

3.12.04 – Engenharia Aeroespacial / Materiais e Processos para Engenharia Aeronáutica, Aeroespacial

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE JUNTAS COLADAS DE MATERIAL COMPÓSITOJoão Pedro Pereira dos Santos¹, Marcelo Leite Ribeiro²

1. Estudante da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP)
2. Professor da EESC-USP – Departamento de Engenharia Aeronáutica / Orientador

Resumo

A utilização de juntas coladas (JC), assim como a de materiais compósitos, é assunto de grande estudo e prática dentro da engenharia. Para uma correta aplicação, pode-se dimensionar previamente uma JC utilizando-se de um programa em elementos finitos (EF). Entretanto, a simulação dessas juntas pode levar a tempos de cálculos excessivos, ou problemas de convergência devido à complexidade do modelo. Assim, a seguinte pesquisa possui o objetivo de estudar como as simplificações de um modelo em elementos finitos afetam a previsão da falha da junta. Serão avaliados 3 modelos modificados a partir de um artigo base, construídos no programa de EF Abaqus®. Os resultados permitem avaliar o comportamento qualitativo da falha da junta, demonstrando que o adesivo tende a falhar antes do compósito. Para uma avaliação mais criteriosa, compara-se os modelos quantitativamente, através de gráficos de tensão no adesivo, deslocamento da junta e dano no adesivo. Assim, apesar das simplificações, todos os modelos funcionam da mesma maneira.

Palavras-chave: Elementos Finitos; União Adesiva; Análise Estática

Apoio financeiro: CNPq.

Trabalho selecionado para a JNIC: EESC-USP.

Introdução

No campo da engenharia aeronáutica, mais especificamente para a aviação comercial, a crescente demanda de passageiros requer a busca de soluções para aumentar a capacidade das aeronaves. Uma das maneiras de atingir esta meta é através da redução do peso estrutural da aeronave. Desta maneira, os materiais compósitos tornam-se essenciais para esta tarefa. Além disto, a união adesiva através de uma JC permite a eliminação de dispositivos fixadores (como rebites e parafusos), o que elimina a presença de furos nas estruturas, as principais fontes de concentração de tensão e redutores da vida em fadiga do componente. Assim, uma junta colada em material compósito permite uma melhor vida em fadiga, além de um peso estrutural menor, permitindo maior vida da aeronave e capacidade de carga paga [1]. Entretanto, as vantagens econômicas são desafiadas por uma complexidade elevada na análise estrutural. Esta dificuldade surge dos diversos modos de falha que uma estrutura em compósito colada oferece. Do ponto de vista do compósito tem-se alguns modos de falha: por tração e compressão tanto na matriz quanto na fibra, além da delaminação entre as camadas de um laminado. Além disto, quando se tem um adesivo em questão, deve-se considerar ainda as falhas do adesivo por tração, compressão ou cisalhamento. Portanto, analisar mecanicamente uma JC torna-se essencial para um projeto que atenda os padrões elevados de segurança do mundo aeronáutico. Tal atividade é comumente realizada computacionalmente por meio de programas de EF, e, devido à complexidade que esses modelos tomam, uma análise de um componente estrutural pode tomar um tempo indesejável.

Desta forma, este trabalho busca modificar um modelo relativamente complexo, de forma a simplificá-lo, e avaliar os impactos dessa simplificação na predição do comportamento mecânico estático de uma JC simples.

Metodologia

O modelo o qual foi tomado como base para as modificações pode ser encontrado em [2]. O programa de elementos finitos utilizado para a análise foi o Abaqus®, devido à sua boa flexibilidade, biblioteca de elementos e documentação disponível. Trabalha-se dentro do ambiente implícito, por se tratar de uma análise de tração, a qual pode ser considerada estática para pequenas taxas de deslocamento. Os materiais do adesivo e do compósito (laminado de fibra de vidro) encontram-se respectivamente na Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 1 - Propriedades do adesivo AF163-2K. [2]

E (MPa)	2000
$G=G_1=G_2$ (MPa)	750
G_{1c} (N/mm)	0.6
$G_{2c}=G_{3c}$ (N/mm)	0.67

η	1.45
t_1^0 (MPa)	30
$t_2^0=t_3^0$ (MPa)	50

Tabela 2 - Propriedades da fibra de vidro utilizada no laminado. [2]

E1 (MPa)	44000
E2=E3 (MPa)	13000
$\nu_{11} = \nu_{13} = \nu_{23}$	0.2736
$G_{12}^0=G_{13}^0$ (N/mm)	6900
G_{23}^0 (N/mm)	6200
σ_{1T}^u (MPa)	1200
σ_{1C}^u (MPa)	850
σ_{2T}^u (MPa)	70
σ_{2C}^u (MPa)	90
σ_{12}^u (MPa)	95
σ_{23}^u (MPa)	50
G_{ft} (MPa)	100
G_{fc} (MPa)	100
G_{mt} (MPa)	25
G_{mc} (MPa)	25

Para modelar o dano no adesivo utiliza-se da teoria de zonas coesivas (em inglês, *Cohesive Zone Modelling - CZM*). Pelo fato de o adesivo em questão ser frágil, adota-se uma lei triangular de tração-separação, descrita em [3]. A iniciação da trinca é prevista por um modelo quadrático nominal, enquanto que a propagação prevista pelo critério de Benzeggagh e Kenane, desenvolvido em [3]. Com relação à geometria e malha de cada modelo, uma descrição breve com os principais pontos é apresentada nos itens a seguir:

- 1) Modelo 1: propõe avaliar o comportamento da junta considerando apenas o dano modelado no adesivo. Assim, não há critérios de falha para o compósito, uma vez que o programa não aceita tal para os elementos utilizados neste caso (C3D8R), sólidos de 8 nós com integração reduzida. O adesivo é feito com elementos coesivos de 8 nós disponíveis na biblioteca do programa (COH3D8). Discretiza-se o compósito e o adesivo de forma a tentar se aproximar da quantidade de elementos finitos do artigo base, totalizando 540 elementos no adesivo e 23700 em cada compósito.
- 2) Modelo 2: propõe maior simplicidade e rapidez de solução, uma vez que os compósitos são modelados com elementos de casca plana de 4 nós e integração reduzida (S4R). A modelagem do adesivo se mantém igual ao modelo 1, tanto na análise de dano quanto no elemento utilizado. Neste caso tem-se 2130 elementos em cada compósito, por ser plano, 540 para o adesivo novamente.
- 3) Modelo 3: mais simples que o modelo original, todavia, constitui no modelo mais completo e complexo dentre os três estudados. Neste caso para modelar o compósito com o critério de Hashin, utiliza-se de um elemento de casca contínua de 8 nós e integração reduzida (SC8R). O adesivo continua da mesma maneira que nos modelos anteriormente citados. Neste caso, a quantidade de elementos gerados tanto para o compósito quanto para o adesivo é a mesma do modelo 1.

As condições de contorno para a análise estática da junta colada constituem em um engaste fixo em uma das extremidades e um deslocamento de 2mm na outra, na direção longitudinal. Desta forma, com os 3 modelos prontos, inicia-se a análise de cada um e a extração dos dados para apresentação dos resultados discutidos a seguir.

Resultados e Discussão

Pode-se avaliar o comportamento de cada modelo sob duas perspectivas: qualitativa e quantitativa. A primeira se refere à reação cinemática de cada junta diante o deslocamento. Os 3 modelos apresentam uma curvatura característica no centro, vide Figura 2, devido às tensões de arrancamento na zona adesiva. Além disto, os gráficos de contorno demonstram uma concentração de tensão nas bordas do adesivo, vide Figura 1, região de descontinuidade. Estes comportamentos são esperados e conhecidos de outras literaturas e ensaios já realizados.

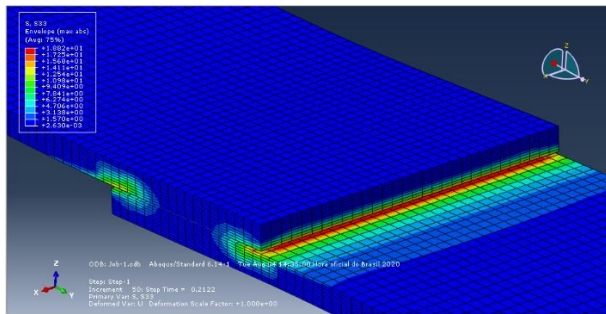


Figura 1 - Concentração de tensão nas descontinuidades da JC

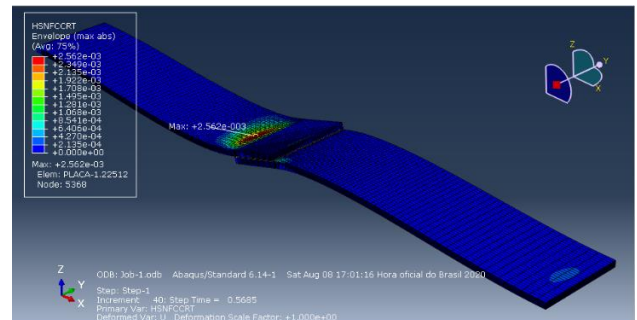


Figura 2 - Curvatura da JC na região central

Tratando-se da ótica quantitativa da junta em análise, pode-se estudar o comportamento do deslocamento da junta contra a força de reação, vide Figura 3. Além disto pondera-se sobre a evolução do dano no adesivo com o deslocamento, além do comportamento das tensões de Von Mises dada as deformações desse.

É possível notar uma tendência e semelhança na zona linear-elástica dos modelos 1, 3 e original. O segundo modelo aparenta ser o mais dispar entre os quatro comparados. Isto sugere algum tipo de imprecisão deste modelo mais simplista para construir a junta, e isto é reforçado pela Figura 5 a qual mostra um aparente comportamento dúctil para o adesivo, sendo que este possui característica frágil. Além disto, o modelo 2 é o primeiro a falhar para o critério quadrático do adesivo, como evidencia a figura Figura 4. A mesma figura exalta que o modelo mais completo prevê uma falha mais tardia do adesivo quando comparado aos outros dois modelos.

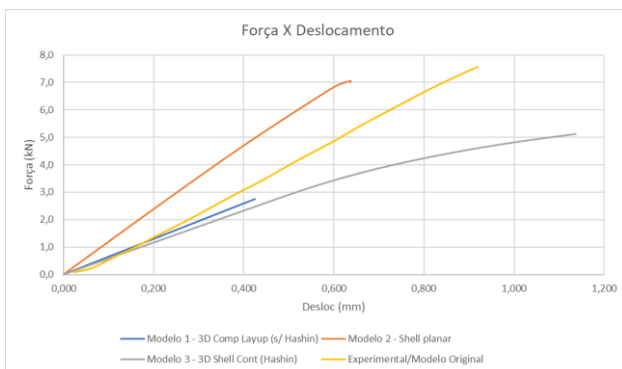


Figura 3 - Força na JC versus deslocamento

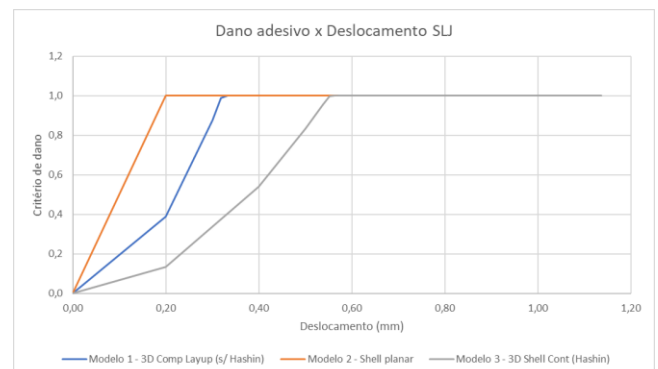


Figura 4 - Evolução do dano no adesivo com o deslocamento da JC

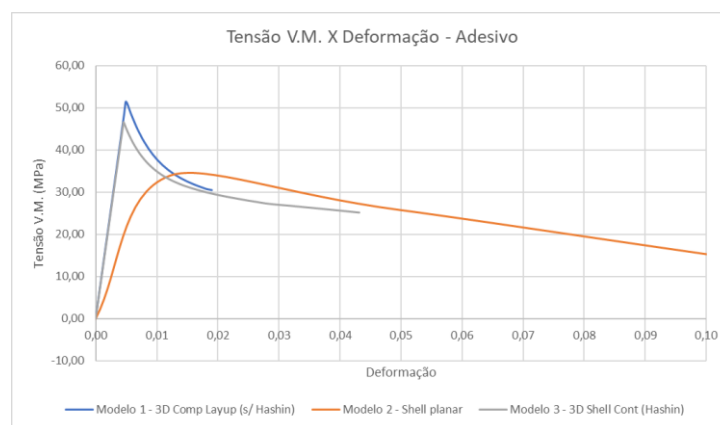


Figura 5 - Tensão versus deformação no adesivo

Conclusões

O presente artigo demonstrou os impactos de simplificações em um modelo de junta colada fabricada com fibra

de vidro. Visto que este tipo de união mecânica e material são apreciados no campo da engenharia aeronáutica, este artigo possui a sua contribuição para o setor.

Ao observar como cada abordagem se comporta com relação à predição da cinemática do conjunto, é possível notar que os 3 modelos se mostram capazes de prever as deformações e tensões de arrancamento, muito importantes para este caso de cargas desalinhadas. De acordo com os dados expostos anteriormente é possível então avaliar os impactos das simplificações adotadas com relação ao modelo original. Dentre esses efeitos está uma certa perda na precisão numérica dos valores obtidos de tensão e forças agindo sob a JC. No caso mais extremo, do segundo modelo, há uma significativa perda de precisão, de tal modo que a única compensação a se avaliar é uma provável rapidez na análise computacional. Para o modelo 1, o qual prevê apenas falha no adesivo, demonstra uma tensão última (Sut) maior que os outros casos. Por último, o terceiro modelo, já mais completo e complexo, foi capaz de prever uma resposta mais coerente e próxima ao que se espera de uma junta. Para os outros modelos, entretanto, é possível notar uma diferença, mas que é compensada pela velocidade ganha nos cálculos com relação a modelos mais complexos.

Com o que foi apresentado anteriormente é possível então mensurar dentro de uma aplicação prática qual abordagem fará mais sentido visando o objetivo em mente. No caso de uma análise rápida e a qual busca-se pouca precisão e apenas se ter uma noção do comportamento, o modelo 2 poderá se tornar o mais interessante. Para uma análise mais rigorosa, mas ainda onde busca-se praticidade, o modelo 3 pode se tornar mais atrativo. Assim, cabe ao engenheiro conhecer as limitações e potenciais de cada modelo apresentado anteriormente.

Referências bibliográficas

- [1] BANEJA, M. D.; DA SILVA, L. F.M. Adhesively bonded joints in composite materials: An overview. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications**, [s. l.], v. 223, n. 1, p. 1–18, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1243/14644207JMDA219>
- [2] DEMIRAL, Murat; KADIOGLU, Ferhat. Failure behaviour of the adhesive layer and angle ply composite adherends in single lap joints: A numerical study. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, [s. l.], v. 87, n. October, p. 181–190, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2018.10.010>
- [3] NOORMAN, D. C. **Cohesive Zone Modelling in Adhesively Bonded Joints: Analysis on crack propagation in adhesives and adherends**. 156 f. 2014. - Delft University of Technology, [s. l.], 2014.