

# COMPARATIVO DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO CHARPY DE COMPÓSITOS EM MATRIZ EPÓXI E POLIÉSTER REFORÇADOS COM FIBRA DE CÂNHAMO

*Anna Carolina Cerqueira Neves<sup>1</sup>*

*Lázaro Araújo Rohen<sup>1</sup>*

*Dhyemila Paula Mantovani<sup>2</sup>*

*Carlos Maurício Fontes Vieira<sup>3</sup>*

*Frederico Muylaert Margem<sup>4</sup>*

*Sergio Neves Monteiro<sup>5</sup>*

## Resumo

As fibras sintéticas vêm sendo gradualmente substituídas por fibras naturais, uma vez que ao compará-las, as fibras naturais demonstraram vantagens econômicas e ambientais. No que tange a aplicação de compósitos que têm fibras naturais como fase reforço de matrizes poliméricas, destaca-se a indústria automobilística, especialmente as partes internas dos carros; aplicação essa que justifica o interesse em analisar e comparar o comportamento mecânico de resistência ao impacto, nesse caso, Charpy, onde se torna interessante avaliar a absorção de energia dos materiais até a fratura e o aspecto da fratura. Uma vez que as resinas epóxi e poliéster destacam-se como fase matriz em compósitos dessa natureza, o presente estudo tem o objetivo de determinar qual matriz apresenta melhor desempenho mecânico. Uma vez confeccionados os corpos de prova com adição de 0, 10, 20 e 30% de fibras de cânhamo incorporadas, tanto para matriz poliéster quanto epóxi, esses foram ensaiados em uma PANTEC Pendulum e seus resultados analisados. Desta forma, observou-se uma relação próxima a linearidade entre o aumento do valor de energia de impacto absorvida e a quantidade de fibras de cânhamo incorporadas. Ainda foi possível observar um destaque nas propriedades dos compósitos de matriz epoxídica em detrimento dos compósitos de matriz poliéster.

**Palavras-chave:** Charpy, comparativo, fibra de cânhamo, compósitos, epóxi, poliéster.

## CHARPY IMPACT TEST IN EPOXY MATRIX COMPOSITES REINFORCED WITH HEMP FIBER

### Abstract

Synthetic fibers have gradually been replaced by natural fibers, since in comparing them, natural fibers have shown economic and environmental advantages. Regarding the application of composites that have natural fibers as reinforcing phase of polymer matrices, the automotive industry, especially the internal parts of cars, stands out; application that justifies the interest in analyzing and comparing the mechanical behavior of impact resistance, in this case, Charpy, where it becomes interesting to evaluate the energy absorption of the materials until the fracture and the aspect of the fracture. Since the epoxy and polyester resins are highlighted as matrix phase in composites of this nature, the present study has the objective of determining which matrix presents better mechanical performance. Once the samples containing 0, 10, 20 and 30% of incorporated hemp fibers were prepared, both polyester and epoxy were tested in a PANTEC pendulum and analyzed. Thus, a close relationship was observed between linearity between the increase in the absorbed impact energy value and the amount of incorporated hemp fibers. It was still possible to observe a prominence in the properties of epoxy matrix composites to the detriment of polyester matrix composites.

**Keywords:** Charpy, comparative, hemp fibers, composites, epoxy, polyester.

- <sup>1</sup> *Graduando(a) em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, bolsista de iniciação científica, LAMAV, UENF, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro - Brasil.*
- <sup>2</sup> *Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, bolsista de iniciação científica, LAMAV, UENF, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro - Brasil.*
- <sup>3</sup> *Pós doutorando em Ciência e Engenharia de Materiais, Pós-Doutorando, LAMAV, UENF, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro - Brasil.*
- <sup>4</sup> *Professor PhD, IME, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

É notório o aumento da produção de bens de consumo e conseqüentemente da produção de rejeitos, gases ofensivos e materiais não recicláveis, bem como a elevação da taxa de crescimento global que prejudica a vida do planeta como todo. Entretanto, felizmente, em paralelo, aumenta também a linha de pensamento que diz respeito a conscientização para preservação ambiental, na qual destaca-se a busca por materiais ambientalmente amigáveis, cujos processos de fabricação e até mesmo rejeitos sejam cada vez menos nocivos. (1)

No que tange à busca de materiais que sejam mais “amigáveis” ao meio ambiente, é possível salientar o crescente uso de fibras naturais como reforço de matrizes poliméricas que alia questões ambientais – ser renovável, biodegradável, de baixa toxicidade – a questões financeiras visto que se tratam de materiais de baixo custo e encontrados em abundância. Além disso, destaca-se atrativa resistência e rigidez específica, caracterizando-os em potenciais substitutos para fibras sintéticas. (2)

O uso de resinas termofixas, tais como poliéster e epóxi, justifica-se, por sua vez, através de vantagens como baixo custo, estabilidade térmica e dimensional, resistência química em altas temperaturas e a facilidade em se moldar peças de

grandes dimensões, embora sua resistência a fratura torne necessária a utilização de reforços. (3)

Uma vez que as propriedades dos compósitos de matriz poliméricas reforçados por fibras naturais são dependentes diretamente das propriedades do reforço e matriz isoladamente, características como geometria, forma, composição química, orientação e quantidade relativa das fibras influenciam diretamente o comportamento final dos compósitos e o seu comportamento com a matriz. Especialmente no que diz respeito ao comportamento entre matriz e fibra, esta interface apresenta grande importância uma vez que é através desta presente região que ocorrem as transferências de carga entre matriz e reforço. (4)

No que diz respeito a aplicação desse tipo de compósitos, uma vez que as fibras naturais vêm substituindo as sintéticas, das quais destaca-se a fibra de vidro, como fase de reforço em compósitos de matriz polimérica, estes vem sendo utilizados em muitas aplicações de engenharia como componentes do interior de automóveis, capacetes de ciclismo, painéis de carros e paletas de moinho, das quais dentre as aplicações, deseja-se destacar a característica de resistência ao impacto de uma fibra natural que por sua vez é mais flexível, tornando-a vantajosa por exemplo em uma situação em que há uma batida com impacto. Uma vez que as fibras estejam aderidas à matriz, as partes dos automóveis como painel frontal, encosto de cabeça não irão se partir em pedaços pontiagudos e/ou cortantes, por outro lado, essas partes deverão absorver a energia de impacto, evitando causar injúrias aos passageiros. (5)

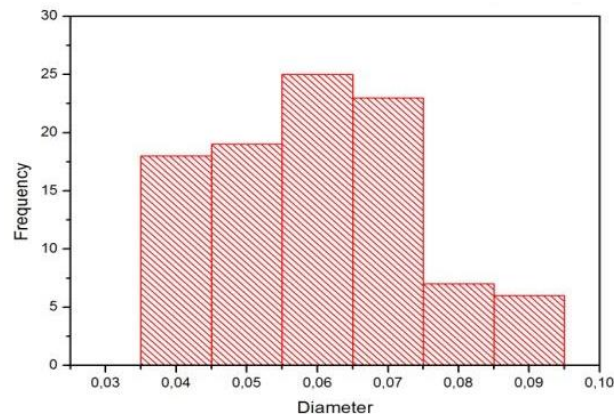
Exemplos de fibras utilizadas na indústria automobilística já em escala industrial são as fibras de coco, linha, juta, rami, curauá e sisal. (6) Partes de carros e até mesmo o protótipo de avião já foram confeccionados com compósitos reforçados por fibras de cânhamo, fibras fortes e flexíveis, porém, ainda não se tem registros de seu uso em larga escala, o que potencializa a importância deste presente estudo.

Assim, o presente trabalho, propôs estudar o comportamento mecânico dos compósitos de matriz polimérica reforçados por 10%, 20% e 30% em volume de fibras de cânhamo referente à resistência ao impacto na configuração Charpy e ainda a avaliação das propriedades de flexão desse material, estabelecendo ainda uma comparação entre as matrizes epoxídicas e de poliéster. Além da estrutura fractográfica desses materiais avaliando as características da interface e o comportamento mediante absorção de energia de impacto avaliados e os aspectos da fratura por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e análise da macrografia.

Este estudo de avaliação das propriedades de absorção de energia em materiais compósitos de matrizes epóxi e poliéster reforçados por fibras de cânhamo, portanto, contribuiu para a busca de novos materiais que sejam alternativas mais sustentáveis, com viabilidade econômica e tecnologia adequada.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados neste presente trabalho as fibras de cânhamo sem tratamento superficial prévio obtidas através da empresa Desigan Fibras Naturais e as resinas poliméricas epóxi e poliéster fornecidas pela Resin Epoxi. Foram extraídas aleatoriamente com fibras do lote recebido e medidas em um projetor de perfil. Essas medidas foram estatisticamente tratadas e então obteve-se o histograma da Figura 1, que mostra a distribuição dos diâmetros da fibra de cânhamo considerando seis intervalos distintos. Uma vez que obtida a distribuição dos diâmetros, foi possível determinar o diâmetro médio de 0,065mm para as fibras de cânhamo do lote recebido.



**Figura 1.** Histograma da distribuição do diâmetro da fibra de cânhamo em seis diferentes intervalos.

Inicialmente, as fibras foram cortadas em comprimentos de aproximadamente 125mm para que pudessem ser melhor acomodadas nas matrizes. Depois de cortadas, foram pesadas em balança semi analítica e separadas em quantidades que representavam 10, 20 e 30% em volume da matriz para que fossem incorporadas como reforço.

As matrizes metálicas utilizadas para a confecção das placas mediam 152x120x12,5mm e portanto, após seu desmolde foram cortadas para obter as medidas necessárias para o ensaio de impacto Charpy conforme especificado na ASTM D6110-10 e mostrado na Figura 2.

As matrizes foram preparadas de forma a serem untadas por vaselina sólida e envoltas por plástico filme em todas as suas três partes a fim de que a operação de desmolde fosse facilitada, não fossem provocadas quebras das placas e ainda fossem evitados vazamentos da fase contínua pela matriz metálica.

Então, foram preparadas as resinas que foram utilizadas como matriz. A preparação da resina se deu de forma a pesar 280 gramas da mesma em balança analítica, adicionando-se o catalizador correspondente em quantidades adequadas. ou seja, para a resina poliéster insaturada ortoftálica, de alta viscosidade e insolúvel em água endurecida adicionou-se 5% em peso de catalizador a base de metil-etil

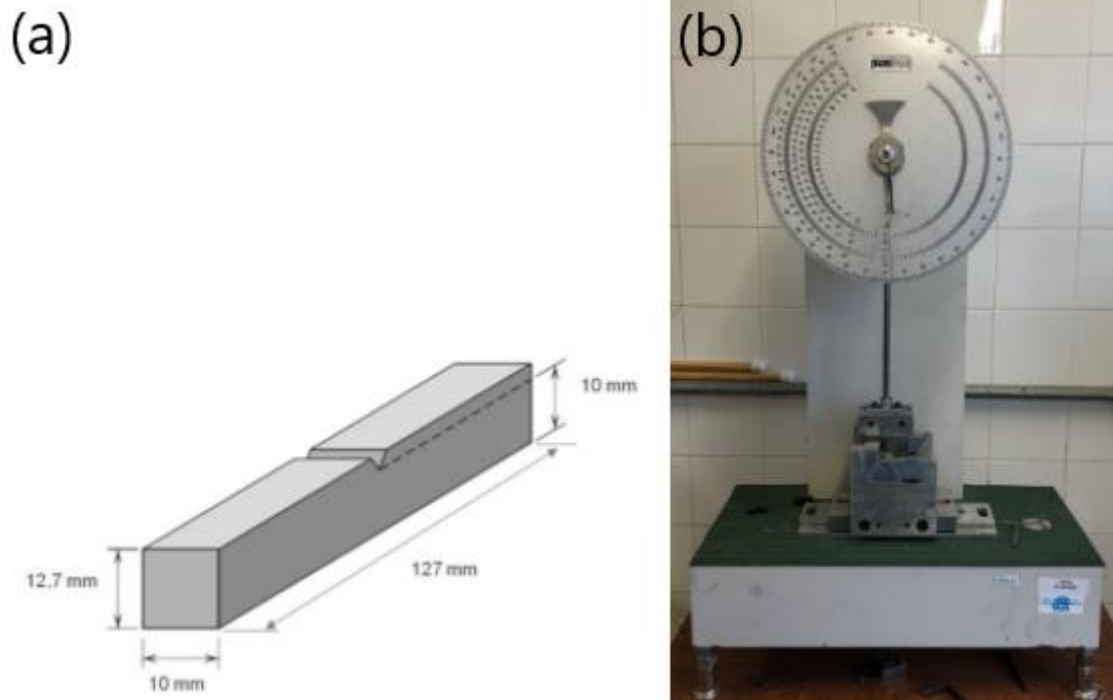
cetona e também, enquanto que para a resina epóxi diglicil éter de bisfenol-A (DGEBA) foi feita a adição de 13% em peso de catalizador trietileno tetramina (TETA). Em sequência, feita a mistura desses dois produtos de forma lenta para evitar a incorporação de bolhas na matriz polimérica, até que fosse possível sentir a iniciação do processo de cura, caracterizado pela reação exotérmica gerando aquecimento e um início de endurecimento. Salienta-se que todo esse procedimento de mistura foi realizado dentro da capela, bem como foram usados todos os equipamentos de segurança recomendados durante a manipulação de tais produtos.

Uma vez preparadas matriz metálica, fibras e resina, iniciou-se a confecção dos corpos de prova propriamente ditos. Primeiro, colocou-se uma quantidade de resina na base da matriz, suficiente para formar a primeira camada; então adicionou-se fibras de cânhamo formando mais uma camada e assim, intercalando matriz polimérica e reforço até que toda quantidade de fibra referente ao volume de reforço requerido fosse incorporada na matriz.

Depois de colocadas resina e fibras na matriz metálica, esta foi fechada e colocada na prensa aplicando uma pressão de 1 toneladas por 24 horas, a fim de que houvesse um melhor fechamento da matriz, melhor disposição das fibras na matriz melhorando a interface e ainda, prestasse auxílio na eliminação de bolhas na matriz polimérica, além do fato desse tempo de 24 horas corresponder ao período suficiente para que o processo de cura fosse completado.

Passado o tempo para cura, as placas foram retiradas da matriz metálica com o auxílio de uma espátula metálica, com cuidado para que não ocorressem fraturas das placas de compósito no processo de desmolde.

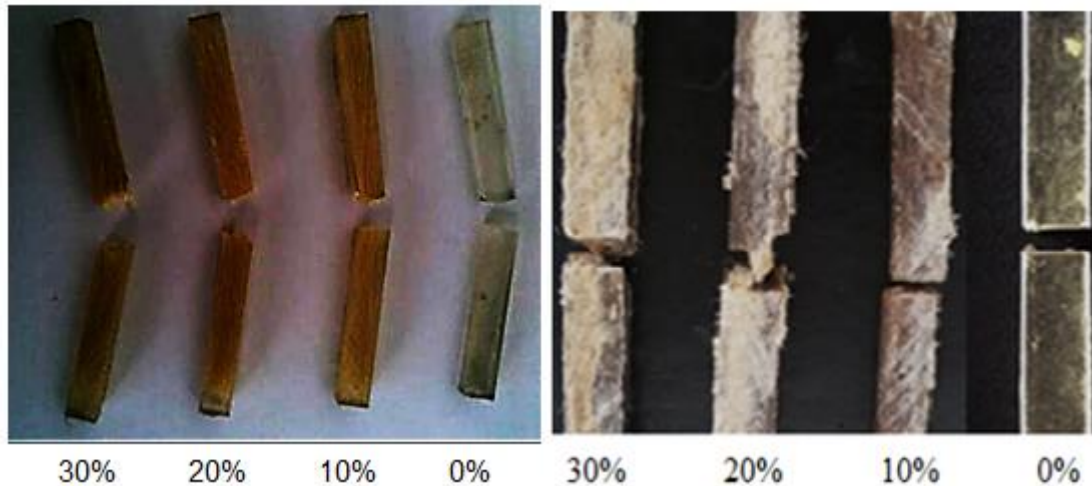
Após o término da confecção das placas de compósito, estas seguiram para a fresa, onde foram cortadas e entalhadas, adquirindo as dimensões necessárias para o ensaio. Uma vez cortados e medidos com o auxílio de um paquímetro, os corpos de prova para 0,10, 20 e 30% de fibras de cânhamo incorporados tanto em matriz poliéster quanto epóxi foram ensaiados numa máquina de ensaio de impacto PANTEC Pendulum em configuração para ensaio de impacto Charpy, conforme mostrado na Figura 2 a seguir.



**Figura 2:** (a) Dimensões dos corpos de prova para ensaio Charpy (Fonte: adaptado de Callister, 2008); (b) Máquina de ensaios de impacto PANTEC Pendulum XC-50 em configuração Charpy. (Fonte própria)

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através da macroestrutura do corpo de prova rompido por impacto Charpy que não apresenta reforço é possível observar a natureza frágil do ponto de rompimento, ou seja, com a energia absorvida pelo impacto as trincas puderam se propagar sem que “obstáculos” fossem impostos, até que a amostra se rompe em duas partes distintas, mecanismo esse que ocorre tanto para os corpos de prova de resina epóxi quanto poliéster, conforme observado na Figura 30, nos itens (a) e (b). Com a adição de teores de fibras de cânhamo à matriz, por sua vez, a propagação da inicial da trinca é bloqueada pelas fibras e precisa migrar para a interface fibra/matriz. Em corpos de prova com maiores incorporações de fibras, o corpo de prova chega a não romper completamente, mantendo as partes da matriz unida, sem que haja a ruptura em estilhaços, por exemplo.



**Figura 3:** Macroscopia dos corpos de prova de matriz (a) epoxídica e (b) poliéster após serem submetidos ao ensaio de impacto Charpy. (Fonte própria)

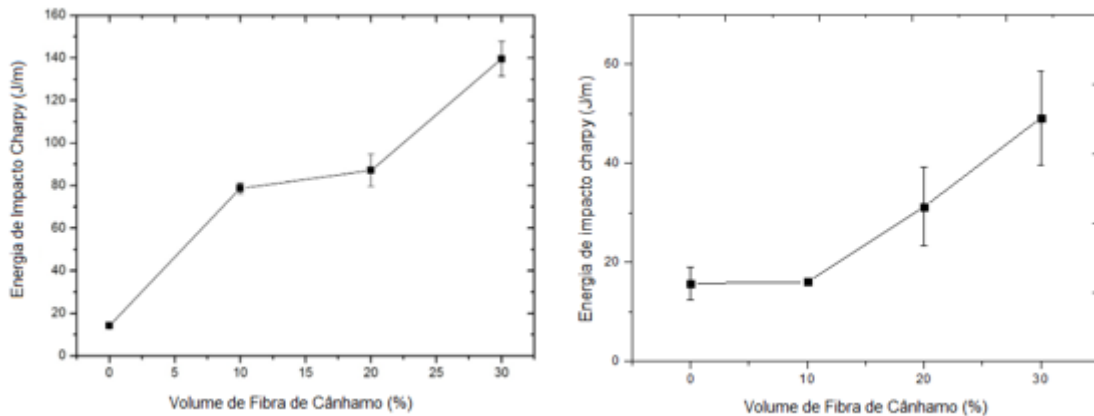
Alguns fatores relacionados à fratura de impacto em matrizes poliméricas reforçadas por fibras de naturais relevantes consistem na resistência relativamente baixa na interface, onde se tem uma matriz polimérica de natureza hidrofóbica e uma fase reforço de natureza hidrofílica por se tratar de uma fibra natural lignocelulósica, contribuindo para uma transferência de cargas ineficiente da matriz para as fibras contínuas e alinhadas. Uma vez que são características de matrizes poliméricas, se aplicam tanto para a resina epóxi quanto poliéster.

Os resultados obtidos pelo ensaio de impacto Charpy podem ser observados na Tabela 1 a seguir e de antemão, pode-se comentar que para ambos os compósitos, tanto em matrizes poliéster quanto epóxi, houve uma melhora na absorção de energia de impacto ao passo que aumentada a porcentagem em peso de fibras de cânhamo incorporadas, linearidade desta observada através dos gráficos da figura 4a seguir.

**Tabela 1:** Valores de absorção de Energia para compósitos reforçados por fibras de cânhamo em matrizes poliéster e epóxi submetidos a ensaios de impacto em configuração Charpy. (Fonte própria)

Volume de fibra de <i>hemp</i> (%)	Energia de impacto Charpy Matriz Poliéster (J/m)	Energia de impacto Charpy Matriz Epóxi (J/m)

0	$15,75 \pm 3,27$	$14,90 \pm 0,60$
10	$16,08 \pm 0,63$	$78,70 \pm 2,58$
20	$31,23 \pm 7,93$	$87,10 \pm 7,51$
30	$49,16 \pm 9,56$	$139,05 \pm 8,21$



**Figura 4:** Variação da energia de impacto na configuração Charpy em relação ao volume de fibras de cânhamo incorporadas nas matrizes (a) de poliéster e (b) epóxi.

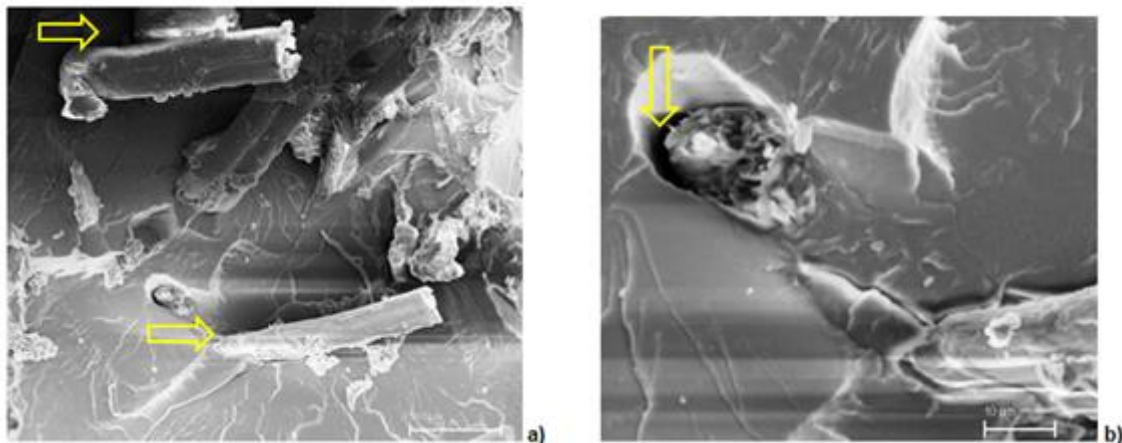
Com base nos valores demonstrados acima, para os compósitos reforçados por fibras de cânhamo em matrizes poliéster, há um aumento pronunciado nos valores de absorção de energia, especialmente a partir de 20%p de fibras incorporadas, de forma que as fibras de cânhamo mostram-se bom reforço, favorecendo a absorção de energia de impacto, uma vez que a trinca deixa de se propagar livremente pela matriz e passa a encontrar “obstáculos” que são as fibras, precisando de maior energia para romper ou contornar essa “barreira”.

O mesmo processo de reforço se dá para os compósitos reforçados por cânhamo em matriz poliéster, entretanto, o aumento das propriedades não é tão pronunciado quanto o dos compósitos de matriz epóxi, podendo estar relacionado a problemas na interface da fibra de cânhamo e da matriz poliéster, sugerindo assim, um possível tratamento na superfície da fibra a fim de melhorar a interface entre as fases do compósito. Além disso, baixos valores podem ter relação com o lote de resinas recebido, problemas na confecção dos corpos de prova, tais como má distribuição de cargas ao ser submetida à prensa, problemas para homogeneização da resina e endurecedor, processo de cura incompleto e afins.

A superfície da fratura típica para um corpo de prova ensaiado por impacto Charpy pode ser observada na Figura 5 a seguir e através dela, é possível observar em 5 (a) um “dobramento” das fibras ao invés de sua ruptura. Enquanto que em 32 (b) observa-se a propagação de uma trinca que se propaga com padrão de “veios de rio” e ainda, na interface matriz-reforço é possível notar as trincas se propagando na interface, o que consiste no mecanismo de fratura entre a fibra de cânhamo e a matriz



polimérica associado à resistência fraca na interface, resultando a um aumento na energia de impacto.



**Figura 5:** MEV da região fractográfica por ensaio de impacto na configuração Charpy de corpos de matriz poliéster reforçados por 30% de fibras de cânhamo.

De forma mais específica, no que se refere à diferença entre as energias de impacto entre as matrizes epóxi e poliéster reforçados com a mesma porcentagem em peso de fibras de cânhamo, observa-se que os compósitos de matriz epoxídica apresentam propriedades de até aproximadamente três vezes maior que os compósitos de matriz poliéster para aqueles com 30% de fibras de cânhamo incorporadas. Acredita-se, por sua vez, que esse desempenho significativamente inferior da matriz poliéster, se comparada à epóxi, se deve ao fato da resina poliéster apresentar certa dificuldade em formar cadeias longas e de cura, além de possíveis problemas relacionados ao lote de resinas utilizado, além de problemas na interface entre resina poliéster e fibra de cânhamo, que pode ser melhorada através de tratamentos superficiais na fibra.

#### 4 CONCLUSÃO

Ambos os compósitos de matriz poliéster quanto epóxi tem suas propriedades de absorção de energia de impacto Charpy aumentadas quanto maior a porcentagem em peso de fibras de cânhamo como reforço.

Os compósitos reforçados por fibras de cânhamo como reforço de matriz epóxi podem apresentar valores de absorção de energia, ou seja, propriedades de resistência ao impacto Charpy, até aproximadamente 3 vezes maior que para compósitos com a mesma incorporação de fibras de cânhamo (30%) para matriz poliéster.

A fraca interface entre a matriz polimérica hidrofóbica e a fase reforço de fibras naturais lignocelulósicas hidrofílicas contribuiu para um aumento na energia de impacto mudando a trajetória da propagação das trincas no compósito, que passa a ocorrer de forma longitudinal pela interface, gerando áreas mais largas de ruptura se

comparada às fraturas transversais, o que reflete em maiores valores de energia de impacto absorvidos para que a ruptura se efetive.

## 5 REFERÊNCIAS

- <sup>1</sup> Monteiro, S. N.; Perissé, F. D. L.; Costa, L. L.; Bevitori, A. B.; Silva, I. A. S. Barbosa A.P, (2011) Natural Lignocellulosic Fibers as engineering materials – 53 an overview. The minerals, metals & materials Society and ASM International 2011, 2966-Vol 42A, October 2011.
- <sup>2</sup> Sébe, G., Cetin, N. S., Hill, C. A. S., Hughes, M. (2000) RTM Hemp fibre-reinforced polyester composites. Applied Composite Materials, 7: 341-349.
- <sup>3</sup> Sanchez, E. M. S., Cavani, C. S., Leal, C. V., Sanchez, C. G. (2010) Compósito de resina poliéster insaturado com bagaço de cana-de-açúcar: influenciado tratamento das fibras nas propriedades. Polímeros, 20(3): 194-200.
- <sup>4</sup> Razera, I. A. T., Frollini, E. (2004) Composites based on jute fibers and phenolic matrices: Properties of fibers and composites. Journal of Applied Polymer Science, 91: 1077- 1085.
- <sup>5</sup> Rohen, L. A., Margem, F. M., Neves, A. C. C., Monteiro, S. N., Gomes, M. A., Castro, R. G. Vieira, C. M. F., De Paula, P. (2015) Izod impact test in epóxi matrix composites reinforced with hemp fiber. Characterization of Minerals, Metals, and Materials.
- <sup>6</sup> Joseph, A.; Sreekala, M. S.; Oomens, Z.; Koshy, P.; Tothomas, S. A. (2002) “ A comparison of the mechanical properties of phenol formaldehyde composites reinforced with banana fibre and glass fibres”. Composites Science and Technology, v. 62, p. 1857-68, 2002.
- <sup>7</sup> Callister, W.D. (2008). Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução, 7ed., LTC, Rio de Janeiro-RJ.
- <sup>8</sup> Neves, Anna Carolina Cerqueira; Rohen, Lázaro Araújo; Vieira, Janaína da Silva; Vieira, Carlos Maurício Fontes; Margem, Frederico Muylaert; Monteiro, Sergio Neves; Mantovani, Dhyemila de Paula. ANÁLISE DO IMPACTO CHARPY EM COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORÇADA COM FIBRAS DE CÂNHAMO In: 71º Congresso Anual da ABM, 2016, Rio de Janeiro. Anais do Congresso Anual da ABM. São Paulo: Editora Blucher, 2017. p.643
- <sup>9</sup> Neves, Anna Carolina Cerqueira; Rohen, Lázaro Araújo; Castro, Rafael Gomes de; Vieira, Carlos Maurício Fontes; Margem, Frederico Muylaert; Monteiro, Sergio Neves; CHARPY IMPACT TEST IN EPOXY MATRIX COMPOSITES REINFORCED WITH HEMP FIBER In: 70º Congresso Anual da ABM, 2015, Rio de Janeiro. Anais do Congresso Anual da ABM. São Paulo: Editora Blucher, 2017. p.615

- <sup>10</sup> ASTM, Internacional (2002) Standard Test Methods for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastic: ASTM D 6110-10. United States.
- <sup>11</sup> Aquino, R. C. M. P.; Almeida, J. R. M; Monteiro, S.N. (2005). Análise do Compósito de Piaçava/Resina poliéster, como substituto da Madeira. In: 60º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 24-27 de julho de 2006, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- <sup>12</sup> Hull, D.; Clyne, T. W. (1996) An Introduction to Composite Materials, 2a ed., Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- <sup>13</sup> Monteiro, S.N, Costa, L.L., Santafé, H.P.G.,(2008) Tenacidade ao impacto Charpy de compósito epoxídico reforçado com fibras de coco, In: CBECIMAT – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, outubro de 2008, Porto de Galinha – PE – Brasil.p. 1-12.
- <sup>14</sup> Bledzki, A.K.; Gassan, J. (1999) Composites reinforced with cellulose-based fibres. Prog. Polym. Sci, v. 24, p. 221-274.
- <sup>15</sup> Monteiro, S.N.; Lopes, F.P.D.; Ferreira, A.S.; Nascimento, D.C.O. (2009a) Natural fiber polymer matrix composites: cheaper, tougher and environmentally friendly. JOM, v. 61, n. 1, p. 17-22.
- <sup>16</sup> Leão, A. L.; F.X., Frollini, E. (1997) Lignocellulose-Plastics Composites, plastic composite. USP & UNESP.
- <sup>17</sup> Monteiro, S.N., Lopes, F.P.D., (2007) Ensaio de impacto em compósito polimérico reforçado com fibras de curauá – In: 62º CONGRESSO ANUAL DO CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS ,ABM, julho de 2007, Vitória, ES. p. 1-10
- <sup>18</sup> Yue, C.Y.; Looi, H.C; Quel, M.Y. (2005) Assessment of Fibre-Matrix Adhesion and Interfacial Properties Using the Pullout Test. Int. J. Adhesion and Adhesives, v. 15, p. 73-80, 1995.
- <sup>19</sup> Monteiro S.N; Margem F. M; Neto, J.B. Evaluation of the interfacial strength of ramie fibers in polyester matrix composites, TMS 2010 Annual Meeting & Exhibition, February 14-18, 2010 • Washington State Convention Center, Seattle, WA.
- <sup>20</sup> Crocker, J., “Natural materials innovative natural composites”. Materials Technology, 2-3 (2008) 174-178.
- <sup>21</sup> K.C.M. Nair, S.M. Diwan, S. Thomas, “Tensile properties of short sisal fiber reinforced polystyrene composites”, *J. Appl. Polym. Sci.*, 60(9) (1996) 1483-1497.
- <sup>22</sup> P.V. Joseph, K. Joseph, S. Thomas, “Short sisal fiber reinforced polypropylene composites: the role of interface modification on ultimate properties”. *Compos. Interf.*, 92(2) (2002) 171-205.
- <sup>23</sup> S.N. Monteiro, W.P. Inacio, F.P.D. Lopes, L.L. Costa, L.F.L. Santos Jr., “Characterization of the critical length of sisal fibers for polyester composite

reinforcement”, *Proceedings of Characterization of Minerals, Metals & Materials - TMS Conference*, (San Francisco, USA, March, 2009) 1-8.

- <sup>24</sup> S.Y. Fu, B. Lauke, E. Mäder, X. Hu and C.Y. Yue, “Fracture resistance of short-glass-fiber-reinforced and short-carbon-fiber-reinforced poly-propylene under Charpy impact load and dependence on processing”, *J. Mater. Process. Technol.*, 89/90 (1999), 501-507.
- <sup>25</sup> S.N. Monteiro, R.C.M.P. Aquino, F.P.D. Lopes, E.A. Carvalho and J.R.M. d’Almeida, “Charpy impact notch toughness of piassava fibers reinforced polyester matrix composites” (in Portuguese), *Rev. Mater.*, 11(3) (2006) 204-210.