

## Análise das Propriedades Mecânicas de Estruturas Sanduíche de Material Compósito Fabricadas com o Método VARTM

João Alberto Günther Neto, Felipe Ruivo Fuga, Ricardo De Medeiros

### INTRODUÇÃO

As estruturas sanduíche de materiais compósitos consistem na união de duas faces de elevada rigidez, usualmente em material compósito, a um núcleo de baixa densidade. Essa configuração estrutural apresenta ampla gama de aplicação nos setores náutico e aeronáutico, em razão de sua baixa densidade e alta rigidez à flexão (Thomson; Mouritz, 1999). Tais estruturas, entretanto, estão sujeitas a diferentes modos de falha, os quais podem ser divididos em duas categorias principais: resistência insuficiente e instabilidade estrutural (Miracle et al., 2001). Entre os modos de falha relacionados à instabilidade, destacam-se:

- Enrugamento das faces: formação de ondulações nas superfícies externas, resultando em esmagamento, rasgamento ou descolamento do núcleo;
- *Shear crimping*: falha caracterizada pelo cisalhamento do núcleo, acompanhado de deslocamento lateral das faces;
- Flambagem global: instabilidade global da estrutura como um todo.

O estudo desses possíveis modos de falha mostra-se de grande relevância, uma vez que, em função da geometria e das dimensões da estrutura, o modo de falha crítico pode variar. Nesse contexto, este trabalho tem por objetivo analisar os modos de falha da estrutura em uma viga sanduíche com duas faces de compósito de fibra de carbono e um núcleo de PVC expandido, com 10 mm de espessura, 25 mm de largura e altura variável, submetida a esforços compressivos. Para tal, são comparadas as cargas críticas associadas a cada modo de falha, com base em simulações numéricas e ensaios experimentais.

### DESENVOLVIMENTO

A manufatura dos corpos de prova foi realizada pelo método VARTM (*Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding*), utilizando o seguinte *lay-up*: fibra de carbono, núcleo de PVC expandido, fibra de carbono. Durante o processo de laminação, foram aplicadas camadas de *peel ply* e de *flow media* nas camadas mais externas, com a finalidade de auxiliar, respectivamente, na desmoldagem e no escoamento da resina.

A estrutura sanduíche resultante apresentou espessura média  $10,74 \pm 0,05\text{mm}$ , sendo os corpos de prova manufaturados e cortados com comprimento médio de  $25,73 \pm 0,29\text{mm}$ , e duas alturas distintas:  $48,25 \pm 0,40\text{mm}$  e  $68,93 \pm 0,12\text{mm}$ . Os ensaios de compressão foram realizados em uma máquina Instron EMIC 23-100, sob velocidade de ensaio de  $1\text{mm/min}$ .

Para a análise numérica, desenvolveu-se um modelo computacional no *software* Abaqus® 2025, utilizando elementos C3D8 para a representação do núcleo em PVC expandido e elementos SC8R para o laminado de fibra de carbono, cujas propriedades podem ser encontradas em Günther et al. (2025). As dimensões adotadas no modelo (comprimento e espessura) foram as mesmas dos corpos de prova ensaiados experimentalmente, sendo simuladas alturas variando entre 25 mm e 500 mm. As condições de contorno aplicadas visaram reproduzir o ensaio experimental, restringindo-se todos os graus de liberdade em uma das extremidades da barra, enquanto a outra permaneceu livre apenas para deslocamentos axiais, condição em que foi aplicada uma força de referência de 1N. A simulação linear foi conduzida para determinação dos fatores de carga (*load multipliers*) que tornam a estrutura instável, bem como dos respectivos modos de flambagem associados.

## RESULTADOS

Conforme ilustrado na Figura 1, as simulações numéricas evidenciaram a ocorrência dos três modos de falha para todos os corpos de prova com altura superior a 100 mm. Verificou-se que o modo de falha crítico para corpos de prova com altura de até 150 mm corresponde ao *shear crimping*, enquanto para alturas superiores a 200 mm a flambagem global se apresenta como modo predominante. A transição entre esses dois mecanismos ocorre no intervalo compreendido entre estes limites. O enrugamento das faces, por sua vez, não se configurou como modo de falha crítico para as geometrias e condições de contorno aplicadas, apresentando carga crítica aproximadamente constante para todas as alturas analisadas.

Nos ensaios experimentais, os corpos de prova com 50 mm de altura apresentaram carga crítica variando entre 654,5 N e 757,9 N, enquanto aqueles com 70 mm falham sob cargas entre 564,9 N e 568,8 N. Em ambos os casos, o mecanismo de falha observado foi o *shear crimping*. Contudo, as cargas críticas experimentais foram inferiores às previstas no modelo computacional, o que pode ser atribuído à não uniformidade na altura dos corpos de prova, conduzindo a uma iniciação prematura da falha durante os ensaios. A Figura 2 apresenta a comparação entre os modos de falha observados experimentalmente e aqueles previstos pelas simulações computacionais.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho analisou a influência da altura das vigas de estrutura sanduíche nos modos de falha, por meio de simulações computacionais e ensaios experimentais de compressão. As simulações indicaram que corpos de prova com altura inferior a 150 mm apresentaram falha por *shear crimping*, enquanto para alturas superiores a 200 mm o modo crítico corresponde à flambagem global. Nos ensaios experimentais, os corpos de prova falharam segundo os mesmos modos previstos na análise computacional, entretanto, as cargas críticas observadas foram inferiores às obtidas em simulação, resultado atribuído à não uniformidade da altura dos corpos de prova, a qual ocasionou a iniciação prematura da falha. Para trabalhos futuros, recomenda-se uma nova realização dos ensaios, buscando eliminar a diferença de altura nos corpos de prova para validar a carga crítica prevista computacionalmente.

**Palavras-chave:** estruturas sanduíche; materiais compósitos; modos de falha; simulação;

## ILUSTRAÇÕES

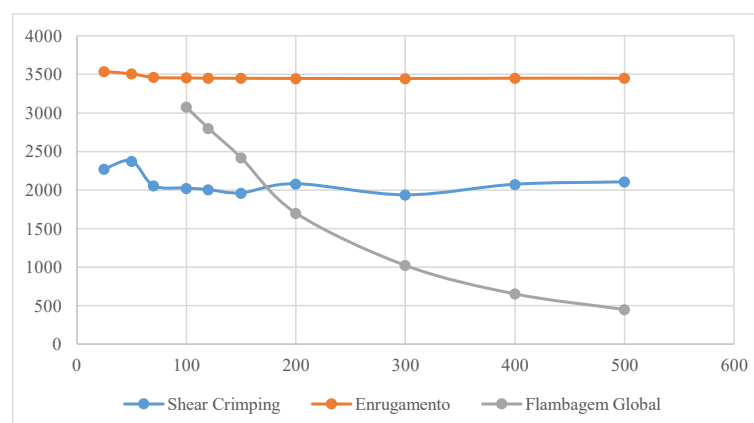
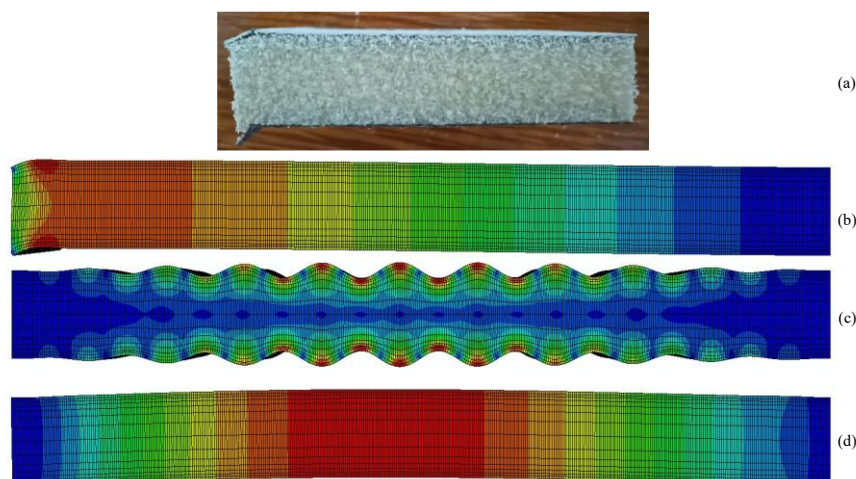


Figura 1. Modo de falha em função da altura da barra.



**Figura 2.** Modos de falha: (a) ensaio (b) shear crimping (c) enrugamento das faces (d) flambagem global.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GÜNTHER, A. et al. Mechanical Characterization of Natural and Synthetic Fibres using Sandwich Structures Under Bending. *Journal of Modern Mechanical Engineering and Technology*, v. 12, p. 34–44, 24 jul. 2025.

MIRACLE, D. B., et al. *ASM handbook*. Vol. 21. Materials Park, OH: ASM international, 2001.

THOMSON, R. S.; MOURITZ, A. P. Skin Wrinkling of Impact Damaged Sandwich Composite. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, v. 1, n. 4, p. 299–322, 1 out. 1999.

---

## DADOS CADASTRAIS

---

**BOLSISTA:** João Alberto Günther Neto

**MODALIDADE DE BOLSA:** PIBIC/CNPq

**VIGÊNCIA:** 09/2024 a 08/2025 – Total: 12 meses

**ORIENTADOR(A):** Prof. Assoc. Ricardo De Medeiros

**CENTRO DE ENSINO:** CCT

**DEPARTAMENTO:** Departamento de Engenharia Mecânica

**ÁREAS DE CONHECIMENTO:** Engenharia Mecânica / Mecânica dos Sólidos

**TÍTULO DO PROJETO DE PESQUISA:** Modelagem computacional e experimental de estruturas de material compósito

**Nº PROTOCOLO DO PROJETO DE PESQUISA:** NPP3924-2022