

15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

Análise dos modos de falhas de um compósito polimérico carbono/epóxi de cura rápida por simulação numérica e comparação com os resultados experimentais utilizando critérios de falhas distintos

MANUELA K. R. MATHIAS¹, BRUNO M. F. MARQUES²

¹ Graduanda em Engenharia Mecânica, Bolsista PIBITI (CNPq), IFSP, Campus São José dos Campos, manuela.k@aluno.ifsp.edu.br.

² Docente do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica, IFSP, Campus São José dos Campos, bruno.mikio@ifsp.edu.br.
Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.05.03.01-9 Mecânica dos sólidos, elásticos e plásticos

RESUMO: O aumento na produção de compósitos poliméricos reforçados com fibra motivou a busca por métodos mais eficientes, devido ao longo período de cura dos processos tradicionais. Para isso, desenvolveu-se os compósitos de cura rápida, processados pela moldagem a compressão a quente. É um processo eficiente, reduzindo o tempo de cura para minutos e alcançando propriedades comparáveis aos dos compósitos tradicionais. Contudo, além dos compósitos já possuírem mecanismos de falha complexos, algumas etapas desse processo podem gerar tensões residuais, defeitos na superfície e desalinhamento das fibras. Este estudo realizou uma análise numérica e experimental, aplicando os critérios de falha de Hashin, Puck, LaRC04 e Tsai-Wu em simulações numéricas no software FEMAP 2021.2 (versão educacional) e comparando os resultados aos ensaios de tração em corpos de prova de compósito de cura rápida, segundo a norma ASTM D3039. Os modelos 2D e 3D foram comparados, com o 2D apresentando diferenças mínimas e otimizando o tempo computacional. Os resultados numéricos correlacionaram bem com os experimentais, com erro máximo de 4,63%. O critério de Puck foi o mais preciso, que apresentou o menor erro de 3,12%, enquanto Hashin e LaRC04 foram mais conservadores e Tsai-Wu apresentou resultados intermediários.

PALAVRAS-CHAVE: elementos finitos; critério de falha; compósito; cura rápida.

Failure modes analysis of a rapid curing carbon/epoxy polymer composite using numerical simulation and comparison with experimental results using different failure criteria

ABSTRACT: The increase in the production of fiber-reinforced polymer composites has prompted the search for more efficient methods, due to the long curing time of traditional processes. Considering this, rapid curing composites have been developed, processed by hot compression molding. It is an efficient process, reducing the curing time to minutes and achieving properties comparable to those of traditional composites. However, beyond the inherent complex failure mechanisms of composites, some process steps may generate residual stresses, surface defects, and fiber misalignment. This study conducted a numerical and experimental analysis, applying the failure criteria of Hashin, Puck, LaRC04, and Tsai-Wu in numerical simulations using FEMAP 2021.2 (educational version) and comparing the results with tensile tests on rapid curing composite specimens according to ASTM D3039. The 2D and 3D models were compared, with the 2D model showing minimal differences and optimizing computational time. The numerical results presented a good correlation with the experimental data, with a maximum error of 4.63%. The Puck criterion was the most accurate, with an error of 3.12%, while Hashin and LaRC04 were more conservative, and Tsai-Wu provided intermediate results.

KEYWORDS: finite element; failure criteria; composite; snap cure; fast cure.

INTRODUÇÃO

Com normas de economia de combustível mais rígidas, os materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras tornaram-se mais atrativos, devido as suas excelentes propriedades e eficiência de combustível (Bae *et al.*, 2018; Reichanadter; Bank; Mansson, 2021). Contudo, devido ao longo tempo de cura e os custos associados a fabricação de alto volume, torna-se necessário obter uma linha de produção mais econômica e efetiva (Bae *et al.*, 2018; Kahn *et al.*, 2020). Assim, foram desenvolvidos os compósitos de cura rápida, com ciclos de cura em minutos (Reichanadter; Bank; Mansson, 2021).

O processamento dos compósitos de cura rápida ocorre pela moldagem a compressão a quente, que alcança propriedades semelhantes às obtidas pela autoclave (Khan *et al.*, 2015). Durante a etapa de pré-montagem, pode ocorrer a formação de rugas na superfície e o desalinhamento das fibras do material (Khan *et al.*, 2020). Além disso, as altas temperaturas de cura geram tensões residuais após o resfriamento, afetando negativamente as propriedades do compósito (Agius *et al.*, 2016).

Como os compósitos apresentam modos de falha complexos que dificultam a identificação do início da falha, é essencial desenvolver modelos aplicando o método dos elementos finitos em conjunto aos critérios de falha e validá-los. Isso assegura a criação de modelos eficazes e realistas, principalmente para novos materiais, como os compósitos de cura rápida, proporcionando uma melhor compreensão dos modos de falha (Bae *et al.*, 2018; Idrissi; Seddouki, 2022; Nali; Carrera, 2012).

Assim, o presente estudo contempla a análise de um compósito de cura rápida por meio da realização de ensaios de tração conforme a norma ASTM D3039 (ASTM INTERNATIONAL, 2014) e a validação de um modelo utilizando critérios de falha em conjunto com o método dos elementos finitos. Também será selecionado o critério de falha mais apropriado em relação aos resultados experimentais.

MATERIAL E MÉTODOS

Material e Corpo de Prova

O material utilizado é o MTM 46, um compósito de cura rápida desenvolvido pela Solvay, cujas propriedades foram obtidas por meio de ensaios realizados em parceria com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT/LEL) de São José dos Campos, e são apresentadas na Tabela 1. Além disso, são listadas as propriedades da fibra obtidas segundo a literatura (Marques *et al.*, 2022), necessárias para a aplicação dos critérios de falha. Quanto às suas dimensões, o corpo de prova foi dimensionado de acordo com as especificações da norma ASTM D3039 (ASTM INTERNATIONAL, 2014), com as seguintes configurações: orientação da fibra simétrica e balanceada, com configuração $[0^\circ/90^\circ]s$, dimensões de 25 x 250 x 2,5 mm, e aplicação de 14 camadas de espessura 0,20 mm, resultando em uma espessura total de 2,80 mm.

TABELA 1. Propriedades mecânicas do material MTM 46

Propriedade	Valor
Módulo de elasticidade longitudinal, E1 (GPa)	67,622
Módulo de elasticidade transversal, E2 (GPa)	63,176
Módulo de elasticidade da fibra, Ef1 (GPa)	231
Módulo de cisalhamento no plano, G12 (GPa)	4,176
Resistência à tração longitudinal, XT (MPa)	613,388
Resistência à tração Transversal, YT (Mpa)	623,279
Resistência à compressão longitudinal, XC (MPa)	741,449
Resistência à compressão Transversal, YC (MPa)	750,790
Resistência ao cisalhamento no plano, S12 (MPa)	83,944
Resistência ao cisalhamento interlaminar, S23 (Mpa)	83,944
Coeficiente de Poisson, v12	0,059
Coeficiente de Poisson para a fibra, vf12	0,28

Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram conduzidos em parceria com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT/LEL) de São José dos Campos, responsável pelo fornecimento do material e pela execução dos ensaios. Cinco corpos de prova foram testados utilizando uma máquina universal de ensaios EMIC, com capacidade de até 300 kN, segundo as diretrizes da norma ASTM D3039 (ASTM INTERNATIONAL, 2014). Após a realização dos ensaios, a análise estatística foi conduzida utilizando o software Excel para Microsoft 365, versão 2312, para calcular a média e o desvio padrão com base nos resultados dos cinco corpos de prova.

Simulação Numérica e Critérios de Falha

Para a simulação numérica, foram desenvolvidos dois modelos, um 2D e um 3D, utilizando o software FEMAP 2021.2 versão educacional, segundo as dimensões definidas na norma ASTM D3039 e propriedades mecânicas apresentadas na Tabela 1. Para o modelo 2D, o material foi definido como

ortotrópico 2D, com propriedades de placa laminada. Para o modelo 3D o material foi ortotrópico 3D, com propriedades de sólido laminado. A malha foi discretizada em elementos de 1 mm, totalizando 6526 nós e 6250 elementos para o 2D e 26105 nós e 18751 elementos para o 3D, e as condições de contorno e os carregamentos foram aplicados em 25 mm de comprimento a partir de cada extremidade para simular o ensaio de tração.

Seis casos de carregamento foram definidos, representando 25%, 50%, 75%, 90%, 100% e 110% do carregamento máximo obtido pela média de cada ensaio. Para os carregamentos adicionais, utilizados apenas nos modelos que não atingiram o índice de falha, foram definidos valores de 120%, 175% ou 200% do carregamento máximo. Esses carregamentos foram aplicados a todos os nós na região de 25 mm correspondente à garra da máquina de ensaio. Para facilitar a distribuição do carregamento, foi criado um elemento rígido (RBE2) conectando todos os nós a um nó adicional fora do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 1.

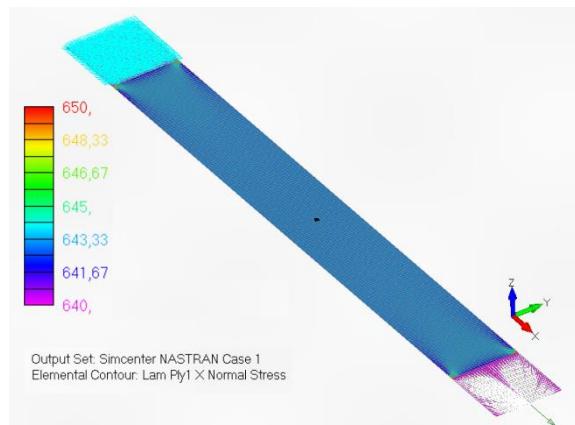


FIGURA 1. Modelo 2D do corpo de prova

Quanto aos modos de falha, foram escolhidos os seguintes critérios, com base na literatura (Nali; Carrera, 2012; Marques *et al.*, 2022; Kober; Kühhorn, 2012; Pinho *et al.*, 2005): Tsai-Wu, Hashin, Puck e LaRC04. A escolha do critério de Tsai-Wu deve-se à sua facilidade de utilização e à sua natureza clássica, já implementada em softwares de métodos dos elementos finitos (SIEMENS, 2021). O critério de Hashin foi selecionado por sua ampla aplicação em análises. O critério de Puck destacou-se como um dos mais eficazes durante a primeira edição do *World Wide Failure Exercise* (WWFE). Por fim, o critério de LaRC04, desenvolvido após o WWFE, baseia-se na mecânica da fratura e é o mais recente entre os quatro critérios escolhidos (Kober; Kühhorn, 2012).

Os critérios de falha, exceto o de Tsai-Wu, foram incorporados ao modelo via *Output Vectors*, pois não estavam disponíveis na versão do FEMAP utilizada. Analisaram-se as camadas 1 e 2 do compósito, pois como o modelo é um laminado simples com orientação simétrica, os valores se repetem nas demais camadas. A análise focou na falha da primeira camada, utilizando os valores de um elemento do corpo de prova. Para evitar a influência do efeito de Saint-Venant, que causa variação significativa de tensões e deformações nas extremidades (Horgan, 1989), escolheu-se um elemento próximo ao centro do corpo de prova, indicado na Figura 1, garantindo que essa variação não afetasse significativamente os resultados.

Por fim, para determinar o carregamento que irá gerar um índice de falha igual a 1, foram utilizadas equações de linhas de tendência lineares e quadráticas, conforme apropriado para cada critério, além de técnicas de interpolação, baseando-se nos resultados das simulações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos resultados da simulação numérica dos modelos 2D e 3D e do ensaio de tração, elaborou-se a Tabela 2, que contém os carregamentos de falha para o modelo 2D, os erros relativos do modelo 3D em relação ao 2D e do modelo 2D em relação ao ensaio de tração. Também foi elaborada a Figura 2, que exibe as curvas carregamento-deslocamento do ensaio de tração.

É importante ressaltar que a tabela contém apenas os modos que apresentaram falha nos carregamentos atribuídos e que as condições dos modos correspondiam às tensões e deformações geradas no corpo de prova. O erro relativo entre os resultados experimentais e numéricos considera o

modo de falha da fibra por tração, que é a condição catastrófica e resulta diretamente na fratura do material. Como o critério de Tsai-Wu não define modos de falha, foi assumido que a falha da fibra ocorreu na camada 1 e a falha da matriz na camada 2, conforme o padrão observado nos demais critérios.

Esse comportamento pode estar associado à resistência das camadas nas direções do urdume e da trama. Conforme indicado na Tabela 1, a resistência transversal à tração é maior que a longitudinal, logo, é esperado que a camada 1 falhe antes da camada da 2, que possui maior resistência. A falha da fibra ou da matriz pode estar relacionada ao fato de que as fibras na direção da camada 1 são mais resistentes e suportam cargas elevadas antes de falharem, enquanto na direção da camada 2, as fibras são menos resistentes, tornando a matriz mais suscetível à falha.

TABELA 2. Modos de falha para os modelos 2D e 3D

Critério	Modo de falha	Camada	Carregamento 2D [N]	Erro relativo	
				Modelos	Ensaio*
Hashin	Falha da fibra por tração	1	41723	0,14%	4,63%
	Falha da matriz por tração	2	45570	0,65%	-
Puck	Falha da fibra por tração	1	42385	0,02%	3,12%
	Falha de inter-fibra por tração transversal	2	10814	0,003%	-
	Falha da fibra por tração	1	41723	0,0002%	4,63%
LaRC04	Falha da fibra por compressão com fiber-kinking	2	50925	0,001%	-
	Falha da matriz por tração	2	69160	0,003%	-
Tsai-Wu	—	1	41747	0,20%	4,57%
	—	2	45307	0,11%	-

*Carregamento médio ensaio [N]: 43748 ± 2628

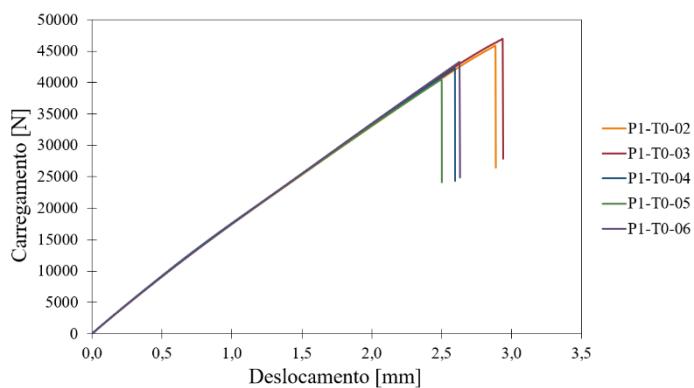


FIGURA 2. Gráfico carregamento-deslocamento

A priori, a execução da simulação dos modelos pelo FEMAP levou aproximadamente, 2 e 5 minutos, respectivamente. Observa-se que o erro em relação aos modelos 2D e 3D é menor que 1%, demonstrando que o modelo bidimensional representa o corpo de prova de modo eficaz, reduzindo o tempo e a memória computacional. Desse modo, a análise seguiu com base no modelo 2D.

Nos ensaios, a maioria dos corpos de prova falhou no modo “Lateral, na garra e na extremidade superior” (LAT), com algumas falhas nos modos “Lateral, na garra e na extremidade inferior” (LAB) e “Lateral, dentro da garra e na extremidade superior” (LIT) (ASTM INTERNATIONAL, 2014). No entanto, nos modelos não foi possível identificar claramente a localização inicial da falha, apesar da variação na tensão nas extremidades próximas à garra, conforme ilustrado na Figura 1. Esse comportamento pode ser atribuído ao modelo bidimensional, devido a aproximação dos resultados, ou ao tipo de componente, pois as tensões são distribuídas de forma quase homogênea em toda a região do corpo de prova, exceto nas extremidades, dificultando a previsão da localização exata da falha.

Ademais, ao comparar os resultados numéricos e experimentais, observou-se um erro máximo de 4,63%. Fatores que podem ter influenciado essa diferença incluem erros no cálculo do carregamento para o índice de falha igual a 1, obtido pela equação da linha de tendência e interpolação, a possibilidade de que o modelo 2D esteja superdimensionado, pois as falhas nos critérios ocorrem em carregamentos

inferiores aos experimentais, e a variação significativa nos carregamentos e no deslocamento que levam à falha, observados na Figura 2, que podem ter influenciado a média e aumentado o desvio padrão.

Nesse contexto, o critério de Puck demonstrou o melhor resultado, apresentando um erro de 3,12%, sendo o mais próximo da realidade. Puck considera o plano de falha e os micros danos que ocorrem antes de a carga atingir a resistência do material, o que reduz a resistência da matriz e aumenta a probabilidade de falha da fibra (Kober; Kühhorn, 2012). Assim, o maior carregamento pode estar associado ao fato de que a fibra transversal é a mais resistente, o que aumenta a resistência da matriz e exige um carregamento maior para a falha da fibra longitudinal ocorrer.

Quanto aos demais critérios, LaRC04 e Hashin foram os mais conservadores, enquanto o critério de Tsai-Wu apresentou um valor ligeiramente maior. Para LaRC04, o valor foi igual ao de Hashin, pois seu equacionamento desse modo de falha é semelhante ao de Hashin, já que o critério de LaRC04 também teve como base o critério de Hashin (Pinho *et al.*, 2005).

Para o modo de falha da matriz por tração, observa-se que o critério de Puck é o mais conservador, pois esse modo ocorre antes de qualquer outro, em um carregamento muito baixo. Isso acontece devido a delaminação entre as camadas do laminado, sendo um mecanismo de falha inicial que ocorre prematuramente (Marques *et al.*, 2022). Assim, é esperado que esse modo de falha ocorra antes da fratura do corpo de prova.

Por outro lado, os valores obtidos para LaRC04 foram os menos conservadores, com valores muito altos, superiores ao carregamento que causou a fratura do corpo de prova. Tanto na falha da matriz por tração quanto na falha da matriz sob compressão longitudinal com torção eventual de fibras, o critério de LaRC04 sugere que o material pode não ter falhado para esses modos, pois as falhas ocorreram em carregamentos inferiores. Isso implica que o laminado já havia fraturado antes de alcançar carregamentos próximos a 60.000 N.

Esse comportamento pode estar relacionado ao efeito in-situ, considerado nas equações do critério. O efeito in-situ considera o aumento das resistências transversais à tração e ao cisalhamento de uma camada do laminado, quando esta é restringida por camadas de diferentes orientações da fibra (Kober; Kühhorn, 2012). Logo, as resistências serão maiores, e consequentemente, o corpo de prova falhará em carregamentos superiores.

O critério também utiliza o coeficiente de tenacidade do material (g), uma constante calculada a partir de ensaios experimentais ou teoricamente. Neste estudo, como não foram realizados ensaios específicos para obter esse coeficiente, utilizou-se a equação teórica. Observou-se que o valor calculado analiticamente é maior do que os obtidos na literatura, pois o laminado é bidirecional, enquanto os valores da literatura foram calculados com base em laminados unidirecionais (Kober; Kühhorn, 2012; Pinho *et al.*, 2005). Portanto, adotou-se $g = 1$, que, segundo Pinho *et al.*, assume cisalhamento linear e negligencia o cisalhamento fora do plano. Como o modelo utilizado é 2D, o cisalhamento fora do plano é desconsiderado, tornando essa consideração viável.

Em relação aos critérios de Hashin e Tsai-Wu, os carregamentos situam-se em um nível intermediário neste modo de falha, diferentemente dos valores extremos (muito altos ou muito baixos) observados nos demais critérios.

CONCLUSÕES

Por fim, o modelo de um laminado compósito carbono/epóxi de cura rápida submetido a carga axial foi analisado com base nos critérios de falha de Tsai-Wu, Hashin, Puck e LaRC04 e validado por meio de ensaios de tração. A comparação entre os modelos bidimensional e tridimensional demonstrou que a modelagem 2D oferece resultados muito bons e coerentes, reduzindo o tempo e o armazenamento computacional.

Quanto aos resultados numéricos, foi observado que os modos de falha variam conforme a orientação das camadas do laminado: a falha da fibra ocorreu na camada 1, enquanto a falha da matriz foi predominante na camada 2. Para a falha da fibra por tração, os critérios de Hashin e LaRC04 foram os mais conservadores, e o critério de Puck foi o menos conservador. Por outro lado, para a falha da matriz, o critério de Puck foi o mais conservador, Hashin foi intermediário, e LaRC04 foi o menos conservador. O critério de Tsai-Wu mostrou-se intermediário em ambos os casos.

Considerando os resultados experimentais, o maior erro relativo obtido foi de 4,63%. Assim, para esse laminado de material compósito de cura rápida, o critério que melhor se adequa, com o menor erro relativo de 3,12%, é o critério de Puck.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de testes específicos para compreender melhor o coeficiente de tenacidade do corpo de prova, além de analisar o comportamento desse novo material em diferentes componentes e validar numericamente esses novos modelos.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

M.K.R.M. procedeu com a metodologia, simulação e redação do trabalho. B.M.F.M. contribuiu com a orientação técnica e metodológica e a revisão final do trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq pela concessão da Bolsa de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBITI). Agradecemos também ao IFSP pelo suporte e recursos oferecidos, e ao IPT pela doação dos corpos de prova e pela realização dos ensaios de tração, que foram fundamentais para a pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AGIUS, S.L. *et al.* Rapidly cured epoxy/anhydride composites: effect of residual stress on laminate shear strength. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [S.I.], v. 90, p. 125-136, nov. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.06.013>.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D3039/D3039M - Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. West Conshohocken, PA: [S.I.], 2014.
- BAE, D. *et al.* Experimental and Numerical Studies on Fiber Deformation and Formability in Thermoforming Process Using a Fast-Cure Carbon Prepreg: effect of stacking sequence and mold geometry. **Materials**, [S.I.], v. 11, n. 5, p. 857, 21 maio 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/ma11050857>.
- HORGAN, C. O. Recent Developments Concerning Saint-Venant's Principle: An Update. **Applied Mechanics Reviews**, [S.I.], v. 42, n. 11, p. 295–303, 1989.
- IDRISSI, H. E.; SEDDOUKI, A. Modelling of Progressive Damage in a Notched Carbon/Epoxy Composite Laminate Subjected to Tensile Loading Using Different Assessment Methods Coupled with FEM. **Fibers and Polymers**, [S.I.], v. 23, n. 11, p. 3146-3162, 7 out. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12221-022-0019-4>.
- KHAN, M.A. *et al.* On the validity of bias-extension test method for the characterisation of in-plane shear properties of rapid-cure prepgres. **Composite Structures**, [S.I.], v. 246, p. 112399, ago. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112399>.
- KHAN, M.A. *et al.* Processing of thermoset prepgres for high-volume applications and their numerical analysis using superimposed finite elements. **Composite Structures**, [S.I.], v. 131, p. 917-926, nov. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.06.056>.
- KOBER, M.; KÜHHORN, A. Comparison of different failure criteria for fiber-reinforced plastics in terms of fracture curves for arbitrary stress combinations. **Composites Science And Technology**, [S.I.], v. 72, n. 15, p. 1941-1951, out. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.08.007>.
- MARQUES, B. M. F. *et al.* Failure criteria assessment of carbon/epoxy laminate under tensile loads using finite element method: validation with experimental tests and fractographic analysis. **Mechanics Of Advanced Materials And Structures**, [S.I.], v. 30, n. 6, p. 1274-1283, 7 fev. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/15376494.2022.2029984>.
- NALI, P.; CARRERA, E. A numerical assessment on two-dimensional failure criteria for composite layered structures. **Composites Part B: Engineering**, [S.I.], v. 43, n. 2, p. 280-289, mar. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.06.018>.
- PINHO, S. T. *et al.* Failure Models and Criteria for FRP Under In-Plane or Three-Dimensional Stress States Including Shear Non-Linearity. **NASA Technical Reports Server**, [S.I.], 1 fev. 2005. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20050110223>.
- REICHANADTER, A.; BANK, D.; MANSSON, J. E. A novel rapid cure epoxy resin with internal mold release. **Polymer Engineering & Science**, [S.I.], v. 61, n. 6, p. 1819-1828, 6 maio 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/pen.25703>.
- SIEMENS. **Simcenter Femap. Versão educacional 2021.2.** [S.I.], 2021. Disponível em: <https://resources.sw.siemens.com/pt-BR/download-simcenter-femap-student-edition>.