



ENSAIOS DE *PULLOUT* EM FIBRAS DE BURITI INCORPORADAS EM MATRIZ EPÓXI¹

Anderson de Paula Barbosa²
Felipe Perissé Duarte Lopes³
Núbia Suely Silva Santos⁴
Sergio Neves Monteiro⁵

Resumo

A interface entre a matriz e o reforço de fibras desempenha um papel importante na eficiência com que uma carga aplicada é transmitida através da matriz de um compósito. Neste trabalho uma avaliação foi realizada da tensão interfacial de cisalhamento da fibra de buriti em resina epóxi. A partir dos ensaios conhecidos como pullout de fibras de buriti embutidas em cápsulas de epóxi obteve-se o comprimento crítico, a tensão interfacial e analisou-se por microscopia eletrônica de varredura regiões das fibras que romperam ou sofreram escorregamento ao serem extraídas da resina. Os resultados revelaram uma tensão de cisalhamento interfacial similar a de outras fibras lignocelulósicas e mostraram também uma razoável adesão interfacial decorrente da natureza heterogênea das fibras de buriti, o que facilita a impregnação pela resina. Um pequeno comprimento crítico foi encontrado para a fibra de buriti incorporado em epóxi, desta forma pode-se avaliar a resistência interfacial entre a fibra natural e a matriz epóxi.

Palavras-chave: Ensaio de *pullout*; Fibras de buriti; Matriz epóxica; Resistência interfacial; Comprimento crítico.

PULLOUT TESTS IN BURITI INCORPORATED IN FIBER EPOXY MATRIX

Abstract

The interface between the matrix and fiber reinforcement plays an important role in the efficiency with which a load is transmitted through the composite matrix. In this work, an assessment was performed of the interfacial shear strength of the contact area buriti fiber in epoxy resin. From pullout tests of buriti fibers embedded in epoxy resin capsules, the critical length and the interfacial strength were found and regions where the fibers have broken down or suffered slip from the resin were analyzed by scanning electron microscopy. The results showed an interfacial shear strength similar to other lignocellulosic fibers and also revealed a reasonable interfacial adhesion due to the heterogeneous nature of buriti fibers, which facilitates the resin impregnation. A small critical length was found for the fiber embedded in epoxy buriti. In this way it was possible to evaluate the interfacial strength between the natural fiber and epoxy matrix.

Keywords: Pullout test, buriti fibers, epoxy composite, Interconnection strength, critical length.

¹ Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

² Doutorando, Universidade Estadual do Norte Fluminense, CCT/UENF, Av. Alberto Lamego, 2000, 28015-620, Campos dos Goytacazes, RJ – Brasil. apbarbosa@yahoo.com.br

³ Mestrando, LAMAV – CCT/UENF.

⁴ DS.c, Departamento de Engenharia Mecânica, UNICAMP.

⁵ PhD, Professor Titular, LAMAV – CCT/UENF.

1 INTRODUÇÃO

Compósitos reforçados com fibras longas e alinhadas são aqueles que apresentam o melhor desempenho mecânico comparativamente aos outros tipos de compósitos.⁽¹⁻⁴⁾ A avaliação para caracterizar se uma fibra pode ser considerada longa como reforço de uma dada matriz baseia-se no conceito de comprimento crítico. Abaixo de um valor mínimo, ou seja, o crítico, a fibra não agiria como efetivo reforço na matriz do compósito. Neste caso, não ocorreria uma eficiente transmissão de carga aplicada na matriz para a fibra. Baseado neste conceito, foi proposto^(5,6) um ensaio de arrancamento individual de fibra, conhecido pela sua denominação inglesa de *pullout*, para determinar o comprimento crítico desta fibra relativamente a uma determinada matriz. As características deste ensaio e a complexidade associada à sua interpretação foram apresentadas em outra publicação.⁽⁷⁾ Apesar das dificuldades inerentes ao ensaio de *pullout*, este tipo de teste vem sendo utilizado para se determinar o comprimento crítico tanto de fibras sintéticas⁽⁸⁻⁹⁾ quanto de fibras naturais.⁽¹⁰⁻¹³⁾ Além disso, através do comprimento crítico, obtido no ensaio de *pullout*, é possível avaliar também a tensão cisalhante interfacial, τ_c , que mede a resistência na interface fibra/matriz:⁽⁴⁾

$$\tau_c = \frac{d\sigma_f}{2\ell_c} \quad [1]$$

onde d é o diâmetro da fibra e σ_f sua resistência à tração.

Uma fibra lignocelulósica que recentemente vem sendo investigada⁽¹⁴⁻¹⁶⁾ por apresentar resistência mecânica compatível com seu uso em reforço de compósitos e aquela extraída do pecíolo da palmeira de buriti (*Mauritia flexuosa*).

Embora possua potencial para ser utilizada como reforço de compósitos a fibra de buriti ainda não foi avaliada quanto sua resistência interfacial em matrizes poliméricas. Assim o presente trabalho realizou uma análise preliminar do desempenho desta fibra em matriz epoxídica por meio de ensaios de *pullout*.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As fibras de buriti utilizados neste trabalho foram extraídas de pecíolos da palmeira e cedidas por um dos autores, Núbia S. S. Santos como um lote vindo diretamente do Estado do Pará. A Figura 1 ilustra o aspecto das fibras de buriti utilizadas nesta investigação.



Figura 1. (a) Palmeira buriti, (b) pecíolos e (c) fibras extraídas.

Do lote como recebido, foram extraídas 100 fibras para uma análise dimensional como mostrado no histograma da Figura 2. Esta análise permitiu calcular um diâmetro médio de 0,7 mm. As medidas do diâmetro foram feitas em um projetor de perfil modelo 6C, do LAMAV/UENF. Estas medidas foram realizadas em 5 posições ao longo da fibra, girando 90° e obtendo outras duas medidas, conforme descrito em outras publicações.^(12,17)

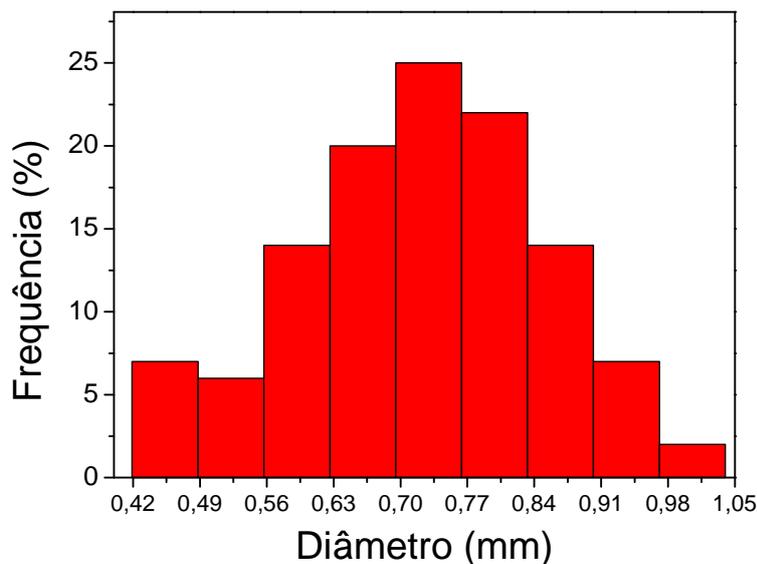


Figura 2. Histograma de distribuição do diâmetro das fibras de buriti.

Para os ensaios de *pullout*, as fibras foram encapsuladas com diferentes comprimentos embutidos, 3 mm, 5 mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm e 40 mm, em matriz epoxídica, conforme esquematicamente mostrado na Figura 3. A cápsula polimérica mostrada nesta figura foi confeccionada em resina epóxi comercial com denominação química éter diglicidílico do bisfenol A (DGEBA) endurecida com trietileno tetramina (TETA) na proporção estequiométrica de 13 partes de TETA para 100 partes de DGEBA ou, em inglês *parts per hundred of resin*, phr 13.

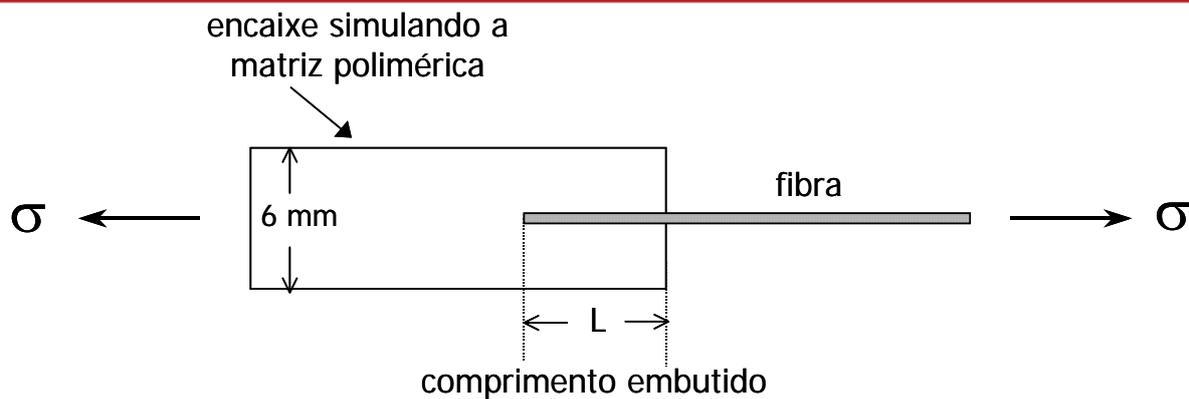


Figura 3. Esquema do corpo de prova do ensaio de *pullout*.

Os ensaios de pullout, nos quais cada corpo de prova (Figura 3), é tracionado por garras especiais prendendo ambas as extremidades, a da fibra e a oposta da cápsula, foram conduzidos em uma máquina Instron modelo 5582, disponível no LAMAV/UENF. A pressão nas garras foi ajustada para permitir que tanto a fibra quanto a cápsula de epóxi fossem firmemente apertadas sem escorregarem para fora da garra mas também sem serem danificadas pelo aperto.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 ilustra o aspecto típico da força de tração versus alongamento para cada comprimento embutido de (L). As curvas desta figura correspondem a exemplos correspondentes aos comprimentos (L) de fibra dentro da resina. Com relação a esta figura o gráfico com $L = 3\text{mm}$ apresenta curva de valor menor e serrilhada caracterizando uma retirada gradual da fibra na matriz polimérica sem ruptura. Para os outros comprimentos de L (5 mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm e 40 mm), pequenas oscilações são observadas porem não se pode associar estas curvas a um processo de arrancamento da fibra. Estas oscilações são, aparentemente causadas pela ruptura seqüencial dos filamentos que compõem as fibras de buriti⁽¹⁴⁻¹⁶⁾ até a fratura final.

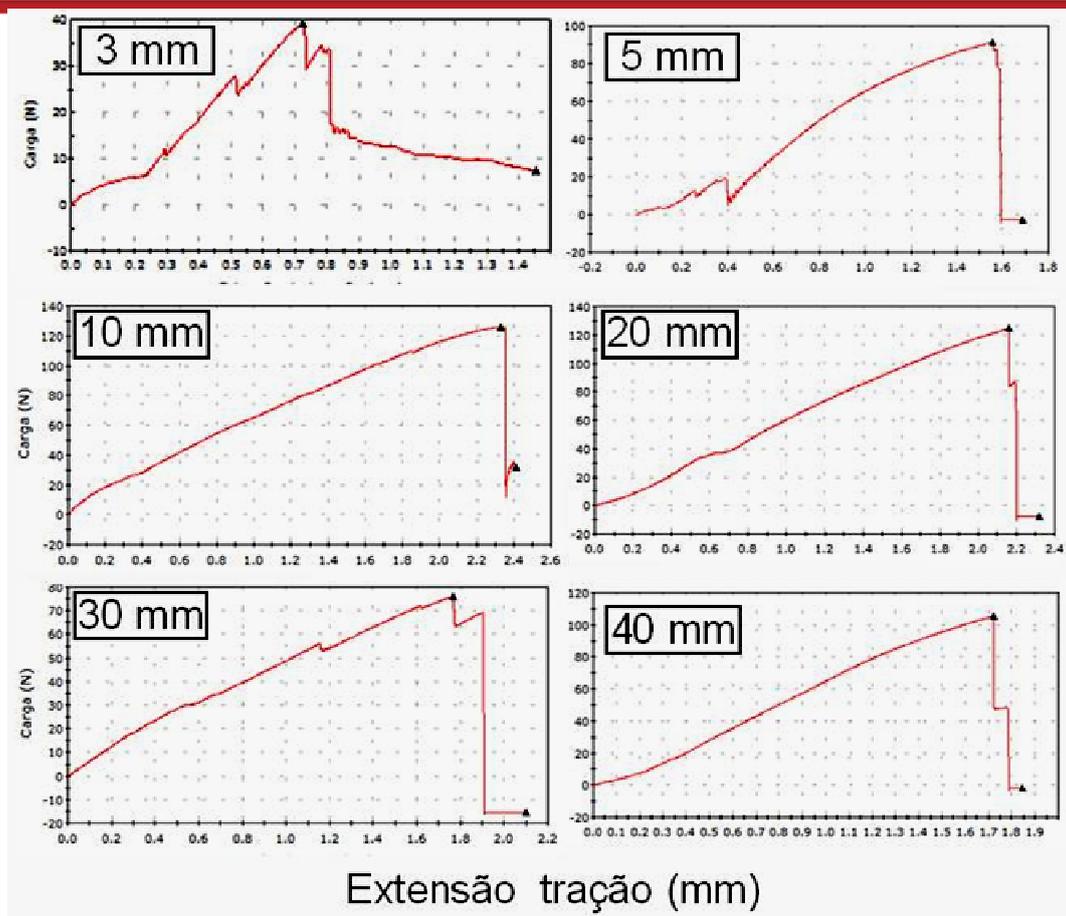


Figura 4: Curvas de *pullout* para fibras de buriti.

Com base nos resultados de curvas como as da Fig. 4, a tensão máxima atingida em cada ensaio foi calculada dividindo a força máxima pela área da seção transversal da fibra ou por $(\pi d L)$, no caso da fibra escorregar. A Tabela 1 mostra a média da tensão com os respectivos desvios padrão para cada comprimento L.

Tabela 1. Tensão média e desvio padrão para fibras de buriti

L (mm)	Tensão Média e Desvio Padrão (MPa)
3	12,55 ± 7,53
5	111,07 ± 66,32
10	151,21 ± 79,42
20	180,37 ± 58,11
30	201,72 ± 82,92
40	174,09 ± 58,38

A Figura 5 apresenta um gráfico de tensão trativa versus comprimento embutido (L) para fibras de buriti embutidas em resina epóxi de acordo com o procedimento mostrado na Figura 3.^(7,8) Além da tensão máxima e da barra de erro respectivo. Para cada valor de L, a Fig 5 também apresenta duas linhas tracejadas horizontais. As linhas correspondem ao intervalo de resistência à tração de 125 MPa – 230 MPa pouco abaixo do relatado para fibras de buriti tratadas com irradiação de feixes de elétrons a 50 kGy (175 MPa – 275 MPa).⁽¹⁷⁾

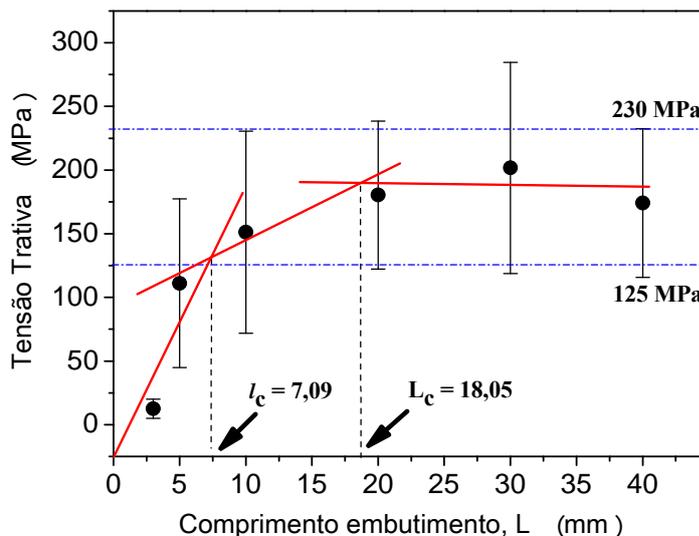


Figura 5: Tensão trativa e comprimento de embutimento para curvas de *pullout* em fibras de buriti.

Na Figs 5, deve-se notar que, para os maiores valores de L , dentro das barras de erro, a resistência fica próxima do intervalo observado para a resistência à tração de fibras de buriti.⁽⁹⁾ Isso já era esperado uma vez que comprimentos maiores incorporado não permite que a fibra deslize para fora da cápsula. Portanto, o teste de arrancamento torna-se um simples teste de tração para a fibra. Conseqüentemente, uma linha horizontal contínua reta foi traçada através dos pontos correspondentes aos valores de L acima de 10 mm.

Para os outros pontos mais inclinados, a reta foi ajustada até o valor de $L = 10$ mm. Finalmente, uma outra linha reta passando pela origem, foi ajustado para os dois menores valores de L . A interseção das duas últimas retas ocorre para o valor de $L_c = 7,09$ mm, que seria o comprimento crítico limite para livre desacoplamento proposto neste trabalho. Pode-se também imaginar um valor $L_c = 18,05$ mm do comprimento a partir do qual não ocorre mais desacoplamento da fibra em relação à matriz.^(6-8,15)

O procedimento aplicado para a construção das diferentes fases linha reta na fig 5 foi usado anteriormente para obtenção de curvas distintas para retirada de piaçava / poliéster / coco / epóxi e curauá / poliéster.^(6-8,15) A lógica subjacente ao processo de interpretação da curva de pullout foi discutido em outras publicações.^(6-8,15)

Utilizando-se o valor do comprimento crítico $L_c = 7,09$ mm na equação (1), juntamente com o diametro médio de 0,7 mm e a média da resistência a tração de 175,5 MPa, obteve-se a tensão interfacial de cisalhamento $\tau_c = 8,7$ MPa.

Os resultados de arrancamento foram complementados com observações em MEV. A Figura 6 mostra a superfície de uma fibra que foi extraída da cápsula por deslizamento sem ruptura. Com maior ampliação (Figura 6a), observa-se uma camada de resina de epóxi, que é aderida à superfície da fibra. Com maiores ampliações (Figura 6 b), a região da epóxi onde anteriormente a fibra estava inserida e foi arrancada existe um buraco e nas paredes deste buraco de resina ha uma interface com resto de fibra aderida. A resina expõe a fibra e revela a boa adesão na fibra na matrix epóxi. Isso justifica o valor da tensão média na Tabela 1.

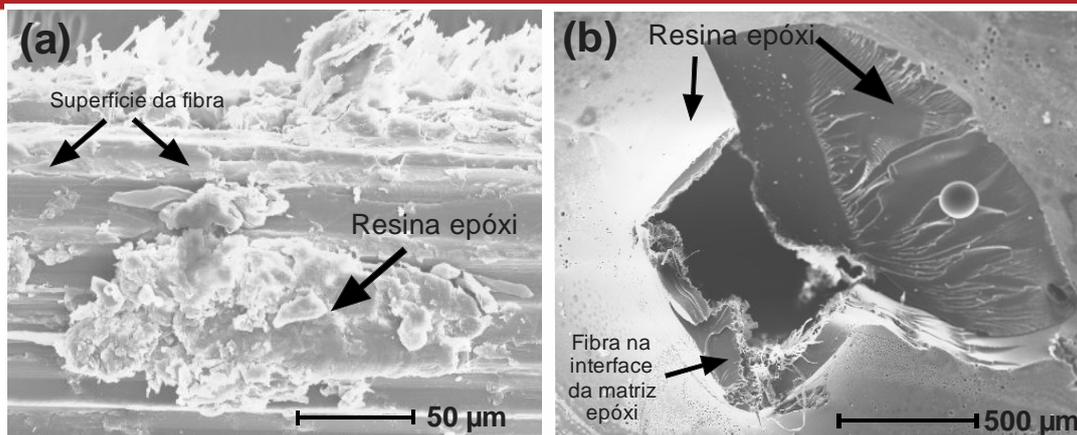


Figura 6: (a) Superfície de uma fibra buriti, que foi separada da cápsula por deslizamento, sem ruptura, (b) matriz epóxi mostrando a interface fibra matriz.

Como observação final, é relevante mencionar que os testes de arrancamento de fibras de buriti embutidas em resina epóxi apresentaram resistência da interface relativamente alta. No entanto, o presente trabalho é ainda uma investigação preliminar que inclui um valor limitado de L embutido e pequeno número de amostras correspondentes. Propõe-se a ampliar os pontos da curva de arrancamento (Figura 5), para melhorar a análise estatística, como determinada em outros trabalhos.^(7,8,15)

4 CONCLUSÕES

- Testes de *Pullout*, nos corpos compostos de fibras de buriti em cápsulas epóxi com diferentes comprimentos embutidos de 3 mm a 40 mm, permitiram uma correlação com a tensão máxima ser estabelecida através de uma curva de *pullout*.
- A partir da curva de *Pullout*, foi observado um comprimento crítico $l_c = 7,09$ milímetros e uma tensão de cisalhamento da interface de $\tau_c = 8,7$ MPa obtidos com base em procedimento específico.
- Observações da superfície das fibras que foram arrancadas da resina sem ruptura confirmam a boa aderência fibra matriz, associado a uma resistência interfacial relativamente alta.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do CNPq, CAPES e FAPERJ.

REFERENCIAS

- 1 AGARWAL, B.D., BROUTMAN, L.J., *Analysis and Performance of Fiber Composites*, Nova York, John Wiley & Sons, 1990.
- 2 ASHBEE, K.H.G., *Fundamental Principles of Fiber Reinforced Composites*, Lancaster, Technomic Pub. Co. Inc., 1993.
- 3 CHAWLA K. K., *Composite Materials*, Nova York, Springer – Verlag, 1993.
- 4 HULL, D., CLYNE T.W., *An Introduction to Composite Materials*, Cambridge, Cambridge Univers. Press, 1981.
- 5 KELLY, A., TYSON, W.R., *High Strength Materials*, Nova York, Wiley, 1965.
- 6 KELLY, A., *Strong Solids*, Londres, University Press, 1966.
- 7 MONTEIRO, S. N., D' ALMEIDA, J. R. M., "Ensaio de pullout em fibras lignocelulosicas – uma metodologia de análise". *Revista Matéria* v. 11 (3), p.189 – 196, 2006.



- 8 YUE, C.Y., LOOI, H.C., QUEK, M.Y., "Assesment of Fibre-Matrix Adhesion and Interfacial Properties Using the Pullout Test", *International Journal Adhesion and Adhesives*, v. 15, pp. 73-80, 1995.
- 9 YUE, C.Y., CHEUNG, W.L., "Interfacial Properties of Fibrous Composites: Part I. Model for the Debonding and Pullout Processes", *Journal of Materials Science*, v. 27, pp. 3173-3180, 19.
- 10 AQUINO, R.C.M.P., MONTEIRO, S.N., D'ALMEIDA, J.R.M., "Evaluation of the Critical Fiber Length of Piassava (*Attalea funifera*) Fibers using the Pullout Test", *Journal of Materials Science Letters*, v. 22, pp. 1495-1497, 2003.
- 11 MONTEIRO, S.N., D'ALMEIDA, J.R.M., DE DEUS, J.F., "Ensaio de Pullout para Avaliar o Tamanho Crítico de Fibras Naturais", In: *60º Congresso Anual da ABM*, pp.1-10, Belo Horizonte, Brasil, Jul. 2005.
- 12 MONTEIRO, S. N. AQUINO, R.C.M.P., LOPES, F. P. D. "Performace of curaua fiber in pullout tests". *J. Master Sci*, v. 43, p. 489-493, 2008.
- 13 MONTEIRO, S. N. INACIO, W. P., LOPES, F. P. D. "Caracterização of the critical length of sisal for polyester composite reinforcement". *Anais do Mineral, Metals & Materials Simposium – TMS conference*, San Francisco, EUA, p 1-8.
- 14 MONTEIRO, S.N.; LOPES, F.P.D.; MOTTA, L.C.; MARQUES, L.S.; PORTELA, T.G.R. "Statistical analysis to characterize the uniformity of mechanical properties of buriti fibers". *Proceedings of the Characterization of Mineral, Metals & Materials, TMS 2009*, (San Francisco, CA, USA, March 2009) 1-8.
- 15 PORTELA, T.G.R.; LOPES, F.P.D.; LOIOLA, R.L.; MONTEIRO, S.N.; CARVALHO, E.A. Avaliação da influência do diâmetro na resistência à tração das fibras de buriti pelo método de Weibull. In: *64º Congresso Anual da ABM*. Belo Horizonte, MG, Brasil, p.1-10. Julho 2009.
- 16 PORTELA, T.G.R., COSTA, L.L., LOPES F.P.D., MONTEIRO, S.N., "Characterization of fibers from different parts of the buriti palm tree", In: *Proceedings of the TMS – Conference, Characterization of Minerals Metals & Materials Symposium*, pp. 1-7, Seattle, USA, March 2010.
- 17 BARBOSA, A. P., COSTA, L. L., PORTELA, T. G. R., MOURA, E. A., DEL MASTRO, N., SATYANARAYANA, K. G., MONTEIRO, S. N. Effect of electron beam irradiation on the mechanical properties of buriti fiber. *Simpósio Matéria 2010*, Rio de Janeiro RJ.