

DISTRIBUIÇÃO WEIBULL COMO INSTRUMENTO DE ANÁLISE ESTATÍSTICA DE ENSAIO DE TRAÇÃO EM FIBRAS DE COCO¹

*Helvio Pessanha Guimarães Santafé Junior*²

*Sergio Neves Monteiro*³

*Lucas Lopes da Costa*⁴

*Felipe Perissé Duarte Lopes*⁴

*Eduardo Atem de Carvalho*⁵

Resumo

Vantagens econômicas, técnicas e ambientais justificam a substituição da fibra de vidro por fibras lignocelulósicas em compósitos poliméricos. Entretanto, contrastando com a uniformidade das fibras de vidro, as fibras lignocelulósicas são dimensionalmente heterogêneas, com grande dispersão em seus valores de diâmetro. Esta variabilidade no diâmetro pode ser correlacionada com diferentes níveis de resistência mecânica. Neste trabalho, realizou-se uma análise estatística da resistência à tração das fibras de coco utilizando-se a metodologia de Weibull. Através desta análise relacionou-se a resistência ao diâmetro obtido em projetor de perfil. Os resultados revelaram uma aparente dependência inversa entre o diâmetro da fibra e a sua resistência a tração. Observações da superfície de fratura das fibras sugerem possíveis mecanismos responsáveis por essa correlação.

Palavras-chave: Fibras de coco; Estatística de Weibull; Ensaio de tração; Influência do diâmetro na resistência.

WEIBULL DISTRIBUTION AS AN INSTRUMENT OF STATISTICAL ANALYSIS FOR COIR FIBER TENSILE TEST

Abstract

Economical, technical and environmental advantages justify the substitution of lignocellulosic fibers for glass fiber in polymeric composites. However, by contrast to the glass fiber uniformity, the lignocellulosic fibers are heterogeneous in their diameter values. This variability can be correlated to different levels of mechanical resistance. In this work, a statistical analysis of the tensile strength of coir fiber using the Weibull methodology was performed. An attempt to correlate the strength with the diameter, obtained by profile projector measurements, was carried out. The results revealed an inverse dependence between the coir fiber diameter and its tensile strength. Fracture surface observations suggested possible mechanisms that could be responsible for this correlation.

Key words: Coir fiber; Weibull statistic; Tensile test; Diameter influence on the strength.

¹ *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *M.Sc., Doutorando, LAMAV – CCT/UENF. Laboratório de Materiais Avançados – LAMAV, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, CCT/UENF, Av. Alberto Lamego, 2000, 28015-620, Campos dos Goytacazes, RJ – Brasil. santafejr@uenf.br*

³ *PhD, Professor Titular, LAMAV – CCT/UENF.*

⁴ *Graduando, LAMAV – CCT/UENF*

⁵ *PhD, Professor Associado, LAMAV – CCT/UENF*

1 INTRODUÇÃO

Fibras naturais obtidas de parte de vegetais com teores relativamente elevados de celulose, conhecidas como fibras lignocelulósicas, despertam interesse crescente como possíveis substitutos de fibras sintéticas, particularmente da fibra de vidro, em compósitos poliméricos.⁽¹⁻⁵⁾ Este interesse baseia-se em vantagens relacionadas ao baixo custo e algumas características técnicas como, boa tenacidade e menor desgaste de equipamentos usados no processamento dos compósitos. Além disto, as fibras lignocelulósicas são materiais reconhecidos como ambientalmente corretos por serem renováveis, biodegradáveis e neutros em relação à emissão de CO₂, o maior responsável pelo aquecimento global.^(3,5)

Por outro lado, as fibras lignocelulósicas apresentam sérias desvantagens em relação às fibras sintéticas tais como dificuldade de acoplamento com matrizes poliméricas e heterogeneidades dimensionais.^(4,5) O acoplamento entre a fibra hidrofílica em um polímero hidrofóbico pode ser melhorado através do tratamento superficial da fibra.^(6,7) Heterogeneidades dimensionais, entretanto, são próprias da natureza das fibras lignocelulósicas e cada uma possui comprimento e diâmetro médios característicos. Mais ainda, enquanto as fibras sintéticas podem ser produzidas com dimensões precisas, as fibras naturais apresentam grande dispersão em seus valores dimensionais.⁽⁵⁾ Isto se constitui em uma grande limitação para o uso de fibras lignocelulósicas contínuas como reforço de compósitos. Na maioria das vezes, a fibra é previamente picada, isto é, tem seu comprimento cortado para então ser misturada e automaticamente injetada juntamente com o polímero da matriz. Comprimento curto e distribuição aleatória da fibra na matriz, no entanto, reduzem a capacidade de reforço como indicam as equações da Regra das Misturas para compósitos.⁽⁸⁾

Uma seleção dimensional dentro de um lote permite ter-se não só fibras longas em relação ao comprimento crítico como também pouca dispersão de tamanho.⁽⁹⁾ Mais importante ainda, existem evidências recentes em fibras de curauá⁽⁹⁾ e buriti⁽¹⁰⁾ de que a resistência mecânica das fibras lignocelulósicas varia com a dimensão das mesmas. Isto implica que em um lote destas fibras obtidas diretamente da natureza, não só existe grande dispersão dimensional, mas também dispersão na resistência. Conseqüentemente, com a seleção dimensional pode-se escolher fibras mais resistentes e com menor dispersão em suas propriedades mecânicas.

A fibra lignocelulósica extraída da casca do coco, ou seja, do fruto do coqueiro (*Cocos nucifera*) vem sendo incorporada em compósitos poliméricos para fabricação de componentes industriais, sobretudo na indústria automobilística, como painéis e estofamentos de veículos⁽¹¹⁾ Investigações sobre o efeito da incorporação de fibras de coco contínuas e alinhadas na resistência mecânica de compósitos poliméricos,⁽¹²⁻¹⁶⁾ não mostraram reforço tanto para ensaios quase estáticos de flexão⁽¹²⁻¹⁴⁾ quanto para ensaios dinâmicos de DMA.⁽¹⁶⁾ Isto pode ser atribuído à heterogeneidade no comportamento mecânico dessas fibras.

Tendo em vista essas características acima mencionadas, o objetivo do presente trabalho foi realizar uma análise estatística da uniformidade na resistência à tração das fibras de coco utilizando a distribuição Weibull em função dos parâmetros dimensionais em diferentes classes de diâmetros dessas fibras.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A análise estatística foi realizada em mais de 200 fibras de coco retiradas aleatoriamente de um lote com 5 kg cedido pela empresa Coco Verde Reciclado. Em trabalho anterior⁽¹⁵⁾ foi determinada a distribuição de diâmetros de 100 outras fibras do mesmo lote, como esta apresentado na Figura 1.

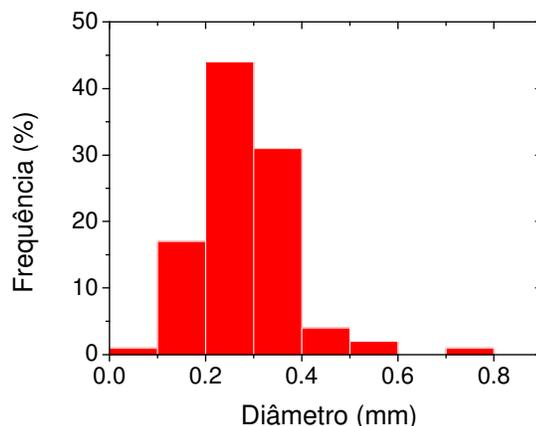


Figura 1. Distribuição estatística do diâmetro das fibras de coco investigadas.

No histograma elaborado nesta figura os diâmetros foram divididos arbitrariamente em intervalos para fins estatísticos. Este histograma (Figura 1), revela uma grande dispersão dimensional. Ou seja, encontrou-se em 100 fibras diâmetros variando de 0,1 mm a 0,8 mm. Com base na distribuição da Figura 1, calculou-se um diâmetro médio de 0,28 mm.

Tendo como ponto de partida a divisão em intervalos da Figura 1, retiraram-se do lote como recebido contendo milhares de fibra de coco, 7 exemplares para cada um dos seguintes intervalos diâmetros: $d < 0,148$; $0,148 < d < 0,211$; $0,338 < d < 0,402$; $0,466 < d < 0,529$; $0,529 < d < 0,593$; $0,593 < d < 0,656$ e $d > 0,656$ mm. Em cada fibra foram efetuadas medições de diâmetros em cinco posições espaçadas ao longo do comprimento. Para cada posição, o diâmetro foi medido duas vezes girando-se a fibra de 90° e tomando-se a média para aquela posição. As medições foram realizadas em um projetor de perfil Nikon modelo 6C.

Todas as fibras foram ensaiadas em tração em máquina EMIC, em um ambiente climatizado a 25°C. Os ensaios foram conduzidos a uma taxa de $4,2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ utilizando-se garras especiais para prevenir o deslizamento e evitar danos à fibra. Após ruptura, algumas fibras de coco selecionadas foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) em um equipamento JEOL modelo JSM 6460 operando a 15 kV. Os resultados foram interpretados estatisticamente através da distribuição estatística de Weibull por meio do programa *Weibull Analysis*. Este programa calcula para um conjunto de medidas referente à propriedade em questão, no caso deste trabalho a máxima resistência à tração, parâmetros que permitem interpretar a qualidade das medidas e, conseqüentemente, da correlação obtida.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos dados digitais adquiridos pela máquina EMIC, obteve-se, para cada ensaio, curvas de tração (força x deformação) típicas de cada faixa de

diâmetro das fibras, como ilustrado na Figura 2. Nesta figura observa-se que todas as curvas de tração, para qualquer intervalo de diâmetro das fibras de coco, apresentam aspectos semelhantes. Após o regime elástico linear, tem-se um comportamento plástico, relativamente extenso, quando então ocorre a ruptura no ponto de máxima força, associado também à máxima tensão. Isto significa que, independente do seu diâmetro, todas as fibras comportam-se em tração como materiais plásticos com similar desempenho.

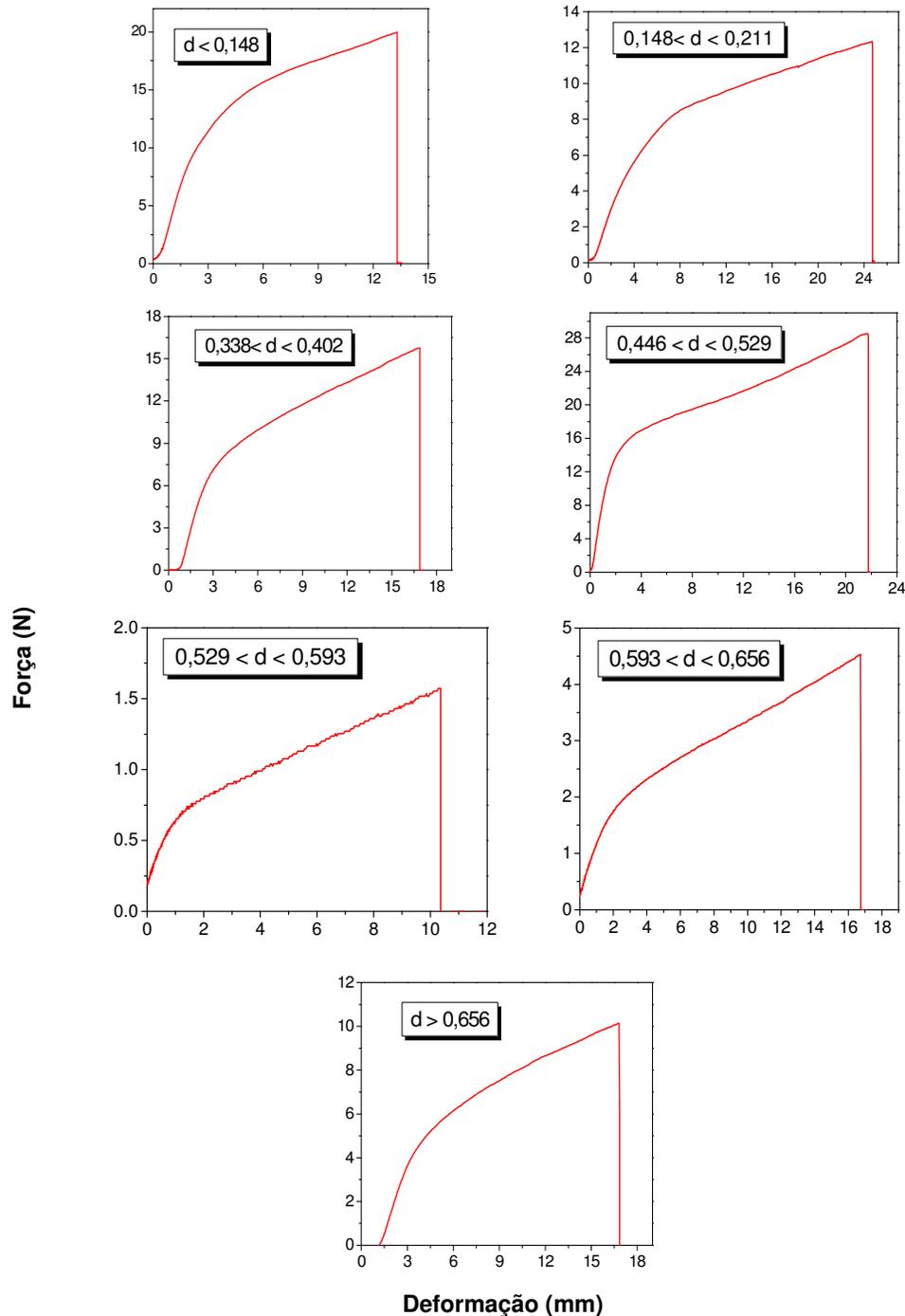
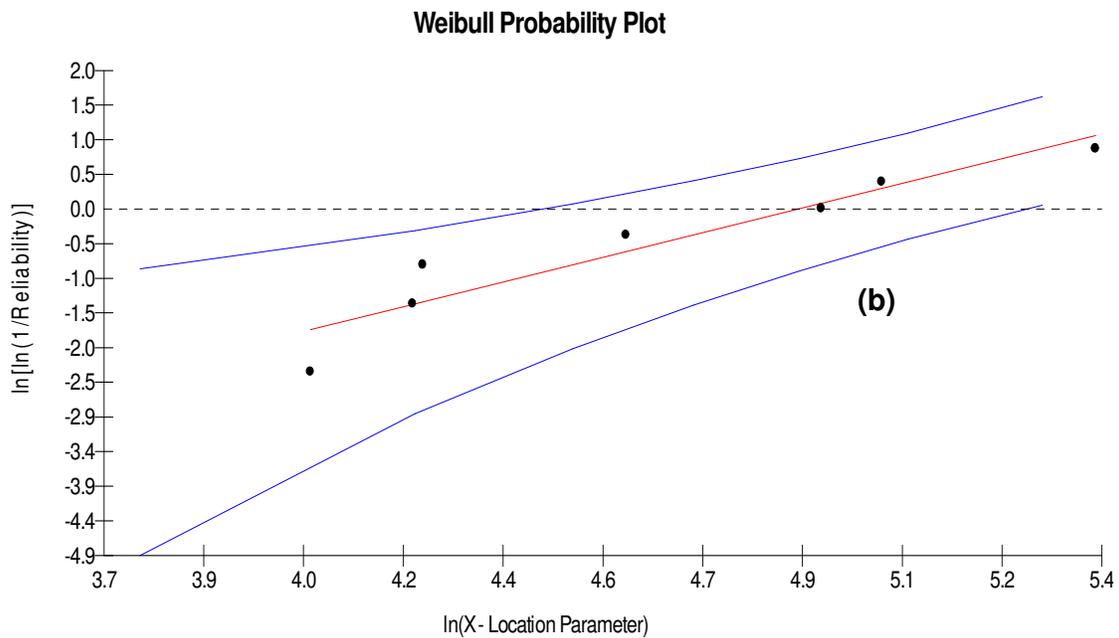
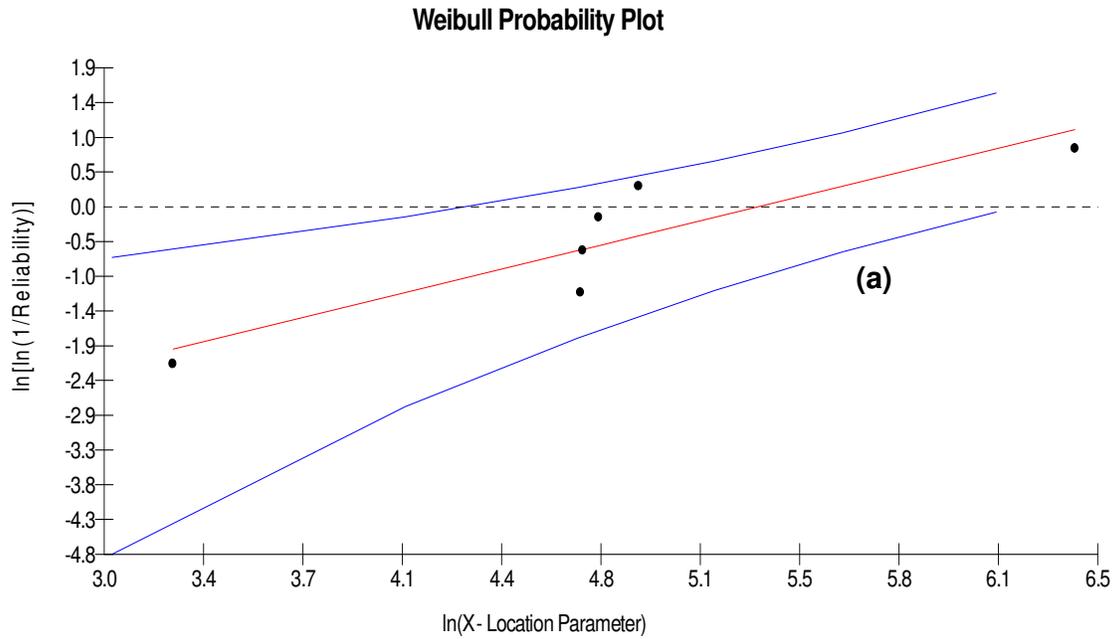


Figura 2. Curvas de tração típicas para fibras de coco em diferentes intervalos de diâmetros (mm).

As curvas de tração correspondentes a cada um dos sete intervalos de diâmetro da Figura 1 permitiram que a resistência mecânica das fibras de coco fosse analisada pela estatística de Weibull para cada um dos intervalos de diâmetro considerados. A Figura 3 ilustra para três destes intervalos de diâmetro os gráficos da probabilidade de Weibull



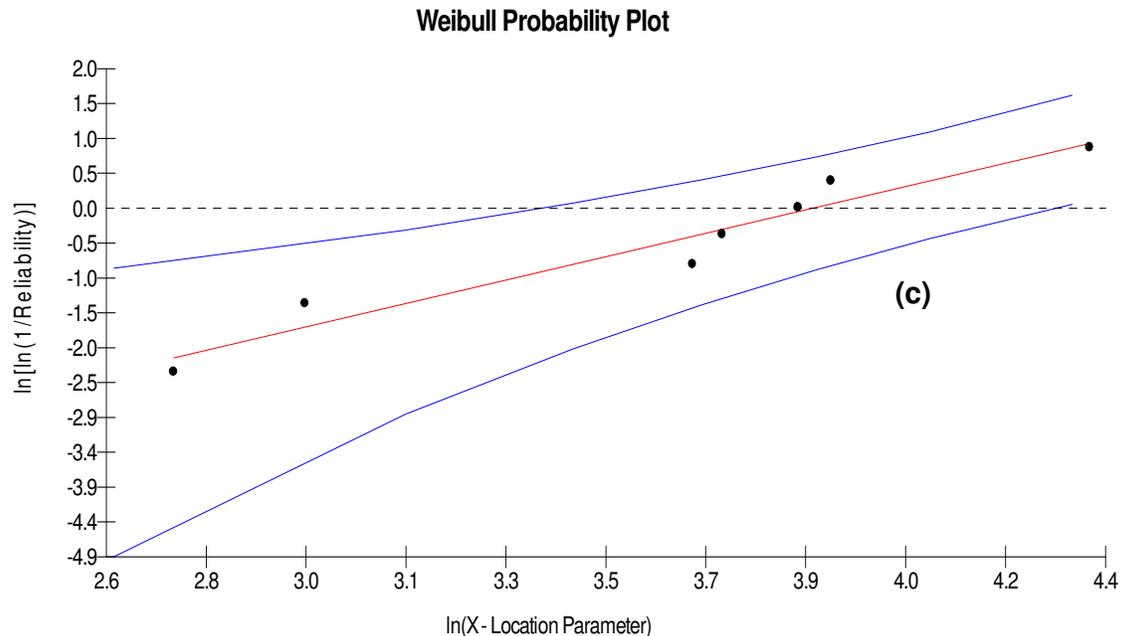


Figura 3. Gráficos típicos da probabilidade de Weibull para alguns intervalos de diâmetro: (a) $d < 0,148$ (b) $0,148 < d < 0,593$ (c) $d > 0,656$

Com base nos resultados dos gráficos de Weibull para os 7 intervalos de diâmetros escolhidos, obtiveram-se valores da tensão de ruptura característica (θ) bem como outros parâmetros de probabilidade conforme listados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de Weibull para os intervalos de diâmetro das fibras de coco

Faixa de diâmetro das fibras de coco (mm)	β	θ (MPa)	R^2	Tensão Média σ (MPa)	Desvio Padrão
$d < 0,148$	0,96	201,2	0,8111	206,3	218,1
$0,148 < d < 0,211$	1,14	203,8	0,7555	185,5	133,8
$0,338 < d < 0,402$	1,68	92,7	0,9355	82,6	50,7
$0,446 < d < 0,529$	2,06	131,9	0,8938	116,8	59,5
$0,529 < d < 0,593$	1,29	59,9	0,8982	55,4	43,2
$0,593 < d < 0,656$	2,17	74,8	0,9593	66,3	32,3
$d > 0,656$	1,83	48,1	0,9396	42,7	24,2

Para a confecção desta tabela, os dados obtidos foram analisados através da Distribuição Estatística de Weibull utilizando o método da Máxima Verossimilhança levando-se em consideração o parâmetro de forma β e o parâmetro de escala θ . No presente trabalho, o parâmetro de posição foi considerado $\delta=0$, pois um valor numérico deste parâmetro forneceria uma probabilidade negativa. Os parâmetros da Tabela 1 possuem as seguintes características:

β - também conhecido como o Módulo de Weibull, indica a qualidade da própria distribuição estatística. Tipicamente β apresenta valores entre 0,5 e 15. Quanto maior o valor de β , mais a média da distribuição se aproxima de θ e a variância se aproxima de zero.⁽¹⁸⁾

R^2 – esse parâmetro indica o quanto os pontos estão bem ajustados à reta central indicada nos gráficos típicos (Figura 3), da probabilidade de Weibull. Esse parâmetro varia de 0 até 1, sendo que quanto mais próximo de 1 menor a dispersão na medida da propriedade.

θ - esse parâmetro corresponde à tensão de ruptura característica indicando que 63,8% das fibras suportarão a tensão de θ antes de se romperem.

Tendo em vista as tensões máximas características da Tabela 1, construiu-se o gráfico de sua variação com o correspondente valor médio de cada intervalo, como está apresentado na Figura 4. Esta figura mostra que existe uma tendência do parâmetro θ , que representa a tensão máxima característica, de diminuir com o diâmetro médio das fibras de coco. Entretanto, a oscilação dos pontos no gráfico deixa dúvidas quanto à exatidão desta tendência.

Na verdade, para todos os conjuntos de medidas analisados, têm-se Módulos de Weibull, isto é, valores de β , relativamente baixos, o que indica afastamento de θ em relação à média para máxima tensão, bem como maior variância no seu valor real. Outro aspecto importante de ser comentado é o número relativamente pequeno de medidas, somente 7, realizado para cada intervalo de diâmetro. Quanto menor o número de medidas, maior a imprecisão dos parâmetros da distribuição de Weibull.⁽¹⁸⁾

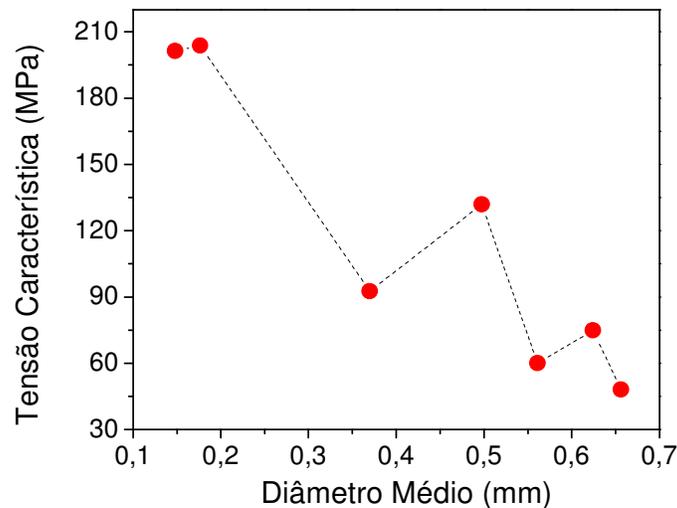


Figura 4. Tensão característica em relação ao diâmetro das fibras de coco analisadas segundo o método estatístico de Weibull.

Para melhor avaliar a possibilidade de existir uma correlação, comparou-se a tensão característica com o valor da tensão média e respectivo desvio padrão em cada intervalo de diâmetro das fibras de coco. Assim, a Fig 5 apresenta a média das tensões máximas obtidas nos ensaios de tração das fibras de coco juntamente com os respectivos desvios padrão.

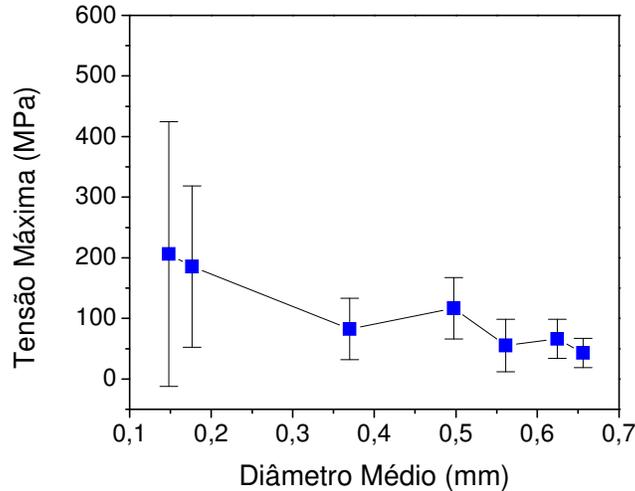


Figura 5. Tensão média em relação ao diâmetro das fibras de coco analisadas.

Comparando-se os gráficos das Figuras 4 e 5 verifica-se uma certa similaridade, o que sugere uma razoável coerência na análise estatística da relação entre a resistência à tração das fibras de coco com seu diâmetro através do uso do método de Weibull. Entretanto, a grande variância nas medidas da Figura 5, particularmente para os menores valores de diâmetro, em associação com os baixos valores de β na Tabela 1, indicam uma baixa qualidade na correlação. Na verdade, dentro dos intervalos das barras de erro correspondentes aos desvios padrão na Figura 5, é possível se passar uma reta horizontal por todos os pontos. Ou seja, do ponto de vista estatístico, poderia ser concluído que a resistência é constante com o diâmetro.

A análise da ponta de ruptura das fibras de coco realizada através da observação por MEV (Figura 6), acrescenta evidências de um possível mecanismo que justifique a correlação entre a tensão máxima variando inversamente (Figuras 4 e 5), com o diâmetro. Para os menores diâmetros (Figura 6a), a ruptura envolve simultaneamente toda a seção reta da fibra de maneira mais uniforme. Por outro lado, fibras com maiores diâmetros (Figura 6b), rompem-se por partes em um processo menos uniforme que acarreta tensão na fratura comparativamente menor devido à antecipação do processo de ruptura em uma parte mais fraca na seção reta.

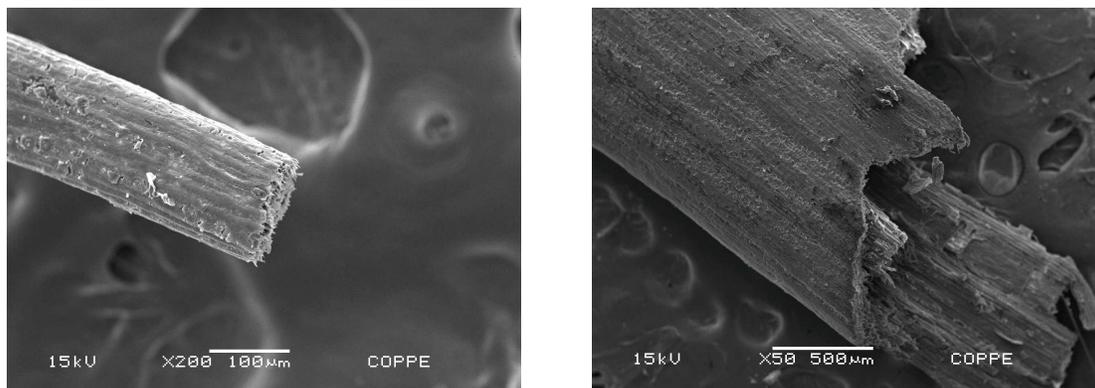


Figura 6. Fractografia por MEV das pontas rompidas de fibras de coco: (a) mais fina, $d=0,14\text{mm}$, e (b) mais grossa, $d=1,7\text{mm}$.

Como considerações finais, é importante mencionar que o resultado da análise estatística pelo método de Weibull apresentado na Tabela 1 e Figuras 3 e 4, traduz a heterogeneidade intrínseca às fibras lignocelulósicas⁽¹⁻⁵⁾. Isto está associado a valores relativamente baixos para os parâmetros β e R^2 na Tabela 1, bem como a uma oscilação nos valores de θ na Figura 4. Apesar da pouca qualidade da distribuição Weibull, existe uma tendência (Figuras 4 e 5), de se ter maior tensão de ruptura, idêntica à máxima resistência (Figura 1), para menores valores de diâmetro. A maior uniformidade da ponta de fratura de fibras com menor diâmetro justifica esta correlação.

4CONCLUSÕES

A aplicação do método de Weibull para a análise estatística dos resultados dos ensaios de tração em fibras de coco revelou uma baixa qualidade na distribuição.

Valores relativamente pequenos dos parâmetros β e R^2 bem como a grande variância nas medidas da resistência máxima, associada à tensão de ruptura, lançam dúvidas sobre sua correlação com o diâmetro.

Por outro lado, a maior uniformidade da fratura das fibras mais finas tende a corroborar a correlação de que fibras de coco com menor diâmetro são comparativamente mais resistentes do que as de maior diâmetro.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Faperj, CNPq, Capes e Fenorte/Tecnorte. É também motivo de agradecimento a permissão para o uso MEV, por parte da Prof Luiz Henrique de Almeida do PEMM/Coppe/UFRJ.

REFERÊNCIAS

- 1 – BLEZKI, A.K.; GASSAN, J. Composites reinforced with cellulose-based fibres. Prog. Polym. Sci, v. 24, p. 221-274, 1999.
- 2 – NABI SAHED, D.; JOG J.P. Natural fiber polymer composites: a review, Advances in Polymer Technol., v.18, p. 221-274, 1999.
- 3 - MOHANTY, A.K.; MISRA, M.; HINRICHSEN, G. Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. Macromolecular Mater. and Eng., v. 276, p.1-24, 2000.
- 4 – CROCKER, J. Natural materials innovative natural composites. Materials technology, v. 2-3 n. 3 p. 174-178, 2008.
- 5 – MONTEIRO S.N.; LOPES, F.P.D.; FERREIRA, A.S.; NASCIMENTO, D.C.O. Natural fiber polymer matrix composites: cheaper, tougher and environmentally friendly. JOM, v. 61, n. 1, p. 17-22, 2009.
- 6 - J. GASSAN, A.K. BLEZKI, "Effect of cyclic moisture absorption/desorption on the mechanical properties of silanized jute-epoxy composites. Polymer Composites, v. 20, n. 4, p. 604-611, 1999.
- 7 - ROUT, J.; MISRA, M.; TRIPATHY, S.S.; NAYAK, S.K.; MOHANTY, A.K. The influence of fibre treatment on the performance of coir-polyester composites. Comp. Sci. Technol. v. 61, p. 1303 – 1310, 2001
- 8 - CALLISTER Jr., W.D. Materials Science and Engineering – An Introduction, 5ª Edição, Nova York : John Wiley & Sons, 2000.
- 9 – TOMCSAK, F.; SATYANARAYNA, K.A.; SIDENSTRICKER, T.H.D. Studies on lignocellulosic fibers on Brasil: Part III – Morphology and properties of Brazilian curaua fibers. Composites: part A. v 38, p. 2227-2236, 2007.

- 10 – MONTEIRO, S.N.; LOPES, F.P.D.; MOTTA, L.C.; MARQUES, L.S.; PORTELLA, T.G.R. Statistical analysis to characterize the uniformity of mechanical properties of buriti fibers. In: CHARACTERIZATION OF MINERALS, METALS & MATERIALS – TMS CONFERENCE, Fev. 2009, SAN FRANCISCO, EUA, p.1-6
- 11 – Disponível em http://www.mecanicaonline.com.br/2005/01_janeiro/engenharia/daimler_chrysler_meio_ambiente.htm, Acesso em: 07 fev. 2009.
- 12 - MONTEIRO, S.N.; TERRONES, L.A.H.; LOPES, F.P.D.; D'ALMEIDA, J.R.M. Mechanical Strength of Polyester Matrix Composites Reinforced with Coconut Fiber Wastes, Rev. Mater., v.10, n. 4, p.571-576, 2005.
- 13 - MONTEIRO, S.N.; TERRONES, L.A.H.; LOPES, F.P.D.; D'ALMEIDA, J.R.M., Structural characteristics and properties of coir fiber wastes reinforced polymeric composites, In: III INTERNATIONAL CONGRESS ON MATERIALS, Cartagena, Colombia, 2005, p. 1-6.
- 14 - MONTEIRO, S.N.; TERRONES, L.A.H.; CARVALHO, E.A.; D'ALMEIDA, J.R.M. Efeito da interface fibra/matriz sobre a resistência de compósitos poliméricos reforçados com fibras de coco. Rev. Mater. v. 11, n. 4, p.395-402, 2006.
- 15 – SANTAFE JR, H.P.G.; COSTA, L.L.; MONTEIRO, S.N. Análise dinâmico mecânica de compósitos epoxídicos reforçados com fibra de coco. In: 63º CONGRESSO ANUAL DO CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS – ABM, Jul. 2008, Santos, Brasil, p. 1-9.
- 16 – MONTEIRO, S.N.; RODRIGUES, R.J.S.; LOPES, F.D.P.; SOARES, B.G. Efeito da incorporação de fibras de coco no comportamento dinâmico mecânico de compósitos com matriz poliéster, Technol. Metal. Mat., v.5, n. 2, p. 111-115, 2008.
- 17 – KAPUR, K.C.; LAMBERSON, L.R. Reliability in Engineering Design. Nova York: John Wiley & Sons, 1977.
- 18 – CARVALHO, E.A. Avaliação da influência do fator de localização e rank mediano no valor do módulo de Weibull em materiais frágeis. In: 62º CONGRESSO ANUAL DO CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS – ABM, Jul. 2007, Vitória, ES, Brasil, p. 1-10.