

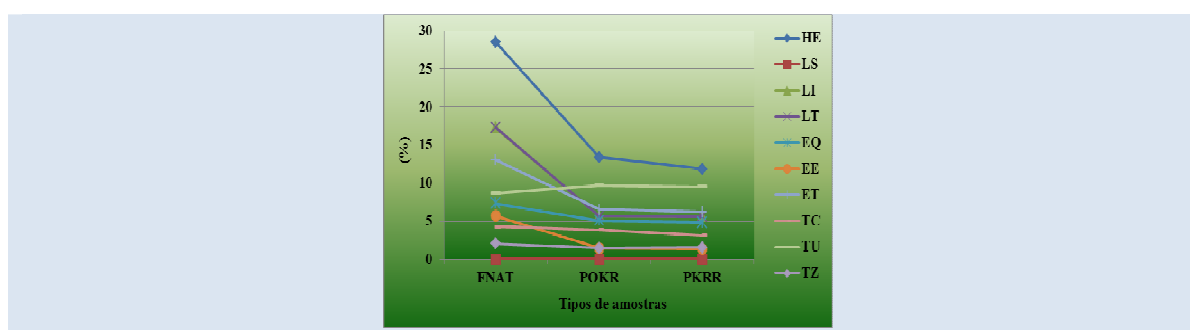
CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE FIBRA E POLPAS DE *Bambusa vulgaris* Schrad PARA UTILIZAÇÃO EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOSMario Guimarães Junior^{1*}, Kátia Monteiro Novack², Vagner Roberto Botaro³, Thiago de Paula Protásio⁴, Allan Motta Couto⁴1: Departamento de Eletrônica CEFET-MG (Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais), Campi Araxá, Araxá - Minas Gerais, Brasil. Doutorando em Eng^a Materiais pela REDEMAT/UFOP-MG

2: Instituto de Ciências Exatas e Biológicas / Departamento de Química, UFOP-MG (Universidade Federal de Ouro Preto), Ouro Preto - Minas Gerais, Brasil

3: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, UFScar-SP (Universidade Federal de São Carlos), campi Sorocaba, Sorocaba - São Paulo, Brasil

4: Departamento de Ciências Florestais, UFLA-MG (Universidade Federal de Lavras), Lavras - Minas Gerais, Brasil

* e-mail: mgjunior@araxa.cefetmg.br



RESUMO

Atualmente é crescente o interesse pelos compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais vegetais em substituição às fibras manufaturadas. Isto se deve ao fato das fibras vegetais serem menos abrasivas, biodegradáveis, apresentar baixa densidade e excelentes propriedades mecânicas e térmicas. Várias fibras vegetais vêm sendo utilizadas nos mais variados tipos de compósitos, dentre as quais as de bambu se diferenciam por serem largamente utilizadas na produção industrial de celulose e papel. Este trabalho apresenta os resultados de recentes pesquisas envolvendo fibra e polpas de bambu, as quais foram submetidas a vários tipos de ensaios, visando um maior conhecimento de suas propriedades. O principal objetivo deste estudo foi caracterizar físico-quimicamente fibra e polpas, difundindo suas propriedades e maximizando sua utilização em aplicações poliméricas. Grande parte das amostras foram analisadas e caracterizadas utilizando as metodologias preconizadas pela *American Society for Testing and Materials*, ASTM e pela *Technical Association of the Pulp and Paper Industry*, TAPPI. Os resultados mostram que a polpa refinada se apresentou mais adequada para ser utilizada como agente de reforço em compósitos poliméricos em detrimento da polpa sem refino e fibra natural.

Palavras-Chaves: compósitos poliméricos, fibras vegetais, polpa de bambu

PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERIZATION OF FIBER AND PULP OF *Bambusa vulgaris* Schrad FOR USE IN POLYMERIC COMPOSITES

ABSTRACT

Nowadays the interest in polymeric composites reinforced with vegetal natural fibers in substitution for manufactured fibers is increasing. This is due to the fact that vegetal fibers are less abrasive, biodegradable, present low density and excellent mechanical and thermal properties. Several vegetal fibers have been used for various types of composites among which the bamboo differs from these fibers in being widely used for cellulose and paper industrial production. This paper presents the results of recent researches about fiber and pulps of bamboo, which were submitted to several types of tests, aiming at a better understanding of their properties. The main objective of this study was to physical-chemical characterize fiber and bamboo pulps, disseminating their properties and maximizing their use in polymeric applications. Most of the samples were analyzed and characterized using the methods recommended by the *American Society for Testing and Materials*, ASTM and the *Technical Association of the Pulp and Paper Industry*, TAPPI. The results show that the refined pulp was more suitable to be used as a reinforcing agent in polymeric composites instead of the unrefined pulp and natural fiber.

Keywords: polymeric composites, vegetal fibers, bamboo pulps

1. INTRODUÇÃO

A utilização de fibras naturais vegetais em compósitos existe desde a antiguidade Rowell [1]; Chawla [2]. No entanto, o uso de fibras lignocelulósicas, como são conhecidas as fibras naturais vegetais, na área de engenharia, tem diminuído com o passar do tempo, devido principalmente, ao aparecimento de novos materiais. Nas últimas décadas, com o aumento das pressões da sociedade para um uso mais racional dos recursos naturais, as fibras naturais voltam a ser uma alternativa para diversas aplicações, principalmente para as indústrias de plásticos, pois são recursos naturais renováveis, biodegradáveis, fixadoras de dióxido de carbono; além de possuírem baixa densidade, natureza não abrasiva, altas propriedades específicas, grande variedade de espécie em todo o mundo, possuindo altos níveis de enchimento Chattopadhyay et al. [3]; Lopez e Correal [4]; Taj et al. [5]; Caufield et al. [6]; Abu-Sharkh et al. [7]; Mengeloglu e Karakus [8]. Além disso, segundo Gellerstedt e Gatenholm [9], quando comparadas as fibras manufaturadas, as fibras vegetais consomem, em média, 60% menos energia, além de serem responsáveis pela sobrevivência de um grande número de pessoas em inúmeros Países, essencialmente nos Países do terceiro mundo.

Fundamentados neste argumento, Marzely e colaboradores [10] comentam que o bambu é capaz de retirar da atmosfera cerca de 62 toneladas de CO₂ e liberar na atmosfera até 35% a mais de O₂ por hectare plantado/ano, se comparado a uma floresta jovem, além de possuir um rápido crescimento, aproximadamente três vezes maior, quando comparados ao eucalipto, por exemplo. Outro fator que chama a atenção, descrito por Murakami [11], é o crescimento médio anual do bambu, que pode atingir, em média, de 22 a 24 m³/ha/ano.

Neste sentido, segundo Ghavami [12], torna-se evidente que os “*materiais verdes*” satisfazem algumas exigências fundamentais para o futuro da humanidade, tais como: minimização do consumo de energia, conservação dos recursos naturais, redução da poluição e manutenção de um ambiente saudável.

Pesquisas por materiais alternativos de fontes renováveis vêm sendo incentivadas por diversas instituições em todo globo terrestre para combater problemas ambientais e, neste contexto, o bambu

tem recebido atenção considerável como um substituto para a madeira nos últimos anos, pois segundo afirmam Kushwaha e Kumar [13]; Lee e Wang [14] e Chen et al. [15], suas propriedades mecânicas são muito semelhantes. Segundo Amada e Untao [16], a força do bambu, especialmente na direção longitudinal, resulta principalmente de fibras de paredes espessas, que possui resistência mecânica comparável a do aço, sendo sua tenacidade a fratura maior do que a do Al-alloy. Atributos como alta porcentagem de celulose (~60%), baixa porcentagem de lignina (~32%) e valores de seus ângulos de microfibrila (2-10°), são responsáveis por tornar o bambu um agente de reforço de alta qualidade Chattopadhyay et al. [3].

Estas e outras características tem atraído a atenção de cientistas e engenheiros de todo mundo, pois estas gramíneas possui uma alta capacidade de serem utilizadas como agente de reforço em varios tipos de compósitos, dentre eles os compósitos poliméricos. Neste sentido, Bonse et al. [17]; Zou et al. [18] e Okubo e Yamamoto [19] comentam que fibras deste material tem sido empregadas para reforçar algumas matrizes termoplásticas.

O bambu é um recurso natural abundante na Ásia e em outras regiões do mundo, podendo ser renovado mais rapidamente do que a madeira, uma vez que o tempo necessário para alcançar seu tamanho adulto é apenas de seis a oito meses, menos de 5% do tempo necessário para a maioria das madeiras Mi [20]. De acordo com Lopez e Correal [4], devido sua velocidade de crescimento, pode ser considerado maduro para sua utilização entre 2 e 6 anos, diferente da maioria das madeiras, que demoram aproximadamente 20 anos para alcançar seu amadurecimento.

O bambú é abundantemente disponível em diversos Países. Segundo Han et al. [21], atualmente a área total de florestas de bambu no mundo alcança 22 milhões de hectares e a disponibilidade desta fibras por ano, chega a 30 milhões de toneladas, afirma Rowell [22]. Mais de 80% deste valor está distribuído em Países asiáticos, especialmente Índia e China.

Segundo Hidalgo-Lopez [23] há no mundo cerca de 1600 espécies de bambu distribuídas em 121 gêneros e que geograficamente, essas espécies são encontradas nas áreas tropicais, subtropicais e temperadas, com exceção da Europa, onde não há espécies nativas.

Entretanto, no Brasil o bambu é pouco utilizado em comparação as espécies arbóreas, que representam a quase totalidade da matéria-prima utilizada. Neste sentido, Beraldo e Azzini [24] afirmam que este fator se deve principalmente à falta de conhecimentos científicos, agrônômicos e tecnológicos especificamente desenvolvidos.

Diante do exposto, o objetivo desse trabalho é caracterizar fibras e polpas de bambu, da variedade *Bambusa vulgaris* Schrad, possibilitando condições de aplicabilidade das mesmas como agentes de reforço em compósitos poliméricos para aplicações industriais, agregando valor ao material que, no Brasil, é utilizado na sua grande maioria na produção de papéis.

2. PARTE EXPERIMENTAL

As amostras refinadas e sem refino de polpa de bambu da espécie *Bambusa vulgaris*, bem como os colmos de onde se obtiveram as partículas ou feixes de fibras, foram fornecidas pela CEPASA – Celulose e Papel de Pernambuco S/A, localizada na cidade de Jaboatão dos Guararapes.

Para os ensaios físicos foram utilizadas as granulometrias de 35 mesh (0,425 mm) e 12 mesh (1,41 mm), devido a maior homogeneidade das fibras.

Para a caracterização química, as amostras foram transformadas em serragens por meio de um moinho de rotor modelo TE-651, da Tecnal. A serragem foi classificada em peneiras de 35 e 60 mesh, sendo utilizada a fração que ficou retida na peneira de 60 mesh, após serem acondicionadas em uma sala climatizada a 20°C e 65% de umidade relativa, objetivando sua umidade de equilíbrio. Este procedimento está de acordo com a ABTCP M1[25]. Para isso, as mesmas passaram por um processo de extração com solventes orgânicos e água conforme norma M3/69 da ABTCP [26].

As análises químicas das fibras e das polpas refinada e sem refino foram realizadas conforme metodologias apresentadas na Tabela 1.

Na avaliação do experimento foi adotado o modelo inteiramente casualizado com quatro repetições sem nenhum tipo de tratamentos ou modificações químicas. As análises físicas da fibra e das polpas refinada e sem refino de bambu foram realizadas conforme metodologias apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1. Análises realizadas e metodologias utilizadas para a caracterização química de fibra e polpas refinada e sem refino de *Bambusa vulgaris* Schrad

Análises Químicas	Metodologias
ET	M3/69 ABTCP [26]
EQ	TAPPI T207 om-93 [27]
EE	TAPPI T264 om-93 [28]
LS	Goldschmid [29]
LI	TAPPI T222 om-88 [30]
LT	L.S + L.I
HO	[100 – (L.T. + E.T. + CZ)]
AC	Caraschi [31]
TC	TAPPI T574 om-93 [32]
HE	(HO – A.C)
TZ	TAPPI T211 om-88 [33]
TU	ASTM D 1413 [34]

ET: Extrativos totais; EQ: Extrativos solúveis em água quente; EE: Extrativos solúveis em etanol/toluol e etanol; LS: Lignina solúvel; LI: Lignina insolúvel; LT: Lignina total; HO: Holocelulose; AC: Alfa-celulose; TC: Teor de cera; HE: Hemicelulose; TZ: Teor de cinza; TU: Teor de umidade.

Tabela 2. Tipos de análises realizadas e metodologias utilizadas para a caracterização física de fibra e polpas refinada e sem refino de *Bambusa vulgaris* Schrad

Análises Físicas	Metodologias
DA	Azzini e colaboradores[35]
DR	NBR ABNT 9165 [36]
PA	ASTM D 167 [37]
AM	ASTM 570 [38]

DA: Densidade aparente; DR: Densidade real; PA: Porosidade aparente; AM: Absorção máxima de água.

Como a norma ASTM 570 [38] descreve vários tipos de ensaio escolheu-se determinar a absorção de água por imersão longa até a saturação, neste caso após 44 dias. Foram realizadas 4 (quatro) repetições com as amostras retidas nas peneiras de 12 e 35 mesh.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As fibras e polpas refinadas e sem refino de bambu foram submetidas ao processo de polpação industrial conhecido como KRAFT, com rendimento depurado em torno de 46% e número KAPPA entre 45 e 55. Na saída da lavagem, o pH variou de 9 a 10, enquanto o °SR sofreu alterações entre 25° e 30° para a polpa sem refino e 60° e 70° para a polpa refinada. O álcali ativo variou entre 16

e 18%.

Com relação as características químicas, o bambu apresenta elevado teor de holocelulose (67,58%) e baixo teor de lignina (17,31%) quando comparado às madeiras, apresentando também elevado teor de extrativo (13,05%), que pode afetar o rendimento do processo de polpação Rahmati et al. [39]. A composição química do bambu é similar a das madeiras de coníferas e folhosas, contendo celulose, hemicelulose e lignina, porém apresentando elevada quantidade de cinzas e extrativos.

De acordo com Li [40], celulose, hemicelulose e lignina representam aproximadamente 90% da massa total do bambu. A porcentagem do teor de holocelulose presente nos bambus utilizados nas indústrias de polpas celulósicas está em torno de 65%, segundo Li [40], que é uma das vantagens do bambu para a produção de polpa celulósica. Chen et al. [15] afirma que o teor de lignina no bambu apresenta valor inferior ao das madeiras em geral, enquanto extrativos e cinzas quase sempre apresentam valores maiores em seus teores.

Em geral, conforme preconiza Li et al. [41], o teor de alfa-celulose no bambu é de (40-50%), que é comparável com o teor de alfa-celulose das coníferas (40-52%) e folhosas (38-56%). Já o teor de lignina das coníferas pode variar entre (25-35%), superior aos das folhosas (18-25%) e não lenhosas (11-27%), de acordo com Bagby et al. [42].

O teor de alfa-celulose do *Bambusa vulgaris* Schrad deste trabalho (39,05%) é praticamente igual ao encontrado por Manuhua [43] ao pesquisar os bambus *Gigantochloa atrovioacea* (41,08%) e *Bambusa vulgaris* (40,39%), estando pouco mais de 2% abaixo da faixa preconizada por Li et al. [41] e dentro da faixa das madeiras folhosas. O teor de lignina (17,31%) se encontra dentro da faixa das espécies não lenhosas e 3,8% abaixo da faixa das madeiras folhosas. Os teores de extrativo (13,05%) e cinza (2,06%) encontrados estão de acordo com Chen et al. [15] e acima dos teores apresentados pelas madeiras em geral, conforme Rahmati et al. [39].

Os resultados obtidos para a fibra natural de bambu (FNAT), com exceção do teor de cinzas, se mostram inferiores aos resultados obtidos por Li [40] que obteve 1,36% de cinzas, 23,95% de lignina total, 46,82% de alfa-celulose e 72,69% de holocelulose, para o bambu da espécie *Phyllostachys pubescens*

de cinco anos de idade, proveniente da China. De acordo com Yusoff et al. [44] a causa desta diferença está na idade e na espécie de bambu, onde os teores de alfa-celulose, holocelulose e lignina, aumentam com a idade.

Para fins de comparação, o *Eucaliptus gigantea* apresenta em média, conforme Pettersen [45] teores de 72,0; 49,0; 22,4 e 0,2% para holocelulose, alfa-celulose, lignina total, extrativos totais e cinzas, respectivamente, enquanto o *Pinnus eliotti engelm*, segundo o mesmo autor, apresenta valores de 64,0; 46,27; 4,0 e 0,2% para os mesmos teores. O *Eucaliptus* apresenta teores de holocelulose, alfa-celulose e lignina maiores que o bambu analisado neste trabalho, enquanto o *Pinnus* se mostrou com maior quantidade de lignina e menor teor de holocelulose.

Outros materiais lignocelulósicos considerados não-madeira, também foram referenciados para comparação. Segundo Hattallia [46] as fibras de carauá, sisal e piaçava, apresentam teores de celulose, hemicelulose e lignina total de 73,6, 9,9 e 7,5%; 65,0, 12,0 e 10% e 28,6, 25,8 e 45,0%, nesta ordem. Já a Juta apresenta teores de celulose, hemicelulose e lignina total de 61,0, 14,0 e 12,0% Amar [47], enquanto o *hibiscus cannabinus* exibe os mesmos teores nos valores de 28,0, 25,0 e 22,7% Ramakrishna e Sundararajan [48]. Tanto o carauá como o sisal e a juta apresentam teores de holocelulose maiores se comparados ao *Bambusa vulgaris*, em detrimento do teor de hemicelulose. O contrario aconteceu com a piaçava e *hibiscus*. Houve queda no teor de holocelulose e aumento nos teores de hemicelulose e lignina.

Teor de cinza superior ao encontrado neste trabalho para o *Bambusa vulgaris* Schrad (2,06%) foi encontrado por Khedari et al. [49] no valor de 2,22%, para a fibra de coco, enquanto Pereira [50] realizando a extração de nanocelulose de fibras vegetais, encontrou para a fibra de bananeira, valor de $23,14 \pm 8,3\%$ para o teor de extrativos totais, bem acima do valor encontrado para o bambu pesquisado (13,05%). As diferenças e discrepâncias entre os valores dependem da composição química, física e anatômica dos materiais lignocelulósicos e, também, da espécie, variedade, tipo de solo, condições climáticas, parte da planta de onde são extraídas as fibras, idade da planta, entre outros Guimarães et al. [51]. As Figuras 1 e 2 mostram os valores dos teores encontrados para as análises químicas do *Bambusa*

vulgaris Schrad natural, sem refino e com refino.

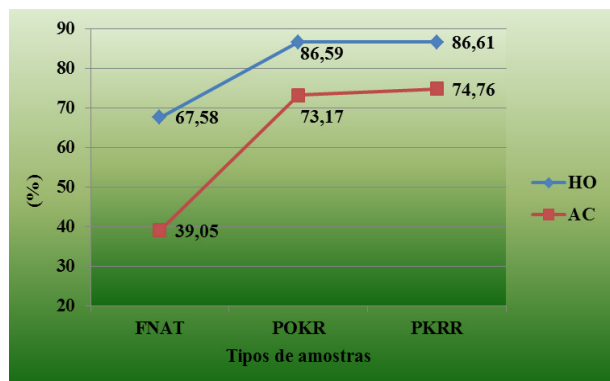


Figura 1. Resultado das análises químicas realizadas nas amostras de *Bambusa vulgaris* Schrad. FNAT: Fibra natural; POKR: Polpa sem refino; PKRR: Polpa refinada; HO: Holocelulose; AC: Alfa-celulose

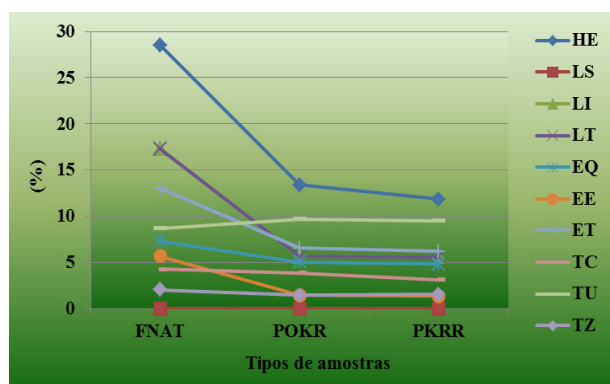


Figura 2. Resultado das análises químicas realizadas nas amostras de *Bambusa vulgaris* Schrad. FNAT: Fibra natural; POKR: Polpa sem refino; PKRR: Polpa refinada; HE: hemicelulose; LS: Lignina solúvel; LI: Lignina insolúvel; LT: Lignina total; EQ: Extrativos solúveis em água quente; EE: Extrativos solúveis em etanol/toluol + etanol; ET: Extrativos totais; TC: Teor de cera; TU: Teor de umidade; TZ: Teor de cinzas

Altos teores de extrativos, cinzas e lignina diminuem as propriedades mecânicas dos compósitos, prejudicam a aderência entre fibras e matrizes, interferem na cura das matrizes e causam estouros no produto final nas etapas de prensagem, caso este seja o tipo de moldagem escolhido. Os tratamentos industriais de polpação e refino realizados promovem a remoção de grande parte destas substâncias, provocando um aumento na pureza das amostras e por consequência, um aumento na quantidade de holocelulose e alfa-

celulose, em relação à fibra natural, o que é extremamente desejável, uma vez que o objetivo deste trabalho é utilizar as polpas de bambu em compósitos.

Neste contexto, as fibras com grande quantidade de celulose são econômica e tecnicamente viáveis para serem utilizadas como reforço em compósitos. Segundo Chand e Hashmi [52] a resistência à tração e o módulo de elasticidade das fibras são diretamente proporcionais ao teor de celulose. Por possuir alta cristalinidade, boa estabilidade química e alta polaridade, a celulose se apresenta vantajosa e recomendável para ser utilizada em compósitos com matrizes poliméricas. Além disso, as fibras com maior teor de carboidratos apresentam maior possibilidade de estabelecer ligações interfibrilares, por causa da funcionalidade química para formação de ligações hidrogênio.

Analisando a Figura 1 observa-se a ocorrência de um aumento de 28,16 e 91,45%, nos teores de holocelulose e alfa-celulose para a amostra refinada submetida ao processo kraft de polpação (PKRR) em comparação a amostra de fibra natural (FNAT). Isso ocorre devido à remoção de lignina e polioses, porções amorfas da fibra.

Atendendo as expectativas, houve também uma redução gradativa nos teores de hemicelulose e extrativos para amostras submetidas ao processo de polpação, pois ao contrário da celulose, as hemiceluloses são polímeros facilmente hidrolisáveis. Como a hemicelulose não forma arranjo fibroso e contribui na formação de regiões amorfas diminuindo a cristalinidade do material, além de ser responsável pela absorção de umidade, o seu menor valor contribui para a melhoria das propriedades mecânicas das polpas.

Já os extrativos, que incluem alguns sais, açúcares, polissacarídeos, ácidos graxos, alcoóis de cadeia longa, ceras, resinas, esteróides, compósitos fenólicos e glicosídeos solúveis em água e em solventes orgânicos, também foram hidrolizados com facilidade. A redução nos teores destes elementos proporciona a fibra e polpas de bambu uma maior sinergia química quando utilizadas como cargas em compósitos poliméricos.

Observa-se também uma pequena variação nos valores dos teores de umidade de fibra e polpas. A polpa refinada (PKRR) apresenta-se mais hidrofóbica em comparação a polpa sem refino

(POKR).

A Tabela 3 apresenta os valores dos coeficientes de variação para as análises químicas realizadas nas amostras naturais, refinadas e sem refino de *Bambusa vulgaris* Schrad.

Tabela 3. Coeficientes de variação para os teores dos componentes encontrados nas análises químicas da fibra natural e polpas refinada e sem refino de *Bambusa vulgaris* Schrad

AQ	CV (%)			AQ	CV (%)		
	FNAT	POKR	PKRR		FNAT	POKR	PKRR
HO	3,1	5,6	5,6	EQ	3,0	5,2	4,4
AC	5,7	7,3	7,4	EE	2,3	3,7	2,8
HE	6,2	7,9	8,0	ET	7,9	9,5	8,7
LS	7,9	8,2	8,1	TC	8,2	7,2	7,4
LI	5,3	7,9	7,5	TU	3,5	2,8	3,1
LT	7,8	9,1	7,2	TZ	4,2	4,8	5,0

HO: Holocelulose; AC: Alfa-celulose; HE: Hemicelulose; LS: Lignina solúvel; LI: Lignina insolúvel; LT: Lignina total; EQ: Extrativos solúveis em água quente; EE: Extrativos solúveis em etanol/toluo + etanol; ET: Extrativos totais; TC: Teor de cera; TU: Teor de umidade; TZ: Teor de cinzas; CV: Coeficiente de variação; AQ: Análises químicas; FNAT: Fibra natural; POKR: Polpa sem refino; PKRR: Polpa refinada.

A Figura 3 mostra os valores das densidades aparente e real encontrados para o bambu da espécie *Bambusa vulgaris* Schrad, desde a fibra natural até a polpa sem refino e refinada.

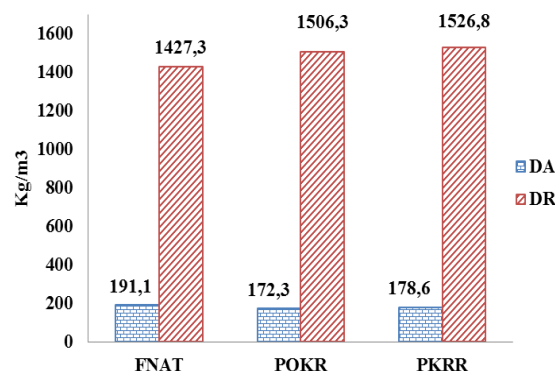


Figura 3. Resultados obtidos para os valores das densidades aparente (DA) e real (DR) de fibra e polpas de *Bambusa vulgaris* Schrad. FNAT: Fibra natural; POKR: Polpa sem refino; PKRR: Polpa refinada. Valores em kg/m³.

Nota-se que o processo de polpação diminui a densidade aparente das fibras, como já esperado, pois houve um aumento da porosidade da parede

secundária das fibras durante o processo. A retirada de extrativos, lignina e outras substâncias existentes na fibra natural corroboram na redução do valor da densidade aparente da polpa sem refino. Há referências na literatura de que materiais lignocelulósicos com maiores teores de extrativos têm tendência de apresentar maior densidade Santos [53].

Após o processo de refino o valor da densidade aparente das polpas sofre um ligeiro aumento até a modificação final das mesmas. A densidade mais elevada para as fibras que compõem a estrutura do colmo se justifica pelas fibras estarem mais fechadas e impermeáveis, resultando em menor porosidade, menor absorção de água e, conseqüentemente, maior densidade aparente. Pode ter corroborado também para este aumento, os decréscimos nos valores do diâmetro do lúmen e na espessura da parede celular, além de uma alteração na geometria das lacunas e vasos existentes na amostra, acompanhada de uma diminuição nos teores de lignina, hemicelulose e outras substâncias amorfas.

O comportamento encontrado para a densidade real, conforme mostra a Figura 3, é bastante diferente do comportamento apresentado pela densidade aparente. Isso é explicado pelo fato da densidade aparente ser afetada pelos poros e espaços vazios existentes nas fibras vegetais, enquanto a densidade real é considerada a densidade da fibra excluindo essas estruturas. Esta densidade representa a medida do material sólido da célula, quase sempre apresentando valor superior ao valor encontrado para a densidade aparente. Este fenômeno é explicado pela existência de grande quantidade de poros permeáveis nas fibras acarretando elevada absorção de água.

Os resultados apresentados mostram que independentemente dos processos de polpação e refino, a densidade real, ou massa específica da parede celular, não se diferem tanto uma das outras e nem tão pouco se distanciam demasiadamente de 1427,3 kg/m³, que é bem próximo do valor real de 1500 kg/m³ para todas as fibras vegetais ou materiais lignocelulósicos. Este resultado mostra que não houve perda de material e nem tão pouco desorganização da parede celular durante os tratamentos realizados, conforme sustenta Clark [54].

A Figura 4 apresenta os índices de porosidade aparente das fibras e polpas analisadas. Observa-se

que a polpa sem refino, é a que apresenta maior índice, enquanto a fibra natural e a polpa refinada se mostram menos porosas. Isso já era esperado, pois o índice de porosidade se relaciona de maneira inversa aos resultados da densidade aparente. Neste contexto, Anjos et al. [55] estudando o efeito do refino na absorção de água de polpas refinadas e sem refino de *Bambusa vulgaris* Schrad, objetivando aplicação das mesmas em compósitos cimentícios, evidencia que a menor absorção e porosidade aparente ocorre na polpa refinada. O autor afirma que a polpa apresenta uma superfície lisa, pouco danificada, em forma de fita e mais densa.

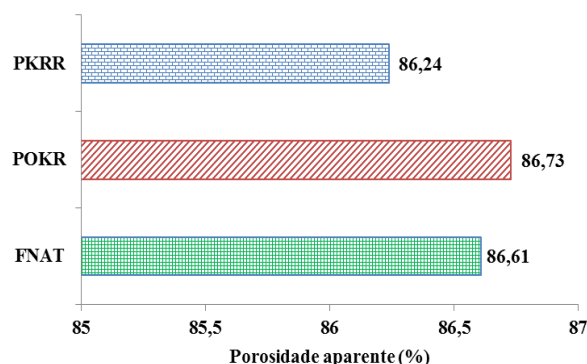


Figura 4. Índices de porosidade aparente encontrados para as amostras de *Bambusa vulgaris* Schrad. FNAT: Fibra natural; POKR: Polpa sem refino; PKRR: Polpa refinada

Os índices de porosidade aparente de 86,6, 86,7 e 86,27% apresentados pela fibra natural, polpa sem refino e polpa refinada, respectivamente, são muito próximos para este parâmetro, sendo inferiores a 0,5%, que indica uma estimativa da quantidade de vazios existentes nas amostras. Isso pode ser explicado pela metodologia utilizada, pois as fibras ao serem transformadas em polpa sem refino tiveram seus valores de densidade aparente diminuídos, mas, em contrapartida, os valores encontrados para densidade real foram aumentados. Após o processo de refino, houve aumentos nos valores de ambas as densidades, mas não o suficiente para provocar um aumento considerável no número de espaços vazios na amostra refinada.

A Figura 5 mostra que a absorção repentina de água das polpas é muito alta já nos primeiros instantes de imersão, o que não acontece com a fibra natural, cujo valor inicial é bem menor, indicando um

gradativo e suave aumento no índice de absorção até o ponto de saturação da mesma.

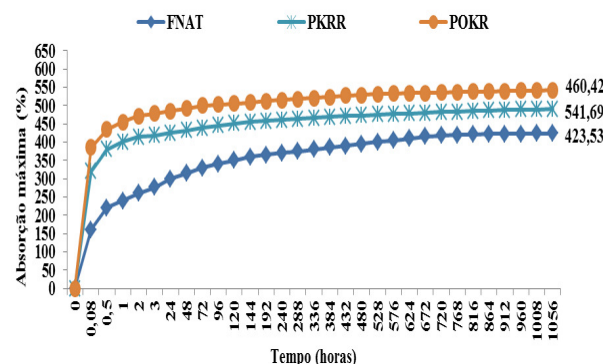


Figura 5. Comportamento das amostras de *Bambusa vulgaris* Schrad frente aos ensaios de absorção máxima de água. FNAT: Fibra natural; POKR: Polpa sem refino; PKRR: Polpa refinada

Sjöber e Hoglund [56] encontraram menor índice de retenção de água para polpa de conífera após o processo de refino. Os autores mencionam que fibras com paredes mais espessas apresentam menor volume livre em seu interior e menor área superficial de parede celular. Este efeito causa redução da retenção de água, pelo fechamento dos poros e na estrutura molecular, pelo estabelecimento de ligações entre os polissacarídeos da parede celular. Weise e Paulapuro [57], estudando a relação entre o encolhimento da fibra e o efeito da hornificação, após processos de refino MTP, concluíram que os raios dos poros e diâmetro do lúmen sofrem diminuição quando as fibras são refinadas. Os autores ainda comentam que a alta temperatura, em torno de 170°C, a qual é exposta o material durante a polpação pode também afetar o valor do Índice de Cristalinidade das mesmas provocando mudanças na agregação intermolecular da hemicelulose, dificultando o refino, e consequentemente, diminuindo a absorção de água.

4. CONCLUSÃO

A composição física e química da fibra natural se mostra coerente com a maioria dos bambus pesquisados, porém, diferentes das madeiras em geral e outros tipos de materiais lignocelulósicos conhecidos como não-madeira. As características físico-químicas da fibra natural restringem a sua utilização como agente de reforço em compósitos poliméricos, pois se apresentam altamente hidrofílicas.

As polpas se mostram bem mais adequadas como agentes de reforço, com vantagem para a polpa refinada, devido o maior teor de alfa-celulose, menor absorção e baixos teores de extrativos e lignina, quando comparadas à polpa sem refino.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FCA (Fundação Cultural de Araxá) pelo apoio financeiro e incentivo a pesquisa; a UFLA-MG (Universidade Federal de Lavras) por ter cedido os laboratórios e equipamentos para a consecução das pesquisas, à CEPASA S/A pela envio das amostras de bambu e, ao CEFET-MG (Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais) pelo apoio irrestrito as pesquisas em todos os campi, contemplando todas as áreas do conhecimento.

6. REFERENCIAS

- [1]. Rowell, R. M. "Natural fibres: types and properties. In Kim L. Pickering, editor, Properties and performance of natural-fiber composites", Woodhead Publishing in Materials, chapter 1, p.3–66. Woodhead Publishing, Cambridge, England, 2008.
- [2]. Chawla, K. K. "Composite Materials: Science and Engineering". 1st Ed. New York, Springer-Verlag, 1987, 292p.
- [3]. Chattopadhyay, S. K.; Khandal, R. K.; Uppaluri, R.; Ghoshal, A. K. "Bamboo Fiber Reinforced Polypropylene Composites and Their Mechanical, Thermal, and Morphological Properties". Journal of Applied Polymer Science, 2011; 119: p.1619-1626.
- [4]. Lopez, L. F. & Correal, J. F. "Exploratory study on the glued laminated bamboo *Guadua angustifolia* kunt as a structural material". Maderas: Ciencia y Tecnologia, 2009; 11 (3): p.171-182.
- [5]. Taj, S.; Munamar, A. M.; Khan, S. "Natural Fiber-Reinforced Polymer Composites." Proceedings of the Pakistan Academy of Sciences, 2007; 44 (2): p.129-144.
- [6]. Caulfield, D. F.; Clemons, C.; Jacopson, R. E.; Rowell, R. "Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites.", London, New York, Singapore, Taylor & Frandis, 2005. p. 365
- [7]. Abu-Sharkh, B. F.; Kahraman, R.; Abbasi, S. H.; Hussein, I. A. "Effect of epolene E-43 as a compatibilizer on the mechanical properties of palm fiber-poly(propylene) composites". Journal of Applied Polymer Science, 2004; 92: p.2581-2592.
- [8]. Mengeloglu, F. & Karakus, K. "Thermal Degradation, Mechanical Properties and Morphology of Wheat Straw Flour Filled Recycled Thermoplastic Composites". Sensors, 2008; 8: p.500-519.
- [9]. Gellerstedt F, Gatenholm P. "Surface properties of lignocellulosic fibers bearing carboxylic groups". Cellulose, 1999; 6 (2): p.103–121
- [10]. Marzely, G. F.; Da Silva, A.; Langer, R. "Ecodesign e Produção Mais Limpa: inovação em Produto no APL madeira móveis." First International Workshop Advances in Cleaner Production, Florianópolis, SC, Brasil, 2007
- [11]. Murakami, C. H. "O bambu: materia prima do futuro." Boletim Florestal, São Paulo, 1 (6): p.5, 2007.
- [12]. Ghavami, K. "Cement composites reinforced with bamboo and vegetable fibres". In: International Conference on Concrete and Development, 2001; 2 (1): p.445-461, Tehran. Proceedings...Tehran: Building and Housing Research Centre.
- [13]. Kushwaha, P. K. & Kumar R. "Influence of Chemical Treatments on the Mechanical and Water Absorption Properties of Bamboo Fiber composites". Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2011; 30 (1): p.73-85
- [14]. Lee, S. H & Wang, S. "Biodegradable polymers/bamboo fiber biocomposite with biobased coupling agent". Applied Science and Manufacturing, 2006; 37: p.80–91.
- [15]. Chen, X.; Guo, Q.; Mi, Y. "Bamboo Fiber-Reinforced Polypropylene Composites: A Study of the Mechanical Properties". Journal of Applied Polymer Science, 1998; 69: p.1891-1899.
- [16]. Amada, S. & Untao, U. "Fracture Properties of Bamboo". Composites Part B, 2001; 32: p.451-459.
- [17]. Bonse B. C., Mamede M. C. S., Costa R. A.; Bettini S. H. P. "Effect of Compatibilizer and Bamboo Fiber Content on the Mechanical Properties of PP-g-MA Compatibilized Polypropylene/Bamboo Fiber Composites". In: Proceedings of the Polymer Processing Society 26th Annual Meeting ~ PPS-26 ~ July 4-8, 2010 Banff (Canada).
- [18]. Zou, L.; Jin, H.; Lu, W.; Li, X. "Nanoscale structural and mechanical characterization of the cell wall of bamboo fibers". Materials Science and Engineering: C, 2009; 29 (4): p.1375-1379
- [19]. Okubo, K.; Fujii, T.; Yamamoto, Y. "Development of bamboo-based polymer composites and their mechanical properties". Composites Part A, 2004; 35: p.377-383

- [20]. Mi, Y.; Chen, X.; Guo, Q. "Bamboo Fiber-reinforced Polypropylene Composites: Crystallization and Interfacial Morphology." *J Appl Polym Sci*, 1997; 64: p.1267-1273.
- [21]. Han, G.; Lei, Y.; Wu, Q.; Kojima, Y.; Suzuki, S. "Bamboo-Fiber Filled High Density Polyethylene Composites: Effect of Coupling Treatment and Nanoclay". *Journal of Polymers and the Environment*, 2008; 16 (2): p.123-130
- [22]. Rowell R .M. "The state of art and future development of bio-based composite science and technology toward the 21st century". In: *Proceedings, 4th Pacific rim bio-based composite symposium*, 1998. Borger, Indonesia, p 1-1
- [23]. Hidalgo-López, O. "Bamboo-The gift of the Gods." Ed. D'Vinni Press Ltda, Bogotá, Colômbia, p.55-69, 2003, 570 p.
- [24]. Beraldo, A. L.; Azzini, A. "Bambu características e aplicações." Rio Grande do Sul, Guaíba, Editora Agropecuária Ltda, 2004.
- [25]. Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel/ABTCP. "Normas técnicas." São Paulo, ABTCP M1, 1974
- [26]. Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel/ABTCP. "Normas técnicas." São Paulo, ABTCP, 1989, Extrativos totais, Norma M 3/69.
- [27]. TAPPI - Technical Association of Pulp and Paper Industry. Standard Method T207 om-93 – Tappi Test Methods, 1993
- [28]. TAPPI - Technical Association of Pulp and Paper Industry. Standard Method T264 om-93 – Tappi Test Methods, 1993.
- [29]. Goldschmid, O. "Ultraviolet spectra". In: *Sarkanen, K.V.; Ludwig, C.H. lignins; occurrence, formation, structure and reations*. New York: John Wiley & Sons, 1971; pp. 241-266.
- [30]. TAPPI - Technical Association of Pulp and Paper Industry. Standard Method T222 om-88 – Tappi Test Methods, 1988.
- [31]. Caraschi, J. C. "Estudo das relações estrutura/propriedades de carboximetilcelulose obtida por derivação de polpa de bagaço de cana-de-açúcar." 1997. 188p. Tese (Doutorado em Química), Universidade Federal de São Paulo, USP, São Carlos, SP, 1997.
- [32]. TAPPI - Technical Association of Pulp and Paper Industry. Standard Method T574 om-93 – Tappi Test Methods, 1993.
- [33]. TAPPI - Technical Association of Pulp and Paper Industry. Standard Method T211 om-88 – Tappi Test Methods, 1988.
- [34]. ASTM D 1413-76-99 (2005). Standard test method for Wood preservatives by laboratory soil-block cultures. ASTM Standards West Conshohocken PA; USA
- [35]. Azzini, A.; Salgado, A. L. B.; Teixeira, J. P. F. "Curva de Maturação da *Crotalaria juncea* L. em função da densidade do caule". *Bragantia*, Campinas, 1981; 40 (1): p.1-10.
- [36]. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9165: Madeira – determinação da densidade relativa verdadeira. Rio de Janeiro, 1985.
- [37]. ASTM D 167-93 (2005). Standard Test Method for Apparent and True Specific Gravity and Porosity of Lump Coke. ASTM Standards West Conshohocken PA; USA
- [38]. American Society For Testing And Materials. "Standard test method for water absorpotion of plastics." ASTM 570 – 95, Philadelphia, 1995
- [39]. Rahmati, H.; Ebrahimi, P.; Sedghi, M. "Effect of Cooking condition and oxygen-deslignification on Bambusa tulda kraft pulping". *Indian Journal of Chemical Technology*, 2010; 17: p.74-77.
- [40]. Li, X. "Physical, Chemical, and Mechanical Properties of bamboo and its utilization potential for fiberboard manufacturing". 2004. 68p. Tese (Master of Science in Renewable Natural Resources)-Faculty of Agriculture and Mechanical College, Louisiana State University, Louisiana.
- [41]. Li, X.; Shupe, B., Peter, T. F., Hse, G. F., Eberhardt, T. L. "Chemical changes with maturation of the bamboo species *Phyllostachys pubescens*". *Journal of Tropical Forest Science*, 2007; 19 (1): p.6-12
- [42]. Bagby, M. O., Nelson, G. H., Helman, E. G.; Clark, T. F. "Determination of lignin in non-wood plant fibre sources". *Tappi Journal*, 1971; 54: p.1876-1878
- [43]. Manuhua, E. "Assesmen Potensi Bambu dan Pemberdayaannya di Pulau Seram." Workshop Bambu, Kerjasama United Nation Industry Development Organization (UNIDO), 2005; dengan PEMDA Maluku. (Laporan Hasil Penelitian)
- [44]. Yusoff, M. N. M.; Abd.Kadir, A.; Mohamed, A. H. "Utilization of bamboo for pulp and paper and medium density fiberboard". In: (W.R.W. Mohd and A.B. Mohamad, eds.). *Proceeding of the seminar towards the management, conservation, marketing and utilization of bamboos*, FRIM, 1992; Kuala Lumpur, p.196-205.
- [45]. 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: Chapter 2.
- [46]. Hattallia, S.; Benaboura, A.; Ham-Pichavant, F.; Nourmamode, A.; Castellan, A. "Adding Value to Alfa Grass (*Stipa Tenacissima* L.) Soda Lignin as Phenolic Resins 1. Lignin Characterization." *Polymer Degrad. Stab*, 2002; 75: p.259-264
- [47]. Amar, K .M.; Manjusri, M.; Lawrence, T. D. "Natural Fibers, Biopolymers, and Bio-composites". CRC Press, Taylor & Francis, 2005, 875 p.
- [48]. Ramakrishna, G. & Sundararajan, T. "Studies on the Durability of Natural Fibers and the Effect of Corroded Fibers on the Strength of mortar". *Cement and Concrete Composites*, 2005; 27 (5): p.575-582
- [49]. Khedari, J.; Watsanasathaporn, P.; Hirunlabh, J. "Development of fibre-based soilcement block with low thermal conductivity." *Cement and concrete composite*. 2005; 27 (1): p.111-116.
- [50]. Pereira, A. L. S. "Extração de nanocelulose de fibras vegetais." 2010. 54p. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Ceará, UFCE, Fortaleza, CE, 2010.
- [51]. Guimarães, J. L.; Frollini, E.; da Silva, C. G.; Wypych, F.; Satyanarayana, K. G. "Characterization of banana, sugarcane bagasse and sponge gourd fibers of Brazil." *Industrial Crops and Products*, 2009; 30 (3): p. 407-415
- [52]. Chand, N. S & Hashmi, A. R. "Mechanical properties of sisal fibre at elevated temperatures". *Journal of Materials Science*, 1993; 28 (24): p.6724-6728.
- [53]. Santos, I. D. "Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica e contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado." 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, UnB, Brasília, DF.
- [54]. Clark, J. D. A. "Pulp technology and treatment for paper." 2ª ed. Miller Freeman Publications Inc. San Francisco, 1985.
- [55]. Anjos. M. A. S.; Ghavami, K.; Barbosa, N. P. "Compósito a base de cimento reforçados com polpa celulósica de bambu. Parte I: Determinação do teor de reforço ótimo." *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande, 2003; 7 (2): p.339-345.
- [56]. Sjöberg, J. C.; Hoglund, H. "Refining systems for sack paper pulp: Part I. HC refining under pressurised conditions and subsequent LC refining". *Nord. Pulp and Paper Res. J.*, 2005; 20 (3): p.320-328.
- [57]. Weise, U.; Paulapuro, H. "Relation between fiber shrinkage and hornification". *Das Papier*, 1998; 50 (3): p. 328-333