



XXVI CREEM

Congresso Nacional de Estudantes
de Engenharia Mecânica

ILHÉUS/ITABUNA - BAHIA



XXVI Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica,
CREEM 2019
19 a 23 de agosto de 2019, Ilhéus, BA, Brasil

CARACTERIZAÇÃO DO LAMINADO DE FIBRA DE VIDRO EM MATRIZ POLIÉSTER PARA APLICAÇÃO NUM PROJETO ESTRUTURAL DE CARRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Lucas Costa Sena, lcosseng@gmail.com¹

Lunno Claudio Nascimento Cincurá, lunnocincura@gmail.com¹

Erik de Souza Lago, eng.eriklago@gmail.com¹

José Victor Silva Duarte, victorcond15@gmail.com¹

Rafael Silvestre de Sena, rafa-silvestre@hotmail.com¹

Íngrid Heloísa da Silva Alves, ihsalves@uesc.br¹

Rômulo Luís Fernandes Martins, rflmartins@uesc.br¹

¹Universidade Estadual de Santa Cruz, Campus Soane Nazaré de Andrade, Rodovia Jorge Amado, Km 16, Bairro Salobrinho, CEP 45662-900. Ilhéus, Bahia.

Resumo. O conhecimento quanto aos possíveis materiais a serem utilizados num componente é essencial para o satisfatório desenvolvimento de um projeto estrutural, que devem estar dentro de parâmetros estabelecidos durante esse processo, tais como características mecânicas, físico-químicas, econômicas, etc. Devido à possibilidade da utilização do compósito de fibra de vidro em matriz poliéster para a construção de um protótipo de eficiência energética, a caracterização do mesmo se tornou essencial para o prosseguimento do projeto estrutural do veículo. Este artigo tem como intuito apresentar os principais dados desse compósito para o prosseguimento do projeto efetivamente, obtidos por meio da realização de ensaios de tração e cisalhamento no plano de corpos de prova fabricados a partir do laminado em questão, que resultaram na aprovação do material para utilização proposta conforme parâmetros de resistência e disponibilidade.

Palavras chave: Projeto estrutural. Design. Compósitos. Eficiência energética.

1. INTRODUÇÃO

Compósitos são todos os materiais constituídos de dois ou mais componentes de classificações distintas, podendo ser formado por metais, cerâmicos, polímeros, etc.; e têm como objetivo reunir as características desses materiais para o desenvolvimento de um outro cujas características sejam combinações das primeiras. Segundo Neto e Pardini (2016), a característica básica dos compósitos é combinar, normalmente em nível macroscópico, pelo menos duas fases distintas denominadas de matriz e reforço. Dessa forma, é possível ampliar o leque da aplicabilidade desses materiais, possibilitando um aproveitamento mais efetivo de todo conjunto estrutural. O desenvolvimento e aplicação desses materiais cresceu nos últimos 50 anos, muito devido ao avanço das indústrias aeroespaciais e automotivas, que buscam aliar características mecânicas (ou de outro caráter) desejáveis à redução de massa dos componentes. Contudo, as aplicações vão muito além desses dois polos, abrangendo o setor energético, naval, construção civil, esportivo, entre muitos outros.

Por sua vez, um protótipo de eficiência energética trata-se de um veículo capaz de percorrer a máxima distância por volume de combustível, logo, a massa equivalente influencia diretamente na potência aproveitada para a realização do deslocamento. Portanto, o grande desafio é o desenvolvimento de uma estrutura capaz de suportar satisfatoriamente as solicitações impostas sem comprometer a massa total, nesse caso, isso definirá um bom projeto estrutural.

A *Shell Eco Marathon* trata-se da competição-foco de participação desse protótipo, em que equipes de todo mundo, em suas respectivas regiões, disputam entre si a fim de alcançarem o posto de grupo com veículo de menor consumo específico (km/L), dividida nas etapas de Protótipo e Conceito Urbano. A primeira é subdividida conforme a fonte energética do veículo. Fontes à combustão, como gasolina e etanol, elétrica e células de hidrogênio são permitidas conforme o regulamento.

Logo, esse trabalho tem como objetivo a caracterização do compósito de fibra de vidro-resina poliéster para o desenvolvimento de um projeto estrutural de um protótipo de eficiência energética, em que parâmetros de resistência mecânica específica serão os fatores desejáveis para a conclusão do projeto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

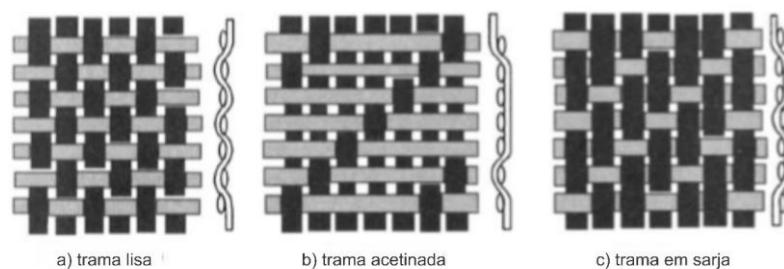
Os materiais compósitos são formados por no mínimo duas fases denominadas de matriz e reforço. Enquanto podem haver matrizes cerâmicas, poliméricas ou metálicas, os reforços podem ser partículas ou fibras, que podem ser contínuas ou descontínuas. Diferentemente de materiais metálicos, que são majoritariamente isotrópicos, os compósitos possuem características que dependem da orientação dos reforços, sendo assim anisotrópicos. Apesar do modelamento matemático de seu comportamento mecânico ser mais complexo, os compósitos possuem uma maior liberdade de manufatura, permitindo que eles se adequem aos requisitos de projeto a partir de sua concepção (Neto e Pardini, 2016).

2.1. FIBRAS

Fibras são alguns dos possíveis reforços a serem distribuídos nas matrizes, que podem ser partículas ou fibras – contínuas e descontínuas – e podem ser produzidos a partir dos mais diversos materiais, desde orgânicos, como as fibras de coco ou piaçava, a materiais vidro-cerâmicos, como a fibra de vidro. Ademais, as fibras de um compósito podem ser dispostas de forma orientada ou aleatória. A orientação das fibras é um dos fatores essenciais para a caracterização do compósito, já que esses materiais possuem características que variam com a direção e sentido, no caso dessas serem bem orientadas na matriz, um comportamento mecânico ortotrópico é evidenciado.

Segundo Gay et al. (2003), as fibras consistem de milhares de filamentos, cada filamento tem um diâmetro entre 5 e 15 micrômetros, permitindo a fabricação de tecidos. Estes tecidos, por sua vez, são compostos por fibras orientadas perpendicularmente entre si, sendo chamadas de urdidura e trama. O arranjo entre ambas permite a classificação do tecido, o que também influenciará no comportamento mecânico do compósito. A Figura 1 apresenta algumas configurações de urdidura e trama.

Figura 1. Tipos de tecidos de fibras (Adaptado de Gay et al., 2003)



Neto (2016) afirma que os tecidos podem ser especificados conforme o tipo de fibra, a gramatura, o título do fio, a quantidade de fios por cabo, quantidade de fios por centímetro e pelo tipo de tela.

2.2. RESINAS

As resinas, por sua vez, são um dos tipos de matrizes, sendo uma matriz polimérica. Dentre as diversas matrizes poliméricas há a classificação entre termoplásticas e termorrígidas, como por exemplo a resina poliéster.

A aplicação da resina permite a união entre as fibras, formando o que chamamos de laminado compósito. Tal processo se dá a partir da polimerização da matriz, também chamada de cura, que ocorre por meio da mistura da resina e de um catalisador, que permite que este tempo seja reduzido, para o caso de polímeros termorrígidos. O aumento da temperatura durante a cura acelera a polimerização e seu controle permite otimizar o tempo necessário até o fim da ação, conforme mencionado por Neto e Pardini (2016).

2.3. ANÁLISE MICROMECAÂNICA E REGRA DAS MISTURAS

Como mencionado anteriormente, um compósito é baseado na utilização de um reforço imerso numa matriz, que pode ter diversos caracteres, logo, para o projeto desse material é necessário predeterminar as proporções de cada componente. A regra das misturas garante que coeficientes mecânicos possam ser obtidos analiticamente a partir dessas proporções. O equacionamento dessa regra é facilmente obtido, onde devem-se considerar algumas condições de contorno. Neto e Pardini (2016) citam algumas das hipóteses para a simplificação do modelamento analítico, que têm como consequência

a possibilidade da aplicação da Lei de Hooke. Contudo, há dois casos específicos, o que resultará em dois resultados, para o sentido longitudinal e transversal ao plano da fibra, respectivamente. A partir disso temos a Eq. (1) e Eq. (2).

$$E_L \varepsilon_L = E_F \varepsilon_F V_F + E_M \varepsilon_M V_M \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_T}{E_T} = \frac{\sigma_F}{E_F} V_F + \frac{\sigma_M}{E_M} V_M \quad (2)$$

em que os subscritos L, T, F e M referem-se ao sentido longitudinal, sentido transversal, às fibras e à matriz, respectivamente. E, σ , ε , e V são módulo de elasticidade, tensão, deformação e fração volumétrica, respectivamente.

Aplicando a Lei de Hooke para ambos os casos, temos a Eq. (3) e Eq. (4) como consequência.

$$E_L = E_F V_F + E_M V_M \quad (3)$$

$$\frac{1}{E_T} = \frac{V_M}{E_M} + \frac{V_F}{E_F} \quad (4)$$

Essa regra também se aplica para a previsão do coeficiente de Poisson e módulo de cisalhamento do compósito, revelando a Eq. (5) e Eq. (6).

$$\nu_{LT} = \nu_F V_F + \nu_M V_M \quad (5)$$

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{V_M}{G_M} + \frac{V_F}{G_F} \quad (6)$$

em que os termos ν e G representam coeficiente de Poisson e módulo de cisalhamento, respectivamente.

Apesar desse cálculo ser originalmente formado para fibras unidirecionais, também pode ser utilizado em casos de tecidos cujo número de fios da urdidura seja igual ao da trama, como na Fig. 1. Diante dessas equações é possível obter analiticamente valores para as propriedades mencionadas do compósito a partir da fração volumétrica de cada material e suas respectivas propriedades.

2.4. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Diferentemente dos materiais metálicos, os compósitos permitem uma maior flexibilidade quanto ao projeto estrutural. Além de apresentar uma ótima razão resistência mecânica por massa, sua aplicabilidade é vasta, contudo, seu estudo comportamental é um tanto quanto mais complexo que os demais. Todavia, os processos de manufatura de um componente estrutural compósito são únicos e podem ser realizados de diversas formas possíveis. Para compósitos de matriz polimérica, métodos de moldagem e impregnação são constantemente melhorados a fim de tornar as propriedades ainda mais satisfatórias.

O método de laminação manual, ou *hand lay-up*, consiste na aplicação da resina sobre as fibras, predispostas sobre um molde rígido onde é feita toda impregnação e uniformização da superfície com o uso de rolo ou pincel. O processo de cura pode ser feito com o auxílio de bombas de vácuo, que permitem uma melhor homogeneização e redução do número de vazios, ou podem ser feitas sob temperatura controlada, o que permite uma polimerização mais rápida, ou à temperatura ambiente. Todavia, devido à necessidade do desenvolvimento e otimização da linha de produção, a indústria utiliza métodos que permitem a fabricação em grande escala, sem comprometer a qualidade do material.

2.5. ENSAIOS DE TRAÇÃO E CISALHAMENTO NO PLANO

Os ensaios mecânicos permitem a análise das propriedades mecânicas de um determinado material. Dessa forma, para comprovar as previsões analíticas anteriormente mencionadas tal etapa é essencial. Ensaio de tração e cisalhamento no plano permitem coletar dados referentes aos módulos de elasticidade e cisalhamento, respectivamente, e tensão máxima para cada solitação.

Esse processo deve ser efetuado por uma máquina de ensaios, mais especificamente com um conjunto de pinças que permita o agarre ao corpo de prova. Os mais diversos softwares permitem a leitura e processamento dos dados fornecidos pelo equipamento, como por exemplo deslocamento e força aplicada.

As normas ASTM D 3039 (2002) e ASTM D 3518 (2001) garantem parâmetros geométricos, de execução e análise para cada ensaio.

2.6. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

O projeto estrutural tem como uma de suas etapas a utilização de ferramentas de análise CAE a fim de que possa se obter valores referentes à rigidez do sistema, por exemplo. O Método dos Elementos Finitos (*Finite Elements Method*, em inglês) permite que tal análise possa ser realizada, utilizando os devidos critérios de falha para cada material. Contudo, para que tenha relevância, é necessária a validação da simulação por métodos analíticos ou experimentais.

Logo, a caracterização do material torna-se ainda mais interessante, em que seus dados não serão simplesmente adicionados à biblioteca do software, mas os ensaios realizados também validarão as futuras análises quanto àquele material.

3. METODOLOGIA

Os corpos de prova para ambos os ensaios foram feitos por laminação manual com uma proporção de cerca de 40% de reforço de fibra de vidro bidirecional, de tecido tipo trama plana (como mostrado na Fig. 1), e conforme a norma ASTM D 3039 (2002) para ensaios de tração em compósitos, as fibras da urdidura e da trama foram orientadas a 0° e 90° das arestas do corpo, respectivamente. A norma ASTM D 3518 (2001), para ensaios de cisalhamento no plano, afirma que as fibras devem ser orientadas em -45° e 45° . A Figura 2 apresenta dois dos corpos de prova utilizados nos ensaios. Por meio da Fig. 3 é possível visualizar a máquina de ensaios utilizada, com força limite de 100 kN, e um corpo de prova posicionado nas pinças da mesma.

Com o intuito de manter a dimensões propostas pela norma, foram sobrepostas 7 camadas de tecido para cada amostra, que foram impregnadas com resina poliéster. Ao término da polimerização, o laminado foi cortado e então foi feito o controle dimensional para manter os corpos de prova em tolerâncias admissíveis.

Figura 2. Corpos de prova utilizados nos ensaios de tração e cisalhamento no plano, da esquerda para a direita, respectivamente (Autoria própria, 2019)

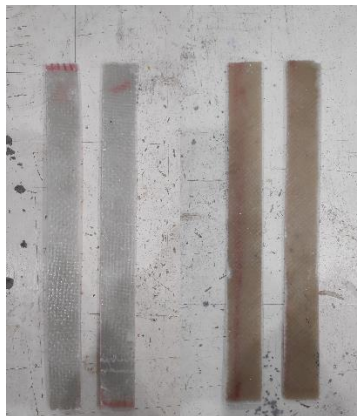


Figura 3. Máquina universal de ensaios modelo Shimadzu Autograph AG-X Plus (à esquerda). Corpo de prova posicionado na máquina universal de ensaios (à direita) (Autoria própria, 2019)



Ao término dos ensaios, a coleta dos dados e o tratamento estatístico foi então realizado, conforme mencionado anteriormente. Dados referentes à força aplicada e ao deslocamento foram informações primárias do equipamento, garantindo a plotagem de um gráfico Força-Deslocamento e permitindo o processamento de valores referentes aos módulos de elasticidade e cisalhamento.

A Tabela 1 apresenta os dados da geometria dos corpos de prova para os ensaios de tração. A Tabela 2, por sua vez, refere-se à geometria dos corpos de prova para os ensaios de cisalhamento no plano.

Tabela 1. Geometria dos corpos de prova para os ensaios de tração (Autoria própria, 2019)

Amostra	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Comprimento Útil (mm)
1	2,50 ± 0,05	25,00 ± 0,05	250,0 ± 0,1	187,0 ± 0,1
2	2,50 ± 0,05	25,00 ± 0,05	250,0 ± 0,1	187,0 ± 0,1
3	2,70 ± 0,05	23,00 ± 0,05	250,0 ± 0,1	187,0 ± 0,1
4	2,60 ± 0,05	26,00 ± 0,05	250,0 ± 0,1	187,0 ± 0,1
5	2,50 ± 0,05	25,50 ± 0,05	250,0 ± 0,1	187,0 ± 0,1
6	2,50 ± 0,05	24,00 ± 0,05	249,0 ± 0,1	186,0 ± 0,1
7	2,70 ± 0,05	24,00 ± 0,05	251,0 ± 0,1	188,0 ± 0,1
8	2,90 ± 0,05	25,00 ± 0,05	250,0 ± 0,1	188,0 ± 0,1

Tabela 2. Geometria dos corpos de prova para os ensaios de cisalhamento no plano (Autoria própria, 2019)

Amostra	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Comprimento Útil (mm)
1	2,0 ± 0,05	25,5 ± 0,05	249,0 ± 0,1	186,0 ± 0,1
2	2,0 ± 0,05	25,2 ± 0,05	249,0 ± 0,1	186,0 ± 0,1
3	2,0 ± 0,05	25,5 ± 0,05	250,0 ± 0,1	187,0 ± 0,1
4	2,0 ± 0,05	26,0 ± 0,05	246,0 ± 0,1	183,0 ± 0,1
5	2,1 ± 0,05	25,5 ± 0,05	248,0 ± 0,1	185,0 ± 0,1
6	2,0 ± 0,05	25,7 ± 0,05	251,0 ± 0,1	188,0 ± 0,1
7	2,2 ± 0,05	25,2 ± 0,05	248,0 ± 0,1	185,0 ± 0,1

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os devidos ensaios foram realizados para cada uma das amostras, conforme a orientação das fibras, cujos dados obtidos estão expressos nas Tab. 3 e Tab. 4.

Tabela 3. Valores de força e deformação máxima dos corpos de prova dos ensaios de tração (Autoria própria, 2019)

Amostra	Força Máxima (N)	Tensão de Ruptura (MPa)	Deformação máxima (%)
1	15150,60	242,41	7,52
2	16570,00	265,12	7,66
3	14778,70	237,98	7,61
4	18802,90	278,15	8,66
5	11538,30	180,99	6,45
6	13220,60	220,34	3,96
7	17224,00	265,80	4,79
8	13242,40	182,65	3,53

Tabela 4. Valores de força e deformação máxima dos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento no plano (Autoria própria, 2019)

Amostra	Força Máxima (N)	Tensão de Ruptura (MPa)	Deformação máxima (%)
1	4594,34	90,09	6,13
2	5001,64	99,24	10,46
3	5092,96	99,86	9,50
4	4520,70	86,94	6,01
5	5301,38	99,00	9,52
6	4832,94	94,03	7,85
7	5049,40	91,08	7,74

A partir desses valores é possível notar a discrepância entre a resistência de um laminado cujas fibras estão orientadas na direção da carga (e a trama perpendicular a essas) e um outro com fibras orientadas a 45° e -45°. A carga limite da primeira é cerca de 3 vezes maior que a seguinte. Isso deve-se ao fato de que toda carga é transferida como solicitação trativa, conforme o círculo de Mohr, e que as fibras, no sentido longitudinal, possuem um alto limite de resistência a tração, resultando em um material de alta resistência mecânica. Ademais, devido à orientação das fibras do segundo caso, a carga resultará numa solicitação de cisalhamento puro que é resistido pela matriz.

Portanto, a partir de dados referentes a deformação percentual e tensão máxima, conforme a Lei de Hooke, é possível obter o valor referente ao módulo de elasticidade do compósito, enquanto que pelo método da secante pode-se obter o valor do módulo de cisalhamento do mesmo, conforme mostrado na Tab. 5. A Figura 4, por sua vez, denota o gráfico Força - Deslocamento da sexta amostra para os ensaios de tração, enquanto que a Fig. 5 apresenta o mesmo gráfico referente à segunda amostra para os ensaios de cisalhamento no plano.

Tabela 5. Módulo de elasticidade e de cisalhamento obtidos para cada amostra (Autoria própria, 2019)

C-P	Ensaio de Tração	Ensaio de Cisalhamento no Plano
	Módulo de Elasticidade (GPa)	Módulo de Cisalhamento (GPa)
1	3,22	3,65
2	3,46	2,71
3	3,13	2,44
4	3,21	3,52
5	2,81	2,59
6	5,57	3,29
7	5,55	2,78
8	5,18	-----
Média	4,02	3,00
Desvio	1,12	1,07

Figura 4. Gráfico Força – Deslocamento do ensaio de tração do 6º corpo de prova (Autoria própria, 2019)

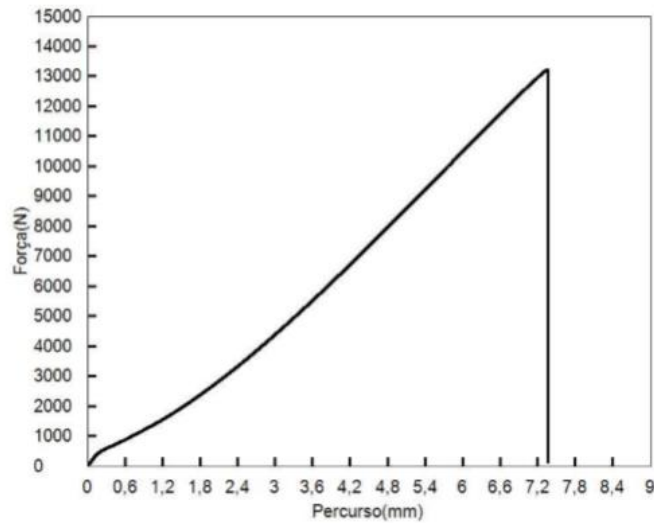
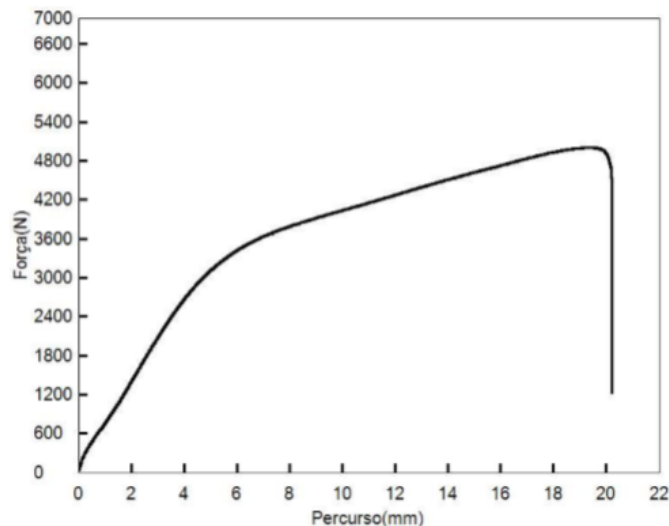


Figura 5. Gráfico Força – Deslocamento do ensaio de cisalhamento no plano do 2º corpo de prova (Autoria própria, 2019)



Por meio das plotagens gráficas a diferença estrutural resultante da orientação da fibra torna-se ainda mais evidente. Pode-se notar que o primeiro caso sofre uma deformação muito menor até a ruptura, contudo sua força limite é bastante superior ao segundo, cuja deformação é bastante acentuada. Essa deformação pode ser justificada pelo baixo módulo de elasticidade da matriz, que caracteriza a resistência à tração do compósito sob a orientação de 45° das fibras.

5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados previamente expostos, é válido dizer que o laminado de fibra de vidro em matriz poliéster trata-se de um material com uma boa razão resistência-massa, principalmente quando comparado a algumas ligas de alumínio, e devido seu menor custo de aquisição e fabricação torna-se viável para a construção de um protótipo de eficiência energética de baixo custo, comparado aos demais compósitos estruturais. No entanto, é válido ressaltar a importância do processo de fabricação sobre as propriedades mecânicas, conforme mencionado na literatura.

Comparando-se os resultados para os ensaios de tração e cisalhamento, é possível notar a criticidade da orientação da fibra no comportamento do compósito, em que o primeiro é capaz de resistir a uma alta carga e apresentar uma baixa deformação até sua falha, enquanto que o seguinte apresenta uma deformação bem mais acentuada.

Ademais, as variações verificadas podem ser justificadas devido a irregularidades geométricas, às pequenas variações entre as lâminas durante a fabricação e ao processo de polimerização utilizado. É possível notar que as amostras para ensaios de tração estão criteriosamente dentro de parâmetros normativos, já o segundo lote possui uma certa discrepância,

justamente devido a essa dificuldade de controle, principalmente da espessura, durante a laminação manual. Contudo, com propostas de melhoria do acabamento e um processo de fabricação mais sofisticado, tais situações devem ser certamente revertidas, acarretando em valores mais parelhos.

Por fim, é válido considerar a essencialidade de toda essa pesquisa, responsável por um projeto mais criterioso, cujas previsões entregues pelas análises estruturais serão mais confiáveis, permitindo que um processo de otimização seja realizado a fim de se obter ainda melhores resultados na competição.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Grupo Santa Cruz por criar a necessidade por essa pesquisa, à UESC por permitir o desenvolvimento da mesma e aos professores Danilo Maciel Barquete, Rômulo Luis Fernandes Martins, Ingrid Heloísa da Silva Alves e Erickson Fabiano Moura por toda orientação, apoio e conhecimento transmitido.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Gay, Daniel et. al. *Composite Materials – Design and Applications*. 4th ed. Florida: CRC PRESS. 2003.
- Neto, Flaminio Levy e Pardini, Luiz Claudio. *Compósitos Estruturais – Ciência e Tecnologia*. 2ª ed.. São Paulo : Blucher, 2016.
- ASTM D 3039, *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. Philadelphia. STP: American Society for Testing and Materials, 2002.
- ASTM D 3518, *Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate*. Philadelphia. STP: American Society for Testing and Materials, 2001.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.