

## Avaliação da força de cisalhamento de fibras longas de piaçava em poliéster insaturado

Evaluation of shear strength of long piassava fibers in unsaturated polyester

**Celso I. Fornari**<sup>1,2</sup>

Universidade Estadual de Santa Cruz, Brasil  
Instituto de Física Campus Soane Nazaré, Brasil  
celsoifornari@gmail.com

**Celso C.M. Fornari Junior**<sup>1,3</sup>

Universidade Estadual de Santa Cruz, Brasil  
Laboratório de Polímeros e Sistemas, Brasil  
celso@uesc.br

---

**Resumo.** Compósitos confeccionados com fibras vegetais e matriz polimérica apresentam um ponto importante com relação à interação entre esses dois materiais. Essa interação tem grande influência nas propriedades finais do compósito, pois são pontos de ligação-união entre os elementos que constituem o próprio material compósito. A atração entre a matriz polimérica e a fibra de piaçava deve ser a maior possível de forma a transmitir a esse tipo de compósito uma forte ligação atrativa entre esses materiais, superando, na medida do possível, a força de tração da matriz polimérica e da fibra. O comprimento crítico da fibra de piaçava embutida na matriz polimérica também apresenta importância relevante na construção de compósitos reforçados com essas fibras, pois permite buscar as melhores propriedades do material compósito em função do tamanho da fibra do material. A avaliação da força de cisalhamento interfacial da matriz poliéster em relação às fibras de piaçava foi estudada neste trabalho.

**Palavras-chave:** polímero, cisalhamento, compósito, fibra vegetal.

**Abstract.** Composites made from plant fiber and polymer matrix present an important point regarding the interaction between these two materials. This interaction has great influence on the final properties of the composite, because they are connection points that constitute the composite material itself. The attraction between the polymer matrix and the piassava fiber should be as large as possible to transmit to the composite a strong link between these attractive materials, overcoming as far as possible the forces binding the polymer matrix and the fiber. The critical length of the piassava fiber embedded in the polymer matrix also has great importance in the construction of composites reinforced with these fibers. The evaluation of the interfacial shear strength between the matrix and the polyester piassava fibers was studied in this work

**Key words:** polymer, shear, composite, vegetable fiber.

---

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Santa Cruz. Rodovia Ilhéus-Itabuna Km 16, 45662-900, Ilhéus, BA, Brasil.

<sup>2</sup> Instituto de Física Campus Soane Nazaré. Rodovia Ilhéus-Itabuna Km 16, Departamento de Ciências Exatas, 45662-900, Ilhéus, BA, Brasil.

<sup>3</sup> Laboratório de Polímeros e Sistemas-LAPOS. Rodovia Ilhéus-Itabuna Km 16, Prédio Juizado Modelo, 45662-900, Ilhéus, BA, Brasil.

## Introdução

Existe um grande potencial nos materiais fibrosos de origem vegetal para utilização em aplicações tecnológicas. As fibras vegetais apresentam, além de suas propriedades de tração, resistência ao desgaste, baixa densidade, facilidade e baixo custo de obtenção. Esses fatores despertaram interesses da comunidade científica para a busca na construção de novos materiais compósitos. Faruk *et al.* (2012) publicaram um trabalho que engloba uma varredura minuciosa sobre compósitos poliméricos com fibras vegetais, salientando a composição química de algumas fibras celulósicas, os tratamentos físico-químicos para melhorar a aderência da fibra à matriz polimérica e abordaram, inclusive, as propriedades desses materiais compósitos. A fibra de piaçava é uma fibra abundante no Sul da Bahia e vem sendo explorada basicamente para coberturas de residências e artefatos de limpeza, como vassouras e escovas. Alguns países europeus utilizam a piaçava para a varrição mecanizada de ruas, pelo fato de apresentar boa resistência à abrasão e à flexão e não gerar faíscas como ocorrem com as escovas de aço. A avaliação da resistência ao impacto de compósitos poliméricos com fibras vegetais de piaçava foi o objetivo de estudo de alguns pesquisadores (Monteiro *et al.*, 2006a). A propriedade de tenacidade da piaçava acoplada com poliéster foi estudada por Almeida e colaboradores (D'Almeida *et al.*, 2006), os quais utilizaram ensaios de impacto pelo método Charpy. Os estudos revelaram que, compósitos contendo 40% em peso de fibra de piaçava absorveram grande parte da energia cinética dirigida ao compósito, revelando aumento na resistência ao impacto do novo material. Almeida e colaboradores avaliaram também o comportamento dinâmico-mecânico de compósitos de poliéster isoftálico com fibras tratadas com soluções de NaOH durante 60 minutos e verificaram mudanças nas propriedades do compósito somente em temperaturas abaixo da T<sub>g</sub> (temperatura de transição vítrea) do polímero. Estudos de Monteiro e colaboradores avaliaram as propriedades de flexão de três pontos de materiais compósitos construídos de poliéster e piaçava entre 30 e 50% em peso de fibra. Os autores observaram que a tensão de ruptura aumenta com o aumento da quantidade de fibra contida no compósito (Aquino *et al.*, 2002). Os materiais fibrosos de origem vegetal, de um modo amplo, apresentam propriedades com bastante

interesse para sua aplicação como material de engenharia. As fibras vegetais apresentam naturalmente um baixo custo de produção, o que lhes confere competitividade vantajosa frente às fibras sintéticas. A produção dessas fibras é ecologicamente adequada ao meio ambiente por ser um produto natural e, além disso, o resíduo oriundo do seu manuseio não agride o meio ambiente. As propriedades como baixa densidade, resistência ao desgaste e fácil coloração têm despertado o interesse tecnológico por esse material, o que é interessante economicamente para a indústria e também para o setor agrícola brasileiro (Ishizaki *et al.*, 2006). A fibra de piaçava é largamente cultivada no Baixo Sul da Bahia, mais especificadamente nas mediações entre Canavieiras e Una, onde possui um comércio característico inclusive para a exportação. O cultivo da piaçava situa-se no Sul do estado da Bahia devido às condições favoráveis de solo e clima. A piaçaveira, como é conhecida, é uma palmeira que produz um pêndulo longo de fibras, que acompanham as folhas as quais são colhidas manualmente, selecionadas, secas e comercializadas. As propriedades de alta resistência ao desgaste, associadas com a boa deformação elástica das fibras, o baixo peso, a resistência às intempéries e seu baixo custo, levam à utilização desse material na fabricação de vassouras, escovas e coberturas residenciais. A pesquisa aplicada na construção de materiais compósitos com fibras vegetais avalia se as suas propriedades físicas caminham no sentido de encontrar a melhor relação entre as propriedades e a quantidade/composição das fibras. Materiais compósitos construídos com piaçava apresentam vantagem com relação ao comprimento das fibras. As fibras vegetais, como, por exemplo, coco, abacaxi, dendê e cana de açúcar (Thwe e Liao, 2002) são mais curtas que as fibras de piaçava, podendo, em algumas aplicações, limitar o uso dessas fibras. Com essa característica, a fibra de piaçava propicia a construção de compósitos com propriedades anisotrópicas explorando ao máximo as propriedades de tração dessas fibras. Entretanto, para encontrar a maior resistência à tração e à flexão, por exemplo, entre outras propriedades em compósitos poliméricos que utilizam fibras vegetais, procura-se a maior força de ligação ou força de acoplamento existente entre a fibra e a matriz polimérica (Canché *et al.*, 2002; Santafé Jr. *et al.*, 2010). Na tentativa de aumentar a força de ligação nos constituintes desses compósitos, já foram aplicados muitos tratamentos direta-

mente nas fibras e de alguns agentes ligantes (Bledzki e Gasan, 1997; Mishra *et al.*, 2003; Aziz *et al.*, 2005; Keller, 2003; Correa *et al.*, 2007). Desse modo, é particularmente importante avaliar e conhecer a força de cisalhamento entre a matriz polimérica e a fibra vegetal. A força de cisalhamento ou força de interação da fibra embutida em uma matriz polimérica na sua condição natural, isto é, sem nenhum tipo de tratamento, pode estabelecer o valor absoluto desses materiais. Com base neste valor, é possível comparar as propriedades físicas do compósito quando eventualmente algum tratamento ou modificação for introduzido/a no material fibroso. Esse dado também possibilitará estabelecer o comprimento crítico da fibra, definindo assim a relação entre a tensão máxima da fibra e a tensão máxima de coesão da fibra embutida na matriz polimérica. Neste estudo, foi avaliada a força de cisalhamento interfacial entre uma matriz polimérica constituída de poliéster ortoftálica e a fibra de piaçava sem tratamento. Para realização dos ensaios de tração, foi arquitetado um embutimento das fibras vegetais de piaçava em uma matriz polimérica do tipo poliéster diluída em estireno, pré-acelerada com sal de cobalto e reticulada com iniciador peróxido de metil etil cetona. Foi variada a profundidade do embutimento da fibra na matriz polimérica e medida a força necessária para o seu arrancamento. Com isso, é permitido estabelecer uma equação que expressa a força de arrancamento (cisalhamento) da piaçava natural em matriz poliéster em função da área de contato.

## Materiais e métodos

Neste trabalho, foi utilizada uma matriz especial à base de elastômero de maneira a permitir a introdução (embutimento) da fibra de piaçava bem como regular o avanço da fibra através de uma pequena abertura lateral na cavidade da matriz. O poliéster foi reticulado na cavidade da matriz, a qual foi adequadamente preenchida pelo polímero no seu estado plástico. Esse sistema permitiu a união da fibra e do poliéster até a reticulação do mesmo, mantendo estável o contato entre a fibra e a matriz polimérica. Além disso, foi possível uma boa precisão no embutimento da fibra, pois o sistema permitiu medir facilmente o tamanho da fibra de piaçava que posteriormente entraria em contato com o polímero. Foi utilizado poliéster ortoftálico acelerado com octoato de cobalto e diluído em 20% com estireno denominado Po-

licom 20200, fornecido pela empresa Cromitec e reticulado usando como iniciador da reação o peróxido de metil etil cetona na quantidade de 1% em peso. A quantidade de peróxido de metil etil cetona foi pesada com o auxílio de uma balança digital de quatro dígitos decimais marca Bioprecisa modelo FA 2104 N. O poliéster foi medido usando uma balança digital de dois dígitos decimais marca Bioprecisa modelo JH 2102. A mistura do polímero e do iniciador foi realizada empregando-se uma espátula de madeira como misturador. As fibras de piaçava cultivadas à sombra foram guardadas após a colheita em ambiente sem luz solar e temperatura variando entre 20-30°C pelo período de seis meses. As fibras assim acondicionadas foram lavadas com água e detergente e secas com papel toalha e estufa a 100°C. As medidas com relação ao diâmetro e ao comprimento das fibras foram feitas utilizando-se um paquímetro digital marca Mitutoyo com dois dígitos decimais. A medida de diâmetro médio foi calculada baseando-se em seis medidas realizadas aleatoriamente. O embutimento da fibra no polímero foi medido utilizando-se um paquímetro digital Mitutoyo e uma lupa de aumento. As amostras foram mantidas por catorze dias em temperatura ambiente antes dos ensaios de tração. As medidas de cisalhamento interfacial, isto é, a força necessária para o arrancamento foram realizadas em equipamento de ensaio universal marca EMIC, devidamente calibrado e aplicando-se a velocidade de tração de 1 mm/min. Os dados de força e deslocamento foram automaticamente organizados em um gráfico digital pelo programa acoplado ao equipamento. Foram ensaiados quatro tamanhos diferentes de embutimento de fibra, e, para cada tamanho, foram ensaiadas seis amostras. A área média de embutimento foi calculada com base em todas as amostras.

## Resultados

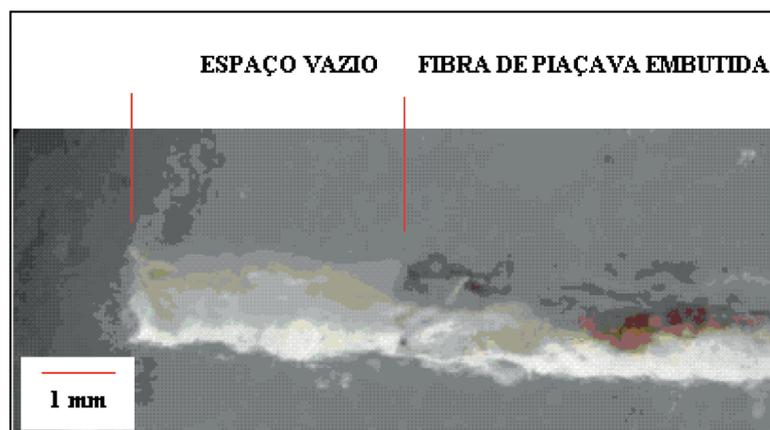
Os materiais compósitos são materiais que, por excelência, agregam as propriedades dos materiais constituintes associando-as e direcionando-as para os fins e as aplicações desejadas. Para um melhor desempenho dos materiais compósitos é essencial uma correta interação entre a união dos seus constituintes de forma que o estudo das forças de ligação entre estes é fundamental na avaliação do comportamento desses materiais. De um modo geral, no caso específico das fibras vegetais quando associadas a uma matriz polimérica,

estas podem aumentar a força de resistência à tração ao mesmo tempo em que diminuem a densidade desses materiais. A força de cisalhamento atuante entre a matriz polimérica e a fibra de piaçava e que, em particular, é uma das maiores responsáveis pelas propriedades mecânicas do novo material pode estar fundamentada basicamente em dois parâmetros: o parâmetro físico, que é o principal responsável pela ancoragem mecânica da fibra à matriz polimérica, e o parâmetro químico, que também exerce uma influência na força de ligação da fibra com a matriz. As reentrâncias e saliências peculiares da fibra vegetal podem possibilitar a acomodação do poliéster na sua forma plástica e a formação de “encaixes” quando o poliéster é reticulado, o que produz uma adesão física do tipo ancoramento, conforme verificado na literatura (D’Almeida *et al.*, 2006). Por outro lado, as reentrâncias podem dificultar o molhamento da fibra pela matriz polimérica, sendo dependente da condição micromorfológica da superfície da fibra (Monteiro *et al.*, 2006b, 2006c). A possibilidade de ligação química no compósito também é um fator relevante a ser considerado, uma vez que ambos os materiais que constituem o compósito apresentam grupamentos polares (Saw *et al.*, 2011). De forma global, a união entre a fibra e a matriz polimérica constitui-se então no somatório da interação física e química, que age na superfície da fibra com o polímero, tentando ser modelada por diversas teorias (Mukhopadhyay e Fanguero, 2009).

A Figura 1 apresenta a fotografia do compósito com aumento de vinte vezes e que cor-

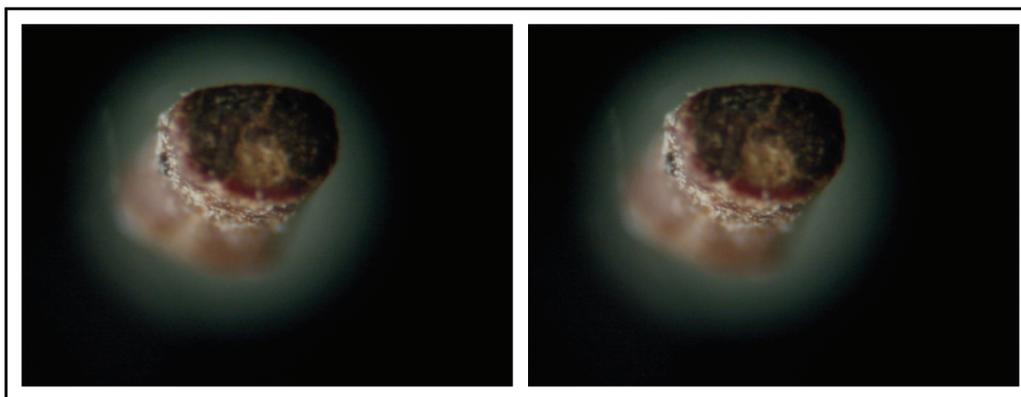
responde à fibra de piaçava embutida e extraída parcialmente em uma matriz de poliéster. Na parte mais clara da imagem, observa-se a cavidade da matriz poliéster da qual a fibra foi extraída. Podem-se notar através do perfil visto na imagem que um perfil ou uma superfície externa não regular é formada quando a fibra é extraída, gerada em consequência das forças de adesão e descolamento.

Ao investigar a força de cisalhamento interfacial ou a força necessária para o arrancamento da fibra embutida na matriz polimérica, pode-se estabelecer o comprimento crítico da fibra. Isto se traduz em uma equação simples que pode estabelecer a tensão de cisalhamento da fibra/matriz e com isso trazer o conhecimento do embutimento máximo e que, neste caso, corresponde ao seu respectivo comprimento crítico. Esse valor será tal quando a força de cisalhamento se igualar numericamente à tensão máxima da fibra pura. Neste trabalho, foi utilizado o embutimento da fibra de piaçava em poliéster insaturado em medidas de 5, 10, 15 e 20 mm de profundidade. Esses resultados permitiram gerar um gráfico de tensão *versus* profundidade da fibra e formular uma equação matemática que permite calcular teoricamente a força de arrancamento máximo para a fibra de piaçava. Pelo fato de as fibras naturais de piaçava não serem perfeitamente cilíndricas, foram realizadas várias medidas para calcular o seu diâmetro médio. A irregularidade no diâmetro das fibras de piaçava pode ser observada através da Figura 2, onde a seção transversal



**Figura 1.** Imagem com aumento de 20 vezes de uma fibra de piaçava deslocada de uma matriz polimérica do tipo poliéster.

**Figure 1.** Twenty time increased image of piassava fibre pulled out from polyester matrix.



**Figura 2.** Fotografia da seção transversal da fibra de piaçava com aumento de 20 vezes.  
**Figure 2.** Photograph of a piassava transverse section increased 20 times.

da fibra é vista com vinte vezes de aumento. Observa-se, através da Figura 2, a seção transversal da fibra de piaçava.

A Figura 2 permite identificar uma forma aproximada a uma elipse na seção transversal da fibra, da qual são bem distintos dois diâmetros significativos, isto é, um diâmetro maior e outro menor. Por esse motivo a área externa da fibra foi calculada considerando-se o formato circular com um raio médio entre os raios medidos. É possível observar, através da Figura 2, que a seção transversal da fibra é sensivelmente irregular e cuja forma semelhante de elipse é uma aproximação que não considera as regularidades e reentrâncias naturais que ela apresenta. Essa consideração permitiu o cálculo da área assumindo um raio médio entre os raios maior e menor da elipse e considerando então uma área de seção circular. Foram feitas medidas médias da área das amostras de fibra, sendo seis medidas de cada amostra. As medidas foram feitas de modo a estabelecer seis medidas do maior diâmetro e seis medidas do menor diâmetro, calculando assim a média das medidas e, dessa forma, um raio médio. Com a média simples foi calculada a área externa da fibra a partir do valor de embutimento, considerando-se então a área externa de um cilindro.

Cada lote de seis fibras foi embutido com uma determinada profundidade na matriz polimérica da seguinte forma correspondente: lote 1-5 mm, lote 2-10 mm, lote 3-15 mm e lote 4-20 mm. Dessa maneira, cada fibra de piaçava possui uma área de contato determinada, a qual está em função do seu diâmetro médio e da profundidade de embutimento. As áreas calculadas para cada uma das seis fibras de

cada lote estão apresentadas na Tabela 1 com seu respectivo desvio padrão.

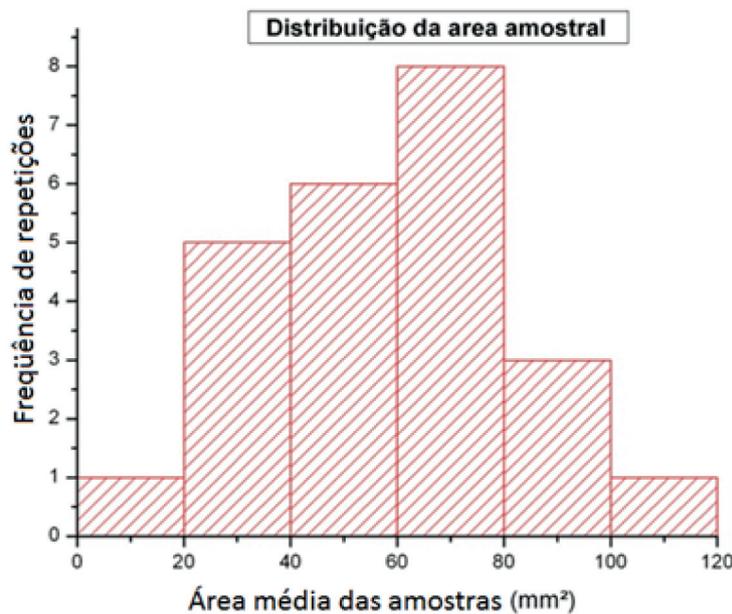
Pelos resultados apresentados na Tabela 1, observa-se que existe uma variação na área da fibra. As amostras de piaçava são materiais que apresentam um diâmetro variado, o que ocasiona certa variação em suas respectivas áreas quando comparadas entre si. O maior desvio padrão apresentou o valor igual a 0,3 para a amostra número 1 do lote 1. As demais medidas mostraram um desvio padrão com valor menor, o que demonstra uma maior regularidade entre as medidas do diâmetro da fibra. Embora as amostras demonstrassem uma considerável variação em seus diâmetros e, conseqüentemente, em suas áreas, esse valor é absoluto e próprio de cada fibra vegetal, sendo que esse valor será avaliado em função da força absoluta de arrancamento. A distribuição dos raios médios das fibras de piaçava está apresentada no histograma da Figura 3. O histograma permite observar que ocorreu uma variação significativa com relação aos raios das fibras de piaçava. A maior distribuição de frequências é observada para o valor de raio igual a 0,68 mm. Os valores de raio maiores que 0,68 mm também apresentaram uma quantidade significativa de amostras, e os valores inferiores a 0,68 mm foram registrados em minoria a totalidade. Observa-se, pelo histograma, que a maior quantidade das amostras possui um raio igual ou maior que 0,68 mm, indicando que as fibras de piaçava foram avaliadas com áreas médias significativas.

As fibras de piaçava foram embutidas em uma matriz polimérica de poliéster reticulada utilizando-se iniciador peróxido de metil etil cetona, conforme apresentada na Figura 4.

**Tabela 1.** Área média calculada para cada medida de piaçava embutida em resina poliéster em mm<sup>2</sup> com seu respectivo desvio padrão.

**Table 1.** Calculated average area for each piassava fibre put in polyester resin at mm<sup>2</sup> and the its standard deviation.

	Lote 1 (mm <sup>2</sup> )	Lote 2 (mm <sup>2</sup> )	Lote 3 (mm <sup>2</sup> )	Lote 4 (mm <sup>2</sup> )
1	20,95 ± 0,30	53,92 ± 0,20	64,97 ± 0,14	106,14 ± 0,26
2	18,81 ± 0,14	51,94 ± 0,15	67,68 ± 0,22	84,74 ± 0,12
3	23,08 ± 0,08	43,12 ± 0,25	75,34 ± 0,16	76,74 ± 0,10
4	27,20 ± 0,12	43,80 ± 0,24	66,20 ± 0,25	65,98 ± 0,06
5	25,75 ± 0,19	48,89 ± 0,19	78,65 ± 0,26	83,87 ± 0,17
6	24,37 ± 0,18	48,55 ± 0,09	73,11 ± 0,14	93,52 ± 0,12

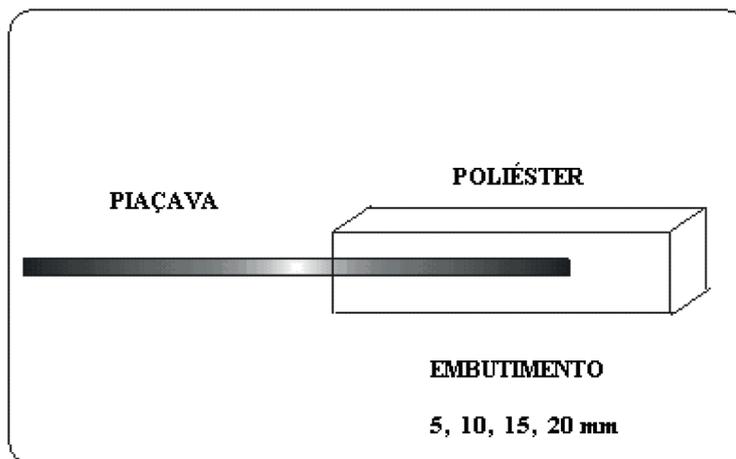


**Figura 3.** Distribuição das fibras de piaçava em função do raio médio.

**Figure 3.** Average radius distribution of piassava fibers.

As fibras embutidas apresentaram uma força necessária para o seu arrancamento da matriz, a qual é proporcional à área de contato entre ambos os componentes matriz/fibra. Para o embutimento das amostras de fibras, estas foram feitas em número igual a seis a fim de se estabelecer um valor médio do somatório dessas amostras. Todas as amostras foram ensaiadas por meio de tração, e seus resultados representados em gráfico apresentado na Figura 5. Apesar da confecção das amostras terem sido padronizadas para todos os tipos ensaiados, os resultados demonstram uma pequena variação entre seus valores. O polímero tipo poliéster insaturado ortoftálico

tem demonstrado algumas particularidades interessantes com relação à heterogeneidade da reticulação quando se utiliza o iniciador de ligação do tipo peróxido de metil etil cetona. Trabalhos desenvolvidos no mesmo laboratório têm identificado propriedades mecânicas com pequenas variações para corpos de prova aparentemente idênticos, isto é, feitos na mesma batelada de material e procedimentos. Isso sugere uma possível diferença no processo de reticulação do polímero principalmente quanto ao modo de adição e mistura do agente iniciador (Dong, 2007). Devido a essa prévia observação, associamos as diferenças nos resultados encontrados neste trabalho, princi-



**Figura 4.** Representação do embutimento da fibra de piaçava em matriz de poliéster reticulado.

**Figure 4.** Representation of piassava fibre inlay in a polyester matrix.

palmente, ao modo de processo de reticulação. Entretanto, outro fator pode também contribuir para aumentar a variação dos resultados obtidos. Devido à fibra de piaçava ter uma seção transversal um tanto irregular com relação à diferença de diâmetros, isso dificulta a determinação da área total exata a qual foi embutida na matriz polimérica.

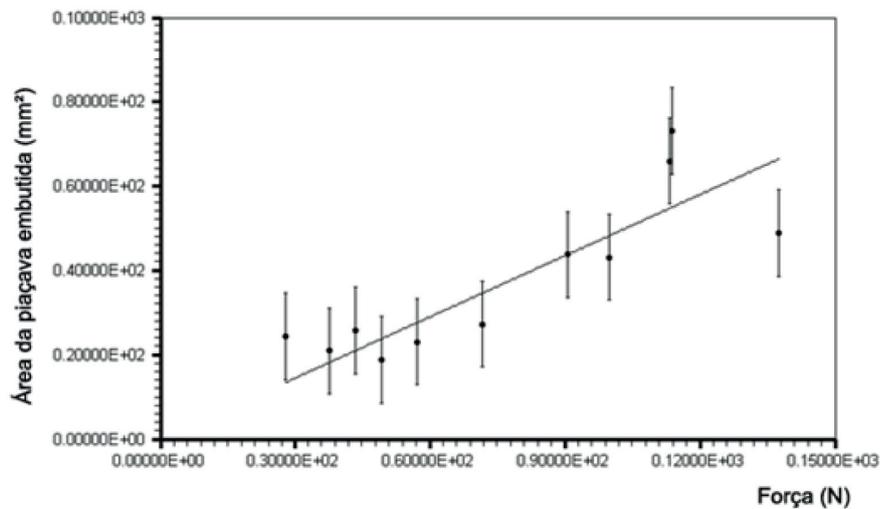
Os ensaios de medição de força de arrancamento foram realizados em máquina de ensaio universal com velocidade de tração igual a 1 mm/min. Essa velocidade é a menor possível no equipamento e foi selecionada para este ensaio. Velocidades mais altas diminuem a sensibilidade com relação à medição da força de cisalhamento, pois diminuem a chance de ocorrer melhor atração entre os dois materiais que estão em contato, isto é, influencia sua respectiva força de atrito. O atrito que surge no momento em que a fibra é deslocada (em movimentação) diminui com o aumento da velocidade de arrancamento, pois dificulta uma melhor interação entre os átomos que estão nas superfícies de contato de ambos os materiais. Os resultados da força necessária para o arrancamento da fibra em função da sua área de embutimento estão apresentados na Figura 5.

Pode-se observar uma sensível dispersão da força de arrancamento das fibras ensaiadas apesar de os ensaios terem sido conduzidos em uma única etapa e de uma forma padronizada. A essa dispersão foi atribuída à possibilidade de ocorrer uma heterogeneidade com relação à cura do poliéster, bem como na de-

terminação de sua respectiva área de embutimento. Os resultados do gráfico possibilitaram ajustar uma curva entre os pontos, o que define uma relação entre a força de arrancamento e a área de embutimento. A relação entre os dois componentes do gráfico é linear, obedecendo à proporcionalidade entre a área e a força de interação entre o polímero e a fibra. A equação matemática representada na equação 1 possibilita calcular a força necessária para o arrancamento da fibra em função da área de contato para as condições utilizadas neste experimento onde o eixo das ordenadas corresponde à área em mm<sup>2</sup> e o eixo das abscissas à força em Newton. A equação é válida para o intervalo entre 30 e 140 N. O gráfico pode teoricamente ser prolongado até a origem dos eixos.

$$y(x) = 0.48 \cdot x \quad \therefore \quad 0 < y(x) < 60 \quad (1)$$

Os valores ensaiados e apresentados na Figura 5 demonstram que a área aproximada de 67 mm<sup>2</sup> necessita de uma força de arrancamento de aproximadamente 140 N. A partir desse valor, a área não impõe mais aumento na resistência à força de arrancamento, conforme resultados apresentados na Figura 6. A partir desse valor, a resistência absoluta da fibra não é mais suficiente para suportar a tensão, proporcionando a ruptura da própria fibra de piaçava. Essa área, estipulando-se um raio médio igual a 0,7 mm, resulta em um comprimento da fibra de 15,6 mm. Teoricamente, o comprimento crítico da fibra de piaçava corresponde



**Figura 5.** Área de embutimento das fibras de piaçava ( $\text{mm}^2$ ) em função da força de arrancamento (N). O ajuste linear realizado é representado pela reta.

**Figure 5.** Area of the piassava fibre in the matrix versus strength of pull out. The linear average is represented by the line.

ao valor de 15,6 mm para um diâmetro médio de 1,4 mm, isto é, a máxima resistência ao desacoplamento da fibra de piaçava embutida em poliéster insaturado corresponde a uma tensão máxima de 2 N/ $\text{mm}^2$ .

Estudos de Almeida e colaboradores observaram que o comprimento crítico para as fibras de coco embutidas em matriz de poliéster apresenta um comprimento crítico de aproximadamente 13 mm (Monteiro *et al.*, 2006c).

Os ensaios demonstraram certa dispersão de valores de força em função da área apresentados na Figura 7. Neste experimento, o fator que mais contribuiu para a variação dos resultados foi a medida externa da área da fibra. A área externa foi calculada por aproximação de um elemento cilíndrico, o que, na realidade, embute uma pequena distorção entre as áreas reais das amostras ensaiadas. Cada amostra de fibra apresenta uma forma específica semelhante a uma elipse, e que na realidade tem uma forma única e particularmente natural a sua estrutura externa. Outra fonte de possível dispersão dos resultados está no grau de reticulação da matriz polimérica. Pré-estudos demonstraram que esse polímero possui uma velocidade de iniciação de reticulação elevada, quando o iniciador é do tipo peróxido de metil etil cetona e o acelerador, a base de sais de cobalto. Associado a isso, a viscosidade do poliéster é também elevada a ponto de dificultar a dispersão do iniciador e impedir que a reação ocorra uniforme. Se, de um lado, a velocidade

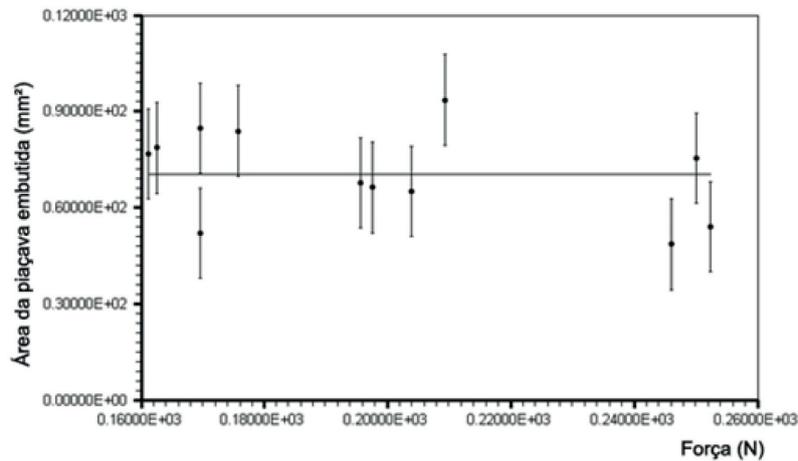
de iniciação é instantânea e a dispersão do iniciador é dificultada pela viscosidade do poliéster, o processo de reticulação que transformará a resina líquida em sólida ocorrerá de maneira diferente em cada local do material. Nesse caso, a reticulação do poliéster estaria quimicamente sujeita a uma pequena diferença de reticulações químicas. O poliéster com grau de reticulação diferenciado pode demonstrar variação no seu comportamento mecânico, isto é, na sua transição plástica/elástica devido ao maior ou menor grau de mobilidade das macromoléculas (Cassu e Felisberti, 2005). Isso também pode contribuir para a diferença de valores encontrados nos ensaios que medem a força de arrancamento (cisalhamento) da fibra.

Representando os valores de profundidade absoluta em função da força máxima de arrancamento da fibra embutida, é possível observar, através da Figura 7, que a curva ajustada entre os valores obtidos corresponde a uma hipérbole de segunda ordem.

Os valores obtidos pelos ensaios de força de arrancamento, apesar de apresentarem variação entre si, correspondem a uma média ajustada que expressa a resposta da resistência da fibra ao desacoplamento no poliéster.

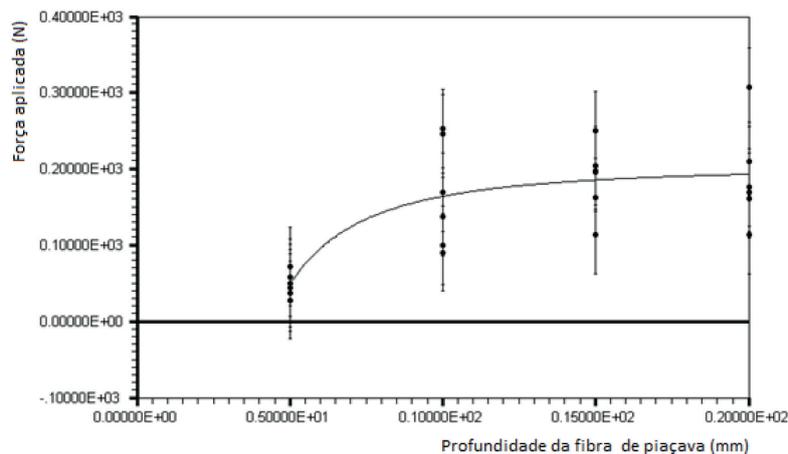
## Conclusão

Os resultados deste experimento demonstraram que a força de atração entre a fibra de piaçava e a resina poliéster ortoftálica tem



**Figura 6.** Força máxima (N) de arrancamento das fibras de piaçava embutidas em matriz de poliéster, em função da área (mm<sup>2</sup>) correspondente ao embutimento.

**Figure 6.** Maximum strength (N) of the pull out of the piassava fibre from matrix polyester according to the fibre area in the matrix.



**Figura 7.** Força máxima de arrancamento das fibras de piaçava embutidas em matriz de poliéster em função da profundidade.

**Figure 7.** Maximum strength (N) of the pull of the piassava fibre from matrix polyester according to the depth.

uma relação linear com a área de contato entre a fibra e o polímero até um valor crítico de aproximadamente 67 mm<sup>2</sup>.

A partir da área de 67 mm<sup>2</sup> e para um diâmetro médio de 1,4 mm, a tensão da piaçava não ultrapassa a força de arrancamento da fibra/matriz de poliéster.

A força absoluta máxima registrada para o arrancamento da piaçava foi de 140 N.

O comprimento crítico da fibra foi calculado em 15,5 mm, equivalente a uma tensão de aproximadamente 2 N/mm<sup>2</sup>.

Esses valores foram obtidos para as condições experimentais utilizadas neste experimento.

## Referências

- AZIZ, S.H.; ANSELL, M.P.; CLARKE, S.J.; PANTENY, S.R. 2005. Modified polyester resins for natural fibre composites. *Composites Science and Technology*, **65**:525-535. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.08.005>
- BLIEDZKI, K.A.; GASAN, J. 1997. The influence of fiber-surface treatment on the mechanical

- properties of jute-polypropylene composites. *Composites Part A*, **28**:1001-1005.  
[http://dx.doi.org/10.1016/S1359-835X\(97\)00042-0](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-835X(97)00042-0)
- CANCHÉ, E.G.; LAVIADA, J.R.; CUPU, J.I.C.L.; MENDIZÁBAL, E.; PUIG, J.E.; HERRERA, P.J.F. 2002. Flexural, impact and compressive properties of a rigid-thermoplastic matrix/cellulose fiber reinforced composites. *Composites Parte A*, **33**:539-549.  
[http://dx.doi.org/10.1016/S1359-835X\(01\)00136-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-835X(01)00136-1)
- CASSU, S.N.; FELISBERTI, M.I. 2005. Comportamento dinâmico-mecânico e relaxações em polímeros e blendas poliméricas. *Química Nova*, **28**:255-263.  
<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422005000200017>
- CORREA, C.A.; YAMAKAWA, R.S.; RAZZINO, C.A.; JUNIOR, E.H. 2007. Compósitos termoplásticos com madeira. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, **13**:154-165.  
<http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282003000300005>
- D'ALMEIDA, A.L.F.S.; BARRETO, D.W.; CALADO, V.; D'ALMEIDA, J.R.M. 2006. Efeito de tratamentos superficiais em fibras de piaçava sobre o comportamento dinâmico-mecânico de compósitos de matriz poliéster isoftálica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17, Foz do Iguaçu. *Anais... CBCIMat*, **1**:3582-3593.
- DONG, C.; DAVIES, I.J. 2007. Flexural properties of macadamia nutshell particle reinforced polyester composites. *Composites: Part A*, **43**:2451-2756.
- FARUK, O.; BLEDZKI, A.K.; FINK, H.P.; SAIN, M. 2012. Biocomposites reinforced with natural fibers:2000-2010. *Progress in Polymer Science*, **37**:1552-1596.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>
- ISHIZAKI, A.H.; VISCONTE, L.L.Y.; FURTA DO, C.R.G.; LEITE, M.C.A.M. LEBLANC, J.L. 2006. Caracterização mecânica e morfológica de compósitos de polipropileno e fibras de coco verde: Influência do teor de fibras e das condições de mistura. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, **16**(3):182-186.  
<http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282006000300006>
- KELLER, A. 2003. Compounding and mechanical properties of biodegradable hemp fiber composites. *Composites Science and Technology*, **63**:1307-1316.  
[http://dx.doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00102-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00102-7)
- MISHRA, S.; MOHANTY, A.K.; DRZAL, L.T.; MISRA, M.; PARIJA, S.; NAYAK, S.K.; TRIPATHY, S.S. 2003. Studies on mechanical performance of biofibre/glass reinforced polyester hybrid composites. *Composites Science and Technology*, **63**:1377-1385.  
[http://dx.doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00084-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00084-8)
- MONTEIRO, S.N.; ALQUINO, R.C.M.P.; LOPES, F.P.D.; D'ALMEIDA, J.R.M. 2006a. Tenacidade ao entalhe por impacto charpy de compósitos de poliéster reforçados com fibras de piaçava. *Revista Matéria*, **11**:204-210.
- MONTEIRO, S.N.; D'ALMEIDA, J.R.M.; AQUINO, R.C.M.P. 2006b. Tensile mechanical properties, morphological aspects and chemical characterization os piassava (*attalea funifera*) fibers. *Composites. Part A-Applied Science and Manufacturing*, **37**:1473-1479.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.03.035>
- MONTEIRO, S.N.; TERRONES, L.A.H.; CARVALHO, E.A.; D'ALMEIDA, J.R.M. 2006c. Efeito da interface/matriz sobre a resistência de compósitos poliméricos reforçados com fibras de coco. *Revista Matéria*, **11**: 395-402.
- MUKHOPADHYAY, S.; FANGUEIRO, R. 2009. Physical modification of natural fibers and thermoplastic films for composites-a review. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, **22**:135-162.  
<http://dx.doi.org/10.1177/0892705708091860>
- SANTAFÉ, H.P.G.J.; LOPES, F.P.D.; COSTA, L.L.; MONTEIRO, S.N. 2010. Tensile behavior of lignocellulosic reinforced polyester composites: Part III coir fiber. *Revista Matéria*, **15**(2):202-207.
- SAW, S.K.; SARKHEL, G.; CHOUDHURY, A. 2011. Surface modification of coir fibre involving oxidation of lignins followed by reaction with furfuryl alcohol: Characterization and stability. *Applied Surface Science*, **257**:3763-3769.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.11.136>
- THWE, M.M.; LIAO, K. 2002. Effects of environmental aging on the mechanical properties of bamboo-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites. *Composites: Parte A*, **33**:43-52.  
[http://dx.doi.org/10.1016/S1359-835X\(01\)00071-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1359-835X(01)00071-9)

Submetido: 08/11/2012

Aceito: 12/08/2013