

ESTUDO SOBRE A APLICAÇÃO DE SMA EM VIGAS DE MATERIAL COMPÓSITO SUBMETIDAS À IMPACTOS DE BAIXA VELOCIDADE

Alexandre Jesus Detogne Debossan, alexandre_debossan@hotmail.com

Lucas Lisbôa Vignoli, ll.vignoli@mecanica.coppe.ufrj.br

Centro de Tecnologia e Aplicação de Materiais Compósitos, Universidade Federal do Rio de Janeiro – Campus Macaé

Resumo. O objetivo deste trabalho é realizar um estudo sobre impactos de baixa velocidade em vigas de materiais compósitos híbridos com matriz polimérica e fibras de vidro reforçados com ligas com memória de forma (Shape Memory Alloy – SMA). O estudo utiliza uma análise multiescala, primeiro efetuando um estudo analítico micromecânico para determinar as propriedades efetivas da lâmina de um laminado $[0^\circ/90^\circ]_2$ s a partir das propriedades da fibra e matriz. As propriedades da lâmina são utilizadas como dados de entrada dos modelos numéricos, sendo este desenvolvido utilizando o software de elementos finitos Ansys. A influência da inclusão do SMA é estudada avaliando o dano resultante do impacto. Os resultados indicam que a utilização do SMA pode diminuir o dano na viga.

Palavras chave: Materiais compósitos, viga laminada, impacto, modelagem multiescala, ligas com memória de forma

Abstract. The objective of this work is to carry out a study on low velocity impacts on beams of hybrid composite materials with polymer matrix and glass fibers reinforced with Shape Memory Alloy (SMA). The study uses a multiscale analysis, first performing a micromechanical analytical study to determine the effective properties of a laminate $[0^\circ/90^\circ]_2$ s laminate from the fiber and matrix properties. The blade properties are used as input data for the numerical models, which are developed using the Ansys finite element software. The influence of SMA inclusion is studied by evaluating the damage resulting from the impact. The results indicate that the use of SMA can reduce beam damage.

Keywords: Composite materials, laminated beam, impact, multiscale modeling, shape memory alloys

1. INTRODUÇÃO

Objetos fabricados a partir de materiais compósitos estão sendo cada vez mais utilizados na indústria aeronáutica. Isso se dá em decorrência das ótimas características inerentes a esse tipo de material, como por exemplo a resistência à corrosão, rigidez, baixo peso específico e resistência à fadiga.

No entanto, uma das maiores preocupações e motivos de redução de confiabilidade quando se trata de materiais compósitos, é a sua baixa resistência ao impacto. Segundo Andrew *et al.* (2019), quase 13% dos reparos realizados em aviões Boeing 747 são decorrentes de impactos por objetos externos. Em colaboração a isso, Topac *et al.* (2017) explicam que impactos transversais de baixa velocidade, como deixar uma ferramenta cair sobre uma parte da estrutura do avião, geram danos internos que não são visíveis em inspeções de rotina. Sendo assim, muitos fabricantes já consideram que os materiais possuem esses danos na fase de planejamento, algo que acaba adicionando peso aos veículos que utilizam material compósito em sua estrutura.

Mantendo isso em vista, é notável a grande diferença que as modelagens analíticas e numéricas fazem quando se trata de reduzir o número de testes experimentais realizados e, por consequência, o custo de projetos de componentes com materiais compósitos (Tsai e Melo, 2014; Shah, 2010).

O presente trabalho tem o objetivo de realizar uma modelagem analítica numérica do dano em uma viga de material compósito (*i.e.*, um laminado com matriz de epóxi e as fibras de vidro orientadas em $0^\circ/90^\circ$) após um impacto de baixa velocidade e a influência da adição de material SMA no dano da estrutura.

2. MODELAGEM MULTIESCALA

A modelagem em multiescala considera primeiro em um nível micromecânico, avaliando como as propriedades da fibra e da matriz compõem a lâmina e influenciam suas propriedades efetivas, bem como a fração volumétrica. Posteriormente, é realizado um estudo macromecânico que avalia as tensões e deformações sobre o laminado quando este é submetido a um impacto, permitindo também utilizar critérios de falha para avaliar danos no material.

2.1 MICROMECHANICA ANALÍTICA

A primeira etapa da modelagem multiescala é a utilização do modelo micromecânico VSPKc proposto por Vignoli *et al.* (2022a) para estimar as seguintes propriedades efetivas da lâmina: módulo de elasticidade longitudinal, E_1 ; módulo de elasticidade transversal, E_2 ; módulo de cisalhamento no plano, G_{12} ; e coeficiente de Poisson do plano, ν_{12} . Para isso, as seguintes equações são utilizadas:

$$E_1 = E_1^f V_f + E^m (1 - V_f) \quad (1)$$

$$\nu_{12} = \nu_{12}^f V_f + \nu^m (1 - V_f) \quad (2)$$

$$E_2 = E^m \left\{ 1 + 2 \sqrt{\frac{V_f}{\pi}} \left[\frac{\pi}{2a_{22}} - \frac{\ln(a_{22} + \sqrt{a_{22}^2 - 1})}{a_{22} \sqrt{a_{22}^2 - 1}} - 1 \right] \right\} \quad (3)$$

$$G_{12} = G^m \left\{ 1 + 2 \sqrt{\frac{V_f}{\pi}} \left[\frac{\pi}{2a_{12}} - \frac{\ln(a_{12} + \sqrt{a_{12}^2 - 1})}{a_{12} \sqrt{a_{12}^2 - 1}} - 1 \right] \right\} \quad (4)$$

onde E_1^f é o módulo de elasticidade longitudinal da fibra, ν_{12}^f é o coeficiente de Poisson no plano da fibra, V_f é a fração volumétrica da fibra e E^m é o módulo de elasticidade da matriz, ν^m é o coeficiente de Poisson da matriz e $G^m = E^m / 2(1 + \nu^m)$ é o módulo de cisalhamento da matriz. Adicionalmente, para que seja possível implementar as Eq. (1-4), é necessário calcular os coeficientes abaixo:

$$a_{22} = 2[(E^m / E_2^f) - 1] \sqrt{V_f / \pi} \quad (5)$$

$$a_{12} = 2[(G^m / G_{12}^f) - 1] \sqrt{V_f / \pi} \quad (6)$$

onde E_2^f é o módulo de elasticidade transversal da fibra e G_{12}^f é o módulo de cisalhamento no plano da fibra.

Para estimar o dano é necessário calcular as resistências da lâmina à tração longitudinal S_{11}^t , à tração transversal S_{22}^t , à compressão longitudinal S_{11}^c , à de compressão transversal S_{22}^c e ao cisalhamento no plano S_{12}^s , utilizando as equações (Vignoli *et al.*, 2020; Vignoli *et al.*, 2022b):

$$S_{11}^t = \left[V_f + (1 - V_f) \left(\frac{E^m}{E_1^f} \right) \right] 0,92 S_t^f \quad (7)$$

$$S_{11}^c = \left[V_f + (1 - V_f) \left(\frac{E^m}{E_1^f} \right) \right] 0,8 S_c^f \quad (8)$$

$$S_{12}^s = \left\{ 1 + 2 \sqrt{\frac{V_f}{\pi}} \left[\frac{\pi}{2a_{12}} - \frac{\ln(a_{12} + \sqrt{a_{12}^2 - 1})}{a_{12} \sqrt{a_{12}^2 - 1}} - 1 \right] \right\} (1 + a_{12}) S_m^s \quad (9)$$

$$S_{22}^t = \left\{ 1 + 2 \sqrt{\frac{V_f}{\pi}} \left[\frac{\pi}{2a_{22}} - \frac{\ln(a_{22} + \sqrt{a_{22}^2 - 1})}{a_{22} \sqrt{a_{22}^2 - 1}} - 1 \right] \right\} (1 + a_{22}) S_n^i \quad (10)$$

$$S_{22}^c = \left\{ 1 + 2 \sqrt{\frac{V_f}{\pi}} \left[\frac{\pi}{2a_{22}} - \frac{\ln(a_{22} + \sqrt{a_{22}^2 - 1})}{a_{22} \sqrt{a_{22}^2 - 1}} - 1 \right] \right\} (1 + a_{22}) S_c^m \quad (11)$$

onde S_t^f e S_c^f são as resistências à tração e à compressão da fibra, S_m^s é a resistência ao cisalhamento da matriz, S_c^m é a resistência a compressão da matriz e S_n^i é a resistência normal na interface fibra-matriz.

2.2. ANÁLISE MACROMECHANICA NUMÉRICA

O Ansys é um software de elementos finitos que permite realizar cálculos complexos sobre tensões e deformações, assim como a aplicação de critérios de falha. Para isso, é necessário fornecer ao software dados de entrada, além de condições de contorno que o permitem realizar a simulação da maneira correta e fornecer os resultados esperados.

Para o caso de uma viga de material compósito com a configuração da Fig. 1, as propriedades efetivas obtidas na análise da micromecânica a partir das propriedades da fibra e da matriz, são os dados de entrada para o laminado. Além disso, a velocidade do objeto que impacta a viga, constantes de evolução de dano e o critério de falha no qual o Ansys vai basear seus cálculos para avaliar o dano do material, são outros dados de entrada necessários para se gerar resultados. Essas informações são apresentadas na Seção 3, onde os resultados são discutidos.

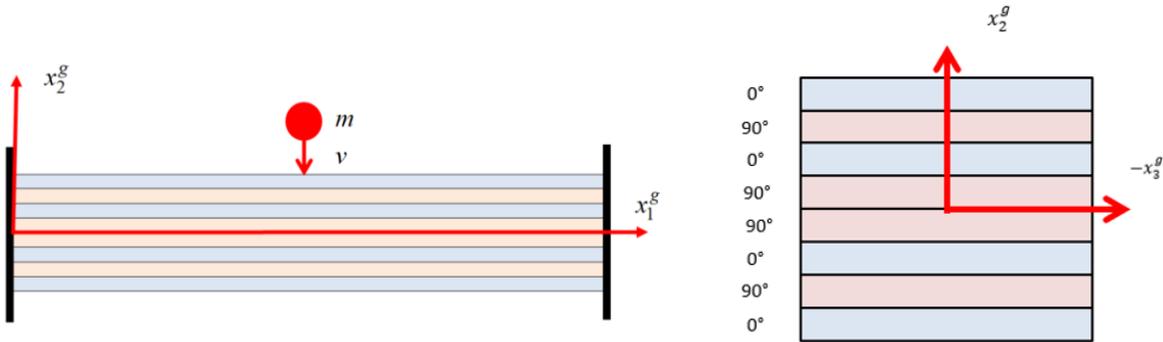


Figura 1. Viga de material compósito estudada

Pela simetria do problema, apenas metade da geometria da viga é considerada, conforme a Fig. 2, sendo imposto que pode haver apenas deslocamento vertical na extremidade esquerda, enquanto a extremidade direita é considerada fixa para representar o engaste. Nas faces perpendiculares à x_3^g o deslocamento nesta direção é assumido como nulo; esta hipótese é considerada para garantir que a geometria simplificada represente uma estrutura que possui uma dimensão consideravelmente grande e periódica nesta direção. Adicionalmente, os contatos são definidos como *Bonded*, não permitindo deslizamento e separação entre as camadas do laminado.



Figura 2. Geometria da viga

Por fim, existe a necessidade de se encontrar a convergência no tempo e na malha que mapeia pontos no objeto e as ligações entre eles, para que se possa garantir que a simulação resulta em valores confiáveis e próximos da realidade.

Três análises diferentes são realizadas: i) com todas as lâminas de material compósito, conforme ilustrado na Fig. 1; ii) outra substituindo a camada superior de compósito por uma camada de SMA; iii) incluindo uma camada de SMA em paralelo da primeira camada de compósito, como mostrado na Fig. 3. Para o terceiro caso, a fração de SMA é equivalente à 10% da fração volumétrica da lâmina.

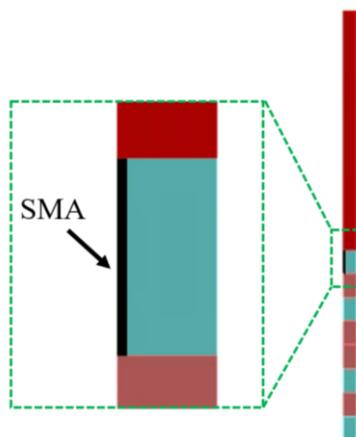


Figura 3. Vista lateral com o fio de SMA

O objetivo de estudar a aplicação do SMA é explorar o fenômeno de pseudoelasticidade. A pseudoelasticidade é um fenômeno resultante da transformação de fase no SMA. Como ilustrado na Fig. 2, o SMA tem inicialmente austenita em sua microestrutura e apresenta um comportamento linear quando submetido à um carregamento mecânico (região A). Com o aumento do carregamento, ocorre a transformação de fase de austenita para martensita (região B), seguido de uma resposta linear após o final da transformação (região C). Para o descarregamento, um comportamento similar é observado para a transformação reversa (região D); no entanto, um caminho diferente é percorrido na curva tensão-deformação,

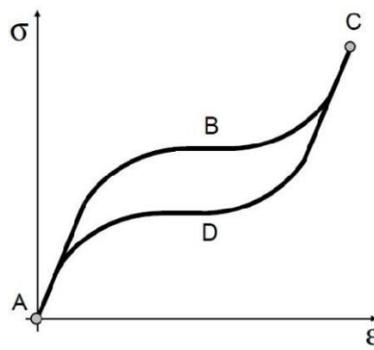


Figura 4. Pseudoelasticidade (Silva, 2014)

3. RESULTADOS

A viga estudada tem 1 mm de espessura por camada, sendo estas orientadas conforme a Fig. 1, chegando a um total de 8 mm de espessura na viga, e um comprimento de 200 mm. As propriedades dos constituintes e efetivas das lâminas, calculadas com o modelo analítico apresentado na Seção 2, são apresentadas nas Tabelas 1-3. As propriedades do SMA estão listadas na Tabela 4. Considerando a queda de uma ferramenta a partir de uma altura de 1.25m, a velocidade de impacto de 4.93 m/s é considerada. Após o estudo de convergência, utilizou-se uma malha retangular com 115175 nós, 18904 elementos quadráticos do tipo SOLID186 e um passo de 2.5 milissegundos.

Tabela 1. Propriedades da fibra de vidro e dá matriz de epóxi (Kaddour e Hinton, 2012)

E_1^f 74 GPa	E_2^f 74 GPa	ν_{12}^f 0.2	G_{12}^f 30.8 GPa	E^m 4.08 GPa	ν^m 0.38
S_t^f 2150 MPa	S_c^f 1450 MPa	S_m^s 50 MPa	S_c^m 120 MPa	S_n^i 52 MPa	

Tabela 2. Propriedades efetivas do material compósito calculadas pelo modelo micromecânico.

Propriedades	$V_f = 0.3$	$V_f = 0.5$	$V_f = 0.7$
E_1 [GPa]	25.06	39.04	53.02
E_2 [GPa]	6.45	9.98	618.98
ν_{12}	0.326	0.290	0.254
G_{12} [GPa]	2.35	3.67	7.16
S_{11}^t [MPa]	669	1040	1420
S_{11}^c [MPa]	392	612	830
S_{22}^t [MPa]	34.19	31.30	26.12
S_{22}^c [MPa]	78.9	72.	60.27
S_{12}^s [MPa]	32.72	29.83	24.53

Tabela 3. Propriedades sobre a evolução de dano

Tipo de Falha	Propriedade Degradada
Fibra em Tração	$E_1 \rightarrow 0.07E_1$

Fibra em Compressão	$E_1 \rightarrow 0.14E_1$
Matriz em Tração	$E_2 \rightarrow 0.2E_2$
Matriz em Compressão	$E_2 \rightarrow 0.4E_2$

Sendo assim, aplicando os critérios de Puck para estimar a falha, uma vez que este é recomendado pelos organizadores do *World Wide Failure Exercise (WWFE)* e consegue verificar separadamente falhas em fibra e matriz, tanto de compressão como tração (Hinton *et. al.*, 2004), e adicionando o material SMA na camada superior do laminado (primeiro substituindo a camada completa por material SMA e depois da forma apresentada na Fig. 3), pode-se comparar os resultados do laminado com e sem o SMA.

Tabela 4. Propriedades do material SMA

E	ν	σ_{SAS}	σ_{FAS}	σ_{SSA}	σ_{FSA}	E_s	ϵ
44.5 GPa	0.3	156.3 MPa	373.0 MPa	186.3 MPa	61.6 MPa	25.8 GPa	4.08 %

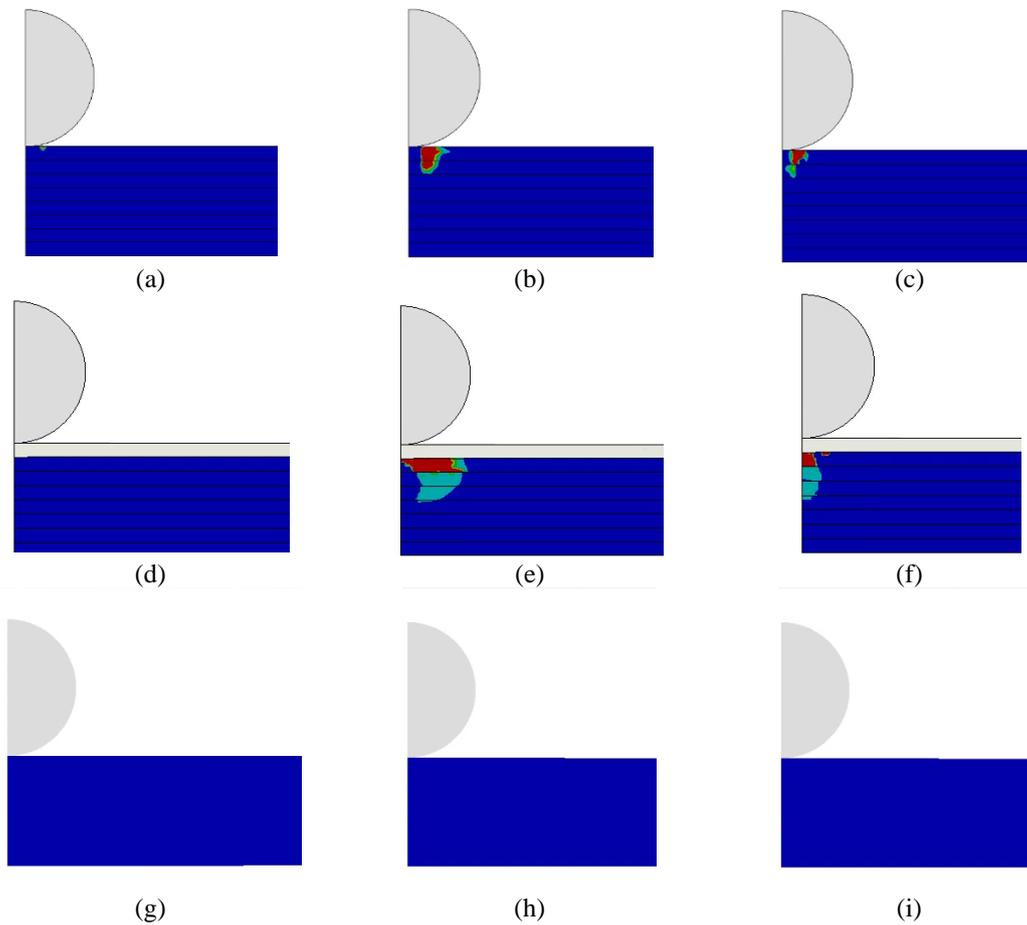


Figura 5. Falhas das lâminas para $V_f = 0.3$. Sem SMA: a) fibra em tração; b) matriz em tração; c) matriz em compressão. Com SMA: d) fibra em tração; e) matriz em tração; f) matriz em compressão. Com fio de SMA: g) fibra em tração; h) matriz em tração; i) matriz em compressão

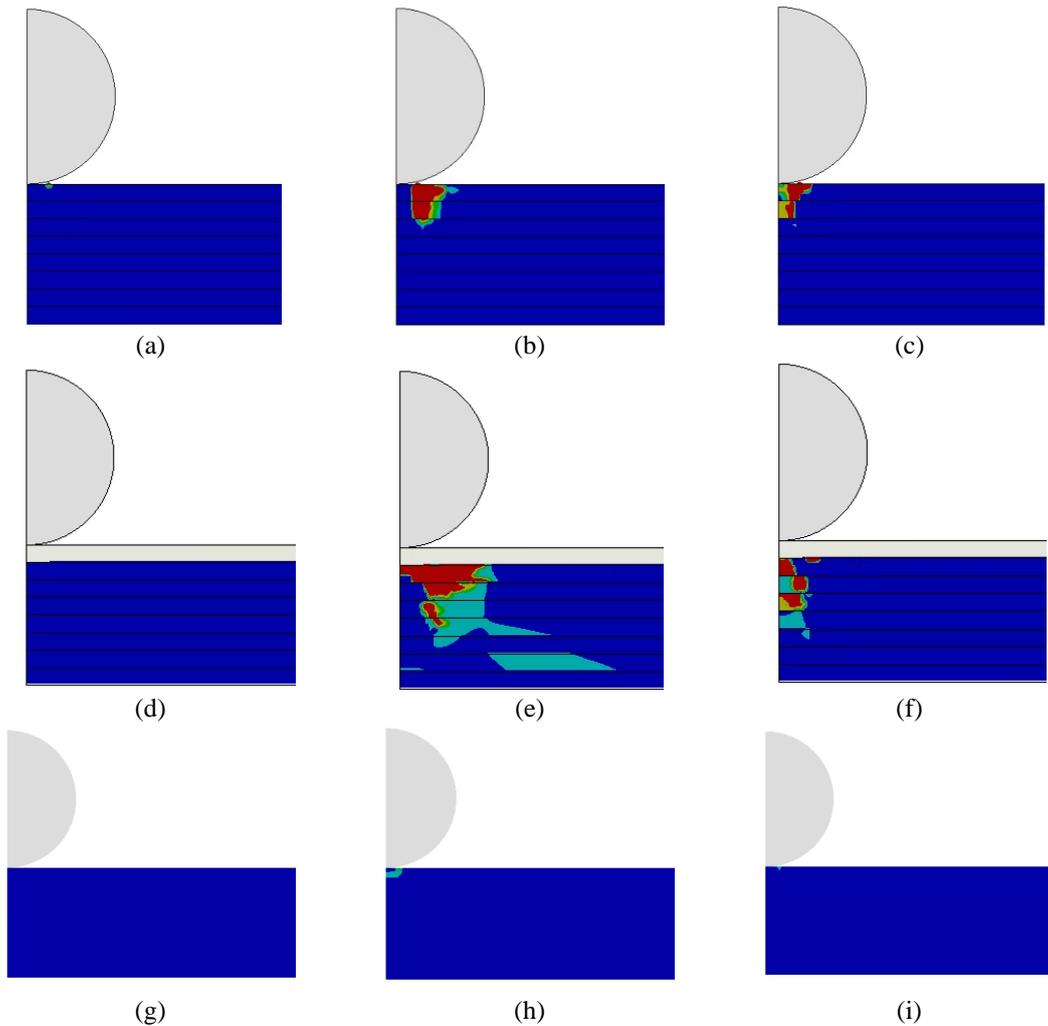
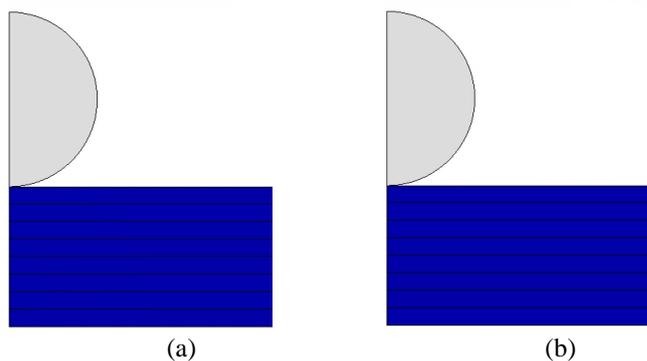


Figura 6. Falhas das lâminas para $V_f = 0.5$. Sem SMA: a) fibra em tração; b) matriz em tração; c) matriz em compressão. Com SMA: d) fibra em tração; e) matriz em tração; f) matriz em compressão. Com fio de SMA: g) fibra em tração; h) matriz em tração; i) matriz em compressão.

Com base nos resultados apresentados nas Fig. 5-7, que mostram em detalhe a região danificada próxima ao impacto, pode-se destacar:

- um aumento na região danificada com a inserção do material SMA em forma de lâmina completa, algo que vai contra o esperado, uma vez que o objetivo dessa adição é reduzir o dano nas camadas do laminado;
- uma diminuição no dano na viga com SMA quando inserido em 10% de volume na lâmina superior, gerando a lâmina híbrida. Isso se dá em decorrência da mudança de fase ocorrer mais rapidamente, dissipando mais energia e impedindo o dano de acontecer nas lâminas abaixo;
- o dano ocorre sempre nas primeiras camadas que sofrem uma maior influência do impacto, em coerência com as características conhecidas de materiais compósitos;
- apesar na diminuição das resistências transversais com o aumento da fração volumétrica, não foi possível observar o aumento do dano diretamente relacionado nas matrizes.



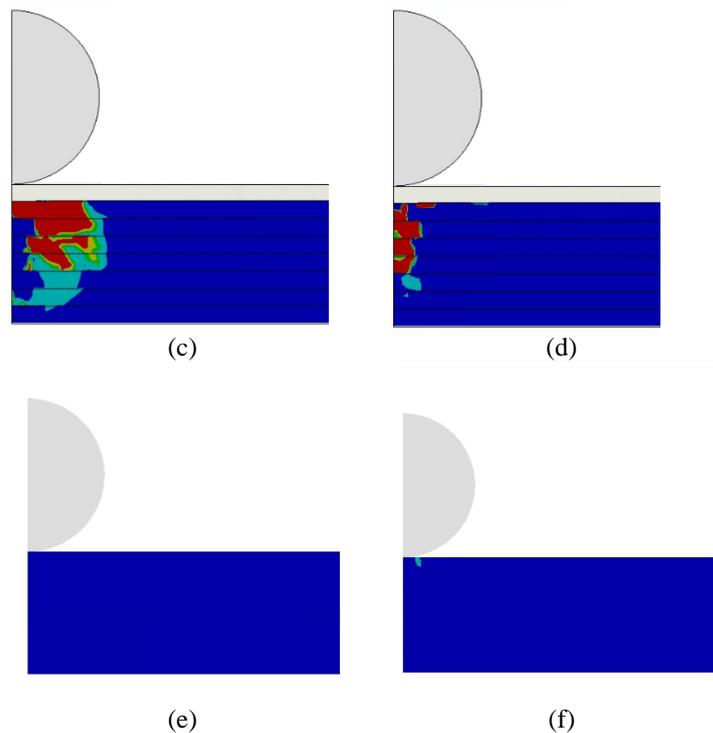


Figura 7. Falhas das lâminas para $V_f = 0.7$. Sem SMA: a) matriz em tração; b) matriz em compressão. Com SMA: c) matriz em tração; d) matriz em compressão. Com fio de SMA: e) matriz em tração; f) matriz em compressão

4. CONCLUSÃO

Concluindo, é notável que a adição do SMA, como lâmina, na posição em que foi colocado, não favorece a resistência a impactos. Por outro lado, quando utilizado de maneira híbrida o SMA com o compósito, nota-se uma drástica redução do dano, evitando que as camadas inferiores sofressem quaisquer danos. Além disso, para a viga sem SMA, obteve-se uma redução no dano quando $V_f = 0.7$, em decorrência do aumento da resistência e da rigidez longitudinal.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à ABCM pela bolsa de iniciação científica e à FAPERJ pelo suporte financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- Andrew, J.J., Srinivasan, S.M., Arockiarajan, A., Dhakal, H.N., (2019), "Parameters influencing the impact response of fiber-reinforced polymer matrix composite materials: A critical review", *Composite Structures*, 224, 111007.
- Kaddour, A.S., Hinton, M.J., (2012), "Input data for test cases used in benchmarking triaxial failure theories of composites", *Journal of Composite Materials*, 46, 2295-2312.
- Hinton, M.J., Kaddour, A.S., Soden, P.D., (2004), "Failure Criteria in Fibre-Reinforced-Polymer CompositeS - The World-Wide Failure Exercise", Elsevier
- Reddy, J.N., (2003), "Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis", Second Edition, CRC Press.
- Silva, P.C.S., Grassi, E.N.D., Savi, M., Araujo, C.J., (2014), "Simulação numérica do comportamento superelástico de mini molas de NITI usando ansys".
- Shah, P.D., Melo, J.D.D., Cimini Jr, C.A., Ridha, M., (2010), "Evaluation of Notched Strength of Composite Laminates for Structural Design", *Journal of Composite Matererials*, 44, 2381-2392.
- Topac, O.T., Gozluklu, B., Gurses, E., Coker, D., (2017), "Experimental and computational study of the damage process in CFRP composite beams under low-velocity impact", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 92, 167-182.
- Tsai, S.W., Melo, J.D.D., (2014), "An invariant-based theory of composites", *Composites Science and Technology*, 100, 237-243.
- Vignoli, L.L., Castro, J.T.P., (2021), "A parametric study of stress concentration issues in unidirectional laminates", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 28, 1554-1569.

A. Debossan, L. Vignoli

Estudo sobre a aplicação de SMA em vigas de material compósitos submetidas à impacto de baixa velocidade

Vignoli, L.L., Savi, M.A., Pacheco, P.M.CL., Kalamkarov, A.L., (2020), “Micromechanical analysis of longitudinal and shear strength of composite laminae”, *Journal of Composite Materials*, 54, 4853-4873.

Vignoli, L.L., Savi, M.A., Pacheco, P.M.CL., Kalamkarov, A.L., (2021a), “A Novel Micromechanical Model for Elastic Properties of Unidirectional Composites with Circular Fibers”, submetido.

Vignoli, L.L., Savi, M.A., Pacheco, P.M.CL., Kalamkarov, A.L., (2021b), “Micromechanical Strength Analysis of Unidirectional Lamina”, submetido.