

DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE SOFTWARE PARA ANÁLISE DE ESTRUTURAS EM COMPÓSITOS AVANÇADOS EMPREGADOS EM UM VEÍCULO ELÉTRICO

Matheus Carvalho da Costa

Volnei Tita

Escola de Engenharia de São Carlos, EESC - USP

matheus.c.costa@usp.br , voltita@sc.usp.br

Objetivos

No setor automobilístico competitivo e comercial cada vez mais necessita-se reduzir massa, desperdício e uso de materiais não renováveis. Sendo assim, tal revolução tem se sustentado na implementação de estruturas em compósitos como fibra de carbono e vidro reforçando um material polimérico, por exemplo, epóxi.

No entanto, ao trabalhar com reforços orientados, em contraponto aos materiais isotrópicos, o estudo de cargas e falhas deve ser feito com maior rigor e cautela, devido a heterogeneidade das propriedades em uma lâmina.

Nessa linha, busca-se com o desenvolvimento deste software “In-House” em MatLab, modelar a estrutura tubular em questão, ou seja, as “suspension rods” e indicar a partir de uma entrada de carga tensora ou compressiva, se haverá falha ou não do laminado de acordo com quatro critérios de falha, sendo eles: máxima tensão, máxima deformação, Tsai-Wu e Tsai-Hill. Ainda, onde ocorreu a referida falha, quais serão suas características e margem de segurança, de forma mais rápida e simples do que os programas baseados no Método dos Elementos Finitos.

Por fim, esta pesquisa permitirá a futura manufatura e instalação de um “suspension rod” em compósito de fibra de carbono no

veículo elétrico da equipe EESC – TUPÃ, feito pioneiro na categoria nacional.

Métodos e Procedimentos

O desenvolvimento do software foi dividido em três etapas: Estudo de literatura e elaboração do script; validação em conjunto com o software de elementos finitos “Abaqus”; atualização e validação do programa para estruturas tubulares.

Na primeira etapa, estudou-se a teoria geral de laminados CLT (Classical Laminate Theory), matrizes de rigidez, hipótese de Kirchhoff, implicações para laminados simétricos, transferência de coordenadas globais para locais; e os critérios de falha apresentados anteriormente (Tita, 2006).

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}_{\text{Global}}^k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}^k \begin{bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \gamma_{xy0} \end{bmatrix}_{\text{Global}} + z \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}^k \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix}_{\text{Global}}$$

Figura 1: Relações de Tensão-Deformação resultantes de Kirchhoff.

A partir desse estudo construiu-se o script em MatLab para uma chapa plana laminar.

Na segunda etapa, validou-se os resultados obtidos do software autoral com aqueles advindos do Abaqus para três casos problema de placas, envolvendo laminado simétrico, assimétrico e diferentes orientações de fibra.

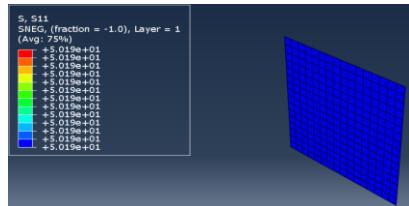


Figura 2: Simulação FEM Abaqus

Por último, na terceira etapa, de (HYER, 1998), adaptou-se o código para estruturas tubulares, em seguida, validando-o com o exemplo apresentado de um tubo reforçado com fibra de carbono que traz um carregamento equivalente ao atuante na estrutura “suspension rod”.

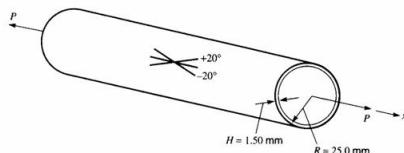


Figura 3: Tubo em carregamento axial.

Resultados

Na etapa de validação com o software FEM, as diferenças percentuais para os valores das tensões e deformações locais (no sistema de coordenadas do material), ficaram inferiores a 0,1% para todos os casos tratados.

Além disso, para a validação do caso de seção tubular apresentado na Figura 3, tem-se:

Tabela 1: Tensões locais (Pa) para $P=1N$ (HYER, 1998)

Ply	σ_1	σ_2	τ_{12}
+20°	3830	-112,3	-148,7
-20°	3830	-112,3	148,7
0°	4770	-168,6	0

Tabela 2: Tensões locais (Pa) para $P=1N$, software autoral

Ply	σ_1	σ_2	τ_{12}
+20°	3829	-112,4	-148,8
-20°	3829	-112,4	148,8
0°	4769	-168,7	0

Novamente, resultados com diferença percentual abaixo de 0,1%.

Por fim, para os critérios de falha, foi analisada a margem de segurança (MS) do algoritmo “In-

House” e aqueles vindos de (HYER, 1998) para um caso onde $P=0,2$ MN.

Tabela 3: Comparativo de MS para o critério de Tsai-Wu

Ply	MS (HYER=Autoral)
+20°	1,75
-20°	1,75
0°	1,54

Conclusões

Conclui-se, visto a proximidade dos resultados do software com os materiais de referência, a confiabilidade do algoritmo. Ademais, com a aplicação ao caso teste da Figura 3, resta somente realizar um estudo dinâmico do veículo elétrico para assim determinar os carregamentos e, em vista disso, definir as características finais à estrutura, ou seja, número de camadas, ângulo de fibra e margem de segurança. Por último, definir o método de manufatura a partir dessas exigências de projeto.

Agradecimentos

Agradecimento especial ao grupo GEA (Grupo de Estruturas Aeronáuticas), EESC e CNPq (processos: 407531/2022-0 e 180654/2024-1) pelo apoio técnico, financeiro e infraestrutura.

Referências

HYER, Michael W. Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials. 1st ed. Boston: McGraw-Hill, 1998. 645 p. ISBN 978-0070316935.

Tita V. (2006) “Projeto e Fabricação de Estruturas Aeronáuticas em Material Compósito Polimérico”. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. Apostila.

GEA - Grupo de Estruturas Aeronáuticas. Disponível em: <http://gea.eesc.usp.br/>. Acesso em: 03 set. 2024.