

CARACTERIZAÇÃO ANATÔMICA DA FIBRA DE BAMBU (*Bambusa vulgaris*) VISANDO SUA UTILIZAÇÃO EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

Mario Guimarães Junior^{1*}, Kátia Monteiro Novack², Wagner Roberto Botaro³

1) CEFET-MG, Rua Mario Campos 520, Vila São Pedro, Araxá-MG, 38183-044, (34) 3661-4746,

mgjunior@araxa.cefetmg.br

2) Universidade Federal de Ouro Preto, knovack@iceb.ufop.br.

3) Universidade Federal de São Carlos, Campus Sorocaba, Vagner@ufscar.com.br.

RESUMO

O desenvolvimento de materiais compósitos utilizando fibras vegetais como reforço é crescente e vêm conquistando novos segmentos de mercado, pois as fibras vegetais apresentam baixo custo, biodegradabilidade, menor densidade e boas propriedades mecânicas, físicas e térmicas adequadas às aplicações industriais. Este trabalho apresenta os resultados de recentes pesquisas sobre a fibra de *Bambusa vulgaris* realizadas no laboratório de anatomia da madeira da *Universidade Federal de Lavras*, onde foram avaliadas suas dimensões e relações entre elas, bem como o ângulo de micro fibrila. O principal objetivo deste estudo é mostrar que estes materiais não convencionais podem apresentar propriedades semelhantes e/ou superiores a outros materiais que tradicionalmente vem sendo empregados na produção de compósitos. Os resultados da pesquisa mostraram que os valores de ângulo de micro fibrila ($11,54^\circ$), comprimento (2.299,47 μm), diâmetro da fibra (13,93 μm), diâmetro do lumen (3,81 μm), relação comprimento/largura (172,53) e espessura da parede celular (5,06 μm) poderão maximizar as propriedades mecânicas dos compósitos onde forem utilizadas tornando-os mais resistentes e mais leves em comparação com outras fibras.

Palavras-chave: fibras vegetais, bambu, compósitos poliméricos.

ABSTRACT

The development of composite materials using vegetable fibers as reinforcement is increasing and comes conquering new market segments, because the vegetable fibers have low cost, biodegradability, lower density and good mechanical properties, physical and thermal suitable to industrial applications. This paper presents the results of recent research about the fiber of *Bambusa vulgaris* performed in the laboratory of wood anatomy of the *Federal University of Lavras*, where were evaluated their dimensions and relations between them, as well as the micro fibril angle. The main objective of this study is to show that these unconventional materials may have similar properties and/or superior to other materials that traditionally come being employed in the production of composite materials. The results of the research has shown that the values of angle of micro fibril angle (11.54°), length (2,299.47 μm), fiber diameter (13.93 μm), lumen diameter (3.81 μm), length/width ratio (172.53) and cell wall thickness (5.06 μm) will be able to maximize the mechanical properties of composites where they will be used becoming then stronger and lighter compared with other fibers.

Key words: vegetable fibers, bamboo, polymeric composites.

1. INTRODUÇÃO

Fibras vegetais, por serem abundantes, de baixo impacto ambiental quando descartadas e apresentarem propriedades mecânicas, físicas e térmicas adequadas às aplicações na indústria, estão se tornando alternativas atrativas do ponto de vista econômico e ambiental. No passado, o desconhecimento da estrutura das fibras vegetais e de suas propriedades, limitou a sua utilização. Com os avanços nas pesquisas, o campo para utilização das fibras vegetais tem aumentado, dessa forma, os conhecimentos da estrutura das fibras e de suas propriedades, as quais auxiliarão na produção de novos produtos e de novas aplicações Mendes [1]. Na seleção das fibras vegetais para

pesquisa, é necessário o conhecimento de sua composição e estrutura, como também das características importantes, para seu desempenho como comprimento, resistência, cor, densidade, entre outras.

A utilização das fibras vegetais não é nova. Ela data, provavelmente, do princípio da nossa civilização, quando se utilizava palha ou capim para reforçar tijolos de barros crus. No entanto, o tratamento e a forma de racionalizar seu uso sofreram modificações ao longo do tempo. Até a década de 60, as fibras vegetais eram bastante utilizadas, principalmente na indústria automobilística. Com o surgimento das fibras sintéticas, elas praticamente foram substituídas nas décadas de 70 e 80. Nos últimos anos, a crise energética, o baixo grau de industrialização necessário para o processamento dessas fibras, sua abundância, baixo custo e os problemas causados pelo uso das fibras sintéticas ao meio ambiente, têm novamente despertado a atenção e o interesse de pesquisadores em todo o mundo para a sua utilização.

Nesse contexto, por ser uma das mais perfeitas estruturas encontradas na natureza, pois combina elevada dureza, resistência e leveza, o bambu é uma fonte renovável de crescimento rápido (três vezes mais que o *Pinus*, atualmente utilizado em reflorestamento para suprir a demanda de matéria prima para indústria madeireira).

De acordo com *Pereira* [2], o bambu tem o potencial de fixar mais carbono do que as árvores (ajudando o combate ao efeito estufa de uma maneira mais eficaz) protegem contra erosões, pode ser plantado em terrenos acidentados, é utilizado em recuperação de áreas degradadas (devido ao fato de não requerer solo com alta fertilidade), propaga-se em regiões inóspitas, onde outros vegetais jamais conseguiram sobreviver.

De acordo com *Beraldo e Azzini* [3], o bambu ainda não é suficientemente conhecido pela civilização ocidental. Esta afirmação é confirmada e fortalecida por *Pereira* [2] quando o autor menciona em seu trabalho que a literatura brasileira sobre bambu é escassa e geralmente restrita a alguns resultados de pesquisas apresentados em congressos científicos.

Segundo *Soderstrom e Calderón*, citados por *Terra* [4], os bambus ocorrem naturalmente em todos os continentes, exceto na Europa. Conforme citado por *Judziewicz et al.* [5], o *Brasil* é o país com maior diversidade de espécies de bambu no novo mundo. Ao todo são 34 gêneros e 232 espécies de bambus nativos no *Brasil*, sendo que algumas ainda não foram formalmente descritas *Filgueiras e Gonçalves* [6]. No *Brasil* ocorrem 89% de todos os gêneros e 65% de todas as espécies de bambus conhecidas na América.

Com relação ao cultivo de bambus, *Hsiung* [7] estima que há cerca de 22 milhões de hectares cultivados em nosso planeta, sendo descritos mais de 4.000 usos para esta planta. No

Brasil, Segundo o IMBAR [8], a área total de bambuzais pode chegar a 8 milhões de hectares. No Nordeste brasileiro são cultivados quarenta mil hectares de *Bambusa vulgaris* para a produção de pasta celulósica, cuja capacidade instalada é de 72.000 toneladas/ano.

Aqui no Brasil, o bambu é pouco utilizado em comparação às espécies arbóreas ou madeiras, apesar de suas amplas possibilidades de ser utilizado como material fibroso. Desde a simples queima para gerar energia até a produção de celulose e papel, utilizam-se a espécie citada acima Berndsem [9].

Polpa e celulose para confecção de papel são as maiores utilizações industriais do bambu como matéria prima em nosso país. Targa [10] cita que a produção nacional de celulose a partir do bambu foi de aproximadamente 17.500 toneladas (1,4 % da produção), apesar de sua comprovação da viabilidade de utilização.

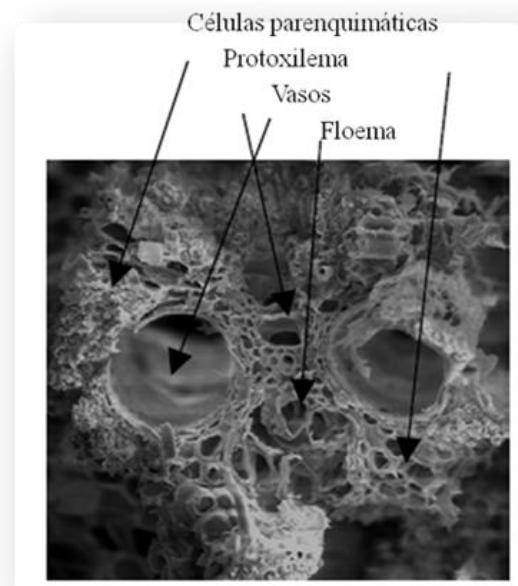


Figura 1. Estrutura anatômica da seção transversal do bambu com seus principais componentes. Silva [12].

Basicamente os bambus são constituídos de um rizoma subterrâneo e de um colmo lenhoso, oco, com fibras dispostas em forma de feixes, principalmente na região mais externa, dotado de ramos e folhas. Morfologicamente, o bambu é constituído de tecido parenquimatoso, vasos e fibras (Figura 1). Numa estrutura bastante compacta, esses elementos anatômicos são dispostos longitudinalmente, com relação ao eixo do colmo, numa completa ausência de raios, sendo a cavidade de ar restrita, principalmente aos lumens das fibras e dos vasos que formam o sistema capilar do bambu. As fibras e vasos são dispostos em forma de aglomerado de feixes fibrovasculares dispersos num tecido de células parenquimatosas. Estas são constituídas de paredes

celulares finas e são de pequenas dimensões *Gomide et al.* [11].

A análise de literatura especializada demonstra que existem variações bastante amplas nas características morfológicas e na constituição química dos bambus, o que se deve principalmente, às variabilidades decorrentes da espécie, localização geográfica, idade, posição do colmo, etc.

O conhecimento da distribuição destes constituintes químicos no colmo do bambu, bem como da variabilidade das características dimensionais das fibras são fatores importantes para a utilização maximizada do potencial desta matéria-prima para a produção de compósitos, em especial compósitos poliméricos.

O objetivo deste estudo foi caracterizar anatomicamente a fibra de *Bambusa vulgaris* submetida no que se referem as suas dimensões, relações entre elas e ângulo de micro fibrila visando fornecer subsídios para uma melhor utilização desta espécie que possam ser correlacionados com o aproveitamento industrial.

MATERIAIS E MÉTODOS

A amostra de um dos colmos (Figura 2) da espécie *Bambusa vulgaris*, de dois anos de idade foi fornecida pela CEPASA (*Celulose e Papel de Pernambuco S/A*), localizada na cidade de *Jaboatão dos Guararapes*. As pesquisas foram realizadas no laboratório anatomia da madeira da *Universidade Federal de Lavras*, UFLA-MG, em *Lavras, Minas Gerais*. O comprimento, o diâmetro máximo externo e interno e a circunferência da amostra foram medidas com uma fita métrica digital com capacidade de 300 cm da marca *Bosch* com precisão de $\pm 1,0$ mm/m, enquanto a largura/espessura da mesma foi medida com o auxílio de um paquímetro digital eletrônico da marca *Mitutoyo* modelo CD-6”C, alcance de 150 mm, resolução 0,01 mm e precisão de 0,01 mm.

Com o auxílio de uma serra de fita foram retirados de várias partes do colmo de bambu 10 cavacos nas dimensões de 2 x 4 cm, os quais foram utilizados na extração dos palitos para posteriormente passarem pelo processo de maceração, visando à realização das medidas microscópicas previstas neste trabalho.

A caracterização anatômica das amostras foi realizada conforme recomendações de *Muniz e Coradin* [13] e segundo norma *IAWA Iawa Committe* [14]. Na mensuração das fibras, foram obtidas informações relativas ao seu comprimento da fibra (l), diâmetro da fibra (D) e diâmetro de lume (d), sendo indiretamente determinada a espessura da parede celular (e). Valendo-se das características levantadas, foram calculadas as principais relações entre as dimensões das fibras, consideradas importantes e que estão relacionadas com as propriedades físico-mecânicas dos compósitos produzidos. Essas relações foram determinadas conforme preconizam *Milanez e Foelkel* [15] e

Azzini et al. [16].



Figura 2. Amostra do colmo da espécie *Bambusa vulgaris*.
Nota- DME: Diâmetro máximo externo. DMI: Diâmetro máximo interno.

Coeficiente de flexibilidade (CF), dado pela relação entre o diâmetro do lume (d) e o diâmetro da fibra (D), expressa em porcentagem (Equação (1)):

$$CF = \left(\frac{d}{D} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

Fração Parede (FP), dada pela relação entre a espessura da parede celular (e) e o raio da fibra (D/2), expressa em porcentagens (Equação (2)):

$$FP = \left(\frac{2e}{D} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

Índice de enfeltramento (IE), dado pela relação entre o comprimento (l) e o diâmetro (D) da fibra (Equação (3)):

$$IE = \left(\frac{l}{D} \right) \quad (3)$$

Índice de Runkel (IR), dado pela relação entre duas vezes a espessura da parede celular (e) e o diâmetro do lume (d) (Equação (4)):

$$IR = \left(\frac{2e}{d} \right) \quad (4)$$

Índice de Boiler (IB), dado pela relação entre as diferenças dos quadrados do diâmetro da

fibra (D) e o diâmetro do lume (d) sobre a soma dos quadrados do diâmetro da fibra (D) e o diâmetro do lume (d) (Equação (5)):

$$IB = \left(\frac{(D^2 - d^2)}{(D^2 + d^2)} \right) \quad (5)$$

Índice de Mulsteph (IM), dado pela relação entre as diferenças dos quadrados do diâmetro da fibra (D) e o diâmetro do lume (d) sobre o quadrado do diâmetro da fibra (D) (Equação (6)):

$$IM = \left(\frac{D^2 - d^2}{D^2} \right) \quad (6)$$

Os valores encontrados compreendem a média de cada índice para cada fibra. Para cada uma das dimensões encontradas, assim como dos índices calculados, foram determinados os valores médio, máximo, mínimo e coeficiente de variação.

A dissociação dos elementos celulares foi realizada segundo o método de *Franklin* [17], modificado por *Berlyn e Micksche* [18]. Palitos foram retirados longitudinalmente de cada amostra e colocados em frascos de vidro com solução de ácido acético glacial e peróxido de hidrogênio 30% (1:1). Os frascos tampados foram levados à estufa a uma temperatura de 60° C por 24 horas, até que as amostras estivessem esbranquiçadas.

O material dissociado foi lavado em água corrente até a retirada total da solução e corado com safranina a 1%, em álcool 50% *Berlyn e Micksche* [18]. As lâminas semipermanentes contendo o material dissociado foram montadas em solução aquosa de glicerina (1:1). Em seguida utilizou-se para a captura de imagens e mensuração dos elementos celulares individuais, uma câmera *Evolution LC Color PL A662* devidamente acoplada a um microscópico óptico da marca *Olympus BX 51* de ocular micrométrica com filamento móvel (objetiva de 20 X para medida do comprimento e de 40 X para medidas da largura, espessura da parede e diâmetro do lume; totalizando aumentos de 200 X e 400 X, respectivamente) sendo o software para a análise de imagem o *Image - Pro plus 5.1* da *Média Cybernetics*. A câmara e o microscópio foram ligados a um microcomputador *Samsung Intel Pentium IV* de 2,8 GHz com monitor de 19 polegadas (Figura 3).

Os dados quantitativos foram transferidos para planilhas do programa *Excel*, onde foram posteriormente analisados.



Figura 3. Conjunto câmara, microscópio e microcomputador.

Foram realizadas 33 medidas para a determinação do comprimento e 25 para a determinação da largura de diâmetro do lume. Por tanto, foram mensuradas 99 fibras para comprimento (3 repetições) e 85 para largura e diâmetro do lume (3 repetições), totalizando 184 fibras ao todo. Para o cálculo da espessura da fibra utilizou-se a equação (7):

$$E_p = \left(\frac{L_g - DL}{2} \right) \quad (7)$$

Onde: E_p : Espessura da parede da fibra (μm), L_g : Largura da fibra (μm) e DL : Diâmetro do lume da fibra (μm).

Para as medidas dos ângulos de micro fibrila, foram seguidos os mesmos procedimentos já mencionados anteriormente referentes à preparação das amostras, com exceção da safranina que não foi utilizada neste ensaio. Foram mensuradas ao todo 30 fibras, totalizando 90 medições com três repetições cada. A câmera, o microscópico e o microcomputador empregados foram os mesmos utilizados nas mensurações de comprimento, largura, espessura da parede e diâmetro do lume, citados anteriormente. A objetiva utilizada foi a de 20X, a qual proporcionou um aumento da ordem de 200X nas imagens capturadas. Dentre as diversas maneiras encontradas na literatura para se medir ângulos de micro fibrila, tais como difração de raios-X, microscopia por reflexão, microscopia por fluorescência, espectroscopia *Raman*, microscopia eletrônica de varredura, microscopia eletrônica de transmissão, dentre outras, o procedimento utilizado para as medições destes ângulos foi o mesmo utilizado por *Donaldson* [19], *Echols* [20], *Foracs* [21] e *Treacy et al.* [22], o qual se baseia em medições individuais de fibras através da técnica de microscopia de luz polarizada ou microscopia de polarização, onde as lâminas com as microfibras são levadas até um prato giratório e em seguida vistas ao microscópio ótico. Este prato é então girado em relação ao seu eixo até que não haja mais luz na parede celular da microfibra (momento em que as mesmas se encontram paralelas ao polarizador). Temos neste instante o que chamamos de máxima posição de

extinção. Usualmente é necessário determinar a correta direção de rotação do prato angular do microscópio (horário ou anti-horário) para se evitar medidas de ângulos complementares. A diferença encontrada entre as medidas dos ângulos formados pelo eixo da fibra e a máxima posição de extinção da luz, após o giro do prato é a medida do ângulo de micro fibrila. O ângulo é facilmente lido em uma escala no prato giratório. Todas as medições, com exceção dos ângulos de micro fibrila foram realizadas em fibras inteira.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Medidas realizadas com a fita métrica e o paquímetro, ambos digitais, mostraram que o colmo do *Bambusa vulgaris* apresentou comprimento de 32,2 cm; circunferência de 17,8 cm; espessura de 0,63 cm; diâmetro máximo externo de 6,31 cm e diâmetro máximo interno de 5,73 cm. Estes valores estão de acordo com aqueles determinados pelo IMBAR para a espécie em discussão, os quais apresentaram para diâmetro dos colmos, espessura da parede e tamanho do internó; valores entre 6-15 cm, 7-15 mm e 25-35 cm, respectivamente. Wahab et al. [23] encontraram para o *Bambusa vulgaris schrad* de dois anos de idade, na província de Kawang Sabah (Malásia), valores de $31,48 \pm 2,82$ cm para comprimento médio do colmo; $9,09 \pm 0,09$ cm para o diâmetro médio do colmo e $0,84 \pm 0,07$ cm para a espessura do mesmo. Estes valores se mostraram bem parecidos com os valores encontrados nesta pesquisa, mesmo sendo o bambu de uma região bem diferente e afastada daquela onde efetuamos os experimentos.

Os valores referentes às medidas anatômicas do *Bambusa vulgaris*, estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Características anatômicas da fibra de *Bambusa vulgaris*.

Caracterização anatômica da fibra									
	CMF μm	DML μm	DMF μm	EMP μm	DB kg/m ³	VV cm ³	RCD	POR %	AMF Graus
V _{méd}	2299,47	3,81	13,93	5,06	273,67	5, 676	172,53	80,82	11,54
V _{máx}	3442,28	8,69	24,96	10,65	294,23	6, 937	314,09	83,61	17,0
V _{min}	1434,66	2,17	10,36	2,36	257,22	4, 422	80,77	78,28	8,0
CV%	25,04	44,17	23,88	33,46	4,65	17,47	32,05	2,33	25,10

V_{méd}: Valor médio; V_{máx}: Valor máximo; V_{min}: Valor mínimo; CV%: Coeficiente de variação; CMF: comprimento médio da fibra; DML: diâmetro médio do lúmen; DMF: diâmetro médio da fibra; EMP: espessura média da parede; DB: densidade básica média; VV: volume médio de vazios; RCD: relação comprimento-diâmetro; POR: índice de porosidade e AMF: ângulo de micro fibrila.

Pelo comprimento médio das fibras (2,299 mm) de *Bambusa vulgaris*, a COPANT [24] classifica estas fibras como muito longas. Este comprimento coloca as mesmas em uma posição intermediária entre as fibras de eucalipto (1 mm em média) e as do pinho (3,5 mm).

De acordo com *Morais* et al. [25], as fibras vegetais do bambu apresentam um elevado comprimento variando de 1,65 a 3,43 mm. *Gomide* et al. [11] encontrou para estas fibras valores médios de 2,8 mm de comprimento, 17,2 e 6,6 μm de largura e diâmetro do lúmen, respectivamente, bem como 5,2 μm de espessura da parede. Por se apresentarem estreitas e longas, as fibras do *Bambusa vulgaris* conferem grande resistência aos produtos fabricados. Isso deve a alta relação entre o comprimento e a largura da fibra (172,53), bem maior que a maioria das outras fibras, tais como coco (35), cana-de-açúcar (66) e sisal (150), conforme demonstrou *Guimarães* [26]. *Bhagava* [27] analisando 31 espécies diferentes de bambu encontrou variação entre as mesmas entre 0,64 a 3,78 mm. *Philip* [28] relata o comprimento médio das fibras variando entre 1,5 a 4,4 mm, com predominância de valores entre 2,2 e 2,6 mm. Para a largura das fibras (10,36 a 24,96 μm), espessura da parede celular (2,36 a 10,65 μm) e diâmetro do lúmen (2,17 a 8,69 μm), com exceção do diâmetro da fibra, que apresentou relativa variabilidade, não houve variações significativas estando às mesmas dentro dos parâmetros encontrados na literatura. As características anatômicas, químicas e celulósicas do bagaço de quatro variedades de cana-de-açúcar foram estudadas por *Barrichello* et al. [29], utilizando, para a produção de celulose, o processo soda. Os comprimentos médios das fibras das variedades ensaiadas variaram de 1,11 a 1,30 mm. A largura média das fibras variou de 19,6 a 21,3 μm e o diâmetro médio dos lumens de 10,0 a 11,6 μm . A espessura média das paredes das fibras variou de 4,6 a 5,0 μm . Em comparação com a fibra de *Bambusa vulgaris*, a fibras de cana-de-açúcar apresentou valor médio maior de largura da fibra (1,5x) e diâmetro médio do lúmen (3x); enquanto o valor médio do comprimento da fibra foi 1,8 vezes maior que a da cana-de-açúcar. Os valores da espessura da parede foram iguais para as duas fibras.

Comparada com as fibras de madeiras folhosas e coníferas, as fibras de bambu possuem em relação ao *eucalyptus grandis*, largura semelhante, com cerca de o dobro da espessura da parede celular e metade do diâmetro do lúmen e comprimento próximo aos da fibra de *pinus ellioti*. As fibras estudadas foram consideradas longas, estreitas, com lúmen pequeno e paredes relativamente espessas. Sendo assim, as fibras se apresentam menos flexíveis, com maior índice de porosidade e com redução no seu elongamento, portanto, mais rígidas, fortes e com baixa densidade aparente.

A classificação tradicional, quanto à largura, visa correlacionar tal dimensão com a resistência ao arrebentamento. Entretanto, esta propriedade só é válida para produtos papeleiros, pois o

comprimento das fibras é induzido a padrões *Soffner* [30]. Para o caso de compósitos poliméricos, a largura não tem significado prático, a não ser sua relação às outras dimensões, caracterizando sua esbeltez.

O diâmetro de lume também não tem significado prático, porém interessa para a determinação da espessura da parede celular, que é dada pela metade da diferença entre a largura da fibra e o diâmetro de lume, resultando no raio da seção transversal efetiva das microfibrilas de celulose *Lima Junior* [31]

Os valores dos coeficientes de variação obtidos estão coerentes com os resultados tidos como satisfatórios na literatura correlata às fibras abordadas como material de reforço de compósitos.

Ângulo micro fibrilar refere-se ao ângulo que as microfibrilas da camada S2 da parede celular faz com o eixo longitudinal da célula. Este ângulo exerce um efeito sobre uma ampla faixa de propriedades do bambu e a fibra em si.

O valor médio do ângulo de micro fibrila do *Bambusa vulgaris* foi de 11,54°, tendo alcançado valor máximo de 17 e mínimo de 8° com coeficiente de variação de 25,10%. *Agopyam* e *Savastrano Jr.* [32] encontrou valores de 8, 10-22 e 30-49 de ângulo de micro fibrila para a malva, sisal e coco, respectivamente. XQ et al. [33] encontraram valores para ângulos de micro fibrila variando de 8,17 a 10,51°, através da técnica de difração de raios-X para o bambu da espécie *Phyllostachys pubescens*, na província de *Zhejiang*, na *China*. Segundo *Chand* et al. [34] e *Savastrano Jr.* [35], a resistência à tração e o módulo de elasticidade das fibras são inversamente proporcionais ao ângulo das micro fibrilas, enquanto o alongamento máximo de ruptura aumenta com o ângulo. *Kelsey* [36] e *Barber* e *Neylan* [37] mostraram que o ângulo micro fibrilar da camada S2 exerce um profundo efeito sobre as propriedades elásticas e estabilidade dimensional da madeira. *Satyanarayana* et al. [38] encontraram para as fibras de banana, juta, rami, abacaxi, carauá e algodão valores de 11, 17, 10, 13, 18 e 34°, respectivamente. Observa-se que o valor encontrado se encontra dentro da faixa da maioria dos valores das fibras utilizadas na confecção de compósitos poliméricos.

A Tabela 2 apresenta as principais relações entre as dimensões das fibras, consideradas importantes na fabricação de vários produtos, incluindo os poliméricos, que estão relacionadas às propriedades físico-mecânicas.

Estas propriedades advindas a partir das relações entre as dimensões da fibra são apropriações matemáticas quanto à flexibilidade, potencial de ligação entre si, aglomeração em conjunto e percentual de micro fibrilas (parede celular). Esta análise anatômica levou em conta a largura média da fibra e o diâmetro médio do lume. Tais parâmetros foram apropriados como sendo a média aritmética das 33 aferições de comprimento e 25 de largura da fibra, espessura de parede e do

diâmetro do lume, tomadas em triplicata.

Tabela 2. Principais relações entre as dimensões das fibras de *Bambusa vulgaris*.

Principais relações entre as dimensões da fibra						
	CF %	FP %	IE	IR	IB	IM
V _{méd}	28,06	71,94	172,53	3,15	0,84	0,91
V _{máx}	63,25	88,60	314,09	7,77	0,97	0,99
V _{mín}	11,40	36,75	80,77	0,58	0,43	0,60
CV%	43,05	16,79	32,05	48,99	15,30	9,51

V_{méd}: Valor médio; V_{máx}: Valor max; V_{mín}: Valor mínimo; CV%: Coeficiente de variação; CF: coeficiente de flexibilidade; FP: Fração parede; IE: Índice de enfeltramento; IR: Índice de Runkel; IB: Índice de Boiler; IM: Índice de Mulsteph.

Como fibras com frações de parede acima de 60% são consideradas rígidas, no caso da fibra de *Bambusa vulgaris* com fração de parede de 71,94%, esta é mais rígida que o *Pinus taeda*, por exemplo, que apresenta um valor médio de 32,63%, conforme encontrado por Nisgoski [39]. Este resultado é confirmado pelo seu valor de coeficiente médio de flexibilidade de 28,06%, muito menor que 69,08% do *Pinus taeda*, mas que está coerente com a maioria das espécies de bambu, tais como, o *Bambusa tulidóides*, *Bambusa textilis* e *bambusa ventricosa*, que apresentaram valores médios de 21,03, 18,00 e 23,02%, respectivamente, conforme descrevem Azzini e Ciaramello [40] em um trabalho que classificou cinco espécies de bambu para a produção de celulose sulfato. Lima Júnior [31] encontrou para a fibra de açaí, valores de 9,81% de coeficiente de flexibilidade, e 90,20% de fração parede, o que torna esta fibra extremamente rígida em relação às citadas acima.

O índice de Runkel é apropriado para características papeleiras, onde valores entre 0,25 e 0,50 (razões porcentuais) são considerados excelentes para a fabricação de papel, pois significa que quanto menor tal parâmetro, maior o potencial de ligação entre as fibras. Para os compósitos poliméricos, as fibras não necessitam se ligar entre si, portanto o valor de 3,15 para a fibra de *Bambusa vulgaris*, que extrapola um pouco o valor tido como ideal para o setor papeleiro, atesta tal propriedade de reforço. Pereira et al. [41] encontraram para a fibra de *Bactris inundata martius* (tucum) valor de índice de Runkel de 3,55, bem próximo ao valor encontrado para a fibra de *Bambusa vulgaris* pesquisada neste trabalho, enquanto Lima Júnior [31] encontrou valor de 0,45 para o *Pinus taeda*, o que indica que a igualdade entre o diâmetro da fibra e a espessura da parede é aumentada. Caumo [42] apresenta como valores ideais, aqueles abaixo de 0,25.

A fibra de *Bambusa vulgaris* apresenta alto índice de enfeltramento (172,53), fato que deve

ser observado quando da dispersão das mesmas na fabricação de materiais compósitos, pois este possui relação diretamente com o nível de porosidade. Quanto maior, maior será a flexibilidade das fibras. Geralmente as coníferas apresentam valores maiores que 100, pois seus comprimentos são elevados, da ordem de 2 a 5 mm. *Lima Júnior* [31] encontrou valor de 141,69 para o índice de enfeltramento do açaí, enquanto *Nisgoski* [39] relatou valor de 87,92 para o *Pinus taeda*.

Com relação aos índices de *Boiler* (0,84) e *Mulsteph* (0,91), ambos menores que a unidade, *Foelkel* [43] e *Lima Junior* [31], encontraram para o *Pinus taeda* de 15 e 11 anos, valores de índice de *Boiler*, respectivamente iguais a 0,35 e 0,24. Estes mesmos autores mensuraram também para o mesmo *Pinus taeda*, índices de *Mulsteph* de 0,52 e 0,39. Para a fibra de *Bactris inundata martius*, *Pereira et AL.* [41] encontraram valores médios de 0,88 e 0,93, respectivamente. Alguns autores como *Akgul e Tozluoglu* [44], *Soffner* [30] e *Caumo* [42] consideram ideais para a produção de papel e celulose valores de índices de *Boiler* e *Mulsteph* menores, pois determina a existência de fibras finas na parede celular. Neste sentido, *Kasmudjo* [45] afirma em seus estudos sobre a madeira da espécie *Roxburghiana evodia*, na província de *Yogyakarta (Indonésia)*, que fibras com índice de *Mulsteph* menores que a unidade é ideal para a produção de papel e celulose.

Sendo assim, os valores encontrados para estes índices mostram que as fibras constituintes da parede celular do *Bambusa vulgaris* não são tão finas quanto às do *Pinus taeda*, por exemplo, o que não inviabiliza de forma alguma, a utilização desta fibra em compósitos poliméricos, já quês estes índices estabelecem a qualidade das fibras objetivando somente a produção de papel.

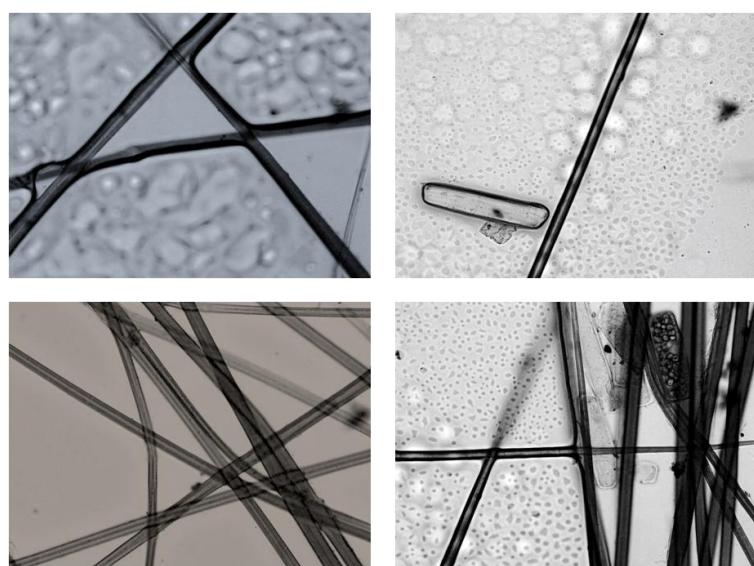


Figura 4. Fotografia das fibras de *Bambusa vulgaris* para mensuração e análises do comprimento, largura, diâmetro do lume, espessura da parede celular e ângulo de micro fibrila.

A Figura 4 apresenta fotografias das fibras de *Bambusa vulgaris* em escala micrométricas

vistas ao microscópio óptico da marca *Olympus*. As mesmas foram capturadas por uma câmara *Evolution Collor* e analisadas quanto à largura, comprimento, diâmetro do lume, espessura da parede celular e ângulo de micro fibrila, através de um software específico para análise de imagens, chamado *Image-Pro plus 5,1* fabricado pela *Média Cybernetics*.

CONCLUSÃO

De forma geral, a fibra de bambu, da espécie *Bambusa vulgaris* fornecida pela *CEPASA S/A* e utilizadas na mesma apenas para produção de celulose na fabricação de papel, se mostrou adequada para utilização em compósitos poliméricos com ou sem adição de cargas minerais, passando ou não por tratamentos superficiais, de acordo com sua aplicabilidade. Os resultados das análises anatômicas bem como das relações entre as dimensões da fibra de *Bambusa vulgaris* as torna candidata em potencial para concorrer com fibras tradicionais conhecidas nacional e internacionalmente, como é o caso das fibras de linho, sisal e carauá, na produção de diversos produtos para as indústrias automotivas, eletroeletrônica, náutica, aeroespacial, embalagens, dentre outras. As fibras estudadas foram consideradas longas, estreitas, com lúmen pequeno e paredes relativamente espessas, apresentando-se, portanto, mais leves, rígidas e fortes.

Agradecimentos. O aluno do curso de Pós-Graduação stricto-sensu em Engenharia de Materiais da UFOP/REDEMAT, agradece a FCA (Fundação Cultural de Araxá) pelo patrocínio das viagens, locomoção, hospedagens e alimentação; a UFLA-MG (*Universidade Federal de Lavras*) por ter cedido o laboratório, equipamentos e todos os reagentes químicos para a consecução das pesquisas e ao CEFET-MG (*Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais*) pela bolsa de Mestrado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Mendes TMF “*Propriedades de resistência à tração e ao impacto de compósitos poliéster/sisal. Um estudo comparativo*”. 1992. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal, RN, (1992)
- [2] Pereira MAR “*Bambu, espécies, características e aplicações*”. UNESP, Bauru, (1999)
- [3] Beraldo AL, Azzini A “*Bambu características e aplicações*”. Rio Grande do Sul: Guaíba, Editora Agropecuária Ltda., (2004)
- [4] Terra GRA “*Aspectos da história de vida de Guadua tagoara (Nees) Kunth (Poaceae: Bambuseae) na Serra dos Órgãos*”. 2007. Dissertação (Mestrado em Ecologia)- Programa de Pós Graduação em Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, (2007)
- [5] Judziewicz EJ, Clark LG, Londoño X, Stern MJ “*The American bamboos*”. Smithsonian Institution Press, Washington DC, U.S.A. 1999
- [6] Filgueiras TS, Gonçalves APA “*Checklist of the basal grasses and bamboos in Brazil*”. Bamboo Science and Culture; the journal of the American Bamboo Society, **18**(1), 7 (2004)
- [7] Hsiung W. Prospects for bamboo development in the world. *Journal de La American Bamboo Society*, **8**(1-2), 168 (1988)
- [8] INBAR – International Network for Bamboo and Rattan. Disponível em: < <http://www.inbar.int/>>. Acesso em julho de 2010.
- [9] Berndsen RS “*Caracterização anatômica, física e mecânica de lâminas de bambu (Phyllostachys*

- pubescens*”). Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR. (2008)
- [10] Targa MS “Determinação de parâmetros hidráulicos e avaliação econômica de tubos de bambu-gigante (*Dendrocalamus giganteus*), para utilização em drenagem”. Tese (Doutorado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP, (1997)
- [11] Gomide JL, Colodette JL, Oliveira RC “Caracterização química e anatômica do *Bambusa vulgaris* visando à produção de polpa celulósica”. Viçosa, SIF, (1981), 22 pag. (Relatório Técnico).
- [12] Silva FA “Tenacidade de materiais compósitos não convencionais”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC. Rio, Rio de Janeiro, RJ, (2004) pag 64
- [13] Muniz GIB, Coradin VR “Normas de procedimentos em estudo de anatomia da madeira: I: Angiospermae, II: Gimnospermae. Brasília: Laboratório de produtos florestais”, 1991. Série Técnica, 15
- [14] INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMY (IAWA). List of microscopic features for wood identification. *IAWA Bulletin*, Leiden, **10**(3), 226 (1989)
- [15] Milanez AC, Foelkel CEB “Processo de deslignificação com oxigênio para a produção de celulose de eucalipto”. Publicado em el CONGRESSO ANUAL DA ABCP, 14. 1981, São Paulo. São Paulo: ABCTP, (1981). 9. 37-110
- [16] Azzini A, Savy Filho A, Salgado ALB, Arnaldi FZ “Deslignificação dos resíduos agrícolas da cultura da mamona para a produção de celulose”. *Bragantia*. Campinas, **43**(2), 519 (1984)
- [17] Franklin GL “Preparation of thin sections of synthetic resins and wood-resin composites, and a new macerating method for wood”, *Nature*, **155** (3924): 51 (1945)
- [18] Berlyn GP, Miksche JP, *Botanical microtechnique and cytochemistry*. Ames: Yowa, State University, 1976
- [19] Donaldson LA “The use of pit apertures as windows to measure micro fibril angle in chemical pulp fiber. *Wood and Fiber Science*, **23**(2), 290 (1991)
- [20] Echols RM “Linear relation of fibrillar angle to tracheid length and genetic control of tracheid length in slash pine”, *Tropical Woods*, **102**, 11 (1955)
- [21] Foracs O “Structural weaknesses in soft wood pulp tracheids”, *TAPPI* **44**, 112 (1961)
- [22] Treacy, M.; Evertsen, J.; Dhubháin, A. *A comparison of mechanical and physical wood properties of a range of Sitka Spruce provenances*. Finland: COFORD-National Council for Forest Research and Development, 2000
- [23] Wahab R, Mohamed A, Hassan M, Hassan “A. Physical Characteristics and Anatomical Properties of Cultivated Bamboo (*Bambusa vulgaris schrad*) Culms”, *J. Biological Sciences*, **9**(7), 753 (2009)
- [24] COPANT - Comisión Panamericana de Normas técnicas. Descripción de características generales, macroscópicas y microscópicas de la madera Angiospermae Dicotiledóneas. COPANT 30:1-19, (1974).
- [25] Morais RLC, Benachur M, Duarte-Coelho AC “Estudo da caracterização reológica do licor negro do processo soda/*Bambusa vulgaris schrad* e do efeito da adição do peróxido de hidrogênio”. Disponível em: < <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:XiyFb6zNkTsJ:ciadicy.unam.edu.ar/trabajos/trabajos/variados/Coelho-78-UFP>> Acesso em julho de 2010
- [26] Guimarães S. Experimental mixing and moulding with vegetable fibre reinforced cement composites. *International Conference on Development of Low-Cost and Energy Saving Construction Materials*, Lehigh Valley, Pennsylvania, pp. 37-42, (1984)
- [27] Bhagava RL “Bamboo” in Kocurek, M.J. *Pulp and paper manufacture*, volume 3: Secondary fibers and non-wood pulping. Joint Executive Committee of the Vocational Educational Committees of the Pulp and Paper Industry, pp.71-81, (1987)
- [28] Phillip P (org.). *Celulose e papel*; vol. I: Tecnologia da fabricação de pasta celulósica; vol.II: Tecnologia da fabricação do papel, 2^a ed., IPT, (1988)
- [29] Barrichelo LEG, Foelkel CEB, Brito JO “Características anatômicas, químicas e celulósicas do bagaço de quatro variedades de cana-de-açúcar” en CONGRESSO ANUAL A ABCP, 9, 1976, São Paulo. Anais. São Paulo: ABCTP, (1976) pag 97-106
- [30] Soffner MLAP “Produção de Polpa Celulósica a Partir de Engaço de Bananeira”. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz - Universidade de São Paulo (USP). Piracicaba, SP, (2001)
- [31] Lima Junior UB “Fibras da semente do açaizeiro (*Euterpe oleracea mart.*): avaliação quanto ao uso como reforço de compósitos fibrocimentícios”. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, PUC – RS. Porto Alegre, RS, (2001)
- [32] Agopyan V, Savastrano JR “Uso de materiais alternativos a base de fibras vegetais na construção civil: experiência brasileira”. In Seminário Iberoamericano 1997 de Materiales Fibrorreforzados, 1, y Reunión Proyecto PIP VIII. 5 Cyted, 3; Cali, 1987. *Memórias*. Cali. Universidad de Vale, (1997) pag 23-

40 (artículo 03)

- [33] XQ W, XZ L, HQ R “Variation of micro fibril angle and density in moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*)”, *Journal of Tropical Forest Science* 22 (1), p. 88-96, (2010)
- [34] Chand N, Tiwary RK, Roghati PK “Bibliography: Resource Structure Properties of Natural Cellulosic Fibres” en: Annotated Bibliography. *Journal of Materials Science*, **23(2)**, (1988)
- [35] Savastano Jr., H. *Materiais a base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo*. 2000. Tese (Livre docência) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, (2000)
- [36] Kelsey KE “A critical review of the relationship between the shrinkage and structure of Wood”. C.S.I.R.O. Division of Forest Products. Tech. Paper nº 28, (1963)
- [37] Barber NF, Neylan BA “The anisotropic shrinkage of wood. A theoretical model”, *Holzforrschung*, **18(5)**, 146 (1964)
- [38] Satyanarayana KG, Guimarães JL, Wypych F “Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications”. Paraná, 2007
- [39] Nisgoski, S. *Espectroscopia no infravermelho próximo no estudo de características da madeira e papel de Pinus taeda L.* Tese (Doutorado em engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná, UFPR-PR. Curitiba, PR, 2005
- [40] Azzini A, Ciaramello D “Bambu como matéria-prima para papel. IV. Estudos sobre o emprego de cinco espécies de bambus a, na produção de celulose sulfato”, *Bragantia*, **30(23)**, 306 (1971)
- [41] Pereira SJ, Muniz GIB, Nisgoski S, Ceccantini G “Morfologia e densidade básica das folhas de tucum (*Bactris inundata martius*) como fonte de fibras celulósicas para papel”, *Ciência Florestal*, **12(1)**, 39 (2002)
- [42] Caumo M. *La raffinazione*. Verona: 10º corso de tecnologia per tecnici cartari. Edizione 2002/2003, 47
- [43] Foelkel CEB “Celulose Kraft de *Pinus spp*”. *O papel*, **37(19)**, 49 (1976)
- [44] Akgul M, Tozluoglu A “Some chemical and morphological properties of juvenile Woods from beech (*Fagus orientalis L.*) and pine (*Pinus nigra A.*) plantations”, *Trends in Applied Sciences Research*, **4(2)**, 116, (2009)
- [45] Kasmudjo. *Cara Penentuan Proporsi Tipe Sel dan Dimensi Sel Kayu*. Bagian Penerbitan. Yayasan Pembina Fakultas Kehutanan Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta, 1994