

MODELAGEM FÍSICA E NUMÉRICA DE COMPÓSITOS ESTRUTURAIS

Vivianna Príncipe dos Santos¹; Januário Pellegrino Neto².

¹ Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

² Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *Materiais compósitos têm vantagens como sua leveza e resistência que os tornam atraentes para fins de engenharia. Este artigo descreve uma viga de compósito quadrada de paredes finas submetido ao teste de flexão de três pontos. Modelos computacionais e experimentais são estudados para esta viga usando fibra de carbono como material compósito. Também são exploradas formas de torná-la o mais leve possível, suportando uma carga mínima pré-estabelecida. Usando ANSYS® Composite PrepPost é possível definir camadas, espessuras e orientações para as estruturas compostas em camadas estudadas. Em seguida, a análise estrutural do modelo geométrico definido é realizada com o auxílio do ANSYS® Mechanical. Os resultados numéricos obtidos são comparados com modelos experimentais produzidos em laboratório. A viga é feita de fibra de carbono e resina epóxi, com aplicação do processo de vacuum bagging após a laminação manual e pós-cura a alta temperatura. Este trabalho é parte das pesquisas de um programa de graduação em engenharia que visa estudar compostos, especialmente para engenharia civil e mecânica, a fim de analisar suas principais características usando ferramentas computacionais e experimentos.*

1. Introdução

Um compósito é um material feito a partir de dois ou mais materiais constituintes que, juntos, podem gerar melhorias em suas propriedades físicas e mecânicas e em seu desempenho, em comparação com suas características individuais (Neto e Pardini, 2006). Eles são feitos a partir da matriz, normalmente um material viscoso que endurece para dar forma ao compósito, protegendo e transferindo cargas para o reforço, e de um material que proporciona resistência, rigidez e capacidade de transportar uma carga. Uma das maiores vantagens dos materiais compósitos modernos é que eles são leves e fortes. Ao escolher uma combinação apropriada entre matriz e reforço, um novo material pode ser gerado atendendo exatamente aos requisitos de uma aplicação específica. Além disso, os compostos são flexíveis e podem obter formas complexas.

Os compósitos têm sido utilizados para os mais diversos fins, como construção de aeronaves, automóveis, capacetes, recuperação estrutural e outros. Na engenharia civil, o concreto é um material compósito amplamente utilizado devido à sua resistência e baixo custo. No entanto, as estruturas de concreto são pesadas devido à sua alta densidade. Atualmente, se buscam materiais que possuam resistência semelhante à dele, porém com menor peso, gerando assim, estruturas mais leves e com mesma capacidade de carga.

Compósitos feitos com matrizes poliméricas e fibras sintéticas são os mais resistentes encontrados no mercado moderno. Dentre as fibras sintéticas, a mais utilizada e conhecida é a fibra de carbono.

Fibra de carbono ou de grafite são nomes usualmente utilizados para mencionar este tipo de material. Isto se deve ao fato de ambos os materiais serem constituídos por átomos de carbono, porém com uma leve diferença na quantidade, o primeiro com até 90% e o segundo com até 95%. Apesar disso, apenas fibras de carbono com alto módulo de elasticidade e estrutura tridimensional de grafite podem ser, de fato, denominadas como fibra de grafite. Essa fibra pode ser obtida pela pirólise de matéria prima orgânica em formato de fibra (Neto e Pardini, 2006), sendo ela poliacrilonitrila (PAN), piche ou rayon. As fibras obtidas a partir do PAN, uma forma de fibra acrílica, originam as melhores propriedades por possuírem até 90% de átomos de carbono em sua composição, porém são mais caras e não produzem fibras com altas resistências quanto as feitas com piche, que são comumente utilizadas para a fabricação da fibra de grafite. O rayon ou celulose,

não é mais utilizado atualmente devido ao seu alto custo e menor rendimento envolvido em seus processos. As fibras passam por processos químicos e térmicos, após sua tecelagem, para melhorar sua adesão à matriz e suas resistências e rigidez, respectivamente.

As matrizes podem ser de três classes distintas, cerâmicas, metálicas e poliméricas. Esta última é constituída de cadeias poliméricas, possuindo baixa resistência e rigidez, porém originando compósitos extremamente resistentes e de baixa densidade, por esse motivo sendo a mais utilizada. Existem dois tipos de matrizes poliméricas, as termoplásticas e as termorrígidas, nos quais a principal diferença está no comportamento característico quando aquecidos, em outras palavras os termoplásticos são polímeros capazes de serem moldados várias vezes, dado que possuem características de se tornarem fluidos sob a ação da temperatura e depois se solidificarem quando a temperatura diminui. Já os termorrígidos não possuem tal característica, já que possuem ligações cruzadas entre as cadeias macromoleculares. Os polímeros termorrígidos são mais utilizados para uso estrutural por possuírem características como, baixa viscosidade, boa impregnação na fibra e baixa temperatura de processamento e menor custo, se comparada com a do outro tipo (Case e Reifsnide, 2003) e por apresentarem características no produto final como, alta rigidez, elevada estabilidade térmica, alta estabilidade dimensional, boas propriedades de isolamento elétrico e térmico, resistência à fluência.

Dentre os polímeros termorrígidos, há diferentes tipos de matrizes que podem ser utilizadas, algumas delas são: Polyester; epoxy; vinyl ester; polyimide (Chung, 2004). O epoxy é a matriz polimérica mais utilizada para materiais compósito de alto desempenho devido à combinação de propriedades mecânicas, resistência à corrosão, dimensionamento estável, boa adesão e baixo custo (Neto e Pardini, 2006). Pode ser subdividido em duas categorias que variam de acordo com a temperatura de cura e a exposição à umidade (Daniel e Ishai, 1994). A primeira categoria engloba matrizes que são curadas em até 120°C e que estarão expostas a baixas variações de temperatura. Já a segunda categoria compreende matrizes que tem processo de cura em até 180°C, que necessita de um endurecedor e ou um acelerador de reações. Em sua formulação possuem uma cadeia polimérica principal, ou um epoxy principal, e as secundárias que são em menor quantidade. Essas cadeias poliméricas secundárias são adicionadas ao composto para fornecer controle de viscosidade, melhorar as propriedades de alta temperatura, reduzir a absorção de umidade ou melhorar a resistência (Campbell, 2004c). Epon, Epi-rez, D.E.R., Epotuf e Araldite são os nomes comerciais dado as matrizes poliméricas epoxy (Chung, 2004).

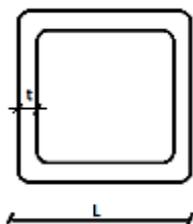
Apesar dos materiais compósitos serem extremamente leves, eles são caros e acarretam à altos custos envolvidos em seus processos de manufatura. Assim sendo, é necessário que se produza peças com a mesma eficiência, porém com um custo menor, em outras palavras, com menos material. Existem inúmeras maneiras de se alcançar este objetivo, uma delas é a otimização paramétrica.

O conceito de otimização é amplo e com muitas possibilidades de definição, sendo assim difícil de ser encontrada. Mas de maneira geral, otimização é o conjunto de técnicas empregadas para alcançar o objetivo final, no qual é maximizar ou minimizar uma função, chamada de função mérito ou função objetivo, com variáveis distintas. Atualmente é possível programar modelos matemáticos que realizem este tipo de metodologia, ou utilizar softwares que já possuam este tipo de ferramenta, como é o caso do ANSYS®.

2. Material e Métodos

O estudo foi baseado em uma viga de compósito quadrado de paredes finas submetido ao teste de flexão de três pontos. A figura 1 detalha a seção transversal estudada.

Figura 1. Esquema da seção transversal da viga, com $L = 100$ mm e t variando com o número de camadas da viga.



2.1 Modelagem computacional

A modelagem da viga, apoios e célula de carga foi realizada através do software SIEMENS NX10, no qual todas as peças foram modeladas e, posteriormente, montadas adequadamente de forma a representarem o ensaio de flexão em três pontos em estudo. Na figura 2 é possível ver a geometria criada.

A geometria criada com o software SIEMENS NX10 foi importada para o software ANSYS® Workbench e serviu de base para o modelo inicial de uma viga com 15 camadas de tecido de carbono bidirecional orientadas em $0/90^\circ$ e resina epoxy, com características típicas do software, através da ferramenta *Ansys Composite PrepPost (ACP PrepPost)*. Após a criação das camadas da viga, o sólido gerado foi importado para o módulo *Static Structural* a fim de ser analisado pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), uma técnica eficiente e amplamente utilizada para obter o comportamento físico de estruturas. O MEF consiste, basicamente, em subdividir o domínio em elementos interligados por nós, gerando uma malha, para facilitar a resolução do problema. Com isso, obtém-se a solução aproximada do problema em estudo.

Nessa etapa foram impostos os apoios, ambos fixos, e o valor da carga. Os resultados de interesse foram: tensão equivalente de *Von-Mises*; deformação total e inverso do coeficiente de segurança da estrutura, o qual foi obtido através do critério de falha de *Tsai-Wu* para materiais compósitos.

Figura 2. Geometria modelada no software SIEMENS NX10.



A seguir, foi dado início ao processo de otimização paramétrica com a ferramenta *Response Surface Optimization*. Foram definidas, inicialmente, as variáveis do problema como o número de camadas da viga, podendo variar de 0 até 15 e o ângulo da fibra em cada camada, podendo este variar de 0° até 90° , ao passo de $22,5^\circ$. Isto posto, estipulou-se o objetivo da função mérito como sendo minimizar a máxima tensão de *Von-Mises*, critério escolhido apenas para esta etapa, e a deformação total, mantendo o inverso do coeficiente de segurança entre 0 e 1, indicando assim que a estrutura não sofrerá fraturas.

Com os resultados obtidos na otimização acima citada, outra viga foi modelada, agora com número de camadas e orientação das fibras diferentes e colocada sobre as mesmas condições de carregamentos e apoios, a fim de verificar os locais de máxima tensão e deformação e analisar seu comportamento.

Realizou-se outra otimização, porém desta vez retirando o objetivo de minimizar a tensão. Sucedeu-se o mesmo procedimento acima citado para os resultados encontrados.

Por fim, realizaram-se as mesmas modelagens acima citadas, mas desta vez utilizando as características do material obtidas a partir de ensaios laboratoriais na etapa experimental, como

módulo de elasticidade e resistência à tração, e não as características fornecidas como padrão pelo ANSYS®.

Para avaliação de falha das vigas modeladas, foi utilizado o critério de Tsai-Wu, o qual é critério de falha utilizado para materiais anisotrópicos, como os materiais compósitos. O critério de falha tem como objetivo estimar a resistência de materiais sob determinado estado de tensão (Souza, Santos, e Carvalho, 2002). Para os materiais compósitos é de relativa complexidade a obtenção destes valores, uma vez que dependem da direção do material. Para um mesmo material podem ser encontrados inúmeros valores de resistência dependendo da direção em que são impostos os carregamentos.

O critério de *Tsai-Wu* baseia-se na ampliação do número de termos do critério de Hill. Esse último se baseia no critério de escoamento de *Von-Mises*, usado para materiais isotrópicos. O critério tem como proposta ser operacionalmente simples de maneira que possa caracterizar o material e que seja facilmente utilizável no projeto de componentes. Este critério não explica ou prevê os mecanismos reais da falha. É um dos critérios mais populares por ser computacionalmente fácil de ser implementado e por requerer um método relativamente simples para prever a capacidade de carregamento de uma estrutura (Hansen, 1992).

Para obtenção dos resultados, foi utilizado o módulo ACP Post no ANSYS®, impondo-se o critério de falha desejado.

2.2 Modelos Experimentais

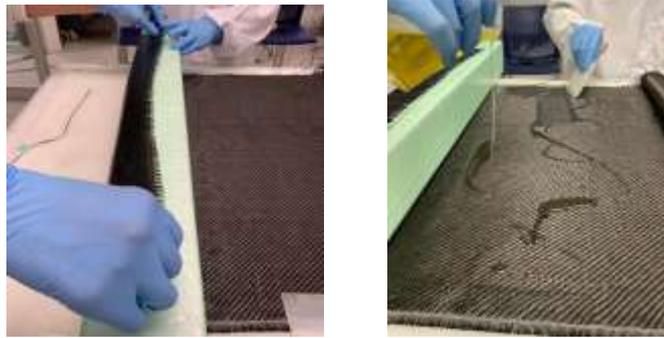
Utilizando os resultados obtidos pelo software, foram feitos os modelos experimentais. O processo de manufatura é totalmente manual e envolve várias etapas. Para iniciar, o local foi limpo com produto adequado, a fim de evitar que quaisquer impurezas entrassem em contato com a fibra. Preparou-se um molde de isopor de alta densidade com as dimensões estimadas para a peça, o qual foi revestido com um plástico, a fim de facilitar o desmolde. Feito isso, cortou-se a fibra com as dimensões corretas e com o ângulo de acordo com a análise computacional e, em uma balança de precisão, preparou-se a resina com o catalizador na proporção correta, originando a matriz a ser utilizada. Este processo é apresentado da Figura 3

Figura 3. Balança de precisão usada para estimar a massa de fibra e resina utilizados na produção da viga.



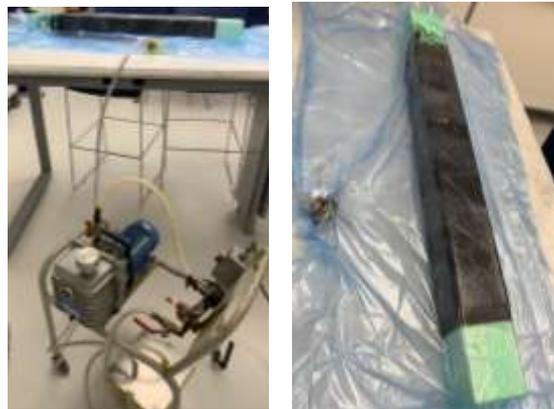
Com essa etapa inicial concluída, deu-se início a laminação do material, na qual consistiu em aplicar a matriz sobre a fibra, de forma a impregná-la, e envolver o molde com o tecido dando voltas até que o número de camadas seja o previamente estipulado.

Figura 4. Processo de laminação da viga, com impregnação de resina no tecido de fibra de carbono.



Com o molde de isopor já envolto com todas as camadas necessárias, outro tecido é aplicado sobre a viga, o *peel ply*, a fim de auxiliar na retirada do excesso de resina, melhorando assim o desempenho do compósito. O conjunto, molde mais fibra, foi então colocado dentro do filme de vácuo, o qual é um saco plástico mais resistente que suporta o vácuo, e este fora selado em todos os seus lados para garantir que todo o ar fosse retirado do sistema através da bomba de vácuo ilustrada na Figura 5. Dessa maneira, foi feita a cura do compósito durante doze horas.

Figura 5. Bomba de vácuo e conjunto molde/fibra sob ação do vácuo.



Após o tempo de cura estipulado, interrompeu-se o vácuo e foi feito o desmolde. A viga inicial foi pesada e foram feitos ajustes finais a peça, como corte e lixamento de suas bordas. A pós-cura foi realizada em uma estufa à 80°C durante oito horas, conforme instruções do fabricante. Ao final do processo, a viga é pesada novamente e são feitas as medições da sua seção transversal e das espessuras.

Figura 6. Aparos finais na viga produzida para ensaio laboratorial.



Além das vigas realizadas, foi feito uma placa do mesmo material e com o mesmo processo de manufatura, apenas diferenciando o processo de moldagem. Para essa placa, não foi utilizado um

molde de isopor, mas sim uma placa de polipropileno, material que não reage com a matriz, em que uma camada de fibra impregnada foi posta sobre outra, sucessivamente, até chegar ao número de camadas desejado. Seu processo de cura e pós cura foi realizado da mesma maneira. Assim como a viga, a placa foi cortada e ajustada no tamanho desejado e dela obtiveram-se dez corpos de prova de mesmas dimensões, Figura 7.

Figura 7. Placa e corpos de prova para ensaio de tração.



2.2.1 Ensaios destrutivos

As vigas produzidas foram submetidas ao ensaio de flexão em três pontos, segundo a norma **D 790 – 97**. Este ensaio consiste em apoiar o corpo de prova em dois apoios localizado nas extremidades da peça sem que eles possuam quaisquer vínculos e é aplicada carga, em uma célula de carga igual à do modelo computacional, no meio, igualmente modelado no software, Figura 9 (a).

Os corpos de prova em formato de lâminas foram submetidos a ensaios de tração, segundo a norma **ASTM D3039**, a fim de obter as características do material fabricado, como módulo de elasticidade e resistência à tração, Figura 9 (b). Os corpos de prova foram produzidos com comprimento de 25 centímetros, largura de 15 centímetros e espessura de 1 milímetro, essas informações são apresentadas na Figura 8 (Marinucci, 2011).

Figura 8. Dimensões dos corpos de prova (Marinucci, 2011).

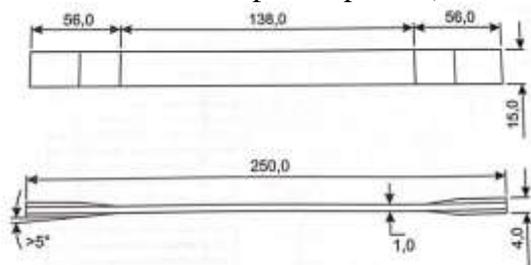
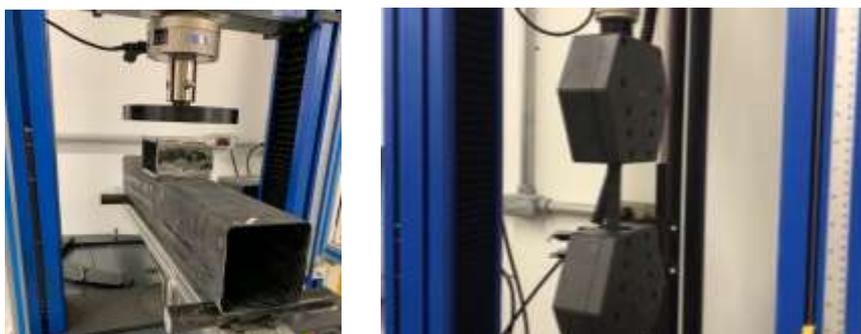


Figura 9. Representação dos ensaios destrutivos, sendo (a) flexão e (b) tração

(a)

(b)



3. Resultados e Discussão

3.1 Análise computacional

O método para avaliação da viga foi o MEF utilizando o software ANSYS®, criando um modelo com uma malha contendo 32231 elementos e 18693 nós. Primeiramente, o módulo *ACP* foi usado para a criação das camadas e orientação das fibras para a geração do sólido. Em seguida, no *Static Structural*, foram aplicadas as condições de contorno do problema para a resolução pelo MEF. Uma carga de 40 kN foi aplicada na face inferior da célula de carga, e a viga permaneceu simplesmente apoiada em dois cilindros.

Inicialmente, foi modelada uma viga com quinze camadas com orientação das fibras de 0/90°, com a qual obteve-se os resultados exibidos na Figura 10 e Tabela 1.

Figura 10. Resultados obtidos pela análise computacional.

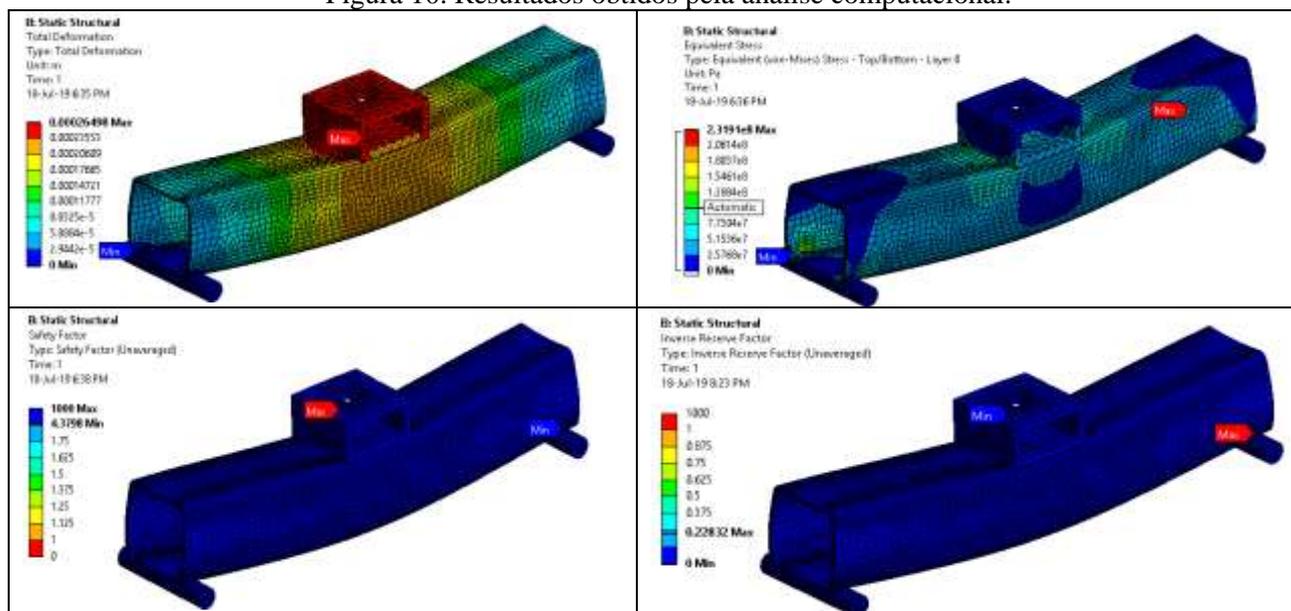


Tabela 1. Resultados numéricos da viga de 15 camadas.

Máxima deformação total [mm]	0,265
Máxima tensão equivalente de <i>Von-Mises</i> [MPa]	231,91
Mínimo valor do inverso do coeficiente de segurança	0,228
Coeficiente de segurança mínimo	4,38

Os resultados indicam que, com a carga aplicada, a estrutura apresenta poucos pontos de tensão elevada e coeficiente de segurança global alto. Tais apontamentos mostram que a peça apresentada suporta os esforços impostos sem sofrer falhas.

Com esse modelo, foi realizada a otimização paramétrica. Foi estipulado o objetivo, o qual foi minimizar a deformação total, a tensão equivalente de *Von-Mises* e o coeficiente de segurança, sendo neste último imposto também valores maiores do que um, garantindo a estabilidade da estrutura. Estabeleceu-se que o número de camadas seria variado de 1 até 15, ao passo de 1, e que o ângulo da fibra seria variado de 0 a 90°, ao passo de 22,5°.

Feito isso, o software calculou para os 75 casos diferentes previamente mencionados e apresentou os melhores 5 candidatos que se enquadravam nos objetivos definidos. Esses candidatos são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Candidatos calculados na Otimização Paramétrica

	Candidatos				
	1	2	3	4	5
Ângulo da fibra	45.203	40.433	54.833	34.673	34.403
Número de camadas	4	4	4	4	4
Coefficiente de segurança	2.215	2.215	2.215	2.215	2.215
Máxima deformação total [mm]	0.253	0.253	0.253	0.253	0.253
Máxima tensão equivalente de <i>Von-Mises</i> [MPa]	219.03	219.03	219.03	219.03	219.03

O primeiro candidate point foi escolhido, uma vez que forneceu ângulo de orientação das fibras mais plausível. Por questões de praticidade em laboratório no quesito de laminação da viga, este ângulo obtido foi considerado como 45°.

Realizou-se mais uma modelagem, porém com o número de camadas e ângulo da fibra de acordo com o encontrado na otimização. Os dados são apresentados na Tabela 3, abaixo:

Tabela 3. Resultados numéricos da viga de 4 camadas

Ângulo da fibra	45
Número de camadas	4
Deformação total máxima [mm]	0.253
Máxima tensão equivalente de <i>Von-Mises</i> [MPa]	218.94
Mínimo valor do inverso do coeficiente de segurança	0.445
Coefficiente de segurança mínimo	2.25

Efetou-se outra otimização paramétrica, apenas removendo o objetivo de minimizar a tensão equivalente de *Von-Mises*. Utilizando o mesmo critério para escolha do melhor candidato, foi escolhido aquele que apresentou número de camadas igual a 8 e orientação das fibras de 0/90°. Na Tabela 4 é possível analisar os valores encontrados com a modelagem dessa viga.

Tabela 4. Resultados numéricos da viga de 8 camadas.

Ângulo da fibra	0/90°
Número de camadas	8
Deformação total máxima [mm]	0.241
Máxima tensão equivalente de <i>Von-Mises</i> [MPa]	221.6
Mínimo valor do inverso do coeficiente de segurança	0.283
Coefficiente de segurança mínimo	3.53

A partir dos resultados dos ensaios de tração indicados na Tabela 5, substituíram-se os valores de Módulo de Young e de resistência à tração padrões do material do ANSYS® pelos valores obtidos experimentalmente.

Tabela 5. Resultados obtidos a partir do ensaio de tração dos corpos de prova.

Módulo de Elasticidade [Mpa]	Resistência à tração [Mpa]
13595	322.93
10621	347.50
11065	304.50
12739	318.06
12260	350.05
21634	352.81
12229	312.60
17876	333.15
17164	321.34
11619	281.27

Com as características do material utilizado impostas, os modelos foram recalculados para as três situações mostradas acima e os resultados são apresentados na Tabela 6, a seguir.

Tabela 6. Resultados numéricos

Ângulo da fibra	0/90°	0/90°	45°
Número de camadas	15	8	4
Deformação total máxima [mm]	0.267	0.254	0.264
Máxima tensão equivalente de <i>Von-Mises</i> [MPa]	232.22	228.74	226.15
Mínimo valor do inverso do coeficiente de segurança	0.161	0.195	0.335
Coeficiente de segurança mínimo	6.19	5.12	2.98

Por fim, foi feita a verificação do critério de falha. Foi imposto o critério de *Tsai-Wu* para as vigas a cima citadas e os resultados são apresentados na Tabela 7, abaixo.

Tabela 7. Valores de critério de falha de *Tsai-Wu* para cada viga.

Número de camadas	Critério de falha de <i>Tsai-Wu</i>
15	0.123
8	0.203
4	0.335

3.2 Análise experimental

Foram produzidas três vigas, com orientação das fibras e número de camadas como apresentado a cima, e testadas de maneira a se assemelhar ao máximo do modelo computacional. Foi utilizado o processo de manufatura *hand lay-up* para fabricação das mesmas, explanado a matriz sobre a fibra com espátulas feitas de material não reagente. A cura foi feita utilizando um saco de vácuo no qual a viga permaneceu por doze horas, a fim de eliminar ao máximo os vazios ou bolhas das peças e aumentar sua resistência. Depois de prontas, foram feitos ajustes em seus comprimentos e bordas a fim de manter as mesmas características do modelo computacional e melhorar imperfeições, respectivamente. Em seguida, as peças foram deixadas em uma estufa por oito horas em 70° C para realização da pós-cura e depois desse período levadas para a realização dos ensaios.

Os ensaios de flexão em três pontos decorreram-se com aplicação gradual e contínua da carga até as peças chegarem ao seu esgotamento e, conseqüentemente, fratura. Os valores das cargas de ruptura estão indicados na Tabela 8. A ruptura das vigas se deu por cisalhamento, esforço no qual o material bidirecional é menos resistente.

Tabela 8. Carga máxima suportada pelas vigas

Número de camadas	Carga de ruptura – [N]
15	40011
8	13532
4	4888

4. Conclusões

Tendo em vista a modelagem realizada, o software gera modelos com perfeita homogeneidade das fibras, volume de vazios nulo e proporção de fibra e matriz ideal, acarretando em peças de altíssima resistência. O processo de hand lay-up, utilizado na fabricação, acarreta erros ao longo de sua execução, tais como formação de bolhas, camadas heterogêneas, desalinhamentos das fibras, excesso de matriz ou de fibra. Tais erros diminuem a resistência final da peça, piorando assim sua performance. O aparecimento de bolhas é o principal causador da queda da resistência das peças. Isso se deve ao aparecimento de fissuras que são geradas pelos espaços vazios incapazes de resistir aos carregamentos impostos. Quando essas fissuras se deslocarem, geram fraturas, e posteriormente, ruptura.

Ao observar os modelos computacionais, é possível notar que com a diminuição das camadas, o inverse reserve fator aumenta, indicando que as peças estão mais próximas da ruína. Por outro lado, não se observa que os mesmos chegam a ruptura com a carga imposta. Analisando mais a fundo os valores de inverse reserve fator, é possível constatar que as vigas com 15 e 8 camadas estão super dimensionadas, uma vez que seus valores desse fator são extremamente altos, acarretando custo elevado em sua fabricação. Já com os modelos experimentais, apenas uma das peças suporta a mesma carga imposta no software sem romper, isto se explica pelos erros envolvidos no processo. Nota-se ainda que, todas as vigas romperam por esforços de cisalhamento, que se fossem devidamente contidos, adotando-se por exemplo orientação das fibras que assimilassem tais esforços, as peças resistiriam ao esforço fletor imposto.

Para continuação deste trabalho será analisada a regra das misturas, pretendendo-se conhecer as frações volumétricas das vigas fabricadas, assim como estabelecer o volume de vazios e a densidade do material. Será feito também o estudo de otimização topológica das vigas a fim de minimizar a massa e o volume.

Referências Bibliográficas

- Campbell, F., 2004c. Thermoset Resins: The Glue That Holds The Strings Together. In: Manufacturing Processes for Advanced Composites. s.l.:Elsevier Science, pp. 63-101.
- F. Neto and L. Pardini. *Compósitos estruturais- ciência e tecnologia*. Publisher, 2006.
- Case, S. & Reifsnider, K. L., 2003. Fatigue of Composite Materials. In: I. Milne, R. Ritchie & B. Karihaloo, eds. *Comprehensive Structural Integrity: Volume 4 Cyclic Loading and Fatigue*. 1st ed. Oxford: Elsevier Ltd., pp. 405-440.
- Chung, D. D., 2004. Composite materials. In: Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. s.l.:s.n., pp. 683-700.
- Daniel, I. M. & Ishai, O., 1994. *Engineering Mechanics of Composite Materials*. New York: Oxford University Press.
- G. Marinucci. *Materiais compósitos poliméricos – fundamentos e tecnologia*. Publisher, 2011.
- G. P. de Souza, V. Tita, N. C. dos Santos, J. de Carvalho, 2002. Metodologia para aplicação de critérios de falhas em materiais compósitos laminados utilizando o método dos elementos finitos. Congresso brasileiro de engenharia e ciência dos materiais.
- W. C. Hansen. The Significance and Measurement of the Tsai-Wu Normal Interaction Parameter F_{12} . Master degree thesis, Oregon State University, 1992.