# DEFEITOS ONDULATÓRIOS DAS FIBRAS DE REFORÇO NOS LAMINADOS DE COMPÓSITOS POLIMÉRICOS

**Isadora de Moura Gomes Leal [1], Carlos Alberto Cáceres [2]**

## RESUMO

Este estudo é direcionado as propriedades mecânicas de compósitos poliméricos e analisa a influência de defeitos como o desalinhamento das fibras que são utilizadas como material de reforço. Os compósitos analisados possuem uma matriz de resina epóxi reforçados com fibras de vidro 1200 g/m². Este tipo de material compósito é utilizado na fabricação de pás eólicas e dentre as características mais atrativas destes materiais se encontra a elevada razão resistência/peso, pois apresentam excelente resistência mecânica somada a uma grande leveza. As propriedades mecânicas advêm da forma como as fibras presentes são alinhadas na matriz polimérica e defeitos como desalinhamento das fibras por ondulações nos laminados podem promover um decréscimo nas propriedades mecânicas, no desempenho dos componentes estruturais e na vida útil da estrutura. Considerando os defeitos como negativos, existe uma motivação no estudo sistemático da presença destes defeitos e sua influência no comportamento mecânico dos laminados estruturais. Para poder introduzir este tipo de defeito foram projetados moldes com superfícies ondulatórias senoidais de modo a simular propositalmente este tipo de ondulações nos laminados. Nesse sentido o objetivo deste projeto é a investigação do desalinhamento de fibras e seu impacto nas propriedades mecânicas de compósitos estruturais de matriz de resina epóxi e fibras de vidro. Os resultados foram analisados através de ensaios mecânicos de tração de acordo com a norma técnica ASTM D3039, e em seguida as amostras com defeitos foram comparadas com amostras de referência obtidas sem a presença de defeitos. Onde comprovou-se que as amostras com presença de defeito ondulatório estavam sujeitas a rupturas precoces, e a amostra com maior nível de severidade de defeito alcançava a ruptura mais rapidamente.

**Palavras-chave:**

Compósitos. Resina Epóxi. Fibra de vidro.

[1] Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, IEDS, Discente, e-mail: isadora_mgl@hotmail.com
[2] Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, IEDS, Docente, e-mail: caceres@unilab.edu.br

## INTRODUÇÃO

A principal demanda dos projetos de compósitos reforçados com fibras, é obter materiais com alto desempenho de resistência em relação ao peso. Por definição os materiais compósitos são obtidos a partir de combinações de diferentes materiais, onde determinadas características especificas de cada material de origem estarão presentes em um único material, como rigidez, tenacidade e resistências as condições ambientais e elevadas temperaturas (SHACKELFORD, 2008). Materiais compósitos com reforço de fibras possuem diversas características específicas que os diferenciam entre si, implicando em suas propriedades mecânicas, que dependem diretamente das propriedades das fibras como: diferentes comprimentos, orientações, concentrações e distribuições (CALLISTER JR e RETHWISCH, 2010).

A extensão da ligação fibra-matriz é um requisito de propriedades mecânicas ótimas, pois sob aplicação de uma determinada carga os esforços recebidos pela matriz devem ser minimamente transmitidos para as fibras de forma que estejam isentas desses danos, pois a matriz é responsável pela estabilidade e distribuição eficiente de carga pelas fibras a fim de proteger as superfícies dos reforços. São essas fibras que dão excelentes características estruturais aos compósitos, também os tornando complexos na fabricação, pois são construídos camada por camada (CALLISTER JR e RETHWISCH, 2010).
Compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro são utilizados como reforços de estruturas desde o início do século XX por serem bastante leves e resistentes, partindo do pressuposto de que materiais em forma fibrosa são mais fortes que em qualquer outra forma (Chawla, 2013), como em pás eólicas, demandam grandes comprimentos que levam a introdução de defeitos na fabricação, que comumente são defeitos ondulatórios ou vazios. As propriedades mecânicas nos compósitos são diretamente influenciadas pela forma como as fibras de reforço são alinhadas na matriz polimérica, e os defeitos por desalinhamento das fibras como ondulações nos laminados podem promover a diminuição nas propriedades mecânicas, no desempenho e na vida útil da estrutura.
Yerramalli, et al. (2010) realizou a análise das propriedades mecânicas de compósito polimérico reforçado com fibras unidirecionais com um tipo de defeito ondular quando sujeito a forças compressivas, e comprovou que a amostra com defeito ondular havia obtido um decréscimo de 40% na compressão em relação a amostra de referência sem defeito, mostrando a perda de resistência ao possuir defeitos ondulatórios na extensão do compósito.
No presente estudo é analisado a influência dos defeitos ondulatórios, o desalinhamento das fibras unidirecionais de reforço, nas propriedades mecânicas de compósitos poliméricos de resina epóxi e fibra de vidro.

## METODOLOGIA

### Norma de ensaio mecânico

Com as informações da norma técnica ASTM D3039 foram analisadas as dimensões dos corpos de prova a serem obtidos após a fabricação do compósito, para realização dos ensaios mecânicos de tração. Os corpos de prova têm formato retangular com as dimensões de 250 mm de comprimento, largura de 15 mm e espessura de ~1,5 mm.

### Geometria de defeito ondulatório

Para análise do defeito ondulatório provocado nos compósitos, foram definidas a fabricação de três moldes, onde dois destes moldes apresentariam o defeito e um sem defeito para a fabricação das amostras de referência. De acordo com a tabela 1, para cada tipo de molde temos as dimensões e equações da onda senoidal presentes para diferentes níveis de amplitude do defeito ondulatório induzido nos compósitos, a equação da onda é dada por $y=Asen(2pix/L)$, onde A é amplitude e L comprimento da onda (JOYCE, 1997a).

Tabela 1 – Equações das formas de onda do defeito ondulatório dos moldes.

Fonte: Próprio autor (2019).

Em seguida, a partir das dimensões das ondulações nos moldes dispostas na tabela 1 foram projetados 3 moldes no software Solidworks para a laminação do compósito, dispostos na figura 1, com dimensões de 400 x 400 mm cada. A partir das representações gráficas do molde e perfil da onda senoidal mostrado na figura 2, onde H representa a amplitude da onda variando de 2 a 4 mm, e L o comprimento desta com 20 mm, foram confeccionados os moldes reais em MDF, e fez-se uso de massa plástica automotiva para a inserção das ondas senoidais do defeito no molde.

Figura 1 - Representação gráfica dos moldes. (a) Molde com deformação senoidal para simular o defeito no compósito, (b) molde liso sem deformações para produção da amostra sem defeito.

Fonte: Próprio autor – Solidworks (2018).

Figura 2 - Representação das dimensões da onda senoidal do defeito (a) no desenho e nos moldes reais com amplitude de 4 mm e (b) 2 mm.

Fonte: Próprio autor – Solidworks (2018).

A severidade (S) é a intensidade da deformação da fibra em forma de onda, que caracteriza a ondulação. Obtida através da razão entre a amplitude de onda H e o comprimento de onda L (JOYCE, 1997b). A obtenção dos corpos de prova de cada tipo de amostra do compósito estudado se deu através do processo de laminação manual, com cura a temperatura ambiente. De acordo com as ondulações obtidas em cada amostra foram calculadas a seguintes severidades de onda, a fim de classificar a deformação inicial sofrida pela fibra no processo de laminação em cada molde, abaixo na tabela 2.

Tabela 2 – Severidades de ondas dos corpos de prova fabricados.

Fonte: Próprio autor (2019).

**Ensaio de tração**

Os ensaios mecânicos do compósito estudado foram realizados na máquina Instron EMIC 23-100. Para cada amostra foram analisadas as propriedades de 6 corpos de prova, onde foram coletados dados como tensão a tração e deformação do material, a fim de obter os os respectivos módulos de elasticidade. O ensaio realizado foi tração longitudinal, onde as fibras estão alinhadas no sentido de carregamento da máquina havendo maior concentração de esforços nas fibras de reforço.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Através dos ensaios de tração na maquina Instron EMIC 23-100 para as três amostras estudadas, foram obtidos os módulos de elasticidade dispostos na figura 3.

Figura 3 – Modulo E das amostras A, B e C do compósito de resina epóxi reforçada com fibra de vidro, obtidos em ensaio de tração.

Fonte: Próprio autor (2019).

Analisando os módulos de elasticidade das 3 amostras, temos que a amostra A sem defeito possui o maior valor de módulo elasticidade de 30,64 GPa, pois não há desalinhamento de suas fibras, em segundo a amostra B com módulo elasticidade de 1,96 GPa e em último a amostra C com seu modulo de elasticidade de 0,55 GPa. O que comprova que a rigidez do material depende diretamente do alinhamento das fibras no interior do compósito, e da relação de ligação fibra-matriz, tendo em vista que o defeito ondulatório induzido nos corpos de prova das amostra B e C, compromete a ligação da fibra de vidro com a resina epóxi, e consequentemente a resistência da estrutura.
Nos ensaios de tração longitudinal realizados nas amostras B e C, mostrou que a força aplicada faz com que a zona ondulada do defeito tenda a se alinhar na direção do esforço, o que causa fratura da resina nessa zona do defeito havendo variação da tensão à tração por conta do dano nesta zona, e quanto mais força é aplicada, mais as fibras tendem a se alinhar e a zona danificada pelo defeito tende a atingir a ruptura. Na amostra C por possuir maior severidade da onda do defeito, alcançou a ruptura precocemente em relação a amostra A e B.

## CONCLUSÕES

O estudo comprovou que a presença de defeitos ondulatórios advindos de processos de fabricação dos compósitos laminados de resina epóxi reforçado com fibra de vidro, semelhante a defeitos encontrados em pás eólicas, implica na redução das propriedades mecânicas destes materiais, principalmente na sua resistência a tração.
Foram obtidas 3 amostras onde A é a amostra de referência sem defeito de onda, B e C possuíam defeitos em forma de ondas senoidais com severidades de 0,1 e 0,2, respectivamente, fabricadas por processo de laminação manual e cura a temperatura ambiente. Em termos de análise de severidade de onda do defeito a amostra com maior grau de severidade (0,2), amostra C, alcançou a ruptura mais rapidamente que a amostra B de severidade 0,1.
A amostra C com maior amplitude de onda do defeito senoidal possuía maior grau de desalinhamento causado pelo defeito senoidal induzido, existindo comprometimento na ligação fibra-matriz, através do ensaio de tração obteve modulo de elasticidade igual a 0,55 GPa. Como as fibras estavam mais expostas as cargas e consequentemente possuíam menor rigidez, justifica-se o decréscimo do módulo de elasticidade da amostra C de 98,21% em relação a amostra A que não possuía defeito e ainda 27,96% menor que o modulo E da amostra B, esta que possuía severidade de defeito ondular menos acentuado.

## AGRADECIMENTOS

A FUNCAP pelo apoio financeiro deste projeto, número de processo: BP3-0139-00032.01.00/18. A BICT/FUNCAP/UNILAB pela bolsa de iniciação cientifica da aluna I. M. G. L. Ao Professor C. A. C. pela orientação e amizade. Ao grupo de pesquisa POLI-EN pela ajuda durante toda a pesquisa e a empresa Aeris Energy pelo fornecimento da fibra de vidro.

## REFERÊNCIAS

ASTM D3039/D3039 M-00. **Standard Teste Method for Tensile Properties of Polymer Matrix**

**Composite Materials**, 2000.
CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering - An Introduction.** 8ª. ed. Hoboken, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc., v. I, 2010.
CHAWLA, K.K. **Composite materials - Science and Engineering**, 3.ed. ASM, Springer-Verlag, 2013.
Joyce, P.J.; Moon, T.J. **Compression strength reduction in composites with in-plane fiber waviness.** ASTM Special Technical Publication. 1997a, 1330, 76–96.
Joyce, P.J.; Kugler, D.; Moon, T.J. **A technique for characterizing process-induced fiber waviness in unidirectional composite laminates-using optical microscopy.** J. Compos. Mater. 1997b, vol 31, 1694–1727, p. 1703 – 1704.
SHACKELFORD, J.F. **Ciência dos materiais.** 6. ed. 2.reimpr. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2008. 556 p.
YERRAMALLI, C. M., et al. **Fiber waviness induced strength knockdowns in composite materials used in wind turbine blades.** European Wind Energy Conference and Exhibition 2010, EWEC 2010. 6.