

# MODELAGEM DE ESTRUTURAS DE MATERIAIS COMPÓSITOS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Marília Cordeiro Padrão <sup>1</sup>; Januário Pellegrino Neto <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluna de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

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

**Resumo.** *Esse estudo foi motivado pelo desenvolvimento de projetos estruturais de vigas feitas de compósitos para participar da competição acadêmica SAMPE. Assim, optou-se por analisar o Método dos Elementos Finitos, compreendendo como funciona de um modo geral e aplicando-o para uma forma mais prática e viável.*

## Introdução

No estudo de estruturas, pode-se encontrar modelos muito complexos que dificultam sua solução. Muitas vezes apenas utilizando a Análise Matricial das Estruturas (AME), consegue-se propor uma resposta adequada para o problema. Esse método pode ser entendido como uma associação de barras ligadas por nós, em que através da matriz de rigidez da estrutura, correlaciona-se os esforços nodais com seus respectivos deslocamentos. Contudo, esse tipo de análise é adequado para vigas, treliças e pórticos que são estruturas reticuladas, ou seja, de seção muito menor que o comprimento. Já para meios contínuos (lajes, cascas cilíndricas, sólidos, paredes etc.) é necessário uso de sistemas de equações de derivadas parciais, combinado métodos numéricos para sua solução, sendo o mais utilizado o Método dos Elementos Finitos (MEF).

O MEF possui uma ideia semelhante a AME, pois caracteriza o sólido como sendo uma associação de elementos interconectados por nós, sendo capaz de correlacionar carregamentos e deslocamentos nodais, possibilitando o cálculo de tensões no interior desses elementos. A subdivisão do modelo em objetos menores (elementos finitos) pela discretização através da malha, é de extrema importância para delimitar os nós e resolver os cálculos. Diferentemente da análise matricial, o MEF requer uma matriz de rigidez mais complicada de ser elaborada, necessitando de um maior aprofundamento na teoria da elasticidade.

Dessa maneira, o método dos elementos finitos apresenta muitas vantagens, pois consegue determinar tensões e deformações de um sólido de geometria arbitrária sujeito a ações exteriores e como as malhas não precisam ser estruturadas, consegue-se obter contorno irregulares. Contudo trata-se de uma formulação matemática muito sofisticada necessitando de computadores para seu desenvolvimento.

A principal motivação para a realização dessa Iniciação Científica, foi encontrar um método de análise estrutural preciso e confiável, que fosse capaz de trabalhar com diversos parâmetros de geometrias e materiais. Isso com o intuito de ajudar no desenvolvimento de vigas de compósitos para a competição acadêmica SAMPE. Dentro desse concurso, existem categorias divididas de acordo com a seção e com a fibra utilizada, em que o critério de avaliação é a viga resistir uma carga mínima, especificada pela norma do campeonato, em um ensaio de três pontos e a que possuir o menor peso vence. Assim, para esse estudo adotou-se o software da ANSYS Inc. que utiliza o MEF para solucionar os modelos estruturais de vigas e que possui um acervo a respeito de material compósitos.

## **Material e Métodos**

O estudo consistiu, primeiramente, em compreender como os materiais compósitos de fibras e resinas se comportam, a partir de suas propriedades e características. Com o intuito de encontrar os diferentes parâmetros que podem interferir na resistência final.

Então, escolheu-se um software que utiliza o Método dos Elementos Finitos para realizar os cálculos e capaz de trabalhar com os parâmetros dos materiais necessários. Assim, foi escolhido pacotes do ANSYS Inc. para a realização das modelagens das vigas de fibra de vidro com seção quadrada e de carbono com seção quadrada e I.

## **Compósitos**

Compósitos são uma combinação de materiais que atuam como matriz ou reforço, gerando um novo material com excelentes propriedades mecânicas e baixo peso. É importante enfatizar que as matrizes e os reforços devem ser quimicamente compatíveis e suas propriedades mecânicas devem ser complementares, pois assim as características finais do compósito vão ser uma combinação dos constituintes. No objeto de estudo, os materiais escolhidos são a resina Epóxi atuando como matriz e as fibras de carbono e de vidro, como reforços.

A resina tem a importante função de envolver a fibra, permitindo que os esforços propaguem pela peça garantindo maior tenacidade. Contudo, também é responsável por atribuir resistência de compressão ao material, dado que a fibra não possui essa propriedade.

Já as fibras são encarregadas de suportar os esforços mecânicos, mais especificamente quanto a atribuir ao compósito a resistência de tração, porém não são tão resistentes ao cisalhamento. Além disso, as fibras são materiais anisotrópicos, isso significa que não tem as mesmas propriedades em todas as suas orientações e, por isso, orientar camadas das fibras a 45° contribui com a resistência do cisalhamento do compósito.

Por conta das características desses materiais, durante a manufatura de peças de compósitos alguns parâmetros devem ser escolhidos pelo projetista afim de aprimorar o resultado final. A quantidade de camadas de fibras é um desses parâmetros, uma vez que quanto maior o número de camadas, mais resistente o material se torna, contudo mais pesado ele fica. Outro parâmetro a se analisar é a orientação da malha de fibra, pois, devido a sua anisotropia, mudar a orientação entre as camadas permite que esforços se dispersem mais facilmente, permitindo que o número de camadas se reduza. Assim, um bom projeto consiste em otimizar o número de camadas e suas orientações, afim do modelo aguentar uma carga necessária com o menor peso possível.

Além disso, é de extrema importância que o compósito não possua bolhas de ar em seu interior, para não perder resistência, devido a inexistência de contato entre fibra e resina. Assim, durante a fase de cura da resina é interessante colocar a peça em um saco de vácuo, para tirar qualquer bolha existente.

## **Pacotes do ANSYS**

ANSYS, Inc. é uma empresa desenvolvedora de softwares muito utilizados para fazer simulações de problemas no campo da engenharia. Nesse estudo foram utilizados os pacotes Structural Analysis e Ansys Composites PrepPost (ACP).

Como sugestivo no próprio nome, o pacote Structural Analysis ajuda na resolução de problemas estruturais, verificando e analisando informações sobre deformações, tensões, cargas pontuais e distribuídas, áreas de contato, geometrias, pontos críticos e muito mais. Uma vez que utiliza o Método dos Elementos Finitos para obtenção dos resultados, essa ferramenta é ideal para respostas rápidas e precisas de modelos com materiais e estruturas mais complexas, sendo que essas análises podem ser mais aprofundadas e refinadas de acordo com a malha gerada. Além disso, o software torna-se bastante vantajoso para auxiliar na escolha de designs e de dimensões do objeto a ser estudado, visto que os dados inseridos podem ser parametrizados e assim diversas verificações a respeito do modelo podem ser estudadas.

Já o ANSYS Composites PrepPost, é utilizado para criar estruturas a partir de materiais compósitos, como fibras e resinas. Essa ferramenta já possui uma grande biblioteca de materiais com suas propriedades (como módulo de elasticidade, espessura, entre outros), mas também permite que novos materiais sejam adicionados e caracterizados pelo programador. Além disso, tem o diferencial de durante a modelagem da estrutura, poder se especificar orientações das camadas e elaborar modelos com camadas de materiais diferentes. Como durante a montagem da estrutura diversos parâmetros dos compósitos são escolhidos, apresentando um alto nível de complexidade, o MEF é ideal para solucioná-los.

A combinação dessas duas ferramentas foi essencial para o desenvolvimento do projeto, sendo que o ACP foi responsável pela determinação dos materiais e propriedades dos objetos em estudo e o Structural Analysis recebendo essas informações foi capaz de determinar pontos de falha, deformações e muito mais, tudo utilizando o MEF.

## Modelagem

Será demonstrado abaixo um passo a passo para modelar uma viga simples de compósito através dos pacotes ANSYS citados anteriormente.

Primeiramente, seleciona-se o ACP (Pre) e arrasta-se para a tela principal do workbench (Figura 1).

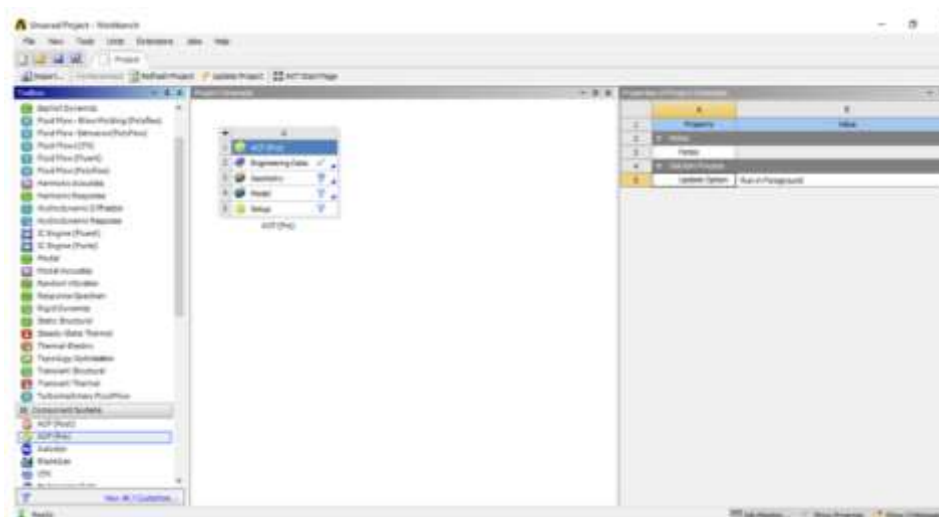


Figura 1-Workbench do ANSYS como o ACP selecionado.

Depois é necessário estabelecer quais materiais vão ser utilizados (nesse exemplo fibra de carbono e resina epoxy), então deve-se entrar no Engineering Data Sources e selecionar

dentro de Composite Materials os materiais que vão ser usados, como pode ser observado na figura 2.

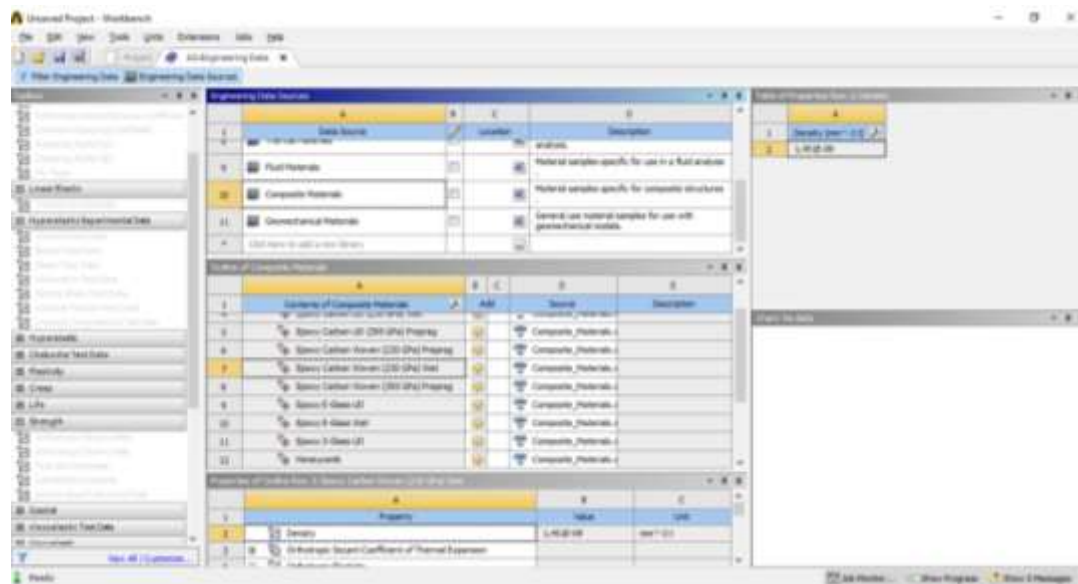


Figura 2- Composite Material no Engineering Data Sources.

A geometria pode ser importada do Solidworks para facilitar o processo, ressaltando-se que essa deverá vir como casca, pois o que dará espessura a peça será a aplicação das camadas de fibra e resina. Como nesse exemplo o ensaio da viga é feito por área de contato, os objetos com os quais a viga terá contato já devem estar no arquivo importado do Solidworks.

Após a geometria estar pronta, entra-se no model do ACP(Pre) e gera-se a malha (mesh generate), podendo especificar tamanho máximo de cada elemento e faces com malha uniforme. Em seguida, utiliza-se o Setup para gerar tecidos com os materiais previamente selecionados, indicando orientação das fibras (figura 3).

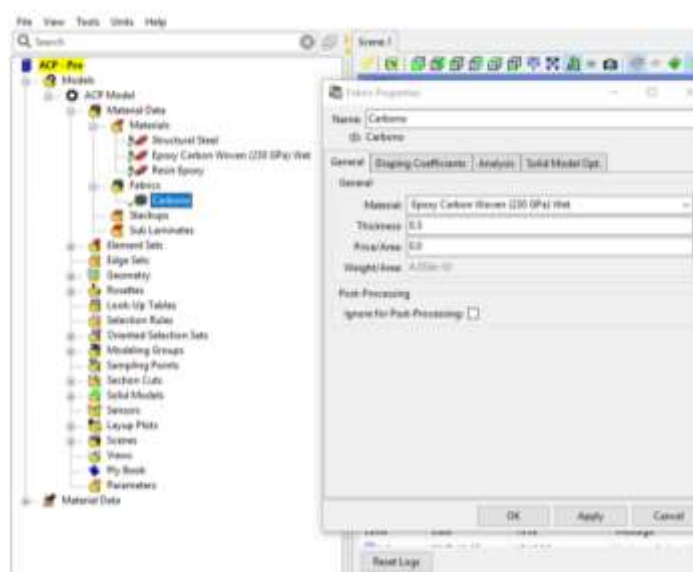


Figura 3- Criação dos tecidos a partir dos materiais pré-selecionados.

Criando os tecidos, é importante aplica-los as faces desejadas e as quantidades também devem ser observadas através do Modeling Group. E para finalizar a parte do Setup e do ACP(Pre), usa-se o Solid Models para gerar o sólido com as informações dadas.

A seguir, começa-se a utilizar o pacote Structural Analysis, onde vão ser estabelecidos, os apoios, as cargas e o que quer se obter como resultado. Para tal, arrasta-se o Structural Analysis para a tela principal do workbench e seleciona-se em ACP(Pre) todos os dados para o Model do Strucutural Analysis (Figura 4)



Figura 4-Workbench com ACP(Pre), Static Structural e ACP(Post) selecionados e interligados.

Utilizando o Setup do Static Structural o próprio ANSYS já reconhece as áreas de contato e o mais interessante é que passa cada camada para analisar o modelo. Já em Solution é possível determinar as cargas e carregamentos da peça, bem como os pontos de apoios, também é nesse momento que se determina quais tensões e deslocamentos serão obtidos.

Depois, já pode se arrastar o ACP(Post) para a tela principal do workbench, ligando Eneineering Data, Geometry e Model do ACP(Pre) para o ACP(Post) e o Solution do Static Structural para Results em ACP(Post) (Figura 4).

Com o ACP(Post) é possível analisar de forma mais correta como materiais compósitos se comportam de acordo com os carregamentos indicados no Static Structural. Sendo que em Definitions determina-se o critério de falha e em Results, na opção de Solution pode-se escolher quais informações deseja-se obter (Figura 5).

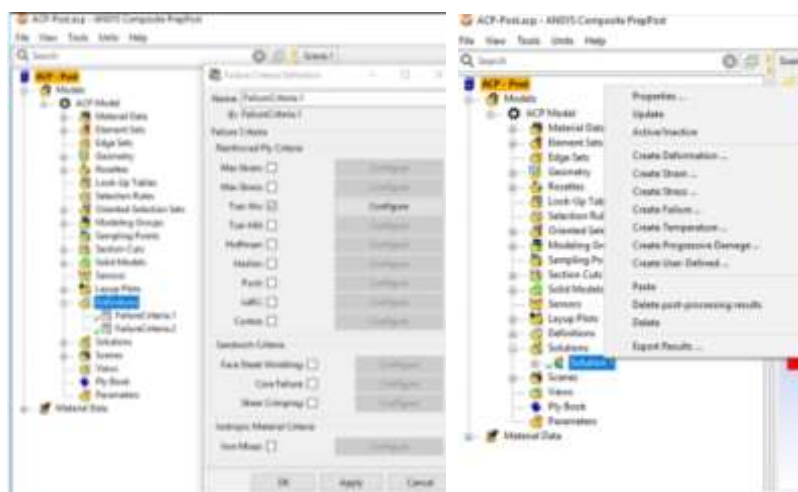


Figura 5-Selecionando o critério de falha em Definitions e as opções de informações que podem ser adquiridas em Solution.

## Resultados e Discussão

A partir da modelagem utilizando o ANSYS, foi possível determinar o número de camadas, orientações das fibras e a geometria que melhor aguentaria a carga exigida com o menor peso possível, considerando um coeficiente de segurança.

Para a viga com seção I de carbono suportar a carga mínima de 4 toneladas, determinou-se que seria necessário um comprimento de 61 cm, mesas de 9 cm com espessura de 5 mm e alma de 8 cm e também com 5 mm de espessura. Para tal utilizou-se 14 camadas de malha com orientação 0-90° e 4 camadas com orientação a 45° na alma e 14 camadas com orientação 0-90° nas mesas. O modelo feito no ANSYS com a análise dos pontos crítico pelo critério de TSAI-WU (critério escolhido) pode ser observado na figura 6 e na figura 7 tem-se a viga levada para o concurso do SAMPE.

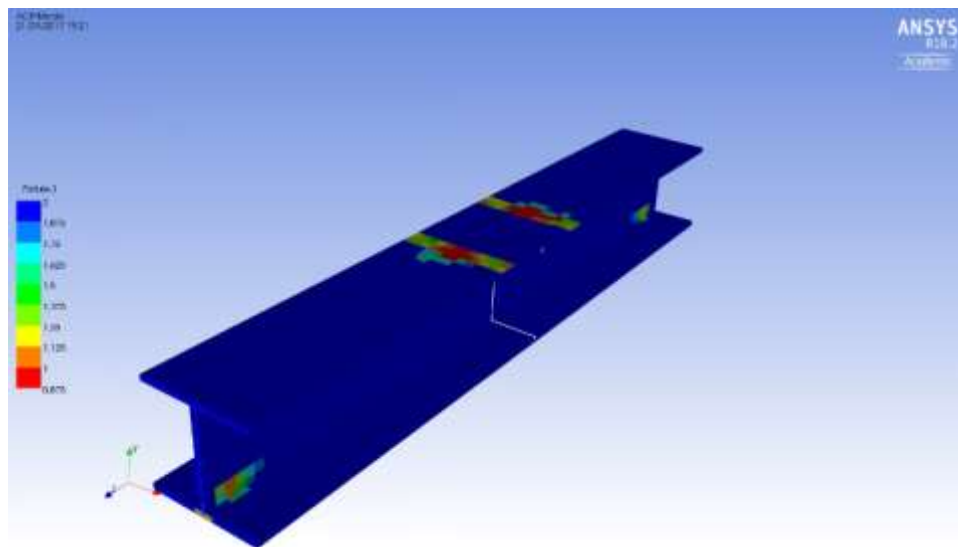


Figura 6-Modelo viga de carbono de seção I com a análise do critério de ruptura de Tsai-Wu.



Figura 7-Viga de carbono de seção I.

Já a viga de carbono com seção quadrada, para suportar a carga mínima prevista de 4 toneladas, teve sua geometria estabelecida com um comprimento de 61 cm, seção quadrada com largura interna igual a 8,5 cm com as espessuras das almas e mesa inferior de 5 mm e da

mesa superior 4 mm, também foram realizados 6 furos na mesa superior com diâmetro de 43 mm para minuir o peso. Desse modo, utilizou-se 14 camadas de malha com orientação 0-90 na base superior, 17 camadas de malha com orientação 0-90 na base inferior e 14 camadas com orientação 0-90 e 3 camadas a 45° nas laterais. O modelo feito no ANSYS com a análise dos pontos crítico pelo critério de TSAI-WU (critério escolhido) pode ser observado na figura 8 e na figura 9 tem-se a viga do concurso SAMPE.

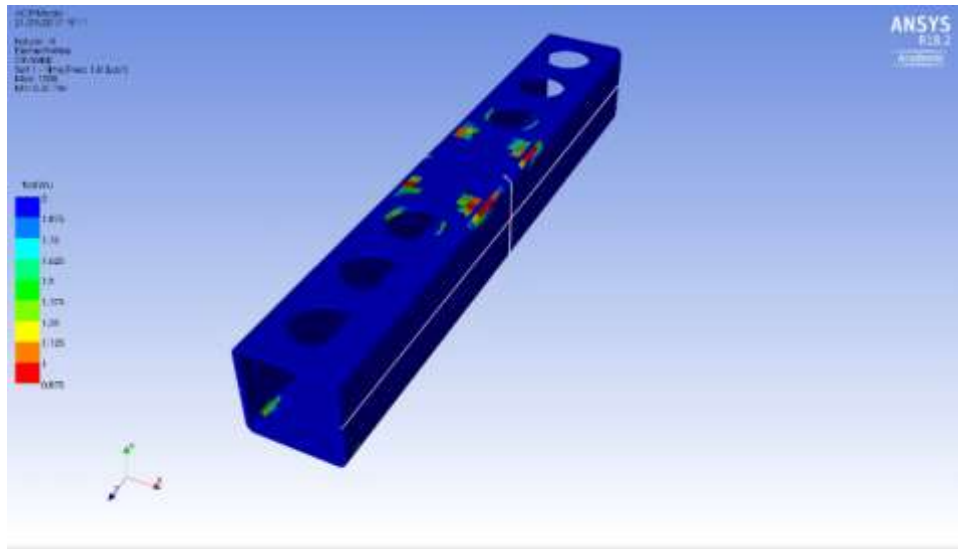


Figura 8-Modelo viga de carbono de seção quadrada com a análise do critério de ruptura de Tsai-Wu.



Figura 9--Viga de carbono de seção quadrada.

A viga de seção quadrada feita com malha de fibra de vidro para reistir a carga de 3 toneladas, teve como dimensões 61cm de largura, a seção de 9,2 cm possuindo espessura de 5 mm em todo seu entorno e foram adicionados 6 furos com diâmetro de 43 mm na mesa



superior para diminuir o peso. Dessa maneira, utilizou-se 15 camadas com malha 0-90 nas mesas inferiores e superiores e e nas almas, 12 camadas 0-90 e 3 camadas a 45°. O modelo feito no ANSYS com a análise dos pontos crítico pelo critério de TSAI-WU (critério escolhido) pode ser observado na figura 10 e na figura 11 tem-se a viga do concurso SAMPE.

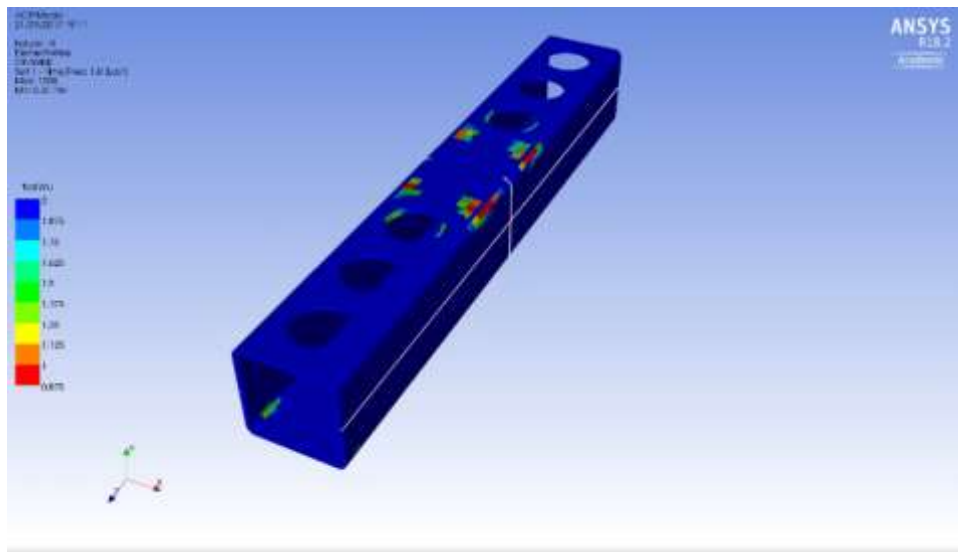


Figura 10-Modelo viga de vidro de seção quadrada com a análise do critério de ruptura de Tsai-Wu.



Figura 11-Viga de vidro de seção quadrada.

As vigas do campeonato foram submetidas a um ensaio de três pontos (figura 12). Sendo que nesse ensaio as vigas de carbono de seção I e quadrada, suportaram uma carga de 2600 kg e 4400 kg, respectivamente. Já a viga de vidro, resistiu uma carga de 2700 kg.

A diferença encontrada na carga máxima suportada pela viga entre a modelagem computacional e o modelo real, está ligado ao processo de manufatura do modelo real. Por se um procedimento manual, erros durante a fabricação das vigas ocorre facilmente. Os mais comuns são: a existência de bolhas que gera um ponto frágil, já que se perde o contato entre fibra e resina; a forma não estar bem moldada, gerando imperfeições na geometria do modelo;



a orientação da fibra não ficar correta durante o processo de laminação e ocorrer a cura da resina antes da laminação completa da viga.



Figura 12- Ensaio de três pontos realizado em uma viga de carbono com seção I.

## Conclusões

Durante o estudo, pode-se observar que o Método dos Elementos Finitos é um modelo matemático confiável para a resolução de problemas estruturais, contudo devido à complexidade dos seus cálculos, a utilização de softwares é recomendável. Através desses softwares, é possível analisar estruturas complexas com materiais diferentes, obtendo resultados seguros e rápidos.

O uso do MEF torna-se bastante prestativo na elaboração do projeto estrutural de vigas laminadas com fibra, principalmente pelo material compósito ter muitos parâmetros e propriedades diferenciadas, apresentando um comportamento anisotrópico.

Contudo só a modelagem computacional não serve para que a viga possa ser otimizada, encontrar meios de fabricação das vigas que contenham menos risco de erros é essencial também. Além disso, sempre deve-se realizar ensaios para comparar os resultados reais com os da modelagem.

## **Referências Bibliográficas**

AZEVEDO, A. Método dos Elementos Finitos. 1ed. Portugal: 2003.

FISH, J; BELYTSCHKO, T. Um primeiro curso em Elementos Finitos. LTC, 2009.

TITA, V. *Análise dinâmica teórica e experimental de vigas fabricadas a partir de materiais compósitos poliméricos reforçados*. 1999. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia São Carlos. São Carlos, 1999.

MARINUCCI, G. Materiais Compósitos Poliméricos – Fundamentos e Tecnologia. Artliber Editora Ltda. 2011.