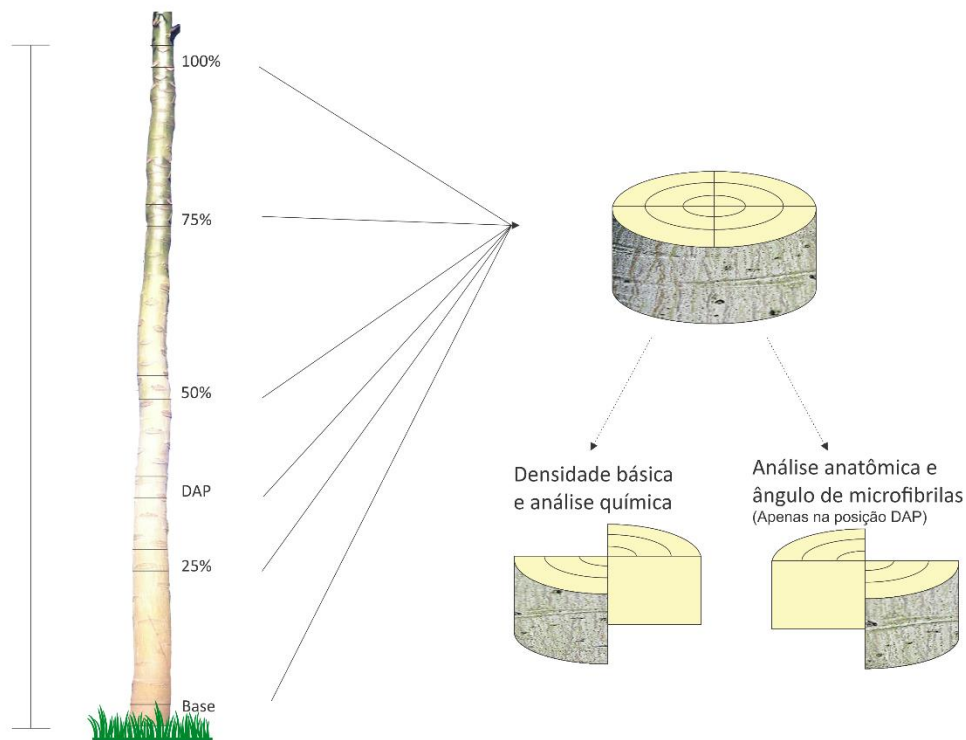
3.2.1 Características de crescimento

Após a derrubada, as árvores foram cubadas pelo método de *Smalian*, para a determinação do seu volume individual com casca. Adicionalmente, foram realizadas estimativas de massa seca, utilizando-se a densidade básica média determinada pelo procedimento de deslocamento de líquido de densidade conhecida (água), conforme descrito na norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 11941/2003).

3.2.2 Amostragem

De cada caule foram retirados discos de 5 cm de espessura, de faces paralelas, nas posições da base, do diâmetro a altura do peito (DAP) (1,30 m de altura do solo), a 25%, 50%, 75% e 100% da altura do fuste considerando a inserção dos primeiros galhos. Os discos amostrados foram seccionados na forma de cunhas opostas (Figura 3).

FIGURA 3: Esquema da amostragem do tronco.



3.2.3 Determinação da densidade básica da madeira

A densidade básica média foi determinada como sendo o valor médio das densidades básicas de duas cunhas opostas retiradas de cada disco. Para tanto, foi utilizado o procedimento de deslocamento de líquido de densidade conhecida (água), conforme descrito na norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 11941/2003).

3.2.4 Caracterização anatômica

3.2.4.1 Análise da morfologia das fibras

Para a mensuração das características individuais das fibras (comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede), de cada árvore foram confeccionados dois corpos de prova, com dimensões de 2cm x 2cm x 2cm, orientados nos três planos anatômicos, retirados da parte intermediária de duas cunhas opostas obtidas na posição do DAP. Em seguida, foi produzido um macerado a partir de pequenos fragmentos no formato de palitos retirados

desses corpos de prova com auxílio de um estilete. Os palitos foram colocados em frascos de vidro separadamente, contendo uma solução de ácido acético glacial e peróxido de hidrogênio 60 volumes na proporção de (v/v) 1:1, e mantidos em estufa a 60°C durante 24 horas. O material foi então cuidadosamente lavado com água destilada e corado com safranina hidroalcóolica 1%. Foram preparadas lâminas provisórias com as fibras, sendo medidas um total de 30 fibras por região.

Dos mesmos corpos de prova, foram retiradas seções anatômicas com auxílio de um micrótomo de deslizamento horizontal nos planos transversal, tangencial e radial, com espessura de 25 µm, as quais foram coradas, desidratadas e preparadas em lâminas histológicas semipermanentes para descrição anatômica do lenho.

As dimensões das fibras foram obtidas em equipamento de análise de imagens (microscópio de polarização, modelo Leica DM2700 P com câmera e monitor de vídeo), utilizando o software de análise de imagem *Leica Application Suite* (LAS V4.5) para as medições.

3.2.4.2 Ângulo de microfibrilas

Os mesmos corpos-de-prova foram utilizados e preparados para a determinação do ângulo de microfibrilas. Foram obtidos desses corpos de prova cortes histológicos realizados no plano tangencial com, aproximadamente, 8µm de espessura, com auxílio de micrótomo de deslizamento horizontal. Posteriormente, os cortes foram inseridos em uma solução de maceração contendo uma mistura de partes de ácido acético glacial e partes de peróxido de hidrogênio 60 volumes na proporção de (v/v) 1:1, e levados à estufa a uma temperatura de 60°C pelo período de 12 horas. Em sequência, foram montadas lâminas provisórias para a medição do ângulo de microfibrilas (AMF), utilizando microscópio de luz polarizada, modelo *Leica* DM2700 P, dotado de uma mesa giratória graduada de 0° a 360°. Nesta técnica, a lâmina é posicionada de modo que as fibras fiquem na posição vertical. Posteriormente, gira-se a mesa do microscópio até o momento em que as fibras apresentem sua máxima posição de extinção, ou seja, até o momento em que a luz polarizada se encontre sobreposta ao mesmo alinhamento das microfibrilas da camada S2 da parede secundária, não deixando a luz passar. A distância entre a posição inicial da fibra e a máxima posição de extinção descreve o AMF (LENEY, 1981).

Os cortes histológicos para medição do ângulo microfibrilar e para a descrição anatômica da madeira foram realizados no Laboratório de Anatomia, Identificação e

Densitometria de Raios X em Madeira do Departamento de Ciências Florestais (LCF) da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – ESALQ/USP, Piracicaba, SP.

3.2.5 Composição química da madeira de guapuruvu

As amostras utilizadas para a caracterização química foram provenientes de amostra composta contendo os 5 discos (item 3.3), a qual foi seca em estufa de circulação de ar e trituradas com o auxílio de um moinho de facas do tipo Willey, Marconi – MA 340. Posteriormente, o material passou por um processo de separação mecânica em um agitador de peneiras com batidas intermitentes, sendo utilizada apenas a fração que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retida na de 60 mesh, com teor de umidade de 0%.

Na análise imediata, foi determinado o teor de cinzas, conforme a norma ASTM D1102-84 (2013). O material resultante foi caracterizado quimicamente conforme prescrito em normas da *Technical Association of the Pulp and Paper Industry* (TAPPI).

3.2.5.1 Determinação do teor de cinzas

Foi pesado, aproximadamente, 1,0g de amostra seca e adicionada em cadinho de porcelana, previamente calcinado, a 600°C. O cadinho foi aquecido em bico de *Bunsen* até levantar chama e, logo após, foi levado ao forno mufla a 600 °C por 6h. Após este intervalo, o cadinho foi colocado e mantido no dessecador até alcançar a temperatura ambiente, em seguida foi pesado.

3.2.5.2 Determinação do teor de extrativos

A determinação dos teores de extrativos totais foi realizada em 3 etapas conforme proposto nas normas TAPPI T 204 cm-97 e T 207 cm-99 adaptadas.

O primeiro passo foi realizado para extrair substâncias não polares utilizando-se uma mistura de etanol/ciclohexano (1:1, v:v). Em cada conjunto de soxhlet, foram colocados 3 pacotes com 2.0g da amostra de guapuruvu. Para esta extração, os aquecedores foram ajustados para promover a fervura e mantidos por aproximadamente 36 ciclos (6 horas). Os pacotes foram removidos, levados estufa a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ até peso constante. Para o segundo passo, utilizou-se o etanol como solvente no soxhlet. O procedimento foi o mesmo usado no primeiro passo. O terceiro passo foi realizado com água quente para remover componentes polares. O conteúdo de cada pacote foi retirado, pesados e colocado em frascos Erlenmeyer

contendo 1 L de água deionizada e mantidos em uma placa de aquecimento com temperatura de, aproximadamente, 70°C e com agitação constante durante 3 horas, mantendo o nível da água. Após este período de extração, a amostra foi filtrada e levada à estufa a $105 \pm 2^\circ \text{C}$ até atingir massa constante.

3.2.5.3 Determinação do teor de lignina Klason insolúvel

O teor de lignina Klason insolúvel foi determinado conforme descrito na norma TAPPI T 222 om-11.

Em um béquer contendo 1,0 g de material livre de extrativos (0% de teor de umidade) foi adicionado 15,0 mL de H_2SO_4 72% (a temperatura de 10 a 15°C) em pequenas porções. Esta mistura foi mantida em banho maria a 2°C e macerada para dispersão do material. Após esse período, o sistema foi coberto com um vidro de relógio e mantido em banho-maria a $20 \pm 2^\circ \text{C}$ durante 2 horas com agitação frequente. Num balão Erlenmeyer de 1L foram adicionados 300 ml de água e em seguida o material foi transferido do béquer para o frasco Erlenmeyer. A solução foi diluída para H_2SO_4 3% e fervida mantendo o volume constante durante 4 horas. Após 12 h em repouso, o material insolúvel foi decantado para prosseguir com a filtração. A solução foi então filtrada, lavada com água deionizada e levada à estufa a $105 \pm 2^\circ \text{C}$ até atingir massa constante.

3.2.5.4 Determinação do teor de holocelulose

O teor de holocelulose foi determinado utilizando os procedimentos da norma TAPPI T9 wd-75

Em um frasco Erlenmeyer de 500 mL foram adicionados 3,0 g de amostra de fibras secas e livre de extrativos e 120 mL de água deionizada. O sistema foi levado a um banho maria a uma temperatura constante de 70°C . Foram adicionados 2,5 g de clorito de sódio (NaClO_2) e 1,0 mL de ácido acético glacial. O Erlenmeyer foi tampado com o auxílio de um béquer de 50 mL e mantido em banho-maria durante uma hora sob agitação constante. Novamente, foram adicionados 2,5 g de clorito de sódio e 1,0 mL de ácido acético, mantendo-se a reação durante mais uma hora. O procedimento de adição de ácido acético glacial e clorito de sódio foi realizado mais uma vez totalizando três horas de agitação neste meio.

Em seguida, a mistura foi resfriada abaixo de 10°C em banho de gelo pelo período de 30 minutos e filtrada à vácuo. O material retido no funil foi enxaguado com água destilada e

acetona até atingir o pH neutro, posteriormente foi introduzido em uma estufa a $105 \pm 2^\circ \text{C}$ para secagem até massa constante.

3.2.5.5 Determinação do Teor de α - celulose

Foi pesado 1,0 g de amostra seca, a qual foi transferida para béquer, onde foram adicionados 10 mL de solução aquosa de NaOH 17,5%. O sistema foi deixado sob repouso por 2 min e as fibras trituradas foram cuidadosamente maceradas por 8 minutos. Após este período foi adicionado novamente 10 mL da solução de NaOH 17,5% e foi deixado em repouso por 20 minutos. Em seguida foram adicionados 40 mL de água deionizada e realizada a filtração à vácuo. O resíduo foi lavado com 200 mL de água deionizada, 20 mL de ácido acético 20% e novamente com 200 mL de água deionizada. A amostra retida no filtro foi levada à estufa a $105 \pm 2^\circ \text{C}$ até atingir massa constante.

3.2.5.6 Determinação do Teor de Hemiceluloses

O teor de hemiceluloses foi determinado pela diferença entre os conteúdos de holocelulose e α -celulose.

3.2.6 Extrusão dos compósitos

De cada caule foi retirada uma seção equivalente à posição da base até 25% da altura do fuste. Estas, por sua vez, foram seccionadas em pequenos fragmentos, secas em estufa de circulação de ar a 80°C até massa constante, trituradas e peneiradas. Sendo utilizada apenas a fração de partículas que passou pela peneira de 10 mesh e ficou retida na de 14 mesh.

Os compósitos foram preparados em uma extrusora de bancada de rosca dupla co-rotacional (diâmetro de 19 mm e L/D de 25) da marca *B&P Process Equipment and Systems*, modelo MP19, pertencente ao Laboratório de Processamento do Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar- campus São Carlos. O perfil de temperaturas utilizado foi de 185/185/180/175/165°C, do alimentador até a saída da matriz. Foi utilizada uma vazão de alimentação de 1,0 kg/h, um torque de 60%, e uma velocidade de rotação das roscas de 120 rpm.

Foram feitas as seguintes formulações:

PP/FMG/Polybond 3200 (100/0/0)

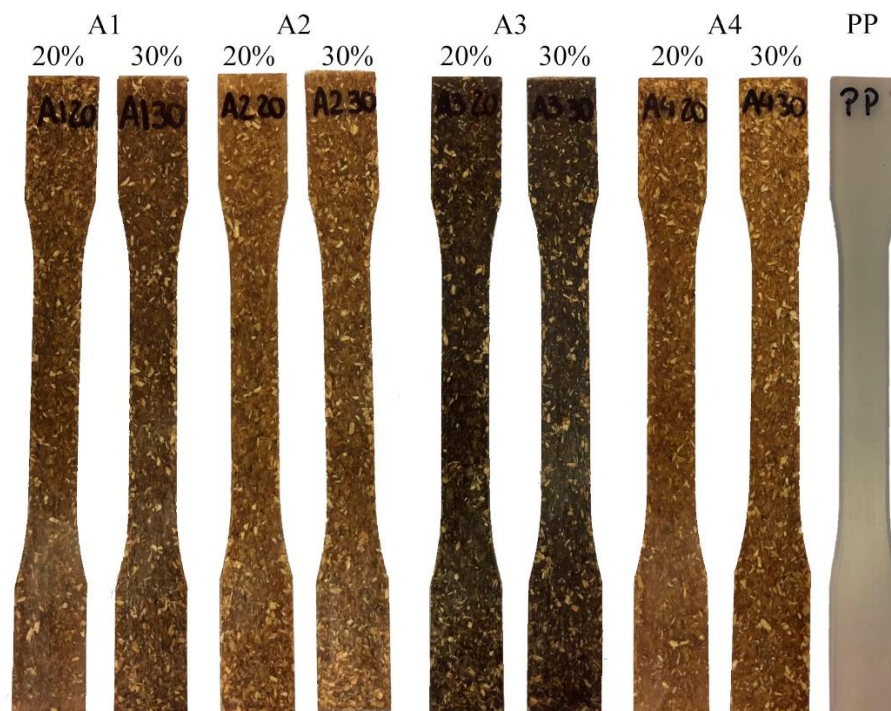
PP/FMG/Polybond 3200 (80/20/2)

PP/FMG/Polybond 3200 (70/30/2)

3.2.7 Injeção dos compósitos

As composições extrudadas foram granuladas e, em seguida, secas em estufa de circulação de ar a 60°C por 12h para, a seguir, serem moldadas para confecção de corpos de prova por injeção em injetora da marca Arburg Allrouder, modelo 270S 400-100, pertencente ao Laboratório Nacional de Nanotecnologia para o Agronegócio da Embrapa Instrumentação Agropecuária (Figura 4). As amostras foram moldadas usando os mesmos perfis de temperatura usados durante a etapa de mistura por extrusão.

FIGURA 4: Corpos de prova moldados por injeção, contendo diferentes teores de farinha de madeira de guapuruvu (*Schizolobium parahyba*).



A1 = árvore 1; A2 = árvore 2; A3 = árvore 3; A4 = árvore 4, PP = polipropileno puro.

A velocidade (vazão) de injeção foi de 30 cm³/s, o volume de dosagem de 35 cm³, a pressão de recalque 400 bar por 4 segundos, tempo de resfriamento no molde de 20 segundos, e temperatura do molde de 50°C.

3.2.8 Caracterização mecânica dos compósitos

Testes mecânicos de tração e de impacto foram realizados no Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais, UFSCar – São Carlos com o intuito de estudar a modificação nas propriedades mecânicas da matriz de PP devido à incorporação da farinha de madeira de guapuruvu.

Testes de tração foram realizados com os corpos de prova moldados por injeção de acordo com a norma de ensaio ASTM D638. O módulo de Young, a resistência a tração na ruptura e a elongação na ruptura foram medidas a temperatura ambiente (25°C) e condições atmosféricas controladas (umidade relativa de $50 \pm 5\%$) em um equipamento de testes mecânicos *Instron*. Os ensaios foram realizados em todas as amostras usando uma cédula de carga de 5 kN e uma velocidade de ensaio constante de 5 mm/min.. Foram testados dez corpos de prova de cada formulação e a média dos resultados foi calculada e relatada.

Os testes de impacto foram realizados com corpos de prova moldados por injeção e entalhados de acordo com a norma de ensaio ASTM D256, usando martelo com energia de 1,0 J.

3.2.9 Densidade dos compósitos

A densidade relativa dos compósitos foi determinada utilizando os parâmetros da norma ASTM D792 (2008).

3.2.10 Análises estatísticas

A análise estatística dos dados foi realizada utilizando-se o software estatístico R (R CORE TEAM, 2016). Para avaliação das propriedades anatômicas (dimensões das fibras e ângulo de microfibrilas), químicas (teores de celulose, hemiceluloses, lignina, extrativos e cinzas) e propriedades mecânicas (alongamento na ruptura, tensão de ruptura, módulo de elasticidade e impacto Izod), procedeu-se uma análise de tendência central (média) e dispersão (desvio padrão), bem como com a análise de variância (ANOVA) fator único, com nível de significância de 5% para verificar a existência de diferenças significativas entre as médias das variáveis analisadas complementada com o teste de Tukey.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Características de crescimento

Os resultados médios das características de crescimento das árvores estudadas estão apresentados na Tabela 2.

TABELA 2: Características de crescimento de árvores de *Schizolobium parahyba* aos 38 meses de idade.

Amostra	DAP	Hc	Ht	VTCC	Mseca
A1	17,82	6,46	8,29	0,118574	28,22
A2	18,14	5,60	8,26	0,139395	33,59
A3	15,28	5,05	6,87	0,074915	17,75
A4	14,96	5,27	6,94	0,076695	18,63
Média	16,55	5,60	7,59	0,102395	24,55
DP	1,662	0,619	0,792	0,031	24,67
CV	10,04	11,07	10,43	31,12	31,23

A1 = árvore 1; A2 = árvore 2; A3 = árvore 3; A4 = árvore 4. DAP = diâmetro a 1,3m de altura do solo (cm); Ht e Hc = altura total e comercial (m); VTCC = volume total com casca (m³); Mseca = estimativa de massa seca, utilizando-se a densidade básica média (kg); DP = desvio padrão da média (na mesma unidade da variável); CV = coeficiente de variação (%).

A produtividade média em volume das árvores de guapuruvu aos 38 meses de idade foi de 0,1024 m³.árvore⁻¹. Valores esses considerados satisfatórios, visto que é uma espécie nativa com pequenos avanços silviculturais quando comparada a culturas exóticas de rápido crescimento, como as espécies do gênero *Eucalyptus*. Para fins de comparação, o volume médio com casca encontrado no presente trabalho é quase o dobro do valor reportado por Kruschewsky et al. (2007) para árvores clonais de um híbrido natural de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh com *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake da mesma idade, plantados em espaçamento 3,33 x 2,0 m (0,0576 m³.árvore⁻¹). Hsing et al. (2016), ao avaliarem as características dendrométricas de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, aos 2,25 anos de idade, encontraram valores de volume de 0,0738 m³.árvore⁻¹. Já em comparação com espécies nativas, Miranda et al. (2016) reportaram valores de volume de 0,0410 m³.árvore⁻¹ para árvore de paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*) de 36 meses de

idade. Os resultados das características de crescimento do presente trabalho demonstram o potencial da espécie para fornecer material em quantidade em ciclo relativamente curto

4.2 Densidade básica da madeira

Os resultados de densidade básica da madeira de guapuruvu se encontram apresentados na Tabela 3.

TABELA 3: Densidade básica da madeira de *Schizolobium parahybaos* 38 meses de idade.

Posição de Amostragem	A1	A2	A3	A4	Média
Base	0,315	0,323	0,315	0,328	0,320 a
25%	0,238	0,245	0,232	0,272	0,247 b
DAP	0,258	0,247	0,242	0,267	0,253 b
50%	0,232	0,231	0,225	0,229	0,229 b
75%	0,193	0,199	0,206	0,199	0,199 c
100%	0,196	0,201	0,200	0,165	0,190 c
Média	0,238 A	0,241 A	0,237 A	0,243 A	0,240

A1 = árvore 1; A2 = árvore 2; A3 = árvore 3; A4 = árvore 4. Obs.: Médias seguidas de letras iguais, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A densidade básica do guapuruvu variou de 0,237 g.cm⁻³ a 0,243 g.cm⁻³, com média de 0,240 g.cm⁻³, valor considerado baixo se comparado a materiais estudados como potenciais para o uso como reforço de compósitos, conforme apresentado na Tabela 4. Os materiais menos densos se destacam por ser uma alternativa para confecção de compósitos mais leves.

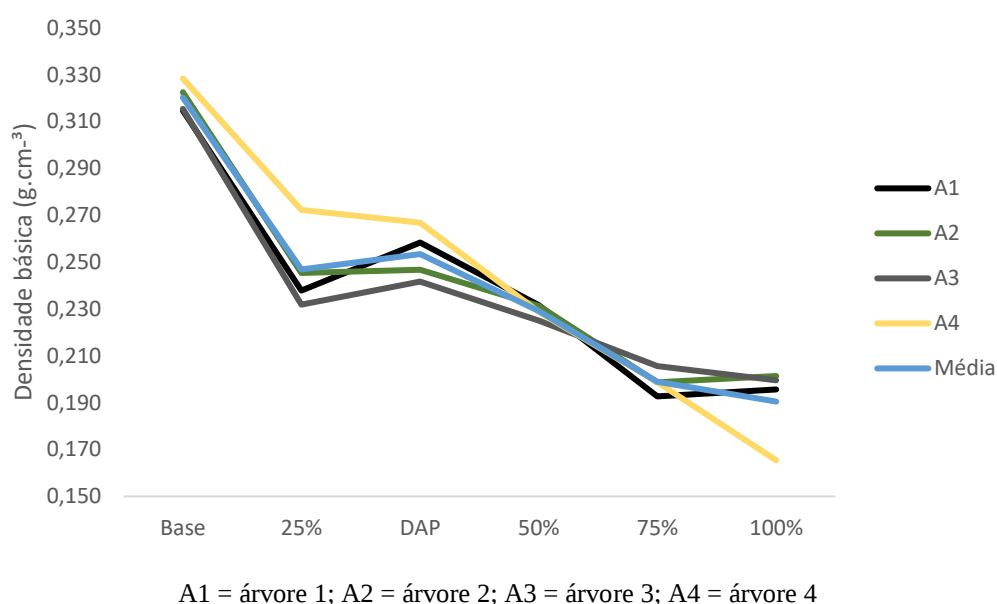
TABELA 4: Valores de densidade de diferentes materiais fibrosos.

Fibra	Densidade (g.cm ⁻³)	Referência
E-vidro	2,54 – 2,55	Bisanda e Ansell (1992), Mohanty (2002)
Aramida	1,40	Bledzik e Gassan (1999)
Sisal	1,40 – 1,50	Bisanda e Ansell (1992), Bledzik e Gassan (1999)
Coco	1,15 – 1,20	Bledzik e Gassan (1999), Bisanda e Ansell (1992)
Juta	1,45 – 1,46	Sengupta et al (2005), Debnath e Sengupta (2009)
Banana	1,35	Bisanda e Ansell (1992)

O valor médio de densidade básica observado no presente estudo está de acordo com o valor de $0,240 \text{ g.cm}^{-3}$ encontrado por Andrade e Carvalho (1998) e ligeiramente inferior ao valor de $0,255 \text{ g.cm}^{-3}$ verificado por Trianoski (2010) para a mesma espécie.

A Figura 5 ilustra a tendência de variação da densidade básica da madeira de guapuruvu em função da altura do tronco para as quatro árvores avaliadas.

FIGURA 5: Padrão de variação da densidade básica da madeira de *Schizolobium parahyba* em função da altura do fuste.



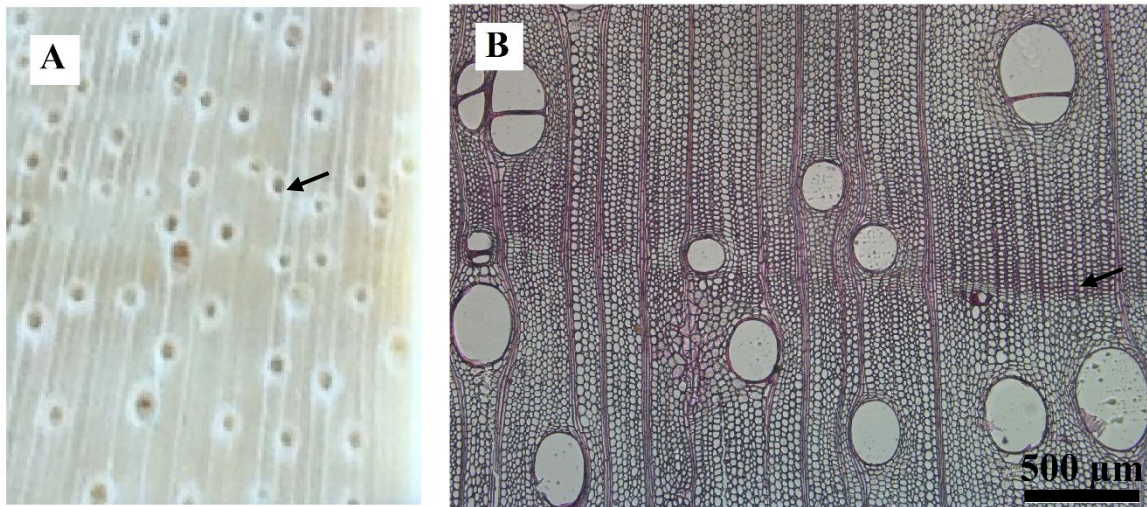
Verifica-se a clara tendência de redução da densidade da madeira com a altura da árvore. Observa-se que, em média, o maior valor para essa variável se encontra na posição da base e os menores valores nas alturas de 75 e 100%, não ocorrendo diferença significativa entre as alturas 25%, DAP e 50% (Tabela 3), por se tratar ainda de madeira juvenil e na fase inicial de formação do cerne. De acordo com Oliveira et al. (2005), madeiras mais homogêneas, quanto à sua densidade no interior do fuste, tendem a se comportar melhor nas operações de processamento, além de possibilitar menor variação nas demais propriedades tecnológicas.

4.3 Características anatômicas da madeira

O lenho de guapuruvu caracteriza-se por apresentar anéis de crescimento visíveis a olho nu, demarcados pelo espessamento da parede das fibras, o que é evidenciado pela

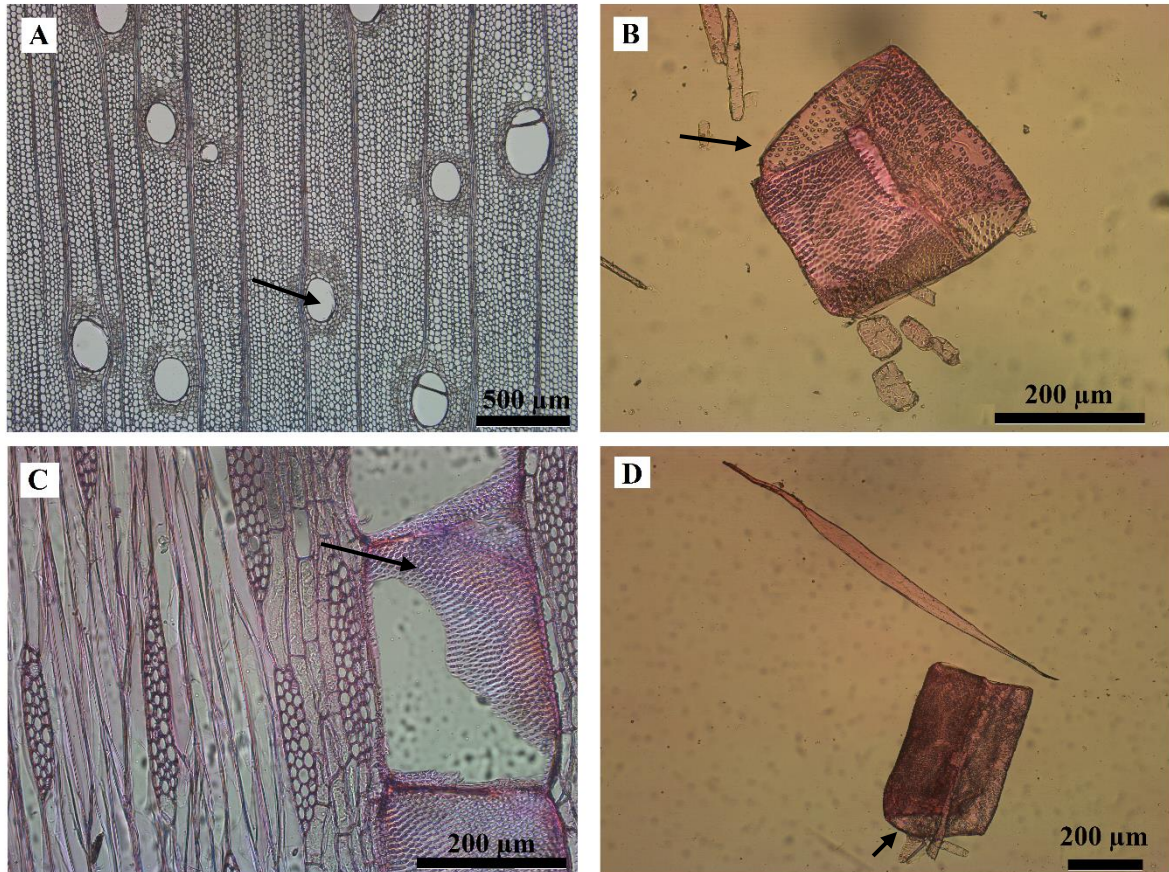
diferença na coloração entre o lenho inicial e tardio (Figura 6B). Os poros também foram visíveis a olho nu, em seção transversal (Figura 6A).

Figura 6: Aspecto macroscópico da madeira de *Schizolobium parahybano* plano transversal; A) vasos visíveis a olho nu; B) Aspecto microscópico da madeira, com camadas de crescimento demarcadas pelo espessamento da parede celular, evidenciadas pela diferença na coloração



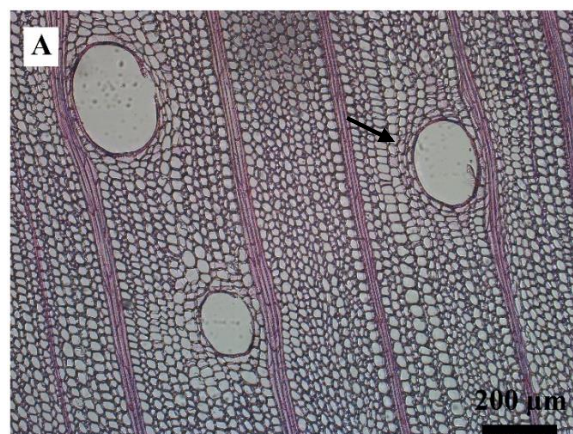
Observa-se que o lenho de guapuruvu apresenta vasos com porosidade difusa uniforme, predominantemente solitários, ocorrendo também vasos geminados e em menor quantidade múltiplos de até quatro (Figura 7A). Os elementos vasculares possuem placa de perfuração simples (Figura 7B) e ausência de tilos. As paredes celulares apresentam pontoações areoladas do tipo alternas (Figura 7C).

FIGURA 7: *Schizolobium parahyba* A) Vasos com porosidade difusa uniforme, predominantemente solitários; B) Vasos com placas de perfuração simples com sua área de perfuração horizontal; C) Vasos com pontoações areoladas alternas (seção tangencial); D) Vasos com sua área de perfuração ligeiramente oblíqua (seta).



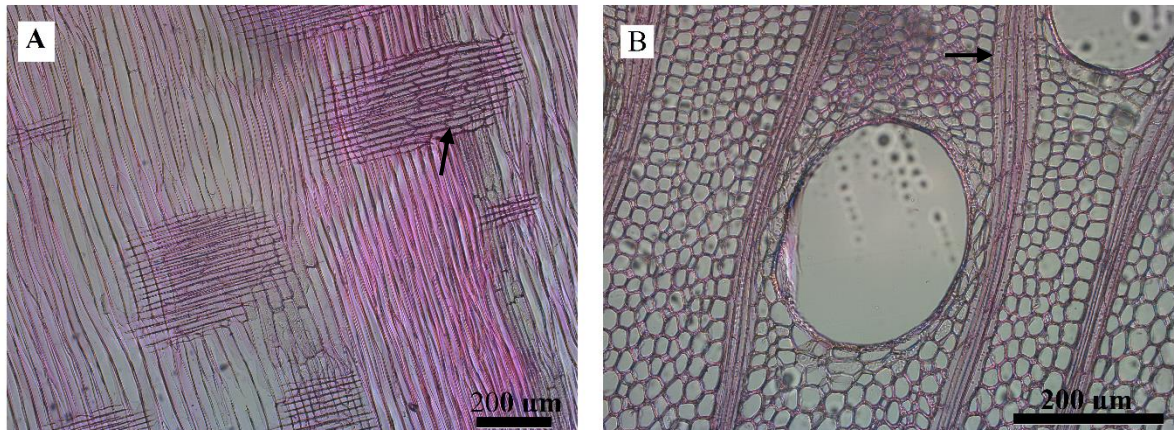
O parênquima axial foi visível a olho nu, sendo classificado como do tipo paratraqueal vasicêntrico e vasicêntrico confluyente (Figura 8).

FIGURA 8: Parênquima do tipo paratraqueal vasicêntrico da madeira de *Schizolobium parahyba*.



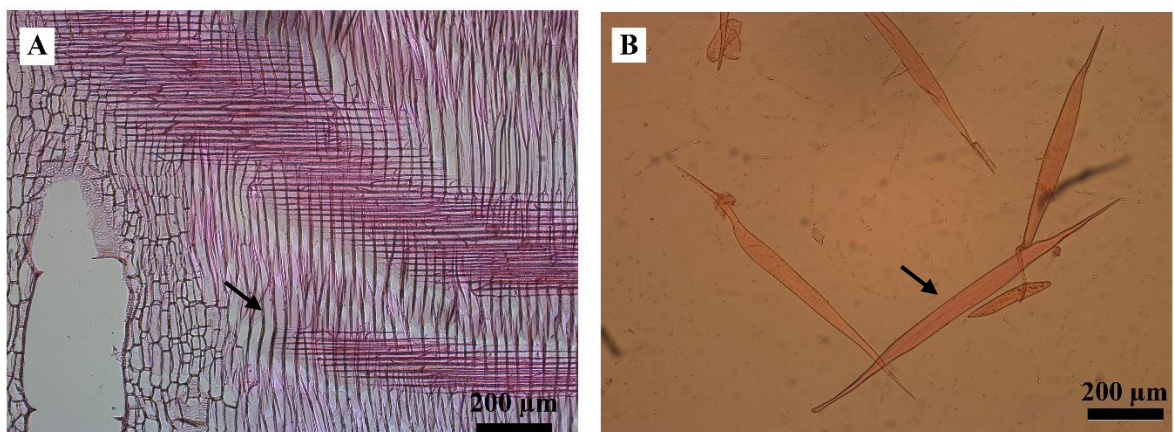
A madeira de guapuruvu apresenta raios homocelulares, formados por células procumbentes (Figura 9A); são unisseriados ocasionais, multisseriados variando de 2-4 predominantes (Figura 9B).

FIGURA 9: A) Seção radial da madeira, apresentando as células procumbentes do raio (seta); B) Detalhe dos raios multisseriados vistos no plano transversal (seta).



As fibras são do tipo libriformes, não septadas (Figura 10), ocasionalmente com presença de pontas bífidas.

FIGURA 10: A) Fibras do tipo libriformes, ausência de septos. B) Fibras individualizadas pela técnica de macerado.



As características anatômicas para a madeira de guapuruvu observadas neste estudo são compatíveis com as descritas por Mainieri e Chimelo (1978) ao analisarem árvores oriundas do estado de São Paulo. Já Pernía e Melandre (2006), ao descreverem as

características de material proveniente da Venezuela, caracterizaram as fibras como septadas, semelhantemente a Nisgoski et al. (2012) ao descreveram anatomicamente árvores de guapuruvu com 15 anos de idade provenientes do estado do Rio Grande do Sul. Tendo este último trabalho também descrito os raios como predominantemente homocelulares e ocasionalmente heterocelulares e o parênquima axial como do tipo paratraqueal aliforme e confluyente.

A variação nas dimensões dos elementos celulares, bem como os valores de ângulo de microfibrilas (AMF) mensurados estão apresentados na Tabela 5.

TABELA 5: Características anatômicas da fibra de *Schizolobium parahyba* aos 38 meses de idade.

Amostra	CF	LF	DL	EP	AMF
A1	863,50 (136,34) a	45,31 (6,83) a	38,46 (6,84) a	3,42 (0,99) a	39,48 (5,86) bc
A2	877,81 (131,01) a	45,70 (6,50) a	39,52 (6,35) a	3,09 (0,73) ab	36,37 (7,61) c
A3	877,84 (161,10) a	43,54 (8,35) a	39,52 (9,16) a	2,89 (0,87) b	43,92 (9,56) a
A4	914,96 (139,46) a	46,35 (6,08) a	39,52 (6,40) a	2,89 (0,90) b	40,01 (6,26) b
Média	883,53 (142,82)	45,43 (7,03)	39,08 (7,31)	3,07 (0,90)	39,94 (7,89)

A1 = árvore 1; A2 = árvore 2; A3 = árvore 3; A4 = árvore 4; CF: comprimento da fibra (μm); DL: diâmetro do lúmen (μm); LF: largura da fibra (μm); EP: espessura da parede (μm) e AMF: ângulo de microfibrilas ($^{\circ}$).

Obs.: Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Os comprimentos médios das fibras individualizadas variaram de 863,50 a 914,96 μm , não havendo diferença estatística significativa entre as árvores. Valores estes semelhantes ao encontrado por Nisgoski et al. (2012) na região próxima a medula (838,10 μm) e inferior ao reportado para a região próxima a casca (1201,36 μm), para árvores de guapuruvu de 15 anos de idade. O estudo de Athanázio-Heliodoro (2015) revelou valores de comprimentos das fibras de guapuruvu de 15 anos variando de 711,42 μm a 1.888,19 μm para madeira juvenil (com média de 1196,67 μm) e de 1.038,72 a 2.329,99 μm para madeira adulta (com média de 1492,0 μm).

No que tange a largura das fibras, foram encontrados no presente trabalho, valores médios (45,31; 45,70; 43,54 e 46,35 μm) superiores ao apresentado por Nisgoski et al. (2012) (39,61 μm). Contudo, em materiais compósitos a largura da fibra por si só não tem significado prático, mas sim sua relação com outras dimensões (GUIMARAES JR et al., 2010). Já para o diâmetro do lúmen, os valores médios (38,46 para a árvore A1 e 39,52 μm para as demais) observados também foram superiores ao encontrado por Nisgoski et al. (2012). Em

contrapartida, este trabalho encontrou valores menores do que os observados por Nisgoski et al. (2012) (3,98 μm), confirmando a influência da idade da árvore, local e taxa de crescimento, visto que em geral, madeiras mais jovens apresentam, em média, fibras mais curtas e largas, além de paredes mais finas (SILVA et al., 2007). Athanazio-Heliodoro (2015) determinou para o guapuruvu a presença de madeira juvenil até o anel seis, com região de transição nos anéis sete e oito e madeira adulta do anel nove ao anel 15.

Com relação a outros materiais fibrosos, as fibras de guapuruvu são consideradas curtas em relação às fibras de sisal que possuem comprimento variando de 1500 a 4000 μm , largura de 10 a 30 μm e a espessura da parede celular variando de 6 a 9 μm e às fibras de kenaf que apresentam comprimento variando de 750 a 2220 μm , largura de 17,34 a 19,23 μm e espessura da parede celular variando de 1,5 a 3,6 μm (AKIL et al., 2011).

Em compósitos, a utilização de fibras curtas, geralmente, reduz os problemas relacionados à dificuldade de alimentação e à ação cisalhante do equipamento, uma vez que quanto menor é o comprimento das fibras, menores são os efeitos da redução de dimensão causados por sua quebra durante o processamento (QUIJANO-SOLIS et al., 2009). Todavia, se o comprimento da fibra empregada como reforço for inferior ao comprimento crítico, uma ruptura do compósito promoverá um arranque da fibra da matriz polimérica ao invés da fragmentação, reduzindo assim a resistência mecânica do compósito (DRZAL, 1990; JOSEPH et al., 1999). Nesse estudo, o comprimento das fibras de guapuruvu foi superior ao comprimento crítico, exercendo, portanto, ação reforçante.

Os valores médios para o ângulo microfibrilar da camada S2 da parede celular das quatro árvores estudadas variaram de 36,37° a 43,92°. Mukherjee e Satyanarayana (1984) reportaram valores de 20-25°, 11-12° e 30-45° de ângulo de microfibrilas para sisal, banana e coco, nesta ordem, fibras estas caracterizadas nestes trabalhos para a produção de compósitos. A resistência e dureza das fibras podem ser afetadas pela angulação das microfibrilas, em que pequenos ângulos são responsáveis por maiores resistências, enquanto que ângulos maiores proporcionam maior elasticidade (TIENNE et al., 2009).

As relações entre as dimensões das fibras são apresentadas na Tabela 6.

TABELA 6: Relações entre as dimensões das fibras de *Schizolobium parahyba* de 38 meses de idade.

Amostra	CF	FP	Razão de aspecto
A1	84,63 (4,69) b	15,37 (4,69) a	19,38 (3,79) a
A2	86,29 (3,53) ab	13,71 (3,53) ab	19,36 (2,61) a
A3	85,92 (5,86) ab	14,08 (5,86) ab	20,50 (3,53) a
A4	87,32 (4,39) a	12,68 (4,39) b	20,02 (3,76) a
Média	86,06 (4,76)	13,96 (4,76)	19,81 (3,47)

A1 = árvore 1; A2 = árvore 2; A3 = árvore 3; A4 = árvore 4; CF= coeficiente de flexibilidade (%); FP = fração de parede (%).

Obs.: Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Em relação ao coeficiente de flexibilidade (CF) e fração de parede (FP), os valores médios observados neste trabalho estão coerentes com os valores encontrados por Nisgoski et al. (2012) para fibras de guapuruvu. No entanto, comparadas às fibras de *Bambusa vulgaris* (GUIMARÃES JR. et al., 2010) e ao *Eucalyptus grandis* (FLORSHEIM et al., 2009), as fibras guapuruvu apresentam coeficientes de flexibilidade maiores e fração de parede menores, o que as tornam menos rígidas. O coeficiente de flexibilidade está relacionado ao grau de colapso que as fibras sofrem durante o processo de refino, quanto maior o valor maior será sua resistência à ruptura e menor à tração (LAINE et al., 2004).

Em compósitos poliméricos, a razão de aspecto traduz a performance das fibras na distribuição dos esforços e das fissuras, influenciando assim, as propriedades mecânicas finais do material compósito (WAGNER; VAIA, 2004). Nisgoski et al. (2012) reportaram valores de razão de aspecto ao redor de 27,96 para fibras de guapuruvu de árvores de 15 anos de idade, valor superior aos encontrados neste trabalho (19,38; 19,36; 20,50 e 20,02 para as árvores A1, A2, A3 e A4, nessa ordem). Essa diferença pode ser explicada pela maior quantidade de madeira adulta presente em árvores mais velhas. Mukherjee e Satyanarayana (1984), encontraram valores de razão de aspecto de 100, 35 e 150 para fibras de sisal, coco e banana, respectivamente. Segundo Pereira et al., 2015, quando o objetivo é aumentar a resistência, o reforço fibroso deve possuir elevada razão de aspecto, visto que quanto maior for esse coeficiente, mais elevada será a aderência das fibras à matriz, maior a flexibilidade das mesmas, menor o espaçamento e menor o diâmetro da fissura.

Com base nos resultados apresentados acima, espera-se que os compósitos produzidos no presente trabalho, tenham menores ganhos de resistência se comparados aos compósitos reforçados com materiais lignocelulósicos tradicionais como sisal, curauá, hemp, coco e kenaf, por exemplo. Sendo indicados, portanto, para usos onde o custo e o peso são fatores

mais importantes do que a resistência, como por exemplo, em aplicações automotivas, onde o menor peso do compósito reduz o consumo de combustível, e consequentemente, a emissão de gases.

4.4 Composição química

Com relação à caracterização química, a Tabela 7 apresenta dados obtidos no presente trabalho.

TABELA 7: Composição química da madeira de *Schizolobium parahyba* de 38 meses de idade.

Amostra	LIG	CEL	HEM	HOL	EXT	CINZ
A1	23,71 (2,70) a	40,80 (2,85) a	31,42 (3,20) a	72,21 (2,64) a	10,66 (0,20) a	1,26 (0,03) a
A2	20,64 (2,55) a	37,12 (1,61) a	33,59 (2,00) a	70,71 (3,59) a	9,84 (0,84) a	1,12 (0,01) c
A3	19,21 (2,00) a	36,00 (0,68) a	32,79 (0,47) a	68,79 (0,82) a	10,84 (0,58) a	1,16 (0,02) bc
A4	20,95 (2,76) a	40,24 (2,04) a	29,01 (1,16) a	69,25 (0,90) a	10,17 (1,43) a	1,23 (0,06) ab
Média	21,13 (2,74)	38,54 (2,70)	31,70 (2,48)	70,24 (2,42)	10,37 (0,86)	1,19 (0,06)

A1 = árvore 1; A2 = árvore 2; A3 = árvore 3; A4 = árvore 4; LIG = lignina (%); CEL = celulose (%); HEM = hemiceluloses (%); HOL = holocelulose (%); EXT = teor de extrativos totais (%); CINZ = teor de cinzas (%).

Obs.: Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A Tabela 8 apresenta, a título de comparação, dados obtidos na literatura para diferentes fibras em estudo para uso em compósitos.

TABELA 8: Composição química de diferentes fibras vegetais.

Espécie	LIG	CEL	HEM	HOL	EXT	CINZ
Coco ¹	31,83	45,47	20,36	65,83	2,33	1,34
Juta ²	11,80	64,40	12,00	-	-	-
Sisal ¹	6,97	59,18	24,58	83,75	9,27	1,95
Bambu ³	17,31	39,05	30,00	67,58	13,05	2,06

LIG = lignina (%); CEL = celulose (%); HEM = hemiceluloses (%); HOL = holocelulose (%); EXT = teor de extrativos totais (%); CINZ = teor de cinzas (%).

Referências: Salazar e Leão (2006)¹; Bledzik e Gassan (1999)²; Guimarães Júnior et al. (2011)³.

Para fins de comparação, o *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* apresentam em média, conforme Trugilho et al. (2003) teores na ordem de 6,71%; 31,77% e 61,52% para extrativos totais, lignina e holocelulose, respectivamente. Já em relação aos materiais lignocelulósicos não madeireiros, de acordo com Salazar e Leão (2006) as fibras de coco apresentam valores médios de teores de celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos totais de

45,47%, 20,36%, 31,83% e 2,33% e as fibras de sisal de 59,18, 24,58, 6,97 e 9,27%, nesta ordem. Bledzik e Gassan (1999), enquanto às fibras de juta expõe teores de 64,4, 12,0 e 11,08% para celulose, hemiceluloses e lignina, respectivamente. Tanto as madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* quanto as fibras de coco exibem teores de lignina superiores quando comparadas ao guapuruvu e teores de extrativos totais menores. O contrário acontece com as fibras de juta e sisal, em que a madeira de guapuruvu apresenta valores de lignina maiores e de celulose menores. O gênero *Schizolobium* contém uma série de substâncias como esteróides, lignana e flavonoides (CARVALHO et al., 2008), o que pode explicar o elevado teor de extrativos na madeira de guapuruvu.

Teores de cinzas inferiores ao encontrado neste trabalho para guapuruvu (1,12% a 1,26%), foram reportados por Mattos et al. (2014) para árvores de, aproximadamente, 15 anos de idade dessa mesma espécie no valor de 0,5%. O alto valor do teor de cinzas ocorreu, provavelmente, devido ao fato de que o material utilizado no presente trabalho foi oriundo de plantio experimental adubado e avaliado em idade precoce resultando em maiores valores residuais dos minerais. Em contrapartida, valores superiores foram observados por Khedari et al. (2005) para fibras de coco (2,2%).

A variação nos componentes químicos da madeira é influenciada por diversos fatores, tais como: espécie, tratamentos silviculturais, condições climáticas e, principalmente, por sua estrutura anatômica (SEVERO et al., 2006). Além disso, Zobel e Van Buijtenen (1989) e Palermo et al. (2013), afirmam que a madeira juvenil quando comparada com a do lenho adulto, apresenta percentagem inferior de celulose, maiores teores de holocelulose, de extrativos e de lignina. Apesar das árvores utilizadas neste trabalho serem jovens (38 meses de idade), contendo provavelmente somente madeira juvenil, o conteúdo de celulose está de acordo com os valores encontrados para algumas das principais fibras (fibra de coco, por exemplo) utilizadas atualmente como reforço de compósitos, tornando-as, assim, candidatas em potencial para concorrer com fibras tradicionais na produção de diversos produtos, como perfis para pisos e assoalhos, batentes de janelas e portas, revestimentos, entre outros.

Fibras vegetais com altos teores de celulose são desejáveis em compósitos de matriz polimérica, uma vez que conferem alta resistência a tração e elevado módulo de elasticidade devido ao seu alto grau de cristalinidade, boa estabilidade química e alta polaridade (CHAND; HASHMI, 1993). De acordo com Guimarães Jr. et al. (2011), altos teores de extrativos, cinzas e lignina diminuem as propriedades mecânicas dos compósitos, visto que esses componentes prejudicam a aderência fibra-matriz e interferem na cura das matrizes.

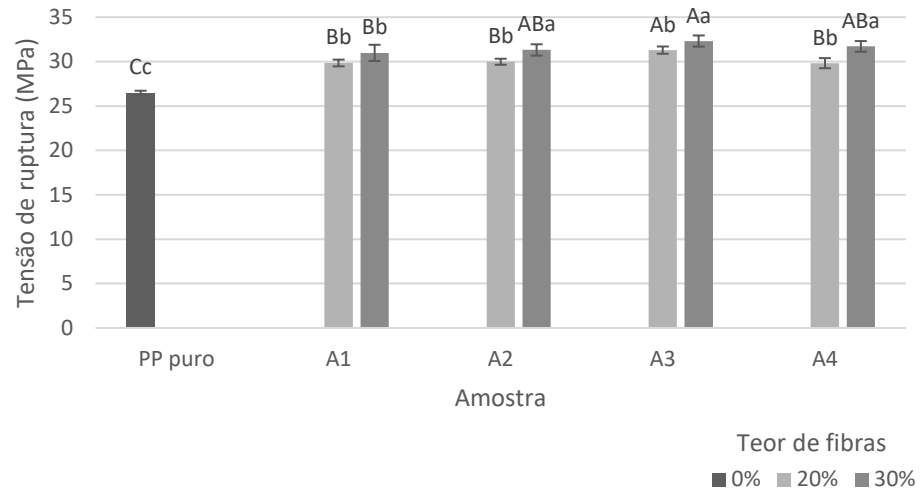
4.5 Caracterização mecânica dos compósitos

A Tabela 9 ilustra o efeito do teor de fibras nas propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno reforçados com fibras de guapuruvu.

TABELA 9: Propriedades dos compósitos de PP contendo diferentes quantidades de fibras de guapuruvu (*Schizolobium parahyba*).

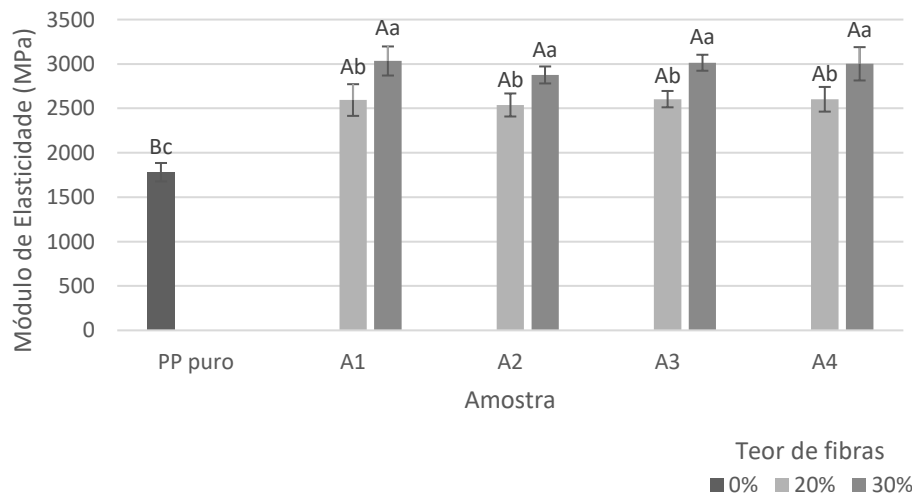
Amostra	PP/FMG/Polybond (%/%/%)	Tensão de ruptura (MPa)	Alongamento na ruptura (%)	Módulo de elasticidade (MPa)	Impacto Izod (J/m)
PP puro	(100/0/0)	26,46 (0,26)	397,36 (0,43)	1781,4 (103,47)	26,33 (2,11)
A1	(80/20/2)	29,84 (0,38)	3,94 (0,29)	2593,8 (178,47)	28,97 (4,28)
	(70/30/2)	30,98 (0,91)	2,97 (0,27)	3033,5 (163,67)	30,17 (3,80)
A2	(80/20/2)	29,98 (0,34)	4,09 (0,34)	2538,1 (129,80)	31,36 (7,09)
	(70/30/2)	31,31 (0,64)	3,10 (0,32)	2876,3 (95,58)	31,97 (3,81)
A3	(80/20/2)	31,29 (0,41)	4,10 (0,30)	2603,8 (92,13)	28,83 (5,14)
	(70/30/2)	32,31 (0,63)	3,16 (0,19)	3013,9 (89,91)	31,21 (2,58)
A4	(80/20/2)	29,82 (0,57)	3,95 (0,37)	2602,2 (138,94)	29,97 (3,86)
	(70/30/2)	31,71 (0,60)	3,18 (0,25)	3001,9 (187,53)	31,96 (3,43)

FIGURA 11: Tensão de ruptura de compósitos de polipropileno com quantidade variável de fibras de guapuruvu (*Schizolobium parahyba*).



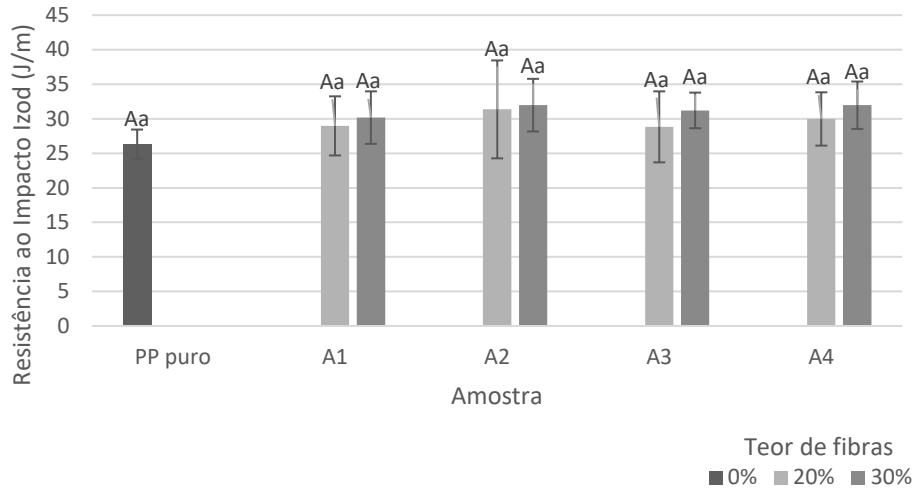
Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças entre as diferentes amostras estudadas e minúsculas, diferenças entre os teores de fibras dentro das árvores + PP, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

FIGURA 12: Módulos de elasticidade em tração de compósitos de polipropileno com quantidade variável de fibras de guapuruvu (*Schizolobium parahyba*).



Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças entre as diferentes amostras estudadas e minúsculas, diferenças entre os teores de fibras dentro das árvores + PP, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

FIGURA 13: Resistência ao impacto Izod com entalhe de compósitos de polipropileno com quantidade variável de fibras de guapuruvu (*Schizolobium parahyba*).



Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças entre as diferentes amostras estudadas e minúsculas, diferenças entre os teores de fibras dentro das árvores + PP, pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

Os resultados mostram que a resistência dos compósitos aumenta com o incremento percentual de fibras, em uma proporção de 12,7% a 22,1%. Tal fato pode ser atribuído à eficiente transferência de tensões que ocorre entre a matriz e as fibras, que são mais uniformemente distribuídas, permitindo, assim, uma melhor interação entre os constituintes. O aumento da tensão de ruptura pode ser observado para todas as amostras, exceto para a amostra A1, onde os valores de tensão na ruptura foram semelhantes nas composições de 20% e 30%, não apresentando efeito significativo da variação dessas concentrações. Comportamento contrário foi reportado por Rosário et. al. (2011), que ao estudarem os efeitos da incorporação das fibras de sisal provenientes da rasadeira (pedaços de fibras da fábrica de cordas), em uma matriz de polipropileno (PP) virgem e reciclado, observaram que com a inserção de 30% (em massa) de fibras de sisal houve uma redução no valor de tensão na ruptura em relação ao polímero puro, atribuindo tal fato à incompatibilidade entre o sisal e a matriz polimérica (baixa adesão sisal/matriz). Já para compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras de sisal, Joseph et al. (1999) reportaram que a resistência dos compósitos se apresentou menor do que a da matriz a carregamentos de até 20% em massa de fibras. No entanto, para carregamentos de 30% ocorreu um aumento de cerca de 25% na resistência dos compósitos.

No que tange ao módulo de elasticidade, foi observado neste trabalho que seus valores aumentam com a adição de fibras para todas as amostras estudadas, em uma proporção de 42% a 70%; sendo esse efeito mais acentuado para o percentual de 30% de fibras de guapuruvu. Isso ocorre porque a distribuição mais homogênea dessas fibras na matriz termoplástica eleva as propriedades de rigidez dos compósitos. Da Luz et al. (2006) observaram que a com a inserção do reforço, o módulo de tração aumentou, aproximadamente, 77% com a adição de 20% em massa de celulose de bagaço de cana e 76% com a adição de 30% desse reforço, em relação ao polipropileno puro. Os autores também reportaram um aumento de, aproximadamente, 65% no módulo de tração com o incremento de 20% de carga de palha e de 68% com a inserção de 30%. Rosário et al. (2011) relataram um aumento de cerca de 70% no módulo de elasticidade em relação ao PP puro com o incremento de 30% de fibras de sisal. Ao avaliarem as propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno reforçados com diferentes teores de aveia, Furlan et al. (2012) observaram que o módulo elástico dos compósitos não foi influenciado significativamente pela quantidade de casca de aveia. Já para compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras de sisal, Joseph et al. (1999) reportaram um aumento de, aproximadamente, 56% nessa propriedade em relação ao polímero puro.

Já o alongamento na ruptura diminuiu em comparação ao PP puro e com o aumento percentual de fibras, em virtude do aumento da rigidez e a redução da mobilidade das cadeias poliméricas, ocasionando a diminuição da capacidade de deformação plástica da matriz. A mesma tendência foi observada por Da Luz et al. (2006), ao avaliarem as propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno reforçados com diferentes teores (20% e 30% em massa) de palha e celulose de bagaço de cana, onde constataram que a deformação até ruptura dos materiais compósitos diminui em relação ao polipropileno puro, independentemente da quantidade de reforço. Sendo que, para o compósito reforçado com celulose de bagaço de cana verificaram que a deformação até a ruptura se mantém praticamente constante nos teores de 20% e 30% e que para o compósito reforçado com celulose de palha os valores de deformação diminuem com o aumento do teor de fibras.

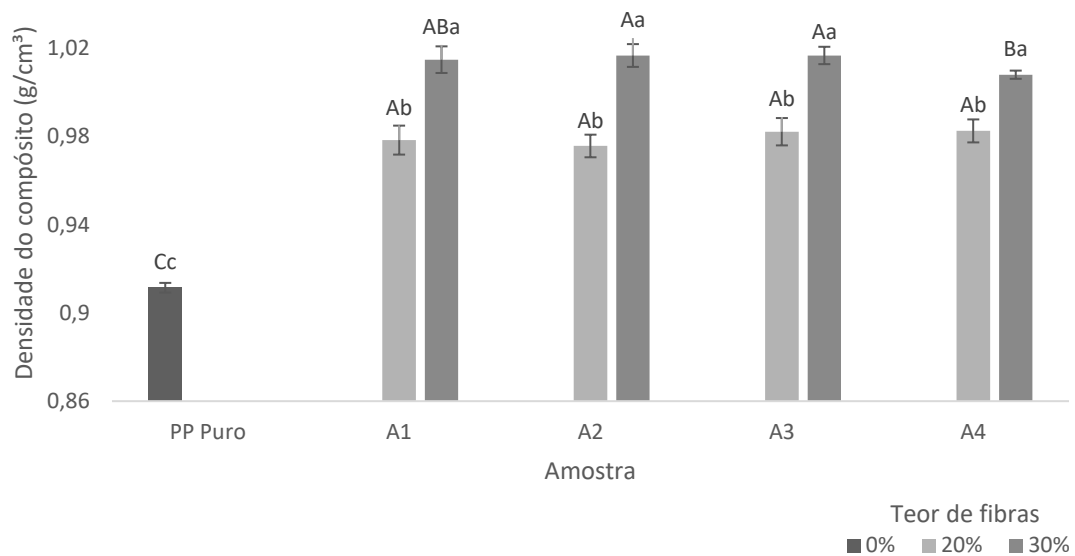
Os valores de resistência ao impacto Izod dos compósitos não sofreram variação significativa em relação ao polímero puro no presente trabalho.

O principal ganho de propriedades do polipropileno reforçado com farinha de madeira de guapuruvu consistiu na melhora da rigidez com baixo peso específico.

4.6 Densidade dos compósitos

Na Figura 14 são apresentadas as médias dos valores encontrados nos testes de densidade dos compósitos produzidos com diferentes quantidades de farinha de madeira.

FIGURA 14: Densidade relativa de compósitos de polipropileno com quantidade variável de fibras de guapuruvu (*Schizolobium parahyba*).



Uma das vantagens citadas para a utilização de reforços lignocelulósicos em matrizes termoplásticas é a baixa densidade que esses materiais conferem ao produto final. Avaliando os resultados encontrados, pode-se observar que a adição de farinha de madeira na matriz polimérica aumenta a densidade relativa do compósito, proporcionalmente à adição. No entanto, é importante salientar que este aumento é muito menor comparado ao de compósitos termoplásticos reforçados com cargas minerais.

Como exemplo pode ser citado o trabalho de Ota et al. (2004), que avaliaram compósitos de PP reforçados com diferentes teores de fibra de vidro (0%, 20% e 30%) e encontraram densidades de 1,01 g.cm⁻³ e 1,10 g.cm⁻³ para compósitos com 20% e 30% de fibras de vidro, respectivamente. Já Guerrica-Echevarría et al. (1998) encontraram densidades de 1,05 g.cm⁻³ e 1,20 g.cm⁻³ para compósitos de PP com 20% e 40% de talco, respectivamente. Caraschi e Leão (2002), encontraram valores semelhantes de densidade para compósitos de PP com 20% e 40% de talco, 1,03 g.cm⁻³ e 1,20 g.cm⁻³, nessa ordem.

Os resultados encontrados no presente estudo confirmam a baixa densidade dos compósitos termoplásticos reforçados com farinha de madeira de guapuruvu, quando comparados com outros compósitos.

A densidade média encontrada no experimento para o PP foi de $0,91 \text{ g.cm}^{-3}$ e a densidade média calculada dos compósitos variou entre $0,98 \text{ g.cm}^{-3}$ e $1,01 \text{ g.cm}^{-3}$, tendo os compósitos reforçados com 30% de farinha de madeira apresentado maiores densidades.

A mesma tendência foi observada por Caraschi e Leão (2002), ao estudarem o efeito de diferentes quantidades de farinha de madeira de *Pinus elliotti* var. *elliottii* na densidade dos compósitos. Os autores encontraram valores de $0,95 \text{ g.cm}^{-3}$ para compósitos com 25% de madeira e de $1,01 \text{ g.cm}^{-3}$ para compósitos com 40% de madeira.

5 CONCLUSÕES

Por meio dos resultados obtidos nesse trabalho, concluiu-se que:

- A produtividade média em volume das árvores de guapuruvu aos 38 meses de idade foi considerada satisfatória;
- A madeira analisada é de baixa densidade, destacando-se, portanto, como uma alternativa para confecção de materiais leves;
- De forma geral, os resultados das análises anatômicas bem como das relações das fibras de guapuruvu as tornam candidatas em potencial para concorrer com fibras tradicionais na produção de diversos produtos;

Apesar das árvores utilizadas neste trabalho serem jovens, contendo provavelmente somente madeira juvenil, o conteúdo de celulose está de acordo com os valores encontrados para algumas das principais fibras (fibra de coco, por exemplo) utilizadas atualmente como reforço de compósitos. No entanto, a madeira de guapuruvu estudada apresentou um elevado teor de extrativos;

- A adição de carga produz uma diminuição no alongamento na ruptura em relação ao polímero puro, porém produz um aumento no módulo de elasticidade e tensão de ruptura em todas as amostras estudadas, indicando que esses materiais podem ser utilizados como reforço para o PP, melhorando suas propriedades;

- A adição de fibra não afetou significativamente a resistência ao impacto do compósito;

- Por meio dos resultados obtidos pode-se deduzir que as fibras de guapuruvu, provenientes de espécie nativa, de rápido crescimento, fácil adaptação, cuja madeira apresenta baixa densidade, podem ser utilizadas como carga em compósitos de PP, exercendo uma ação reforçante. Tendo o compósito preparado com 30% em massa de fibras de guapuruvu e 2% de Polybond 3200 apresentou melhores propriedades.

6 REFERÊNCIAS

AKIL, H.M. et al. Kenaf fiber reinforced composites: A review. Materials & Design, v. 32, n. 8-9, p. 4107-4121, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, D 638-03, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM, D 256-04: Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM, D1102-84: Standard test method for ash in wood. Phyladelphia, 2013. 2 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM, D790-03: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D 1102-84 - Standard Test Method for Ash in Wood. 2007. 2 p.

ANDRADE, A. M. de; CARVALHO, L. M. Potencialidades energéticas de oito espécies florestais do Estado do Rio de Janeiro. Floresta e Ambiente, Rio de Janeiro, v. 5, n. 1, p. 24-42, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO – ABIPLAST. (2016). PERFIL 2015: Indústria brasileira de transformação de material plástico. Recuperado em 20 de agosto de 2016, de http://file.abiplast.org.br/download/2016/perfil_2015.pdf

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11941: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003.

ATHANÁZIO-HELIODORO, J. C. Qualidade da madeira de árvores de guapuruvu (*Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake) com 15 anos provenientes de área de recuperação florestal. 2015. 150 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu, Botucatu, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/135924>>.

BARBER, N. F.; MEYLAN, B. A. The anisotropic shrinkage of wood. A theoretical model. Holzforschung-International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood, v. 18, n. 5, p. 146-156, 1964.

BISANDA, E. T. N.; ANSELL, M. P. Properties of sisal-CNSL composites. Journal of Materials Science, v. 27, n. 6, p. 1690-1700, 1992.

BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose based fibres. Progress in Polymer Science, v. 24, n. 2, p. 221-274, 1999.

BOOKER, R.E. 1993. The importance of the S3 cell wall layer in collapse prevention and wood hardness. In: 24TH FOREST PRODUCTS RESEARCH CONFERENCE 15–18

November 1993, CSIRO Division of Forest Products, Clayton, Victoria, Australia 3/17. Pp. 1–13.

BORSOI, C. et al. Obtenção e caracterização de compósitos utilizando poliestireno como matriz e resíduos de fibras de algodão da indústria têxtil como reforço. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 21, n. 4, 2011.

BOUAFIF, H. Effects of intrinsic characteristics of wood fibers and processes on the performance of wood/thermoplastic composite materials. 2009. 151 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais). AgroParisTech, 2009.

BRASKEM, 2015. Boletim técnico. Disponível em: http://www.braskem.com/catalogos2015/poliolefinas_ago2015.pdf. Acessado em: 16 de março de 2017.

BUSIGIN, C. et al. The properties of mica-filled polypropylenes. Polymer Engineering & Science, v. 24, n. 3, p. 169-174, 1984.

CALLISTER, W. JR. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução, 5ª Ed. Copyright 2002, John Wiley & Sons, Inc. Rio de Janeiro, RJ. LTC. 589 p. 2002.

CANEVAROLO JR., S. V. Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. São Paulo: Editora Artliber, 2ª edição, 280p., 2006.

CARNEIRO, L. A; TEIXEIRA, A. M. A. J. Propriedades e características dos materiais compósitos poliméricos aplicados na Engenharia de Construção. Revista Militar de Ciência e Tecnologia, v. XXV, p. 54–66. 2008.

CARASCHI, J.C.; LEÃO, A.L. Woodflour as reinforcement of polypropylene. Materials Research, v.5, n.4, p. 405-09, 2002.

CARVALHO, M. G.; NASCIMENTO, I. A.; CARVALHO, A. G. 5-desoxiflavonóides e lignana isolados da madeira de *Schizolobium parahyba* (Vell.) S.F. Blake (guapuruvu). Química Nova, São Paulo, v. 31, n. 6, p. 1349-1352, 2008.

CARVALHO, P. E. R. Espécies arbóreas brasileiras. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, 2003. v. 1, 1039 p.

CARVALHO, P. E. R. Guapuruvu. Colombo-PR: Embrapa Florestas, 2005. 10 p. (Circular Técnica 104).

CAVE, I. D. Theory of X-ray measurement of microfibril angle in wood. Wood Science and Technology, v. 31, n. 4, p. 225-234, 1997.

CAVE, I.D. & Walker J.F.C. Stiffness of Wood in Farown Plantation Softwood: The Influence of Microfibril angle. Forest Product Journal, v. 44, n. 5), p 43-48, 1994.

CHAND, N.; HASHMI, S. A. R. Mechanical properties of sisal fibre at elevated temperatures. Journal of Materials Science, v. 28, n. 24, p. 6724-6728, 1993.

CHAWLA, K. K. Ceramic matrix composites. In: Composite Materials, 3^a Ed. Springer New York, 1998. p. 212-251.

CHAWLA, K. K. Composite materials: science and engineering. Springer Science & Business Media, 2012. 542 p.

DEBNATH, S.; SENGUPTA, S. Effect of linear density, twist and blend proportion on some physical properties of jute and hollow polyester blended yarn. Indian Journal of Fibre & Textile Research, v. 34, n. 1, p. 11, 2009.

DHAL, J. P.; MISHRA, S. C. Processing and properties of natural fiber-reinforced polymer composite. Journal of Materials, v. 2013, 2012.

DRZAL, L. T. Fiber-matrix interphase structure and its effect on adhesion and composite mechanical properties. In: Controlled Interphases in Composite Materials. Springer Netherlands, 1990. p. 309-320.

DA LUZ, S. M.; GONÇALVES, A.; DEL ARCO, A. P. J. Microestrutura e propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno reforçado com celulose de bagaço e palha de cana. Revista Matéria, v. 11, n. 2, p. 101-110, 2006.

DUFRESNE, A.; DUPEYRE, D.; VIGNON, M. R. Cellulose microfibrils from potato tuber cells: processing and characterization of starch-cellulose microfibril composites. Journal of Applied Polymer Science, v. 76, n. 14, p. 2080-2092, 2000.

EMONS, A. M. C.; MULDER, B. M. The making of the architecture of the plant cell wall: How cells exploit geometry. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 95, n. 12, p. 7215-7219, 1998.

FENGEL, D.; WEGENER, G. Wood: chemistry, ultrastructure, reactions. Walter de Gruyter Publisher, New York, 1983.

FLORSHEIM, S.M.B. et al. Variação nas dimensões dos elementos anatômicos da madeira de *Eucalyptus dunii* aos sete anos de idade. Revista do Instituto Florestal, São Paulo, v.21, n.1, p.79-91, 2009.

FOWLER, P. A.; HUGHES, J. M.; ELIAS, R. M. Biocomposites: technology, environmental credentials and market forces. Journal of the Science of Food and Agriculture, v. 86, n. 12, p. 1781-1789, 2006.

FU, S.Y.; LAUKE, B. Effects of fiber length and fiber orientation distributions on the tensile strength of short-fiber-reinforced polymers. Composites Science and Technology, v. 56, n. 10, p. 1179-1190, 1996.

FURLAN, L. G.; DUARTE, U. L.; MAULER, R. S. Avaliação das propriedades de compósitos de polipropileno reforçados com casca de aveia. Química Nova, v. 35, n. 8, p. 1499-1501, 2012.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; DOS SANTOS, C. A. Ensaio dos materiais. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GÍRIO, F. M. et al. Hemicelluloses for fuel ethanol: a review. Bioresource technology, v. 101, n. 13, p. 4775-4800, 2010.

GUERRICA-ECHEVARRÍA, G.; EGUIAZABAL, J. I.; NAZABAL, J. Influence of molding conditions and talc content on the properties of polypropylene composites. European Polymer Journal, v. 34, n. 8, p. 1213-1219, 1998.

GUIMARÃES JR, M.; NOVACK, K. M.; BOTARO, V. R. Caracterização anatômica da fibra de bambu (*Bambusa vulgaris*) visando sua utilização em compósitos poliméricos. Revista Iberoamericana de Polímeros, v. 11, n. 7, p. 442-456, 2010.

GUIMARÃES JR, M. et al. Caracterização físico-química de fibra e polpas de *Bambusa vulgaris* Schrad para utilização em compósitos poliméricos. La Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, RLMM, v. 33, n. 1, 2011.

HSING, T.Y. et al. Características dendrométricas, químicas e densidade básica da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophylla*. Ciência Florestal, v.26, n.1, p.273-283, 2016.

HOSSEINAEI, O. et al. Effect of hemicellulose extraction on water absorption and mold susceptibility of wood-plastic composites. International Biodeterioration & Biodegradation, v. 71, p. 29-35, 2012.

HUDA, M. S. et al. Effect of fiber surface treatment of poultry feather fibers on the properties of their polymer matrix composites. Journal of Applied Polymer Science, v. 128, n. 2, p. 1117-1124, 2013.

JOSEPH, K. Compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras curtas de sisal. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 9, n. 4, p. 136-140, 1999.

KARIAN, H. (Ed.). Handbook of Polypropylene and Polypropylene Composites, Revised and Expanded. CRC Press, 2003.

KHEDARI, J.; WATSNASATHAOIRN, P.; HIRUNLABH, J. Development of fibre-based soil cement block with low thermal conductivity. Cement & Concrete Composites, Kidlington, v.27, n.1, p.111-16, 2005.

KRUSCHEWSKY, G. C. et al. Arranjo estrutural e dinâmica de crescimento de *Eucalyptus* spp., em sistema agrossilvipastoril no cerrado. Cerne, v. 13, n. 4, 2007.

KU, H. et al. A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. Composites Part B: Engineering, v. 42, n. 4, p. 856-873, 2011.

LAINE, C. et al. Changes in the fiber wall during refining of bleached pine kraft pulp. Holzforchung-International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood, v. 58, n. 3, p. 233-240, 2004.

LENEY, L. A technique for measuring fibril angle using polarized light. Wood and Fiber Science, v. 13, n. 1, p. 13-16, 2007.

LOBÃO, M. S. et al. Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades. Revista Árvore, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 889-894, 2004.

LOPES, B. L. S. Polímeros Reforçados por Fibras Vegetais: um resumo sobre esses compósitos. 1ª ed. São Paulo Blucher, 2017.

MAHLBERG, R. et al. Effect of chemical modification of wood on the mechanical and adhesion properties of wood fiber/polypropylene fiber and polypropylene/veneer composites. European Journal of Wood and Wood Products, v. 59, n. 5, p. 319-326, 2001.

MAINIERI, C.; CHIMELO, J.P. Fichas de características de madeiras brasileiras. IPT n. 996. São Paulo: IPT, 1978.

MARINELLI, A. L. et al. Obtenção e caracterização de compósitos de fibras de madeira balsa com polipropileno virgem e reciclado. In: 10º CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, Foz do Iguaçu, PR. 2009. Anais...São Carlos: ABPol, 2009.

MARTINS, M. A. et al. Caracterização das Fibras Amazônicas de Pupunha, Babaçu e Balsa através de DRX, TG e RMN. In: 11º CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, Campos do Jordão. 2011. Anais...São Carlos: ABPol, 2011. p. 2578-2583.

MATTOS, B. D. et al. Chemical characterization of wood and extractives of fast-growing *Schizolobium parahyba* and *Pinus taeda*. Wood Material Science & Engineering, v. 11, n. 4, p. 209-216, 2016.

MIRANDA, D. L. C. et al. Growth and production of paricá wood in two plantations in the north of Mato Grosso, Brazil. Nativa, v. 4, n. 4, p. 199-205, 2016.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, L. T. Sustainable bio-composites from renewable resources: opportunities and challenges in the green materials world. Journal of Polymers and the Environment, v. 10, n. 1-2, p. 19-26, 2002.

MOORE, E. P. (Ed.). Polypropylene Handbook. Polymerization, Characterization, Properties, Processing, Applications. Herausgegeben von EP Moore, Jr. Hanser-Gardner, Cincinnati, 1996. Angewandte Chemie, v. 109, n. 10, 1996.

MOTT, L.; URQUHART, S.; EICHHORN, S. J. Relationship between micro-fibril angle and strength of black spruce fibers. Journal of Materials Science Letters, v. 20, n. 14, p. 1325-1326, 2001.

MUKHERJEE, P. S.; SATYANARAYANA, K. G. Structure and properties of some vegetable fibres. Journal of Materials Science, v. 19, n. 12, p. 3925-3934, 1984.

MULINARI, D. R. Comportamento térmico, mecânico e morfológico dos compósitos de polietileno de alta densidade reforçados com fibras de celulose do bagaço de cana de açúcar. 2009, 112 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP, 2009.

NISGOSKI, S. et al. Características anatômicas da madeira e índices de resistência do papel de *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake proveniente de plantio experimental. Scientia forestalis, v. 40, n. 94, p. 203-211, 2012.

OBATAYA, E. Effects of natural and artificial ageing on the physical and acoustic properties of wood in musical instruments. Journal of Cultural Heritage, 2016.

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMEISTER, J. C.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. Revista Árvore, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 115-127, 2005.

OTA, W. N.; AMICO, S. C.; SATYANARAYANA, K. G. Studies on the combined effect of injection temperature and fiber content on the properties of polypropylene-glass fiber composites. Composites Science and Technology, v. 65, n. 6, p. 873-881, 2005.

OU, R. et al. Effect of wood cell wall composition on the rheological properties of wood particle/high density polyethylene composites. Composites Science and Technology, v. 93, p. 68–75, 2014a.

OU, R. et al. Morphology, mechanical properties, and dimensional stability of wood particle/high density polyethylene composites: Effect of removal of wood cell wall composition. Materials & Design, v. 58, p. 339–345, 2014b.

PALERMO, G. P. M. et al. Delimitação entre os lenhos juvenil e adulto de *Pinus elliottii* Engelm. Revista Árvore, v. 37, n. 1, p. 191-200, 2013.

PANSHIN, A.J.; DE ZEEUW, C. Textbook of wood technology. 4ª ed. New York: McGraw–Hill, 1980.

PEREIRA, H.; GRAÇA, J.; RODRIGUES, J.C. (2003): Wood chemistry in relation to quality. In: Wood quality and its biological basis. Barnett J.R.; Jeronimidis G. (Eds), Blackwell Publishing, Oxford, 2003.p. 53-86.

PEREIRA, P. H. F. et al. Vegetal fibers in polymeric composites: a review. Polímeros, v. 25, n. 1, p. 9-22, 2015.

PERNÍA, N. E.; MELANDRI, J. L. Wood anatomy of the tribe Caesalpinieae (Leguminosae, Caesalpinioideae) in Venezuela. IAWA Journal, v. 27, n. 1, p. 99-114, 2006.

PETTERSEN, R. C. The chemical Composition of Wood. In: Rowell, R. M. Ed. The Chemistry of Solid Wood Advancer in Chemistry Series 207. Washington D.C: American Chemical Society, 1984. p. 57-126.

PINHEIRO, R.C; TONELLO, K.C.; VALENTE, R.O.A.; MINGOTI, R.; SANTOS, I.P. Ocupação e caracterização hidrológica da microbacia do córrego Ipaneminha, Sorocaba-SP. Irriga, Botucatu, v.16, n.3, p. 234-245, jul-set, 2011.

QUIJANO-SOLIS, C.; YAN, N.; ZHANG, S. Y. Effect of mixing conditions and initial fiber morphology on fiber dimensions after processing. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, v. 40, n. 4, p. 351-358, 2009.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2016.

RAMSTEINER, F.; THEYSOHN, R. On the tensile behaviour of filled composites. Composites, v. 15, n. 2, p. 121-128, 1984.

RAZERA, I. A. T. Fibras lignocelulósicas como agente de reforço de compósitos de matriz fenólica e lignofenólica. 2006. 167f. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

RENNER, K. et al. Micromechanical deformation processes in PP/wood composites: Particle characteristics, adhesion, mechanisms. Composites: Part A, v. 41, p. 1653–1661, 2010.

RIBEIRO, J. L. P. et al. Predição das propriedades elásticas de compósitos termoestruturais com reforço multidirecional. Revista Matéria, v. 13, n. 1, p. 33-48, 2008.

RICHTER, H. G.; TOMASELLI, I, MORESCHI, J. C. Estudo tecnológico do guapuruvu (*Schizolobium parahyba*) - 1 Parte: Informe geral sobre características importantes na espécie. Floresta, v. 5, n. 1, p. 26-30, 1974.

RIO, J. C. et al. Characterization of organic deposits produced in the kraft pulping of *Eucalyptus globulus* wood. Journal of Chromatography A, v. 823, n. 1, p. 457-465, 1998.

RODRIGUES, L. P. S. Efeitos do Envelhecimento Ambiental Acelerado em Compósitos Poliméricos. 2007. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal, 2007.

ROSÁRIO, F. et al. Resíduos de Sisal como Reforço em Compósitos de Polipropileno Virgem e Reciclado. Polímeros, v. 21, n. 2, p. 90-97, 2011.

ROWELL, R. M. Handbook of wood chemistry and wood composites. Bota Raton: CRC. 2005. 703 p.

SAHEB, D. N. et al. Natural fiber polymer composites: a review. Advances in Polymer Technology, v. 18, n. 4, p. 351-363, 1999.

SALAZAR, V. L. P.; LEÃO, A. L. Biodegradação das fibras de coco e sisal aplicadas na indústria automotiva. Energia e Agricultura. Botucatu, v. 21, n. 2, p. 99-133, 2006.

SAPUTRA, H.; SIMONSEN, J.; LI, K. Effect of extractives on the flexural properties of wood/plastic composites. Composite Interfaces, v. 11, n. 7, p. 515-524, 2004.

SATYANARAYANA, K. G.; GUIMARÃES, J. L.; WYPYCH, F. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, v. 38, n. 7, p. 1694-1709, 2007.

SENGUPTA, S.; RAY, P.; MAJUMDAR, P. K. Effect of dynamic loading on jute-based needle-punched nonwoven fabrics. Indian Journal of Fibre & Textile Research, v. 3, p. 389-395, 2005.

SEVERO, E. T. D.; CALONEGO, F. W.; SANSÍGOLO, C. A. Composição química da madeira de *Eucalyptus citriodora* em função das direcções estruturais. *Silva Lusitana*, v. 14, n. 1, p. 113-126, 2006.

SHALIN, R. E. Polymer matrix composites. Springer Science & Business Media, 1995. 440p.

SILVA, J. C. et al. Influência da idade e da posição radial na massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. Revista Floresta, v. 34, n. 1, p. 13-22, 2004.

SILVA, J. C. et al. Influência de idade e da posição radial nas dimensões das fibras e dos vasos da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. Revista. Árvore, v. 31, n. 6, p.1081-1090, 2007.

SPINACÉ, M. et al. Poliolefinas reforçadas com fibras vegetais curtas: Sisal × Curauá. Polímeros, v. 21, n.3, p.168-174, 2011.

STARK, N. M.; ROWLANDS, R. E. Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites. Wood and Fiber Science, v. 35, n. 2, p. 167-174, 2007.

TAN, W. T.; OOI, S. T.; LEE, C. K. Removal of chromium (VI) from solution by coconut husk and palm pressed fibres. Environmental Technology, v. 14, n. 3, p. 277-282, 1993.

TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY. T203 cm-99 – Tappi Test Methods, 1999.

TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY. T204 cm-97 – Tappi Test Methods, 1997.

TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY. T207 cm-99 – Tappi Test Methods, 1999.

TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY. T222 om-02 – Tappi Test Methods, 2011.

TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY. T9wd-75 – Tappi Test Methods, 1998.

THAKUR, V. K.; SINGHA, A. S. Natural fibres-based polymers: Part I - Mechanical analysis of Pine needles reinforced biocomposites. Bulletin of Materials Science, v. 33, n. 3, p. 257-264, 2010.

TIENNE, D. L. C et al. Influência do espaçamento no ângulo das microfibrilas e comprimento de fibras de clone de eucalipto. Revista Forestal Latinoamericana, v. 24, n. 1, p. 67-83, 2009.

TITA, S. P. S; PAIVA, J. M. F.; FROLLINI, E. Resistência ao impacto e outras propriedades de compósitos lignocelulósicos: matrizes termofixas fenólicas reforçadas com fibras de bagaço de cana-de-açúcar. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 12, n. 4, p. 228-239, 2002.

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus globulus*, *E. pellita* e *E. acmenoides*. Revista IPEF Scientia Forestalis, v. 36, p. 35-42, 1987.

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis*. IPEFScientia Forestalis, n.29, p.37-45, 1985.

TRIANOSKI, R. Avaliação do potencial de espécies florestais alternativas de rápido crescimento, para produção de painéis de madeira aglomerada. 2010. 260 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. Revista Cerne, v. 2, n. 1, p. 15p, 1996.

TRUGILHO, P.F. et al. Clones de *Eucalyptus* versus a produção de polpa celulósica. Ciência Florestal, Santa Maria, v.15, n. 2, p.145-155, 2005.

TRUGILHO, P.F., LIMA, J.T., e MORI, F.A. Correlação canônica das características químicas e físicas da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*. Cerne, v. 9, n. 1, p. 66-80, 2003.

TSOUMIS G. Science and technology of wood structure, properties, utilization. New York: Chapman & Hall; 1991. 494 p.

TZE, W. T. Y. et al. Nanoindentation of wood cell walls: continuous stiffness and hardness measurements. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, v. 38, n. 3, p. 945-953, 2007.

VENTURA, A. M. F. M. Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas. Ciência & Tecnologia dos Materiais, v. 21, n. 3-4, p. 10-19, 2009.

WAGNER, H. D.; VAIA, R. A. Nanocomposites: issues at the interface. Materials Today, v. 7, n. 11, p. 38-42, 2004.

WIEDENHOEFT, A. C. Structure and function of wood. 2010. In: Wood handbook - Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 508 p.

YADAV, S.; RAVICHANDRAN, G. Penetration resistance of laminated ceramic/polymer structures. International Journal of Impact Engineering, v. 28, n. 5, p. 557-574, 2003.

YUAN, Q. et al. Wood fiber reinforced polyethylene and polypropylene composites with high modulus and impact strength. Journal of thermoplastic composite materials, v. 21, n. 3, p. 195-208, 2008.

ZHANG, S. Y. et al. Effect of the amount of lignin on tensile properties of single wood fibers. Forest Science and Practice, v. 15, n. 1, p. 56-60, 2013.

ZOBEL, B. J.; VAN BUIJTENEN, J. P. Wood variation and wood properties. In: Wood Variation. Springer, Berlin, Heidelberg, 1989. p. 1-32.