ANÁLISE DE FRATURA EM MODOS MISTOS DE JUNTAS COLADAS DE COMPÓSITOS

Caio Pires da Silva, Felipe Ruivo Fuga, Ricardo de Medeiros

INTRODUÇÃO

O uso de materiais compósitos em aplicações estruturais tem ampliado o emprego de juntas coladas como método de união entre componentes (Ribeiro, 2010). Em comparação aos sistemas de fixação mecânica, as juntas coladas permitem a transferência de carga ao longo da região aderida, sem a necessidade de perfurações no material. Em estruturas fabricadas em material compósito, essa característica está relacionada à redução de concentrações de tensão e à alteração dos mecanismos de falha observados na vizinhança da junta. A integridade estrutural dessas uniões depende do comportamento do adesivo e das interfaces aderente-adesivo sob diferentes condições de carregamento. Em aplicações práticas, as juntas estão frequentemente submetidas a combinações de esforços normais e cisalhantes, resultando em condições de fratura em modo misto. Nesses casos, a propagação de trincas ocorre pela interação entre os Modos I (abertura) e II (cisalhamento), exigindo procedimentos de análise capazes de representar adequadamente os mecanismos de iniciação e propagação do dano (Floros *et al.,* 2015; Santos *et al.,* 2017; Ries, 2024; Zhang *et al.,* 2026).

A caracterização da fratura em modos puros possui metodologias experimentais e numéricas consolidadas na literatura. Entretanto, a análise em modo misto apresenta desafios adicionais devido à interação entre diferentes mecanismos de carregamento e aos critérios adotados para descrição da propagação da trinca. Nesse contexto, o Método dos Elementos Finitos tem sido empregado para a modelagem de problemas de fratura por meio de diferentes estratégias numéricas, entre as quais se destacam os elementos coesivos, o contato coesivo e o Método dos Elementos Finitos Estendido (XFEM). Essas formulações utilizam abordagens distintas para representar a iniciação e o crescimento de trincas e, consequentemente, podem produzir diferenças nas respostas estruturais previstas. Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo analisar a fratura em modos mistos de juntas coladas de materiais compósitos por meio de modelos numéricos baseados no Método dos Elementos Finitos. Para isso, são comparadas as formulações de elementos coesivos, contato coesivo e XFEM na simulação do ensaio de Flexão em Modo Misto (*Mixed-Mode Bending* - MMB), considerando diferentes proporções de participação dos Modos I e II, com o propósito de avaliar a resposta carga-deslocamento e a propagação de trincas previstas por cada abordagem.

DESENVOLVIMENTO

Foram desenvolvidos modelos numéricos do ensaio de Flexão em Modo Misto com base na norma ASTM D6671/D6671M-22 (ASTM, 2022) e na configuração adotada por Silva *et al.* (2025). As simulações foram realizadas no software Abaqus® por meio de análises não lineares utilizando o Método dos Elementos Finitos. A avaliação da propagação de trincas em juntas coladas foi conduzida a partir de três abordagens numéricas distintas: elementos coesivos, contato coesivo e Método dos Elementos Finitos Estendido (*Extended Finite Element Method* - XFEM). Embora apresentem formulações diferentes, as três estratégias utilizam leis de tração-separação para representar a iniciação do dano e a propagação da trinca em condições de modo misto. Nessas formulações, o processo de fratura é descrito por meio da degradação progressiva das propriedades mecânicas da interface até a completa separação das superfícies aderidas.

Os modelos foram discretizados utilizando elementos sólidos hexaédricos de oito nós (C3D8) para representar os aderentes, totalizando entre 12.400 e 73.600 elementos, dependendo da formulação empregada. Nos modelos com interface discretizada foram utilizados elementos coesivos

tridimensionais de oito nós (COH3D8), variando entre 4.071 e 6.080 elementos. A discretização foi refinada na região de propagação da trinca para garantir a representação dos gradientes de tensão associados ao processo de fratura. A análise foi conduzida para quatro razões de modo misto, correspondentes a participações de 25%, 50%, 60% e 75% de Modo I em relação ao componente total de carregamento. Essas configurações permitiram investigar a influência da combinação entre os modos de abertura e cisalhamento na resposta estrutural da junta colada, abrangendo diferentes condições de carregamento ao longo do espectro de modo misto previsto para o ensaio MMB.

RESULTADOS

As curvas, força versus deslocamento, obtidas para as diferentes proporções de modo misto mostraram que as formulações por elementos coesivos e XFEM apresentaram respostas equivalentes ao longo do processo de propagação da trinca. Em ambas as abordagens, a iniciação do dano e a evolução da fratura são descritas por leis de tração-separação aplicadas nos pontos de integração dos elementos, resultando em previsões semelhantes da rigidez da junta, da carga máxima e da perda progressiva de capacidade resistente. Para todas as razões de modo misto analisadas (25%, 50%, 60% e 75%), observou-se concordância entre as respostas obtidas por essas duas formulações, tanto na região anterior ao início da propagação da trinca quanto durante o processo de degradação da interface. Esse comportamento indica que ambas as estratégias fornecem estimativas semelhantes para a evolução da fratura nas condições avaliadas.

A formulação de contato coesivo apresentou comportamento distinto, com níveis de carga superiores para uma mesma extensão de propagação da trinca. Como essa abordagem é baseada em interações entre superfícies discretizadas por nós, diferenças na transferência de esforços e nos mecanismos de degradação da interface podem influenciar a resposta estrutural prevista. Apesar dessas diferenças quantitativas, a tendência geral das curvas manteve-se compatível com aquela observada para os modelos baseados em elementos coesivos e XFEM, conforme apresentado na Figura 2. Além da comparação entre formulações, os resultados em modo misto foram confrontados com as respostas previamente obtidas para os casos de Modo I e Modo II puros. Verificou-se que as curvas de modo misto permaneceram limitadas pelos comportamentos característicos desses dois estados extremos de carregamento, apresentando transição compatível com a combinação entre abertura e cisalhamento prevista para o ensaio MMB. A concordância observada entre as respostas numéricas e o comportamento esperado a partir das previsões analíticas utilizadas na validação dos modos puros indica consistência na representação dos mecanismos de fratura empregados nos modelos desenvolvidos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos indicaram que as formulações por XFEM e elementos coesivos apresentaram respostas, carga versus deslocamento, semelhantes para as condições de modo misto analisadas, enquanto a abordagem de contato coesivo previu valores de carga mais elevados para uma mesma extensão de propagação de trinca. A comparação com os casos de Modo I e Modo II puros mostrou comportamento compatível com a combinação entre os mecanismos de abertura e cisalhamento considerados no ensaio MMB, corroborando a consistência das respostas numéricas obtidas. Dessa forma, o estudo permitiu avaliar o desempenho de diferentes estratégias de modelagem da fratura em modo misto de juntas coladas de materiais compósitos, fornecendo subsídios para aplicações envolvendo dano interlaminar e indicando a validação analítica da configuração em modo misto como etapa subsequente da pesquisa.

Palavras-chave: compósitos; juntas coladas; fratura interlaminar; modo misto.

ILUSTRAÇÕES

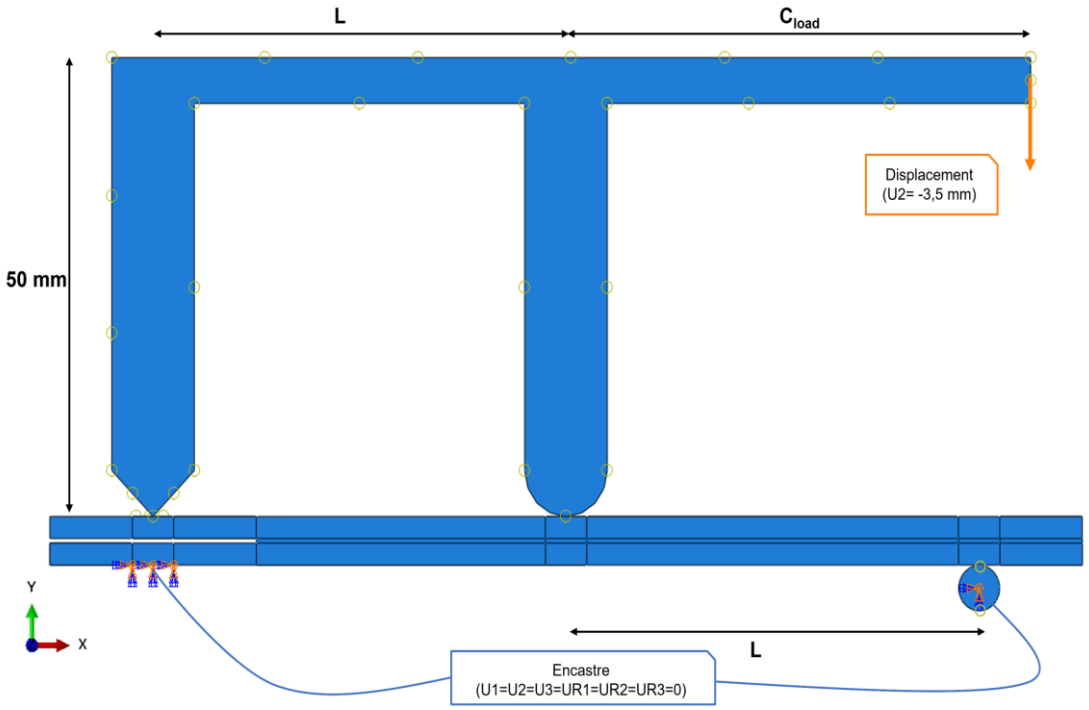


Figura 1. *Condições de contorno do modelo de Flexão em Modo Misto (MMB).*

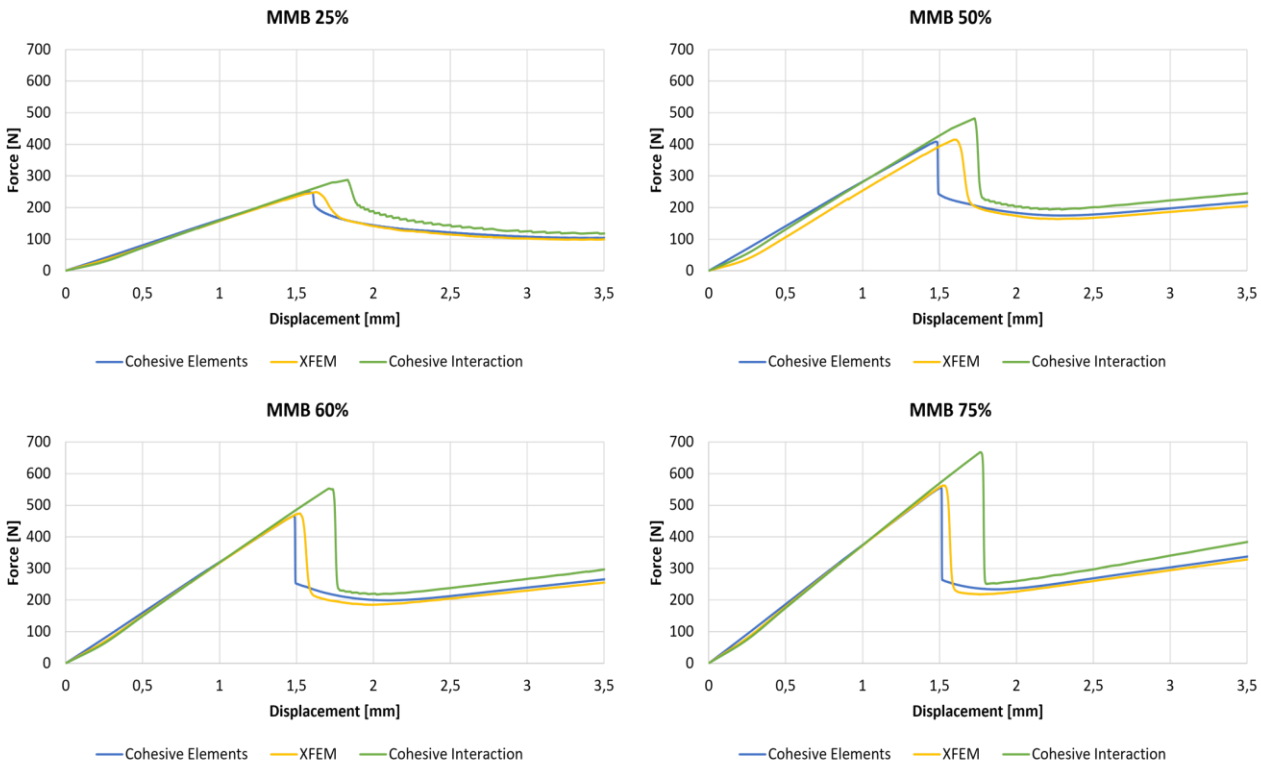


Figura 2. *Curvas força x deslocamento do modelo em Modo Misto (25%, 50%, 60% e 75%).*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D6671/D6671M-22: *Standard Test Method for Mixed Mode I-Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites*. West Conshohocken: ASTM International, 2022.

FLOROS, I. S.; TSERPES, K. I.; LÖBEL, T. Mode-I, mode-II and mixed-mode I+II fracture behavior of composite bonded joints: experimental characterization and numerical simulation. *Composites Part B: Engineering*, v. 78, p. 459-468, 2015.

RIBEIRO, Marcelo Leite. Programa para análise de juntas coladas: compósito/compósito e metal/compósito. 2009. *Dissertação* (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

RIES, M. Mechanical behavior of adhesive joints: a review on modeling techniques. *Computer Methods in Materials Science*, v. 24, 2024.

SANTOS, M. A. S.; CAMPILHO, R. D. S. G. Mixed-mode fracture analysis of composite bonded joints considering adhesives of different ductility. *International Journal of Fracture*, v. 207, n. 1, p. 55-71, 2017.

SILVA, J.A.P. da; BECK, R.; SILVA, L.F.M. da; TITA, V.; MEDEIROS, R. de. Parametric study of bonded composite joints under mixed-mode. *Journal of Composite Materials*, v. 59, n. 27, p. 3055-3074, 2025.

ZHANG, X.; ZHENG, X.; CANG, X.; HU, N.; LI, Z. Revealing Mode I failure mechanisms in adhesively bonded joints: an integrated study with the eXtended finite element method and its coupled approaches. *Applied Sciences*, v. 16, n. 4, p. 1789, 2026.