

UTILIZAÇÃO DE ENSAIOS SHORT BEAM EM COMPÓSITOS COM FIBRAS DE SISAL E CURAUÁ

Humberto S. P. da Silva^{1*}, Tiago M. de Abreu¹, Álvaro G. O. Moraes¹, Masahiro Tomiyama², Luiz A. F. Coelho², Sandro C. Amico¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre-RS

²Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, Campus de Joinville, Joinville-SC

*humberto.sps@gmail.com

Ensaio denominado de Short Beam (ASTM D2344M) são realizados para inferir a resistência ao cisalhamento interlaminar de materiais compósitos. Estes ensaios permitem a identificação do local onde inicia a delaminação e a sua forma de propagação. Outra característica muito importante de compósitos que é a adesão fibra-matriz também pode ser indiretamente avaliada por este ensaio. Neste trabalho, estudou-se a resposta de compósitos de resina poliéster reforçada por fibras de sisal e curauá em ensaios de short beam em diferentes condições. Utilizou-se fibras de sisal ou curauá de diferentes comprimentos (10, 20, 30, 40 e 50 mm), em diferentes frações volumétricas (10, 20, 30 e 40%) e compósitos com diferentes espessuras (3,15; 4,80 e 6,45 mm). Os resultados obtidos de resistência em short beam com diferentes comprimentos de fibra foram bem similares, tanto para o sisal como para o curauá, com uma tendência leve do curauá produzir maiores valores. Com o aumento da fração volumétrica de fibras, observou-se um incremento da resistência short beam, enquanto o aumento na espessura provocou uma diminuição da resistência dos compósitos.

Palavras-chave: compósitos, short beam, curauá, sisal.

The Use of Short Beam Tests for Curaua and Sisal Fiber Reinforced Composites

Short Beam tests (ASTM D2344M), formerly known as Interlaminar Shear Strength (ILSS), may be used to infer the shear strength of composites and to identify where the delamination initiates and how it propagates. Other important characteristics of composites, such as fiber-matrix adhesion or void content, may also be indirectly evaluated by this test. The aim of this work was to study the behavior of polyester matrix composites reinforced with curaua or sisal fibers under short beam tests. Various fiber lengths (10, 20, 30, 40 and 50 mm) fiber volumetric fractions (10, 20, 30 and 40%) and composites with different thicknesses (3.15, 4.80 and 6.45 mm) were studied for sisal or curaua fibers. Short beam strength did not vary with fiber length for both fibers, and curaua yielded slightly higher strength. The increase in fiber volume fraction, produced an increment of strength and the opposite was found for an increase in thickness.

Keywords: composites, short beam, curaua, sisal.

INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento e a difusão de novos processos de fabricação, materiais compósitos vêm sendo utilizados nas mais diversas aplicações e segmentos da indústria. Fibras sintéticas, e.g. aramida, vidro e carbono são as mais utilizadas como reforço em compósitos. Compósitos com fibras de vidro (chamados GFRP) proporcionam excelentes propriedades térmicas e mecânicas. No entanto, dificultam o desenvolvimento de processos eficientes de reciclagem.

Dificuldades de descarte, reciclagem ou reutilização são hoje sérias preocupações ambientais e por isso objeto de estudo de muitas pesquisas. O estabelecimento de métodos de disposição ou descarte para compósitos reforçados com fibras de vidro e suas leis de reciclagem são

temas contemporâneos importantes, pois muitos problemas ambientais surgem e vêm se agravando mundialmente ⁽¹⁾.

Fibras vegetais surgem como uma alternativa eficaz para a substituição parcial das fibras de vidro, suprimindo a necessidade de desenvolverem-se materiais compósitos baseados em constituintes derivados de fontes renováveis, minimizando impactos ambientais e econômicos. Sisal e Curauá são dois exemplos de fibras vegetais produzidas e comercializadas no mercado brasileiro, de fácil cultivo e processamento. Estas fibras estão entre as fibras vegetais exploradas comercialmente que apresentam as melhores propriedades mecânicas.

Compósitos são utilizados em muitas aplicações como materiais de engenharia. A resistência ao cisalhamento interlaminar é um parâmetro muito importante no design de estruturas. Muitos métodos foram sugeridos para mensurar a resistência ao cisalhamento interlaminar (ILSS) em compósitos reforçados por fibras. Atualmente short beam em três pontos é o método mais utilizado para se observar a falha por cisalhamento que ocorre no plano central do corpo de prova ⁽²⁾, sendo largamente utilizado na caracterização mecânica de compósitos devido a sua simplicidade e à pequena quantidade de material requerida para o ensaio, pode-se produzir muitos corpos de prova a fim de gerar uma descrição estatística confiável ⁽³⁾.

Como o nome indica, o ensaio de short beam submete o corpo de prova à flexão, da mesma maneira que um ensaio de flexão, mas o comprimento do corpo de prova é muito pequeno em relação à sua espessura. Por exemplo, a ASTM D 2344 especifica que a distância entre suportes (span) deve obedecer à razão de 4:1 (span/espessura). Para minimizar tensões de flexão (efeitos de tração e compressão) e maximizar a tensão de cisalhamento induzida ⁽⁴⁾.

A presença de vazios em compósitos estruturais pode ter efeitos significativos. Em geral, os vazios diminuem a resistência estática e a sua vida em fadiga. Essa influência é bastante pronunciada na resistência ao cisalhamento interlaminar ⁽⁵⁾ e portanto este teste fornece uma estimativa da qualidade da moldagem.

O teor de vazios pode ser determinado pela norma ASTM D 792-08 e ASTM D 2734-94, porém, em compósitos reforçados com fibras naturais o cálculo do volume de vazios fica comprometido devido à grande variação de densidade das fibras naturais.

Neste trabalho, estudou-se a resposta de compósitos de resina poliéster reforçados por fibras de sisal e curauá em ensaios de short beam em diferentes condições, utilizando fibras de diferentes comprimentos (10, 20, 30, 40 e 50 mm), compósitos com diferentes frações volumétricas (aprox. 10, 20, 30 e 40%) e diferentes espessuras (3,15, 4,80 e 6,45 mm).

Experimental

Preparo das fibras de sisal e curauá

As fibras de curauá utilizadas foram adquiridas diretamente de um agricultor na região de Santarém, no estado do Pará. Portanto, as fibras não haviam sofrido qualquer tipo de tratamento, a não ser a retirada da mucilagem e uma limpeza grosseira das fibras, que secaram ao ar livre. Já as fibras de sisal foram adquiridas no comércio local, em rolos de cordas com tratamento indefinido.

As fibras de curauá e sisal passaram por um processo manual de lavagem para retirada de impurezas, ficando submersas em água destilada durante uma hora. Secando por 50 min a 105°C em uma estufa com circulação forçada de ar.

De acordo com o volume desejado de reforço em cada compósito e a densidade de cada fibra, foram produzidas mantas por dispersão manual, de forma homogênea e aleatória nas dimensões do molde a ser utilizado.

Através de uma série de ensaios de picnometria a gás, utilizando um multi-picnômetro (Modelo MVP-1, Marca Quantachrome), com gás Hélio, foram determinadas as densidades das fibras de sisal e das fibras de curauá utilizadas. O picnômetro a gás determina o volume verdadeiro de um sólido, mesmo que poroso, por variação da pressão de gás numa câmara de volume conhecido. Normalmente utiliza-se Hélio porque este gás, além de inerte, penetra facilmente nos poros (acessíveis) da amostra, devido ao pequeno tamanho dos seus átomos, permitindo assim, determinar o volume do sólido com mais rigor⁽⁶⁾.

As fibras de curauá apresentaram densidade de $1,38 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ e as fibras de sisal, $1,20 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$.

Moldagem e caracterização dos compósitos

Os compósitos foram moldados na forma de placas planas, em um molde de aço inox, de cavidade interna com dimensões de $150 \times 150 \times 3$ mm. Como matriz, utilizou-se resina poliéster insaturada, isoftálica, Ucefex UC ISO 1005 da Elekeiroz. Como iniciador, na proporção de 1,5% em volume de resina, foi utilizado o peróxido de metil etil cetona (P-MEK). Imediatamente antes das moldagens, a resina sofreu um processo de degasagem durante 5 min em um equipamento de ultra-som. Como reforço, foram utilizadas mantas de fibras de sisal ou de curauá. As mantas sofreram um processo de secagem imediatamente anterior à moldagem, em estufa com circulação forçada de ar, permanecendo na temperatura de 105°C por 30 min. O processo de moldagem utilizado foi o de compressão à quente, na temperatura de 95°C e pressão de 2,6 ton durante 75 min em uma prensa hidráulica com aquecimento e controle/monitoramento digital. Marconi modelo MA 098/A 3030.

Inicialmente foram moldadas duas placas de material compósito com fração volumétrica de fibras de sisal ($\%V_f$) em torno de 20% e comprimento das fibras de 40 mm, uma com e outra sem degasagem (s/dg) da resina. Todos os demais compósitos foram moldados com degasagem.

Em seguida foram moldados compósitos com $\%V_f = 20\%$ com diferentes comprimentos de fibra (10, 20, 30, 40 e 50 mm), utilizando-se mantas com fibras de sisal ou de curauá.

Também foram moldados compósitos mantendo-se o comprimento das fibras de sisal e de curauá em 30 mm e variando o $\%V_f$ (10, 20, 30 e 40 %).

Finalmente moldaram-se compósitos reforçados com fibras de sisal e curauá com diferentes espessuras (3,15, 4,80 e 6,45 mm) mantendo-se um $\%V_f = 20\%$ e o comprimento de fibra de 30 mm.

As densidades dos diferentes compósitos foram obtidas de acordo com a norma ASTM D 792.

Os compósitos produzidos foram caracterizados por ensaios short beam (ASTM D2344M). A norma recomenda que a geometria dos corpos de prova seja: comprimento (h) = $6 \times$ espessura e largura (b) = $2 \times$ espessura.

Foram utilizados 10 corpos de prova em cada uma das séries de ensaios realizados e a razão s/t (span/thickness) foi de 4:1.



Figura 1: Corpos de prova com espessura de 3,15 mm ($L = 18,90$ mm), 4,80 mm ($L = 28,80$ mm) e 6,45 mm ($L = 38,70$ mm), de compósitos com fibras de sisal (a) e curauá (b).

Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios EMIC DL 30000 N, com célula de carga de 50 kgf, na configuração apresentada na Figura 2. A resistência short beam foi calculada através da Equação (1), onde P é a carga máxima registrada, b e h são a largura e a espessura do corpo de prova, respectivamente.

$$\text{Resistência Short Beam} = \frac{0,75P}{bh} \quad (1)$$

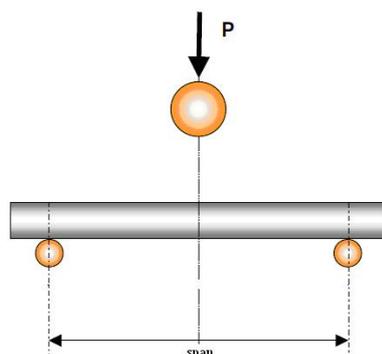


Figura 2: Esquema simulando o ensaio short beam em 3 pontos.

Resultados e Discussão

Nos resultados dos compósitos com diferentes comprimentos de fibras de sisal (Figura 3), observa-se que houve um aumento da resistência short beam dos compósitos com fibras de 40 mm com a degasagem, além de diminuir o desvio dos valores. Assim, comprovou-se a eficiência e a necessidade da degasagem realizada imediatamente antes da moldagem para minimizar a presença de voláteis na resina e conseqüentemente nos compósitos resultantes. Por isso, todos os compósitos posteriores foram moldados com degasagem da resina.

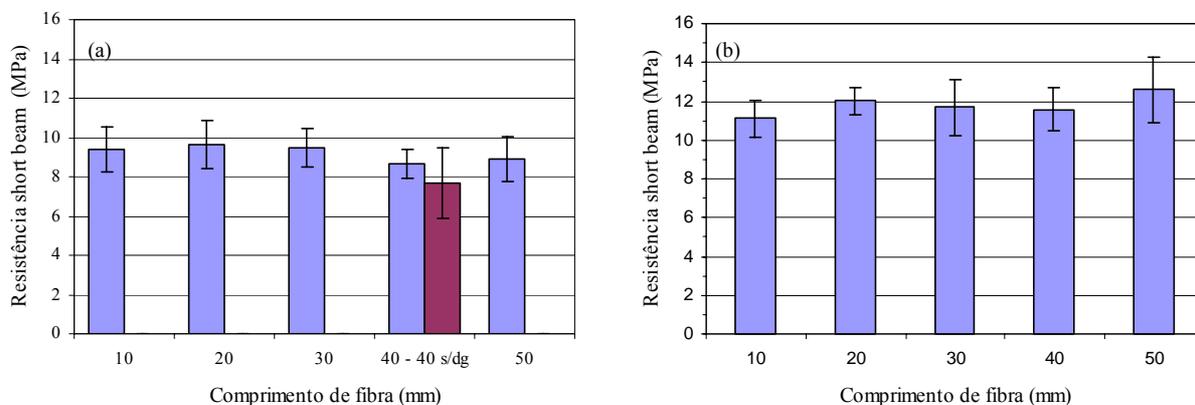


Figura 3: Resultados de resistência short beam de compósitos com diferentes comprimentos de fibras de sisal (a) e curauá (b) ($\%V_f = 20\%$).

Pode-se observar (Figura 3) também que nos compósitos com diferentes comprimentos de fibra, não existe uma diferença significativa entre os valores médios de resistência. O desvio padrão dos resultados foi creditado a uma pequena variação de espessura existente entre os corpos de prova e a forma manual e aleatória de distribuição das fibras na confecção das mantas.

Na Figura 3(b), os resultados obtidos nos ensaios dos compósitos com fibras de curauá reforçam o comportamento dos compósitos com fibra de sisal (Figura 3(a)), demonstrando que o comprimento das fibras não tem influência significativa sobre a resistência short beam para a faixa

de comprimento analisada. De qualquer maneira, os valores de resistência foram superiores aos dos compósitos moldados com fibras de sisal.

Na Tabela 1, são apresentados os resultados de fração volumétrica e fração mássica de fibra e a densidade de cada um dos compósitos avaliados. Nesta, observa-se um incremento na densidade dos compósitos, após a degasagem da resina, o que indica uma redução do teor de vazios. Também se observa que em cada classe de compósitos (sisal ou curauá), a densidade permaneceu constante dentro do erro experimental.

Table 1. Fração volumétrica, fração mássica de fibra e densidade dos compósitos.

Compósito	Sisal			Curauá			
	L_f (mm)	%V _f	%W _f	ρ_c (g/cm ³)	%V _f	%W _f	ρ_c (g/cm ³)
10		20,04	20,04	1,185 ($\pm 0,003$)	21,62	24,08	1,197 ($\pm 0,005$)
20		20,88	20,88	1,189 ($\pm 0,004$)	21,81	24,29	1,193 ($\pm 0,004$)
30		19,88	19,88	1,179 ($\pm 0,002$)	21,57	24,03	1,210 ($\pm 0,007$)
40		19,93	19,93	1,185 ($\pm 0,007$)	20,46	22,83	1,211 ($\pm 0,004$)
40 s/dg		20,81	20,81	1,167 ($\pm 0,004$)	--	--	--
50		20,13	20,13	1,183 ($\pm 0,004$)	21,49	23,94	1,219 ($\pm 0,006$)

L_f – comprimento da fibra; ρ_c – densidade dos compósitos.

Na Figura 4 é possível observar curvas típicas de Força \times deformação, obtidas nos ensaios short beam. Podem ser observadas quedas (bruscas) após o ponto de carga máxima, características destes ensaios.

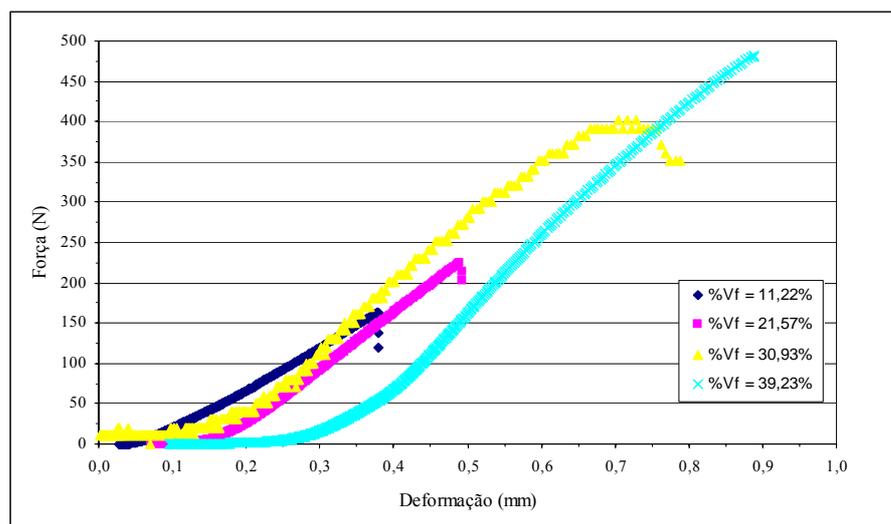


Figura 4: Curvas de Força \times deformação (short beam) de compósitos de curauá com diferentes %V_f.

Segundo Botelho⁽⁷⁾, trincas horizontais e verticais são características de cisalhamento interlaminar em corpos de prova submetidos a ensaios de short bem. Nas imagens da Figura 5,

observam-se falhas por cisalhamento em um corpo de prova retirado do compósito de sisal com espessura de 3,15 mm.

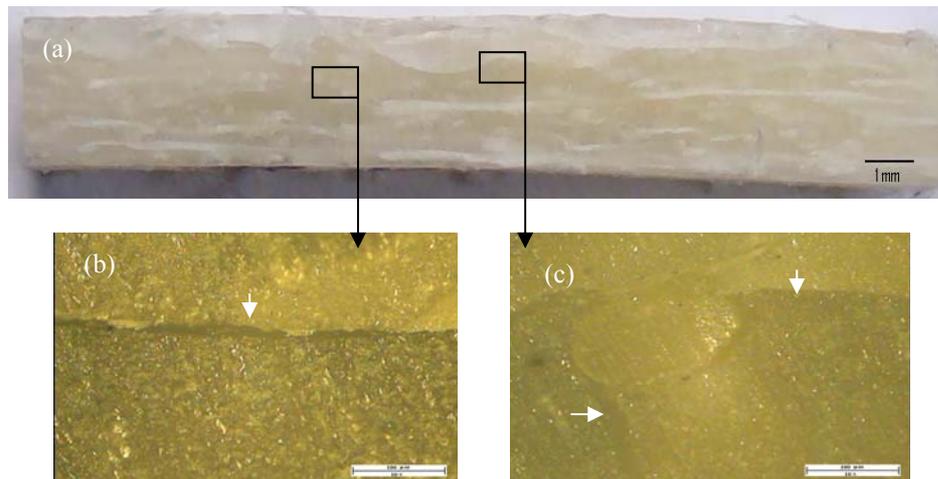


Figura 5: Fotografia (a) de corpo de prova ($\times 20$). Em detalhe, características da fratura por cisalhamento em short beam (b e c). Compósito reforçado com sisal, espessura de 3,15 mm, por microscopia óptica (MO), $\times 200$.

Os resultados dos ensaios short beam, mostraram que um aumento na fração volumétrica de fibra promove um incremento relevante na resistência, sendo observado um comportamento similar para as fibras de sisal e de curauá (Figura 6).

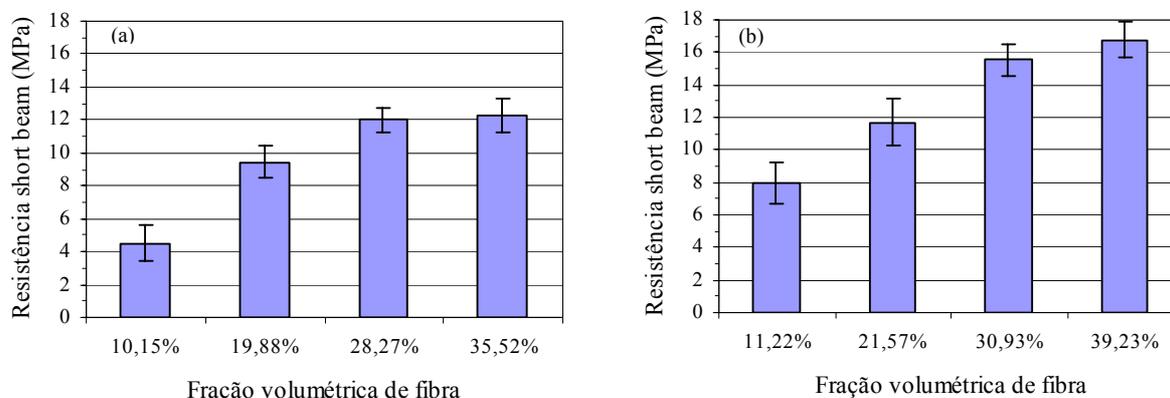


Figura 6: Resultados de resistência short beam de compósitos com diferentes frações volumétricas de fibra de sisal (a) e curauá (b).

Na Figura 6, nota-se que em altos valores de $\%V_f$, a resistência parece atingir um plateau. Isto ocorre devido às dificuldades na moldagem e na molhabilidade do reforço, provavelmente diminuindo a qualidade da moldagem e aumentando o teor de vazios (diminuindo a densidade), com a conseqüente redução da resistência do material.

Nos compósitos reforçados com curauá, quando se eleva o $\%V_f$ de 30,93 para 39,23%, observa-se um incremento na resistência em short beam, porém este ganho de resistência é menor em relação ao ganho obtido entre 11,22 e 30,93%. Similarmente ao sisal, observa-se que quando se

eleva o %V_f há uma tendência de aumentar a resistência até que a resistência começa a estabilizar em um certo %V_f.

Com o teste t de Student, realizado com os resultados dos ensaios de Short Beam, observou-se uma diferença significativa entre os compósitos com diferentes %V_f exceto entre os compósitos com %V_f entre 28,27 e 35,52% de sisal e de 30,93 e 39,23 de curauá.

Tabela 2. Variação da fração volumétrica e mássica de fibras e densidade dos compósitos (L_f = 30mm).

Compósitos de Sisal			Compósitos de Curauá		
%V _f	%W _f	ρ _c (g/cm ³)	%V _f	%W _f	ρ _c (g/cm ³)
10,15	10,15	1,165 (±0,015)	11,22	12,69	1,202 (±0,008)
19,88	19,88	1,179 (±0,002)	21,57	24,03	1,210 (±0,007)
28,27	28,27	1,180 (±0,009)	30,93	33,99	1,219 (±0,006)
35,52	35,52	1,176 (±0,004)	39,23	42,61	1,213 (±0,003)

ρ_c – densidade do compósito.

Com o aumento da espessura dos compósitos (Figura 7) houve uma redução na resistência em short beam. Embora o percentual volumétrico de fibra permaneça o mesmo, em torno de 20%, as mantas de reforço usadas são mais espessas, o que pode dificultar a impregnação da matriz na manta, e conseqüentemente a qualidade da moldagem.

De fato, pode-se observar por microscopia óptica, o aumento da presença de vazios nos compósitos de maior espessura. E novamente, os compósitos reforçados com fibras de curauá apresentaram valores de resistência ligeiramente superiores aos dos compósitos reforçados com fibras de sisal.

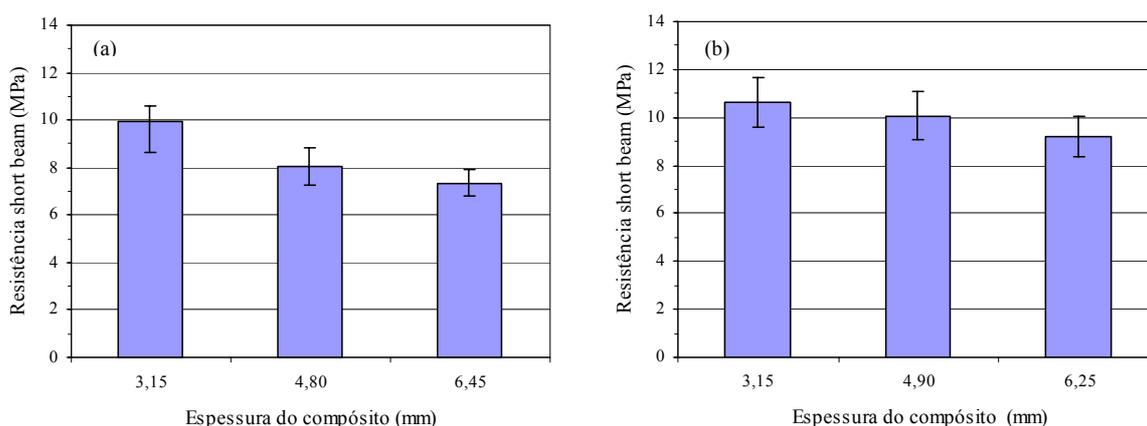


Figura 7: Resultados de resistência short beam de compósitos com diferentes espessuras, reforçados com fibras de sisal (a) e curauá (b) – (%V_f = 20%).

A Tabela 3 apresenta os dados de densidade dos compósitos produzidos em diferentes espessuras. Pode-se ver a diminuição de densidade dos compósitos de maior espessura, o que confirma o aumento esperado do teor de vazios neste caso.

Tabela 3. Densidade dos compósitos de sisal e curauá ($\%V_f \approx 20\%$), com diferentes espessuras.

Compósito de Sisal		Compósito de Curauá	
Espessura (mm)	ρ_c (g/cm ³)	Espessura (mm)	ρ_c (g/cm ³)
3,15	1,142 ($\pm 0,006$)	3,15	1,210 ($\pm 0,007$)
4,80	1,143 ($\pm 0,010$)	4,90	1,202 ($\pm 0,005$)
6,45	1,139 ($\pm 0,009$)	6,25	1,166 ($\pm 0,005$)

Conclusões

Pode-se observar por microscopia óptica e pela análise das curvas de carregamento dos ensaios short beam que houve a falha por cisalhamento nos compósitos, como esperado.

Com o processo de degasagem, houve uma redução na quantidade de voláteis e a conseqüente redução no teor de vazios e aumento nos valores de densidade dos compósitos avaliados, o que alterou positivamente os resultados de resistência short beam.

Observou-se que o comprimento de fibra não exerce uma influência significativa na resistência em short beam, tanto para fibras de sisal como para fibras de curauá e que o aumento na fração volumétrica de fibra provoca um incremento na resistência em short beam. No entanto, esse ganho tende a estabilizar para um elevado carregamento de fibras, acima de 30%.

O aumento na espessura das mantas para a moldagem de compósitos de maior espessura pode ter dificultado sua impregnação pela matriz, reduzindo a molhabilidade das fibras, aumentando o teor de vazios e reduzindo a resistência short beam.

Os compósitos reforçados com fibras de curauá apresentaram resistência short beam ligeiramente superior aos compósitos reforçados com fibras de sisal nas mesmas condições, o que pode ser um indicativo que as fibras de curauá possibilitam uma adesão levemente mais forte ou a produção de compósitos de melhor qualidade em termos de teor de vazios.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, a CAPES e a FAPERGS pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

1. R. Zah; R. Hischier; A. L. Leao; I. Braun *J. Cleaner Prod.* 2007, 15, (11-12), 1032-1040.
2. S. H. Li; Q. Y. Zeng; Y. L. Xiao; S. Y. Fu; B. L. Zhou *Mat. Sci. Eng.* 1995, C3, 125-130.
3. M. L. Costa; S. F. M. Almeida; M. C. Rezende *Compos. Sci. Technol.* 2001, 61, 2101-2108.
4. D. F. Adams. The Short Beam Shear Test. *High Perform. Compos.* 2006, julho.
5. M. L. Costa; S. F. M. de Almeida; M. C. Rezende. *Polímeros: Ciência e Tecnol.* 2001, 11, (4), 182-189.

6. M. J. Moura; M. M. Figueiredo *Silva Lusitana*. 2002, 10, (2), 207-216.

7. E.C. Botelho; M. C. Rezende *Polímeros: Ciência e Tecnol.* 2002, 12, (3), 153-163.