

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E TÉRMICAS DAS FIBRAS DE BAMBU ANTES E APÓS TRATAMENTO QUÍMICO¹

Antonio Eufrazio da Costa Junior²

Diego Magalhães do Nascimento³

Silvestre Carvalho de Oliveira Junior⁴

Enio Pontes de Deus⁴

Selma Elaine Mazzetto⁵

Resumo

O interesse por tecnologias ecologicamente corretas tem se tornado uma grande preocupação, motivada, dentre vários aspectos, pelo crescimento da conscientização sócio-ambiental. Neste contexto, as fibras vegetais surgem como grandes candidatas, como uma alternativa econômica e ecológica em substituição as fibras sintéticas derivadas de fontes não renováveis. As fibras de bambu se adéquam perfeitamente a essa tendência: são longas, possuem alta resistência, ideais para a fabricação de papel, embalagens de alimentos e excelentes candidatos para reforço de compósitos laminares e estruturais. É sabido que o comportamento mecânico/térmico das fibras melhora quando essas são submetidas a algum tratamento químico. Dessa forma, as fibras de bambu foram submetidas a tratamento alcalino (NaOH), em diferentes concentrações, a temperatura controlada (65°C -70°C). A seguir, as fibras foram lavadas, secas e submetidas a ensaios de tração para verificação das suas propriedades mecânicas (Elasticidade, Tensão de Escoamento e Tensão Máxima) e térmicas (Análise Termogravimétrica). As alterações superficiais e estruturais foram verificadas por Espectroscopias Vibracionais no Infravermelho, Difração de Raios-X e Microscopia Eletrônica de Varredura. Os resultados mostraram que as fibras após tratamento apresentaram o melhor conjunto de resultados: aumento da fração cristalina (110%); na estabilidade térmica (de 315^oC para 338^oC); no modulo de elasticidade (30%) e na tensão de ruptura (152%).

Palavras-chave: Bambu; Propriedades mecânicas; Propriedades térmicas.

STUDY OF THE THERMAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BAMBOO FIBRE BEFORE AND AFTER CHEMICAL TREATMENT

Abstract

The interest in environmentally correct technologies has become a major concern, motivated, among many things, by the growth of social and environmental awareness. In this context, vegetable fibers emerge as major candidates, as ecological and economical alternatives to replace synthetic fibers derived from non-renewable sources. The bamboo fibers are perfectly adequate for this trend: they are long, have high strength, ideal for paper manufacturing, food packaging and excellent candidates for enhancement of laminar and structural composites. It is known that the thermal/mechanical behavior is improved when these fibers are subjected to chemical treatment. Thus, the bamboo fibers were subjected to treatment with alkali solution (NaOH), at different concentrations, under controlled temperature (65 -70 °C). Then the fibers were washed, dried and subjected to tensile tests for verification of their mechanical (elasticity, tensile maximum, Ultimate Tensile Strength and tensile break) and thermal (Thermo gravimetric Analysis) properties. The surface and structural changes were observed by the infrared vibration spectroscopy (FT-IR), X-Ray Diffraction and Scanning Electron Microscopy (SEM). The results showed that the fibers after treatment showed the best overall results, increasing the crystalline fraction (110%), the thermal stability (from 315 °C to 338 °C), the modulus of elasticity (30%), and tensile strength (152 %).

Key words: Bamboo; Mechanical properties; Thermal properties.

¹ Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Químico. Pós Graduando. Universidade Federal do Ceará

³ Iniciação Científica. Química. Universidade Federal do Ceará

⁴ Eng. Civil. Pesquisador. Universidade Federal do Ceará

⁵ Química. Pesquisador. Universidade Federal do Ceará

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o interesse por tecnologias ecologicamente corretas tem se tornado uma grande preocupação, motivada, dentre vários aspectos, pelo crescimento da conscientização sócio-ambiental. Nesse aspecto, a possibilidade de exploração e utilização de fibras naturais como agentes de reforço em materiais compósitos (biocompósitos) têm sido investigada nos últimos anos, apontando para resultados encorajadores.⁽¹⁾ O interesse também se faz presente devido à suas características físicas, químicas, propriedades mecânicas como baixa densidade, flexibilidade, ser não abrasivo, viscoelástico.

1.1 Fibras de Bambu

As fibras de bambu Caracterizam-se por ter colmos segmentados e ocos, possui rápida velocidade de crescimento, a maioria cresce de 10 a 30 cm por dia. É um recurso abundante em muitos países da Ásia, Índia, América do Sul⁽²⁾ e têm sido utilizadas tradicionalmente para a construção de casas, pontes, utensílios domésticos.⁽³⁾ Nos últimos anos, o bambu tem se destacado no cenário internacional como uma alternativa sustentável em materiais de engenharia, suporte estrutural, sendo incorporado, e vem sendo toda a cadeia de produção.

As fibras de bambu são longas, têm alta resistência e, são consideradas ideais para a fabricação de papel, adequado para embalagens de alimentos, indústria farmacêutica e reforço para compósitos. Sua resistência mecânica é garantida por suas fibras, que representam cerca de 60% a 70% da massa total do caule. O bambu é considerado um recurso natural que leva menos tempo para ser renovado e não há espécies conhecidas que possam competir em termos de velocidade de crescimento e aproveitamento por área plantada. É um excelente seqüestrador de carbono podendo ser utilizado em reflorestamentos, vegetação ciliar, como ambiente de proteção e regeneração, além de matéria-prima em diversas aplicações.⁽⁴⁾

1.2 Tratamento Superficial das Fibras

Atualmente o tratamento alcalino é o método mais utilizado para modificar a superfície das fibras; o processo consiste na imersão do material em uma solução alcalina em diferentes concentrações, o que resulta no aumento da rugosidade superficial, maior exposição microfibrilar, remoção parcial da lignina externa e aumento da fração cristalina.⁽⁵⁾

1.3 Objetivo

O presente trabalho apresentará os resultados de um estudo detalhado realizado com fibras de bambu antes e após o tratamento químico, utilizando as técnicas de Análise Termogravimétrica (TG, DSC), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Difractometria de Raios-X, Espectroscopia Vibracional no (FTIR) e Ensaio Mecânico.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Coleta de Material

Para este estudo, as amostras de *Bambusa vulgaris*, com idade de 5 anos, foram coletadas de touceiras no Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará, no período entre 2009/2010.

2.2 Desfibramento e Trituração

Os internódios foram separados dos colmos, os quais foram seccionados transversalmente em pedacos de 10 cm e laminados em cavacos de cerca de 3 mm de espessura. O desfibramento e a trituração foram feitos em um moinho de facas semi-industrial tipo Willey Modelo Te-650, passado por peneiras de retenção de 35 mesh, 50 mesh, 60 mesh para serem usadas nas análises químicas.

2.3 Reagentes

As soluções utilizadas no tratamento superficial e branqueamento das fibras foram preparadas com NaOH (Vetec) e NaClO/H₂O, respectivamente.

2.4 Tratamento/branqueamento das Fibras de Bambu com NaOH

As fibras de bambu foram imersas em uma solução de NaOH nas concentrações de 5%, 10%, e 15% (p/v) em quantidades suficientes para intumescimento do material. O tratamento foi conduzido sob temperatura constante de 65°C, durante 4 horas, para remoção parcial de ligninas, hemicelulose, graxas e outros resíduos. Após esse período, as fibras foram lavadas sucessivas vezes com água destilada até pH=7. Em seguida, as fibras foram secas a temperatura ambiente e acondicionadas a pressão reduzida para evitar umidade. Após o tratamento prévio, as fibras foram imersas em solução de hipoclorito de sódio 1% sob temperatura constante de 65 °C por um período de uma hora. Após esse período, as fibras apresentaram um branqueamento diferenciado de acordo com a concentração de NaOH utilizada e lavadas com água destilada para remoção completa de NaClO da superfície. As fibras foram secas a temperatura ambiente e acondicionadas a pressão reduzida para evitar umidade.

3 RESULTADOS

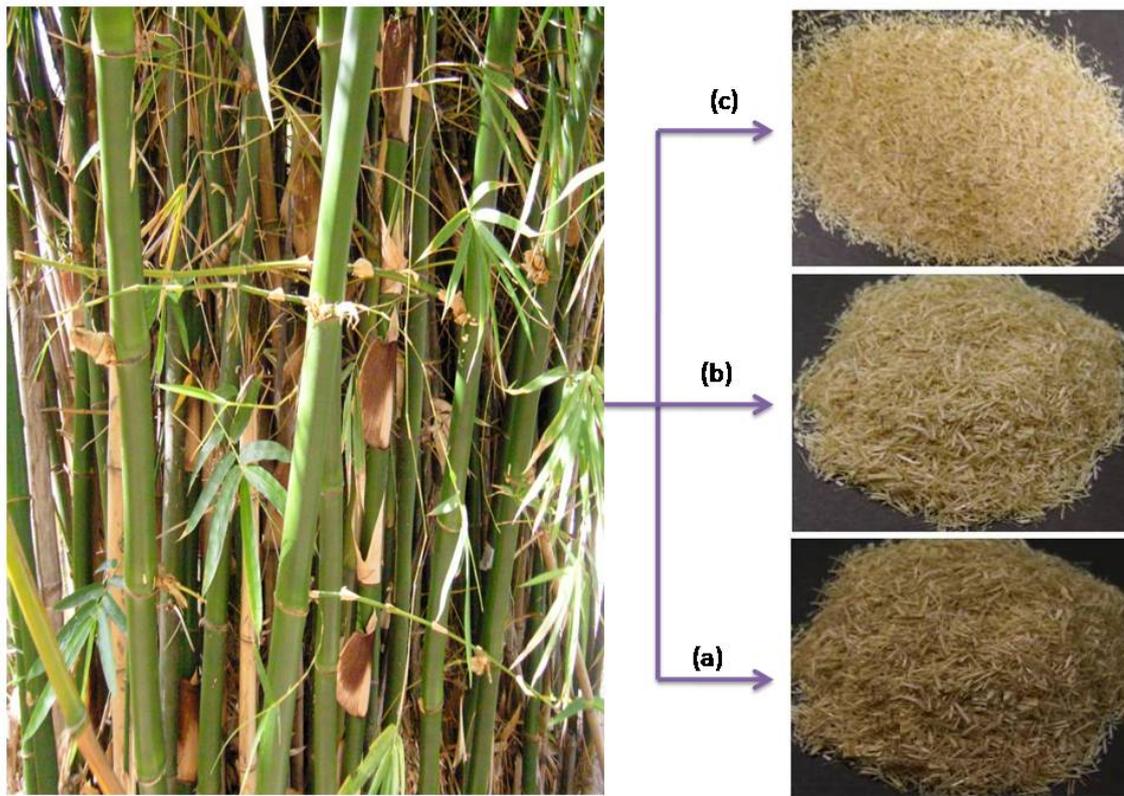


Figura 1 Branqueamento das fibra após tratamento químico: Fibra natural (a), Fibra tratada com NaOH 5% (b), Fibra tratada NaOH com 10% (c).

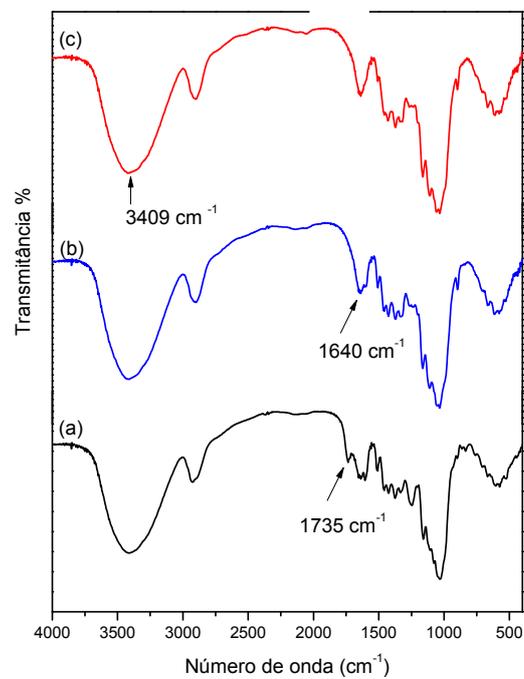


Figura 2– Espectro de infravermelho das fibras de bambu: estado natural (a), NaOH 5% (b) e NaOH 10% (c).

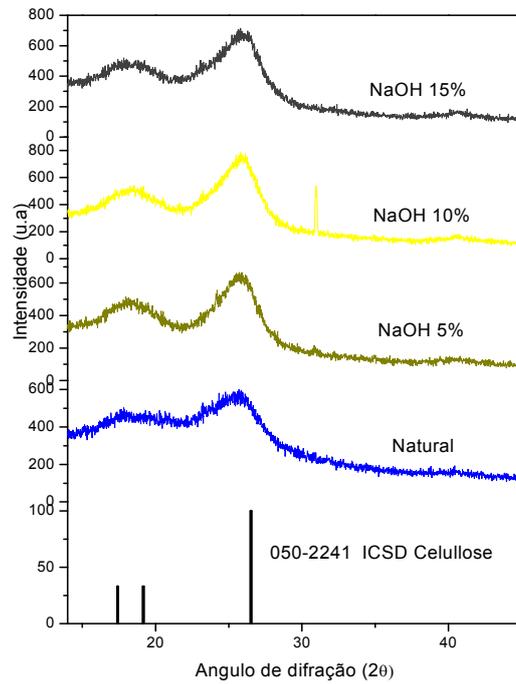


Figura 3 Difratomogramas de raios -X das fibras de bambu.

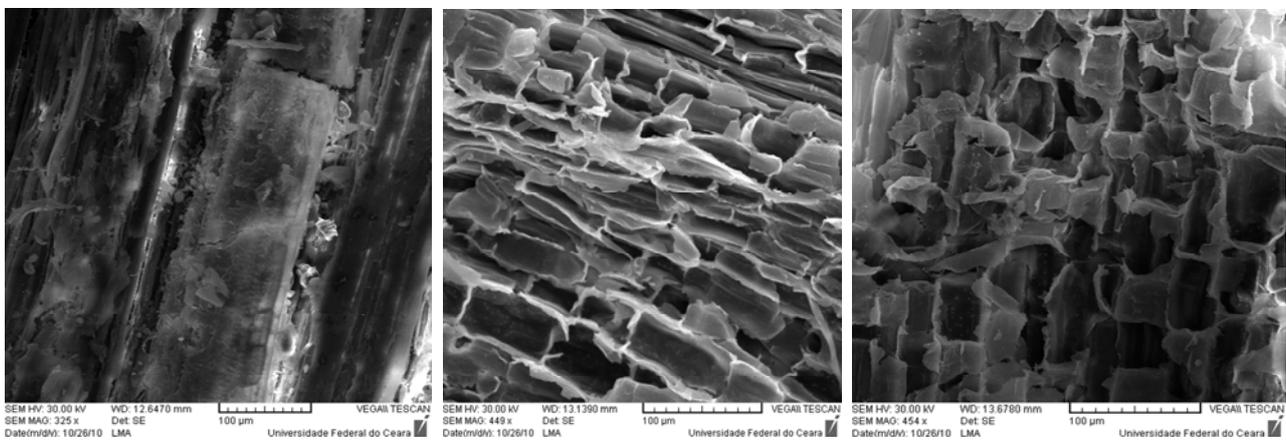


Figura 4 Microscopia eletrônica de varredura para as fibras de bambu (a) natural (b) tratados com NaOH 5%, e tratados com NaOH 10% (c).

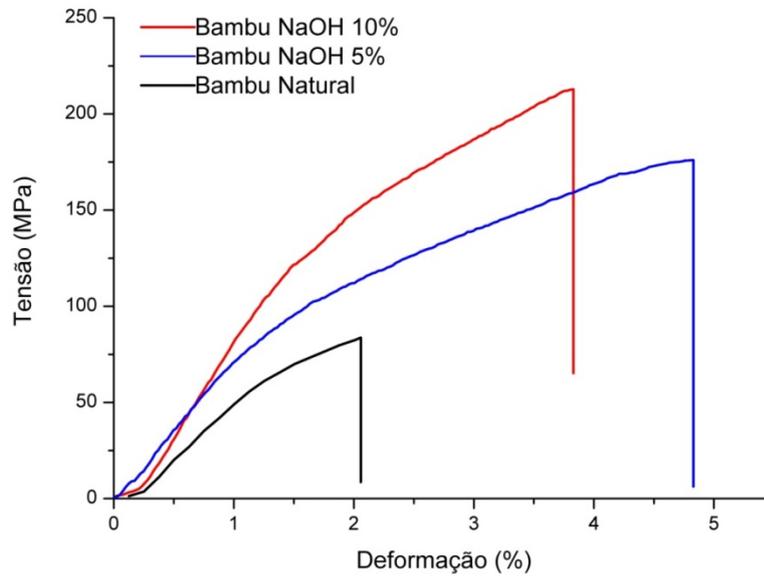


Figura 5 Perfis das curvas de resistência a tração versus deformação.

Tabela 1 Propriedades Mecânicas da fibra de bambu

Fibra	Tensão Máxima (Mpa)	Tensão Escoamento (Mpa)	Tensão Ruptura (Mpa)	Carga de Ruptura (N)	Deformação (%)	Modulo de Elasticidade (GPa)
Natural	84	79	84	164	2,05	4,1
NaOH 5%	174	140	174	250	4,82	4,6
NaOH 10%	212	177	212	358	3,98	5,3

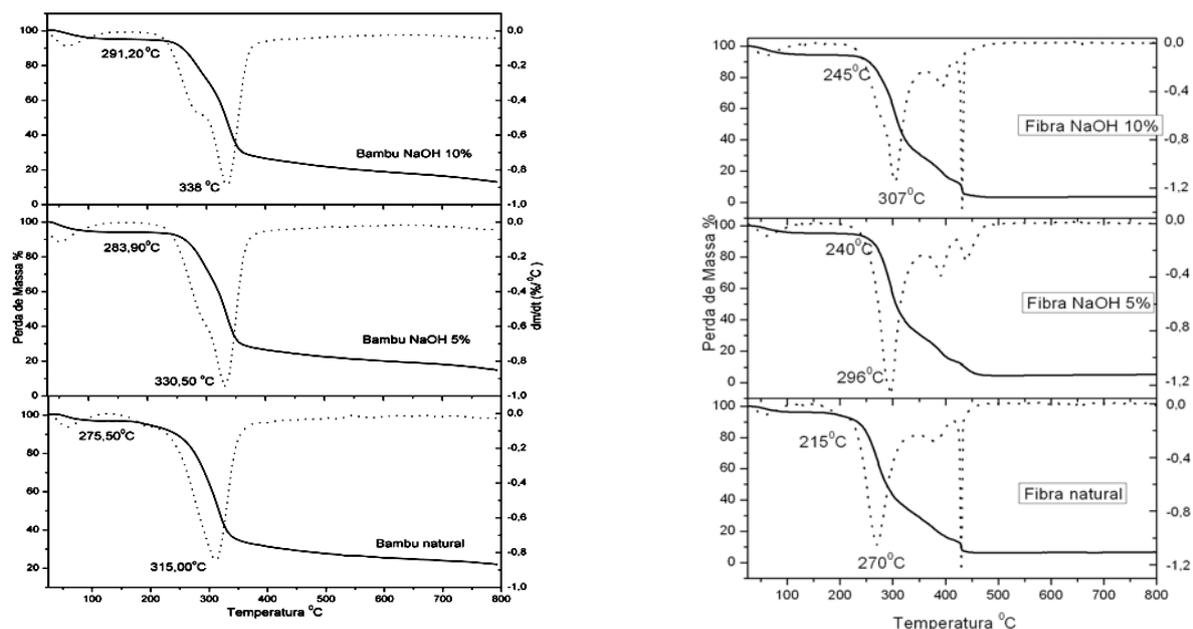


Figura 6 Análise Termogravimétrica TG/DTG de fibras de bambu antes e após o tratamento químico em atmosfera de N₂ e ar:

Tabela 2 Parâmetros térmicos obtidos das curvas TG / DTG para as fibras de bambu em atmosferas de N₂ e ar

Fibra	Atmosfera	Temperatura Máxima (°C)	Faixa de temperatura inicial (°C)	Perda de massa (%)	Resíduo (%)
Natural	N ₂	315	275-400	55	22
	Ar	270	215-350	66	6,22
NaOH 5%	N ₂	330	284-400	67	15
	Ar	296	240-350	64	4,7
NaOH 10%	N ₂	340	291-400	68	13
	Ar	307	245-350	62	3,5

4 DISCUSSÃO

A Figura 1 ilustra o comportamento das fibras de bambu antes e após o tratamento químico. O método para modificar superfície das fibras empregado neste trabalho foi o da alcalinização. O processo foi escolhido por apresentar excelentes resultados para outras fibras naturais, que tiveram suas propriedades físicas e mecânicas otimizadas após serem submetidas a tratamento alcalino.^(1,6) De acordo com a literatura,⁽⁷⁾ a modificação química remove parcialmente a hemicelulose, lignina, resíduos, graxas solúveis em meio alcalino, provocando uma diminuição no grau de agregação da microfibrilas, resultando em fibras mais resistentes.

Os espectros de infravermelho possibilitaram observar alterações na composição funcional das fibras de bambu antes e após tratamento químico (Figura 2). As posições das bandas e suas correspondentes atribuições funcionais estão de acordo com os valores da literatura para fibras lignocelulósicas. Nestes casos as de maior significância encontram-se entre 900 cm⁻¹ a 2.000 cm⁻¹, mais especificamente para a lignina, com uma banda entre 1.660 cm⁻¹ a 1.739 cm⁻¹,

frequência de deformação axial característica dos grupos C = O, que pode ser atribuído à presença de o éster carboxílico em pectina e cera.⁽⁸⁾

Na região espectral entre 1.054 cm⁻¹ a 1.635 cm⁻¹ característica de grupamento presentes na lignina (metoxil, C-O-C, C=C e aromáticos), foi observada uma leve alteração no espectro do bambu natural (Figura 2a), quando comparado com a fibra de bambu tratados com soluções de NaOH 5 e 10%, respectivamente (Figura 2b e 2c). Essa mudança nos espectros sugere que apesar do tratamento alcalino não remover completamente a lignina, causou alterações nos grupamentos presentes nas superfícies das fibras. Estes resultados coincidem com aqueles observados na difração de raios-X, aonde a área amorfa corresponde principalmente à presença destes componentes nas fibras. O desaparecimento do pico em torno de 1.268 cm⁻¹, que representa o estiramento dos grupamentos C-O presente na lignina, indica, provavelmente, a remoção parcial desse componente após o tratamento alcalino.⁽⁹⁾

Uma diferença significativa entre os espectros das fibras é a presença da banda em 1.735 cm⁻¹ para a fibra natural, característico do estiramento axial do grupo C=C presentes a hemicelulose, pectina e ceras. O desaparecimento dessa banda após o tratamento químico sugere a que esses componentes foram parcialmente removidos. Estudos realizados por Barreto et al.⁽¹⁾ impregnando com fibras de sisal, relatam a redução no sinal em 1.730 cm⁻¹ após o tratamento alcalino. Na mesma região espectral, Sgriccia, Hawley e Misr,⁽¹⁰⁾ observaram o desaparecimento do sinal, após o tratamento químico, justifica-se pela remoção de pectina, hemicelulose e ceras. Oujai e Shanks⁽¹¹⁾ também constataram que o desaparecimento do sinal em 1.733 cm⁻¹, atribuída à remoção dos constituintes das fibras após soluções alcalinas.

O sinal intenso em 3409 foi atribuído a vibração axial das hidroxilas dos carbonos 2, 3 e 6 da glucose da celulose,⁽⁸⁾ nessa região não se observou mudança com tratamento químico, o que é justificado e evidenciado nos difratograma de raios-X e TG/DTG.

Os padrões de difração de raios X das fibras de bambu tratadas com NaOH são mostrados na Figura 3. Os picos principais observados para todas as amostras apresentaram ângulos de difração 17,42°; 19,16° e 26,51°(2θ) correspondendo aos planos cristalográficos 101, 10 $\bar{1}$ e 002, característicos à fase cristalina da celulose.

Analisando os difratogramas foi possível observar o aumento nas intensidades relativas dos picos de difração das regiões características de celulose, em função do tratamento alcalino. Esse aumento está relacionado à maior exposição das estruturas de celulose, refletindo assim, no aumento da cristalinidade das fibras.

Os resultados se mostraram concordantes com as observações micrografias, em que o tratamento químico promoveu modificações nas superfícies das fibras pela remoção parcial de seus constituintes amorfos. A remoção de lignina, hemicelulose, resíduos e graxas (caracterizados por serem solúveis em soluções alcalinas), ocorreu através de reações de desprotonação das hidroxilas presentes em suas estrutura (unidades de fenil propano presentes na lignina), acarretando por consequência, na redução dos constituintes amorfos das fibras, o que contribuiu para o aumento da fração cristalina.

Observou-se que houve um aumento na fração de cristalinidade das fibras de bambu após o tratamento químico (até 10% de NaOH). Acima dessa concentração de hidróxido de sódio as intensidades dos picos da região cristalina começaram a se reduzir indicando assim, a quebra das cadeias das estruturas

lineares da celulose, reduzindo o grau de cristalinidade das fibras. Com base nesses resultados as demais análises foram realizadas com as fibras tratadas com NaOH nas concentrações 0, 5% e 10%.

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi obtido para análise das superfícies das fibras de bambu e de seus compósitos, antes e após o tratamento (Figura 4).

A Figura 4(a) ilustra o comportamento da superfície das fibras em seu estado natural, estas apresentam superfície recoberta com resíduos e ceras vegetais, estruturas microfibrilares sem cavidade e menos expostas ao contato com a matriz polimérica. As fibrilas mostram-se encobertas por uma camada de material denominado de cutícula, identificado como cera de origem alifática, de natureza incompatível com a maioria dos polímeros, o que dificulta a adesão entre o agente de reforço com a matriz. A Figura 4(b) mostra que as fibras, após o tratamento químico com NaOH 5%, revelou uma ligeira diferença devido à remoção parcial dos componentes não celulósicos como: ceras, pectina, hemicelulose, lignina etc. A Figura 4(c) ilustra uma modificação mais evidente da superfície da fibra após tratamento com NaOH 10%.

De acordo com as imagens apresentadas na Figura 4 foi observado que ambos os tratamentos com NaOH 5% e 10% produziram modificações similares nas fibras (aumento na rugosidade superficial, abertura de cavidade mediante a remoção parcial dos constituintes solúveis em álcali e maior afinidade entre matriz/reforço).

Ao contrário de outras fibras lignocelulósicas, o perfil das curvas do ensaio de tração da fibra de bambu (Figura 5) mostra regiões de escoamento com um comportamento plástico, característico dos materiais viscoelástico.⁽¹²⁾ Os resultados obtidos nestes testes mostraram-se compatíveis com os da literatura,⁽¹³⁾ após o tratamento químico, houve um aumento significativo nas propriedades mecânicas das fibras. Os resultados de DRX também reforçam o comportamento observado neste ensaio, onde foi observado um aumento da cristalinidade da fibra após o tratamento químico, gerando uma maior resistência do material devido à alta porcentagem de celulose.⁽¹⁴⁾ Entende-se, portanto, que as propriedades mecânicas de fibras estão relacionadas não apenas a composição química, mas também sua estrutura interna

De acordo com os dados da Tabela 1, verifica-se que a tensão máxima coincide com a tensão de ruptura para todas as condições das fibras estudadas, o que mostra que o material não sofre deformação elástica. Ainda de acordo com os dados da Tabela 1, pode ser perceber que houve um aumento nas propriedades mecânicas de fibras após o tratamento químico. Para a tensão de ruptura (carga aplicada por unidade de área no momento da ruptura) aumentou 107% e 152% para as fibras tratadas com NaOH 5% e 10%, respectivamente. Os resultados estão associados com teor de celulose de fibra de bambu (60%) e coincidem com os dados de DRX que mostra o aumento proporcional do grau de cristalinidade após o tratamento alcalino. Quanto ao módulo de elasticidade (tensão dividida pelo deformação, que mede a rigidez do material, como resultado das forças intermoleculares), os valores médios obtidos, considerando o conjunto de 10 fios ensaiados, mostraram que as fibras possuem maior elasticidade, foram aquelas submetidas ao tratamento com NaOH 10%. Para todas as amostras analisadas por termogravimétrica foram observadas uma progressiva perda de massa a uma temperatura inferior a 100°C associada à perda de água. Os termogramas de TG/DTG da decomposição dos componentes lignocelulósicos para as fibras de

bambu, antes e após o tratamento químico, sob atmosfera de nitrogênio mostraram somente um pico, para fibra natural e dois picos, para fibras tratadas com 5% e 10%.

Na faixa de temperaturas entre 100°C-400°C em atmosfera de N₂ observou-se uma perda de massa significativa, relacionada aos eventos principais de 64,90%, 67,38% e 67,95%, respectivamente, para as fibras de bambu tratado com NaOH nas concentrações de 0, 5% e 10%, correspondentes ao estágio de decomposição térmica dos macrocomponentes da fibra. Segundo a literatura, os componentes lignocelulósicos das fibras degradam-se em várias etapas. Hemicelulose entre 240°C-310°C, celulose entre 310°C-360°C e lignina em um intervalo de temperatura mais largo (200°C-550°C).⁽¹⁴⁾

Na Figura 6, observar-se ainda, que o tratamento químico melhorou a estabilidade térmica dos processos de perda de massa caracterizada pelo aumento nas temperaturas iniciais de degradação. Percebe-se um aumento da temperatura inicial de degradação (284,0°C e 291,0°C) nas amostras tratadas com NaOH 5% e 10%, respectivamente, quando comparadas com as fibras no seu estado natural (275,5°C).

Os termogramas de TG/DTG sob atmosferas de ar sintético da decomposição/degradação dos componentes lignocelulósicos para as fibras de bambu antes e após tratamento químico mostraram três eventos distintos (Figura 6). Em ambos os ambientes, o evento térmico principal é devido à variação na degradação dos componentes lignocelulósicos, já os outros dois eventos que ocorrem apenas sob atmosfera de ar sintético são devido à oxidação desses componentes. Entre 400°C-500°C sob atmosfera de ar sintético houve uma rápida perda de massa, devido à oxidação dos materiais residuais e formação de cinzas de 6,22%, 5,12% e 3,5%.

Não houve diferença significativa na temperatura inicial de degradação das fibras estudadas para as duas atmosferas (Tabela 2). A fibra de bambu tratada com NaOH 10% começou a se decompor em temperatura mais alta do que as fibras tratadas com NaOH 5% e natural. Apesar do aumento da concentração de álcali ter causado um pequeno acréscimo na temperatura inicial de degradação (275°C-291°C), nestas condições, houve também uma maior perda de massa, indicando que o tratamento químico foi o mais apropriado com NaOH 10%. Este resultado pode ser justificado se a degradação dos componentes amorfos das fibras forem relacionados à variação global da fração de cristalinidade,⁽¹¹⁾ as fibras de bambu tratadas com NaOH 10% apresentaram maior fração de cristalinidade, resultando em uma maior quantidade de processos de degradação de degradação da fase cristalina, justificando assim uma maior perda de massa.

5 CONCLUSÃO

O tratamento químico depende de diversas variáveis (concentração do reagente, temperatura e tempo) e que os resultados influenciam diretamente as propriedades térmicas e mecânicas das fibras. Os DRX mostram que o tratamento químico aumenta a fração cristalina devido à remoção parcial dos componentes amorfos (hemicelulose, lignina e ceras). As análises de FT-IR e TG/DTG foram importantes para observar a ausência dos grupos funcionais principais bem como as suas variações ocorridas após o tratamento químico. O teste de tração mostrou um aumento significativo nas propriedades mecânicas após a remoção parcial dos macrocomponentes da fibra.

Além disso, a morfologia das fibras observadas por MEV constatou que o tratamento químico causa uma maior exposição das estruturas de celulose, como verificado pela separação das fibrilas e aumento da área superficial. Esta modificação é importante uma vez que resulta em materiais mais e resistente à decomposição térmica e as tensão mecânicas.

Agradecimentos

Ao CNPq, Capes e Universidade Federal do Ceará.

REFERÊNCIAS

- 1 BARRETO, A. C. H.; ESMERALDO, M. A.; ROSA, D. S.; FECHINE, P. B.; MAZZETTO, S. E. Cardanol biocomposites reinforced with juta fiber: microstructure, biodegradability, and mechanical properties. *Polymers Composites*, 2010; 31 (11): 1928-1937.
- 2 SCURLOCK, J.M.O.; DAYTON, D.C.; HAMES, B. Bamboo: an overlooked biomass resource. *Biomass Bioenergy*, (19) 2000; 229-235.
- 3 SHIN, F. G.; YIPP, M. W. Analysis of the mechanical properties and microstructure of bamboo-epoxy composites. *J Mater Sci.* (1989) 3483:24.
- 4 JARAMILLO, J. C. La guadua en los grandes proyectos de inversión. In: *Congresso Mundial de Bambu/Guadua*. Colômbia: Pereira. Anais, 1992.
- 5 MALDAS, D.; SHIAISHI, N.; HARADA, Y.; ADHES, J. Dimensional stability of several wood species treated with vinyl monomers and polyethylene glycol-1000. *Sci. Technology*, v.11 (3), 305-316.1997.
- 6 BRÍGIDA, A. I. S.; CALADO, V. M. A.; GONÇALVES, L. R. B.; COELHO, M. A. Z. Effect of chemical treatments on properties of green coconut fiber. *Carbohydr. Polym.* 2010, 79, 832-838.
- 7 ROUT, J., TRIPATHY, S. S., NAYAK, S.K., MISRA, M., MOHANTY, A.K.,. Scanning electron microscopy study of chemically modified coir fibers. *J. Appl. Polym. Sci.* 2000, 79, 1169–1177.
- 8 WANG, Q.; FAN, X. R.; GAO, W. D. Characterization of bioscoured cotton fabrics using FT-IR ATR spectroscopy and microscopy techniques. *Carbohydrate*, 2006 Res. 341, 2170–2175
- 9 PENDEY, K. K.; PITMAN, A.J.; Examination of the lignin content in a softwood and a hardwood decayed by a brown-rot fungus with the Acetyl Bromide Method and Fourier Transform Infrared Spectroscopy. *J. Polymer. Sci. Part A Polymer*, 2004. 42, 2340–2346.
- 10 SGRICCIA, N.; HAWLEY, M.C.; MISR, M. Characterization of natural fiber surfaces and natural fiber composites. *Composites Part A*: 2008; 39 (10) 1632-1637.
- 11 OUAJAI, S.; SHANKS, R. A. Composition structure and thermal degradation of hemp cellulose after chemistry treatments. *Polymer degradation and Stability*, 2005; 89: 327-335.
- 12 CORRÊIA, C. A. Caracterização Mecânica: tração e impacto. São Carlos: Associação Brasileira de polímero – ABPOL. 200, 65p
- 13 HULL, D. *Composites materials*. Cambridge University Press, 37-42, New York, 2002.
- 14 YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D.; ZHENG, C. Characteristic of Hemicellulose, cellulose and Lignin Pyrolysis. *Fuel*, 2007; 86: 1781-1788.