

ENSAIOS DE PULLOUT PARA AVALIAR O TAMANHO CRÍTICO DE FIBRAS NATURAIS ⁽¹⁾

Sergio Neves Monteiro⁽²⁾
José Roberto Moraes d'Almeida⁽³⁾
Janine Feitosa de Deus⁽²⁾

Resumo

Um dos principais aspectos de contribui para o desempenho de compósitos com matriz reforçada por fibras é a eficiência da ligação interfacial entre a fibra e matriz. Para avaliar esta eficiência, um ensaio de escorregamento, conhecido pelo seu termo inglês como “pullout”, testa a adesão entre fibra e matriz. Através deste ensaio, obtém-se o comprimento crítico da fibra. No presente trabalho realizaram-se ensaios de pullout em três fibras naturais para avaliar os respectivos comprimentos críticos e discutir a efetividade de sua utilização como reforço para matriz polimérica. Fibras naturais de coco, curauá e rami foram classificadas, secas ao ar e embutidas, com diferentes profundidades, em encaixes de matriz poliéster. O conjunto foi submetido ao ensaio de pullout em máquina de tração com garras pneumáticas. Os resultados obtidos permitiram, pela primeira vez, caracterizar o comprimento crítico das fibras e a tensão cisalhante de escorregamento da interface fibra/matriz.

Palavras-chave: Compósitos; Matriz polimérica; Fibras naturais; Ensaio *pullout*.

¹ Submetido ao 60º Congresso Anual – ABM, Belo Horizonte, MG, 25-28 de julho de 2005.

² Laboratório de Materiais Avançados, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, UENF, Av. Alberto Lamego, 2000, 28015-620, Campos dos Goytacazes, RJ – Brasil.

³ Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio, Rua Marques de São Vicente, 225, 22453-900, Rio de Janeiro, RJ – Brasil.

INTRODUÇÃO

Fibras naturais lignocelulósicas, cultivadas ou extraídas, vêm sendo cada vez mais utilizadas como reforço para compósitos com matriz polimérica. Entre as muitas vantagens para esta aplicação, destacam-se o baixo custo, a biodegradabilidade e a natureza renovável das fibras naturais (BLEDZKI e GASSAN, 1999; PEIJS, 2000). Outro aspecto positivo das fibras naturais é o fato de serem encontradas ou facilmente cultivadas em todas as regiões tropicais ou temperadas do nosso planeta. Assim, a coleta ou cultivo das fibras naturais para emprego em produtos de maior valor agregado, como materiais compósitos, pode trazer benefícios econômicos e sociais para diversos países em desenvolvimento. Além disso, na fabricação deste tipo de compósitos, pode-se também aproveitar resíduos de fibras naturais. Isto confere a este uso um caráter ambientalmente correto (AQUINO et alii, 2004).

Por outro lado, as fibras naturais lignocelulósicas possuem algumas desvantagens como a heterogeneidade própria dos organismos vivos e sua natureza hidrofílica. A heterogeneidade pode ser atenuada através de seleção previa das fibras. Por sua vez, a tendência à absorção de água da fibra natural resulta em pouca aderência com a matriz polimérica, normalmente hidrofóbica, o que compromete as propriedades dos compósitos (D'ALMEIDA, 1991; BLEDZKI et alii, 1996; ROUT et alii, 2001). A solução para este problema de aderência tem sido encontrada através de tratamentos físicos e químicos da superfície das fibras (RONG et alii, 2001; GASSAN e BLEDZKI, 1997). Tanto a pré-seleção quanto o pré-tratamento para melhorar o desempenho do compósito implicam em maiores custos que podem comprometer os benefícios práticos. Por exemplo, se o compósito de fibra natural pretende competir com a madeira para fabricação de moveis baratos, melhor seria evitar qualquer beneficiamento a não ser uma limpeza e secagem à temperatura ambiente. Por outro lado, é conveniente selecionar e tratar a fibra natural caso o compósito tenha que competir com peças de fibra de vidro, onde o desempenho mecânico seja crítico.

Outro fator relevante do uso de fibras naturais lignocelulósicas como reforço de compósitos é o comprimento. Fibras de vidro e outras sintéticas podem ser comercialmente obtidas em longos comprimentos. Já as fibras naturais, como por exemplo o algodão, têm comprimento limitado. Longos fios podem, no entanto, ser feitos de fibras naturais, o que requer um entrelaçamento severo das fibras dificultando, todavia, o preenchimento pela resina polimérica entre as fibras durante a fabricação do compósito. Assim sendo, em muitos casos é inconveniente optar-se pelo uso de fibras naturais com seu tamanho próprio. Nestas condições deve ser determinado o comprimento crítico, l_c , que é um importante parâmetro que permite extrair o máximo proveito da resistência mecânica de fibras consideradas curtas (HULL, 1981).

Em recentes trabalhos avaliou-se a capacidade de uma fibra natural, a piaçava, ser usada como reforço para compósitos com matriz polimérica (AQUINO et alii, 2001 e 2003). Como a piaçava é rígida, e de difícil entrelaçamento, tem que ser utilizada em seu tamanho natural. Em consequência, determinou-se o tamanho crítico das fibras de piaçava (AQUINO et alii, 2003) através de testes de pullout, cujo esquema está apresentado na Figura 1.

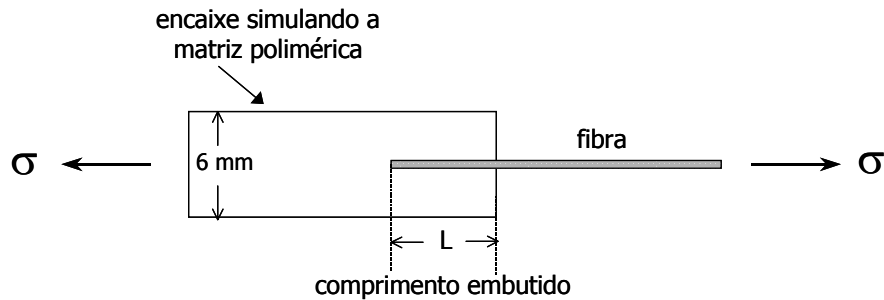


Figura 1. Representação esquemática do teste de pullout.

O valor experimental de $\ell_c = 15$ mm para a piaçava é muito menor que o comprimento natural desta fibra, mesmo em se tratando daquelas descartadas e consideradas como resíduo (AQUINO et alii, 2003). Assim, embora não sejam entrelaçadas, as fibras de piaçava como coletadas de sua palmeira, (*Attalea funifera Mart*) agem como fibras contínuas durante solicitação mecânica de um compósito que estejam reforçando. Isto indica quem para serem usadas como reforço de compósitos, não a necessidade de seleção ou prévio tratamento da superfície de fibras de piaçava.

Do conhecimento dos autores do presente trabalho, além da piaçava e do sisal (SIDENSTRICKER, et alii, 2003), em nenhuma outra fibra natural foi obtido, até agora, o comprimento crítico através de ensaio de pullout. Assim, o objetivo do presente trabalho foi determinar o valor de ℓ_c para fibras de coco, curauá e rami. Além disto, estudou-se também a resistência da interface fibra/matriz poliéster, bem como o possível mecanismo de escorregamento ou ruptura destas fibras.

MATERIAIS E MÉTODOS

As fibras naturais utilizadas no presente trabalho eram de distintas procedências. As fibras de coco (*Cocos nucifera*), cada vez mais empregadas e com grande potencial de crescimento, foram cedidas por uma empresa do Rio de Janeiro, especializada em produtos dessa fibra. As fibras de curauá (*Ananas erectifolius*), com produção ainda muito restrita na região Norte, foram cedidas por uma empresa de Belém (PA). As fibras de rami (*Boehmeria nivea*) foram cedidas na forma de planta seca pelo horto de São Fidelis (RJ). No caso particular do rami, suas fibras tiveram que ser extraídas do caule da planta. O uso das fibras de rami está em franco declínio no Brasil (D'ALMEIDA e MONTEIRO, 2003) e vale a pena investigar sua utilização como reforço de compósitos como alternativa para revitalizar sua produção.

Todas as fibras foram utilizadas sem qualquer tratamento, a não ser uma secagem previa na temperatura ambiente. Tanto o comprimento quanto o diâmetro das três fibras foram avaliados estatisticamente. A Figura 2 apresenta a distribuição do comprimento para as três fibras. Vale comentar que as fibras de rami e curauá são relativamente longas com comprimento sempre superior a 200 mm. Por outro lado, as fibras de coco são relativamente curtas, com comprimento não ultrapassando 250 mm. A Figura 3 apresenta a distribuição do diâmetro para as mesmas três fibras.

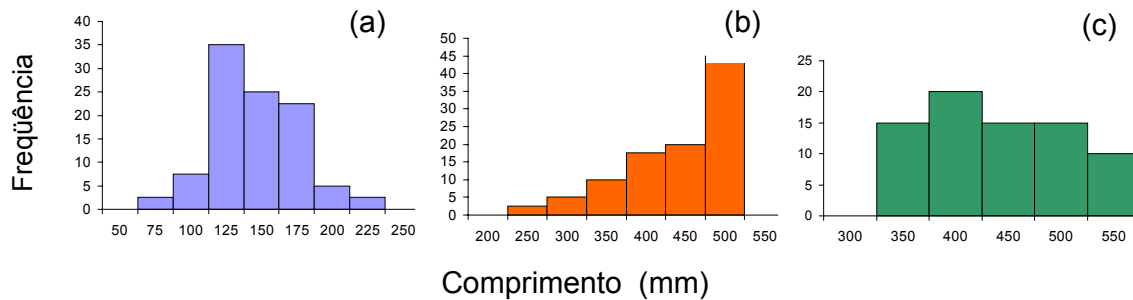


Figura 2. Distribuição do comprimento das fibras naturais: (a) coco; (b) curauá e (c) rami.

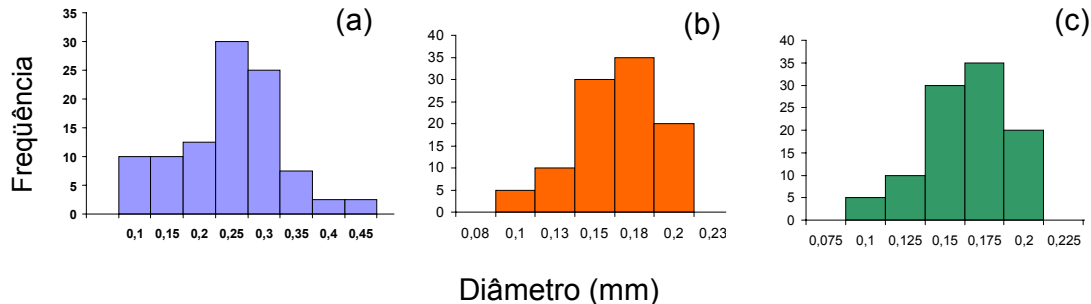


Figura 3. Distribuição do diâmetro das fibras naturais: (a) coco; (b) curauá e (c) rami.

Os ensaios de pullout forma realizados nas três fibras de acordo com o esquema mostrado na Figura 1. As fibras foram parcialmente embutidas em um encaixe cilíndrico de poliéster até o comprimento L que variou de 10 a 40 mm. O encaixe, com diâmetro de 6 mm, foi moldado em um tubo de alumínio, sendo a fibra inserida enquanto a resina poliéster estava líquida. A resina poliéster utilizada foi do tipo ortoftálica, comercialmente disponível e de custo relativamente baixo. No momento da moldagem, acrescentou-se à resina o catalisador à base de metil-etil cetona, na razão de 0,5% para cura à temperatura ambiente, conforme indicado pelo fabricante. O encaixe e a parte livre das fibras, Figura 1, foram presos em garras pneumáticas e ensaiados em máquina Instron com capacidade de 10kN. Pelo menos 5 corpos de prova como no esquema da Figura 1 foram ensaiados para cada fibra com um certo valor de L , visando garantir uma análise estatística. A taxa de deformação empregada foi de $5,0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

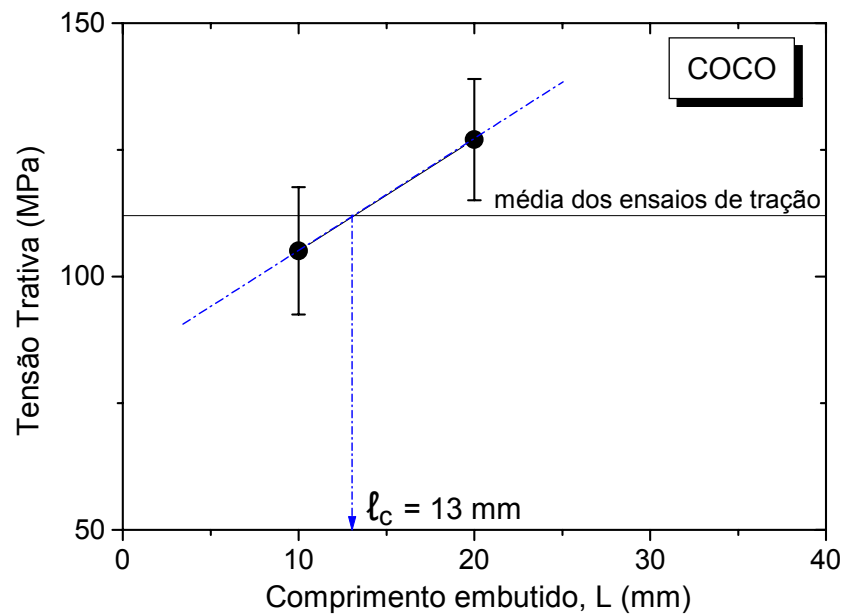
RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta a média e o desvio padrão de ensaios de tração realizados com pelo menos 10 fibras de cada tipo investigado. Estes ensaios foram conduzidos na mesma máquina Instron, com as mesmas: pressão pneumática nas garras e taxa de deformação. Nesta tabela é importante observar que os desvios padrão são extremamente altos. Isto significa que existe uma grande dispersão nos valores da resistência mecânica, como era previsto para o caso de fibras naturais (D'ALMEIDA e MONTEIRO, 2003). É importante mencionar também que a resistência à tração do coco apresentada na Tabela 1 está compatível com os valores apresentados na literatura (BALEY et alii, 1997; SATYANARAYANA et alii, 1986). Do conhecimento dos autores do presente trabalho, não existem resultados na literatura referentes à resistência à tração de fibras de curauá e rami.

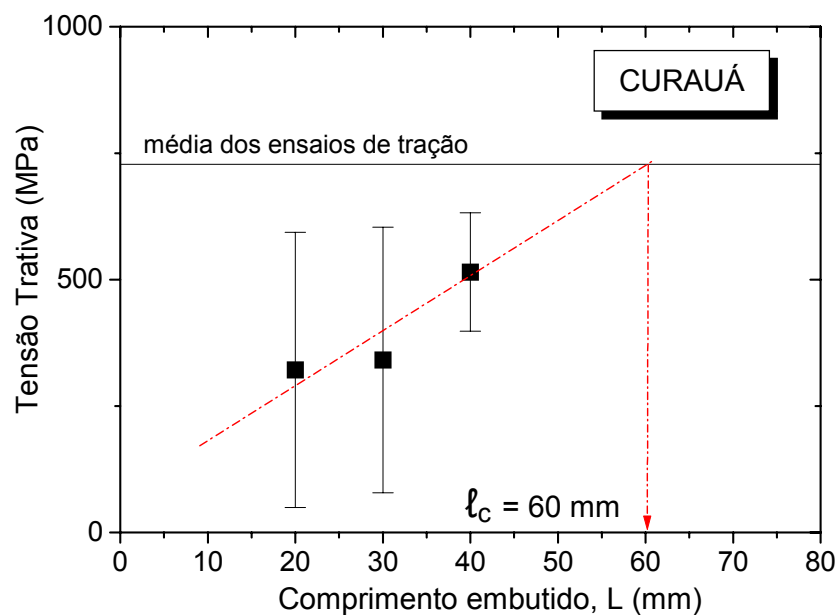
Tabela 1. Resistência à tração das fibras naturais investigadas.

FIBRAS NATURAIS	Resistência à tração, σ_f (MPa)
Coco	$112,5 \pm 32,2$
Curauá	$728,0 \pm 484,4$
Rami	$978,5 \pm 246,1$

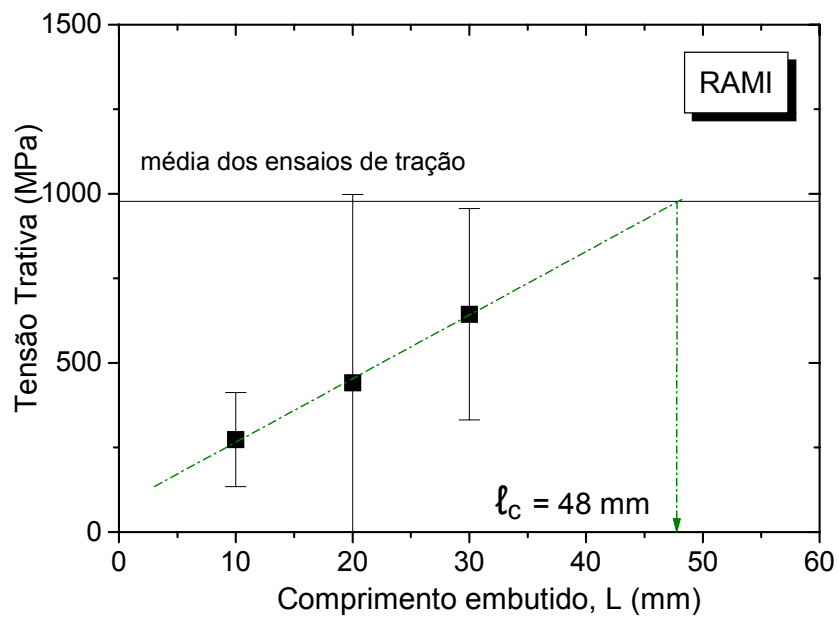
A Figura 4 apresenta os gráficos da tensão de ruptura obtida em ensaios de pullout em função do comprimento embutido L , conforme mostrado no esquema da Fig. 1, para as fibras de: (a) coco, (b) curauá e (c) rami.



(a)



(b)



(c)

Figura 4. Tensão trativa de ruptura dos ensaios de pullout em função do comprimento embutido, L . (a) coco; (b) curauá e (c) rami.

Em relação aos gráficos da Figura 4, alguns pontos devem ser esclarecidos. O primeiro e mais importante é que não foi possível interpretar o ensaio de pullout conforme seu procedimento padrão. Esse procedimento supõe que os valores da tensão, em cada gráfico, aumentem com o comprimento embutido, L , até atingirem um patamar cujo início está associado ao comprimento crítico, l_c (AQUINO et alii, 2003). Entretanto, dada a dispersão dos resultados nos três gráficos da Fig. 4, bem como a inconsistência para alguns valores de L , não possível seguir o procedimento padrão. Optou-se então, por outra forma, não padronizada, de se avaliar l_c . Isto foi feito, associando-se aos gráficos o valor médio dos ensaios de tração dados na Tabela 1. Ou seja, considerou-se que este valor dos ensaios de tração, feitos com as mesmas fibras, devem, necessariamente corresponder ao patamar do ensaio de pullout.

Tendo em vista este procedimento alternativo, os valores do comprimento crítico para cada tipo de fibra natural investigada estão apresentados na Tabela 2. Nesta tabela também estão apresentados os valores das correspondentes tensões de escorregamento da interface fibra/matriz, τ , que podem ser calculadas considerando-se o comprimento crítico a partir da equação de Kelly-Tyson (HULL, 1881):

$$\tau = r \sigma_f / 2 l_c \quad (1)$$

onde r , retirado dos gráficos da Figura 3, é o raio médio das fibras, e σ_f sua resistência à tração. É importante mencionar que o intervalo de valores de τ está associado ao intervalo de σ_f dado pelo seu desvio padrão na Tabela 1.

Tabela 2. Comprimento crítico l_c , e tensões de escorregamento, τ , entre fibra/matriz.

FIBRAS NATURAIS	l_c (mm)	τ (MPa)
Coco	13	0,60 – 0,33
Curauá	60	0,32 – 0,10
Rami	48	5,49 – 0,33

O resultado de l_c para as fibras curauá na Tabela 2 é maior que das fibras de coco e rami e também maior que outras fibras naturais (AQUINO et alii, 2003). Por outro lado, os valores da tensão de escorregamento fibra/matriz, são relativamente baixos. Isto, entretanto, é esperado para fibras naturais sem tratamento superficial e conseqüente dificuldade de aderência à matriz poliéster. Em particular, as fibras de curauá são mais lisas e não possuem tantas saliências e reentrâncias que permitam boa adesão da resina o que explicaria seus baixos valores de τ na Tabela 2.

Como considerações finais, o presente trabalho confirmou a grande heterogeneidade que as fibras naturais apresentam, comparativamente com as sintéticas como as fibras de vidro e aramida. Esta heterogeneidade se reflete na enorme dispersão, tanto nas dimensões, Figuras 2 e 3, quanto na resistência à tração, Tabela 1. Conseqüentemente, uma grande dispersão também resultou nos valores dos ensaios de pullout, Figura 4. Ainda assim, considerando os limites obtidos para as tensões de escorregamento na interface fibra/matriz, Tabela 2, é possível ter-se compósitos, tendo em vista a Figura 2, com as fibras de coco ou rami

agindo no limite,, $l > 15l_c$, para serem consideradas contínuas em aplicações que exijam carregamento mecânico.

CONCLUSÕES

- Esta investigação sobre as características das fibras de coco, curauá e rami, visando seu uso em compósitos de matriz polimérica, revelou grandes heterogeneidades, tanto dimensional quanto na resistência à tração.
- Devido à excessiva dispersão nos valores, ensaios de pullout não puderam ser interpretados na forma padronizada, mas geraram os tamanhos críticos das fibras através de considerações alternativas.
- Os resultados obtidos para o tamanho crítico permitiram avaliar a tensão de escorregamento na interface fibra/matriz. Para as fibras naturais investigadas sem tratamento superficial, esta tensão é relativamente baixa.
- Apesar dos maiores valores do comprimento crítico e menores valores da tensão de escorregamento na interface fibra/matriz, é possível se utilizar as fibras de coco e rami no limite de seus comprimentos para ainda serem consideradas como fibras contínuas, visando o emprego em compósitos com matriz poliéster.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do CNPq, CAPES, FAPERJ e FAPERJ. É também motivo de agradecimento a colaboração da Dra. Regina Célia Nunes, Dr. Augusto César Peres, do IMA/UFRJ e pelas bolsistas Viviane Alves Escócio (IMA/UFRJ) e Claudia Rosa Monteiro (FENORTE/TECNORTE).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 AQUINO, R. C. M. P., D'ALMEIDA, J. R. M., MONTEIRO, S. N. **J. Mater. Sci. Letters**, vol. 20 p.1017, 2001.
- 2 AQUINO, R. C. M. P., MONTEIRO, S. N., D'ALMEIDA, J. R. M. **J. Mater. Sci. Letters**, vol. 22 p.1495, 2003.
- 3 AQUINO, R. C. M. P., DE DEUS, J. F., MONTEIRO, S. N., D'ALMEIDA, J. R. M. Use of Recycled Natural Fiber Wastes as Reinforcement for Polymeric Composites, **Global Symposium on Recycling Waste Treatment and Clean Technology – REWAS'2004**, vol. 1, p. 475-482, Madrid, Espanha, setembro de 2004.
- 4 BALEY, C., D'ANSELME, T., GUYADER, J., **Composites**, vol. 37, p. 28, 1997.
- 5 BLEDZKI, A. K., e GASSAN, J. **Progress Polym. Sci.**, vol. 24, p. 221, 1999.
- 6 BLEDZKI, A. K., REIHMANE, S., GASSAN, J. **J. Appl. Polym. Sci.**, vol. 59, p. 1329, 1996.
- 7 D'ALMEIDA, J. R. M. **J. Mater. Sci. Letters**, vol. 10 p. 578, 1991.

- 8 D'ALMEIDA, J. R. M., MONTEIRO, S. N. Compósitos Reforçados por Fibras Naturais – Oportunidades e Desafios, **Anais do 58º Congresso Anual da ABM**, p. 1725-1734, Rio de Janeiro, julho de 2003, 1CD.
- 9 GASSAN, J. e BLEDZKI **Composites Part A**, vol 28A, p. 1001, 1997.
- 10 HULL, D. **An Introduction to Composite Materials**, pub. Cambridge, Inglaterra, 1981.
- 11 NAIR, K. C. M., DIWAN, S.M., THOMAS, S. **J. Appl. Polym. Sci.**, vol. 60, p.1483, 1998.
- 12 PEIJS, T. **Mater Technol.**, vol 15, p. 281, 2000.
- 13 ROUT, J., MISRA, M. TRIPATHY, S. S., NAYAK, S. K., MOHANTY, A. K. **Cop. Sci. & Technol.**, vol. 61, p. 1437, 2001.
- 14 SATYANARAYANA, K. G., SUKUMARAN, K., KULKARNI, A. G., PILLAI, S. G. K., ROHATGI, P. K. **Composites**, vol 17, p. 329, 1986.
- 15 SYDENSTRICKER, T. H. D., MOCHNAZ, S., AMICO, S. C. **Polymer Testing**, vol. 22, p. 375-380, 2003.

PULLOUT TESTS TO EVALUATE THE CRITICAL LENGTH OF NATURAL FIBERS ⁽¹⁾

*Sergio Neves Monteiro⁽²⁾
José Roberto Moraes d'Almeida⁽³⁾
Janine Feitosa de Deus⁽²⁾*

Abstract

One of the main aspects that contribute to the performance of fiber-reinforced composites is the efficiency of the fiber/matrix bond. In order to evaluate this efficiency, the pullout test permits to calculate the critical fiber length, which is necessary for effective strengthening of the composite. The objective of the present work was to conduct pullout tests in three natural fibers to obtain their effectiveness as reinforcement for polymeric matrix. Coir, curauá and rami fibers were classified, dried at room temperature and embedded in polyester resin with different depths. The set was submitted to pullout tests in a tensile machine with pneumatic grips. The results obtained permitted, for the first time, to characterize the fibers critical length and the fiber/matrix interface shear stress.

Key-words: Pullout test; Polymeric matrix; Composite; Natural fibers.

(1) *d for the 60th Annual Congress – ABMte, MG, July 25-28, 2005.*

(2) *Laboratory for Advanced Materials, Center of Science and Technology, State University of the Northern Rio de Janeiro, UENF, Av. Alberto Lamego, 2000, 28015-620, Campos dos Goytacazes, RJ – Brazil.*

(3) *Department of Materials Science and Metallurgy, Catholic University of Rio de Janeiro, PUC-Rio, Rua Marques de São Vicente, 225, 22453-900, Rio de Janeiro, RJ – Brazil.*