

ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO SOB FLEXÃO DE PLACAS FINAS DE MATERIAL COMPÓSITO LAMINADO REFORÇADO POR FIBRAS

DANIEL HELBIG¹, MAURO DE VASCONCELLOS REAL², LUIZ ALBERTO OLIVEIRA ROCHA³, ELIZALDO DOMINGUES DOS SANTOS⁴, LIÉRCIO ANDRÉ ISOLDI⁵

RESUMO

A crescente necessidade de estruturas com propriedades mecânicas superiores impulsiona o desenvolvimento de novos tipos de materiais, dentre os quais se destacam os materiais compósitos laminados reforçados por fibras. Placas finas construídas com estes materiais possuem diversas vantagens em comparação com as fabricadas com materiais de construção mecânica convencionais como o aço: altas relações rigidez/peso e resistência/peso; alta resistência à fadiga; e excelente resistência à corrosão. Portanto, a aplicação destes elementos estruturais é cada vez mais frequente em diversas áreas da engenharia, especialmente em estruturas navais e *offshore*. Neste contexto, o presente trabalho analisa numericamente o comportamento mecânico de placas finas fabricadas com diferentes tipos de materiais compósitos (Vidro-E / Epóxi, Boro / Epóxi, Tecido de Vidro / Epóxi e Boro / Alumínio) em comparação com o comportamento mecânico de uma placa de Aço. Os resultados mostraram que é possível obter com uma placa de material compósito reforçado por fibras um comportamento mecânico semelhante, ou até melhor, que o de uma placa de aço.

PALAVRAS-CHAVES: Comportamento mecânico. Flexão de placas finas. Materiais compósitos. Simulação numérica.

NUMERICAL ANALYSIS OF MECHANICAL BEHAVIOUR UNDER BENDING OF THIN PLATES OF LAMINATED COMPOSITE MATERIAL IN FIBER REINFORCED

ABSTRACT

The growing need for structures with high mechanical properties propels the development of new types of materials, among which stand out the composite laminates reinforced by fibers. Thin plates constructed of these materials have several advantages over those made with conventional mechanical construction materials like steel: high relations stiffness / weight and strength / weight; high fatigue strength, and excellent corrosion resistance. Therefore, the application of these structural elements is increasingly frequent in diverse fields of engineering, especially in offshore and marine structures. In this

¹ Escola de Engenharia – FURG. Mestre em Engenharia Civil. Email: daniel.helbig@gmail.com

² Escola de Engenharia – FURG. Doutor em Engenharia Civil. Email: mauroreal@furg.br

³ Departamento de Engenharia Mecânica – UFRGS. Doutor em Engenharia Mecânica. Email: luizrocha@mecanica.ufrgs.br

⁴ Escola de Engenharia – FURG. Doutor em Engenharia Mecânica. Email: elizaldosantos@furg.br

⁵ Escola de Engenharia – FURG. Doutor em Engenharia Mecânica. Email: liercioisoldi@furg.br

context, this work analyzes numerically the mechanical behavior of thin plates manufactured from different types of composite materials (E-glass / Epoxy, Boron / Epoxy, Woven-Glass / Epoxy and Boron / Aluminum) compared with the mechanical behavior of a Steel plate. The results showed that it is possible to obtain with a plate of fiber reinforced composite material mechanical behavior similar or better, than that of a steel plate.

KEY WORDS: Bending of thin plates. Composite materials. Mechanical behavior. Numerical simulation.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de novas tecnologias e suas ramificações, associadas à base teórica, permitem a elaboração de elementos estruturais mais eficientes e versáteis, tendo como fator preponderante a utilização mais racional de suas características. Neste contexto encontram-se os materiais compósitos e suas derivações.

Placas finas de material compósito laminado reforçado por fibras podem ser empregadas em diferentes estruturas, com aplicações nas áreas espacial, militar, nas indústrias automobilística e naval, e na construção civil, entre outras.

A principal vantagem dos materiais compósitos refere-se ao aproveitamento máximo das principais características dos elementos formadores da estrutura, e do surgimento de novas características em função da mistura destes materiais [5]. Destacam-se dentre as propriedades obtidas com a utilização do material compósito: a resistência estática e à fadiga, a rigidez, a resistência à corrosão, a resistência à abrasão, a redução de peso, a capacidade de trabalho a alta e baixa temperatura, o isolamento ou condutividade térmica, elétrica e acústica, a dureza e a aparência estética [7].

Por outro lado, sabe-se que o maior problema relacionado à utilização do aço como material de construção em estruturas navais e *offshore*, é sua baixa resistência à corrosão, especialmente quando expostas ao agressivo ambiente marinho. É estimado que a indústria do petróleo gaste vários bilhões de dólares por ano em manutenção, reparos e substituição de estruturas de aço danificadas pela corrosão. Os materiais compósitos, no entanto, oferecem enorme potencial para reduzir estes custos em virtude de sua excelente resistência à corrosão. Além disso, estima-se que os materiais compósitos propiciem uma redução no peso total da estrutura em torno de 30 a 50% [9].

Portanto, neste trabalho uma análise numérica do comportamento mecânico de placas finas de material compósito laminado reforçado por fibras foi desenvolvida. Considerando a placa engastada nos quatro lados, diferentes materiais compósitos e esquemas de laminação foram estudados, confrontando seus resultados com os obtidos

para uma placa fina de aço. O modelo computacional foi desenvolvido no *software ANSYS®*, que é baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF) [1].

2. MATERIAIS COMPÓSITOS

Um material composto é definido, basicamente, como a combinação de dois ou mais materiais em uma escala macroscópica, formando então um terceiro material possuindo as melhores qualidades de seus componentes ou constituintes e até mesmo qualidades que nenhum dos seus componentes possui [2].

Um material compósito típico é formado por inclusões suspensas em uma matriz. Essas inclusões (fibras ou partículas) conferem ao material composto suas características mecânicas, enquanto que as matrizes são responsáveis em transferir as solicitações mecânicas às inclusões e protegê-las do ambiente externo [3].

O caráter anisotrópico dos materiais compósitos é o fator primordial para a obtenção das propriedades mecânicas requeridas pelo componente. A leveza juntamente com as excelentes características mecânicas faz com que os materiais compostos sejam cada vez mais utilizados dentro da engenharia, especialmente nas indústrias naval e *offshore* [8].

As fibras são caracterizadas, principalmente, por sua alta relação comprimento-diâmetro, podendo ser contínuas, longas, ou curtas, na faixa de 5 a 25 mm de comprimento. Quanto à sua disposição, elas podem ser unidirecionais, bidirecionais ou aleatoriamente orientadas. A resistência e a rigidez de um material, quando em forma de fibra, são algumas ordens de magnitude maiores que os valores obtidos para o mesmo material em bloco. Este paradoxo é devido ao fato de que as fibras apresentam estruturas mais perfeitas se comparadas ao material em bloco. Nas fibras, os cristais estão alinhados ao longo de seu eixo. Além disso, existem menos defeitos internos que em um material em bloco [5,7].

Materiais compósitos laminados reforçados por fibras consistem na associação de lâminas confeccionadas com fibras longas e resistentes, dispostas de forma paralela segundo uma ou duas direções, envolvidas por um material caracterizado como matriz [3], como mostra a FIGURA 1.

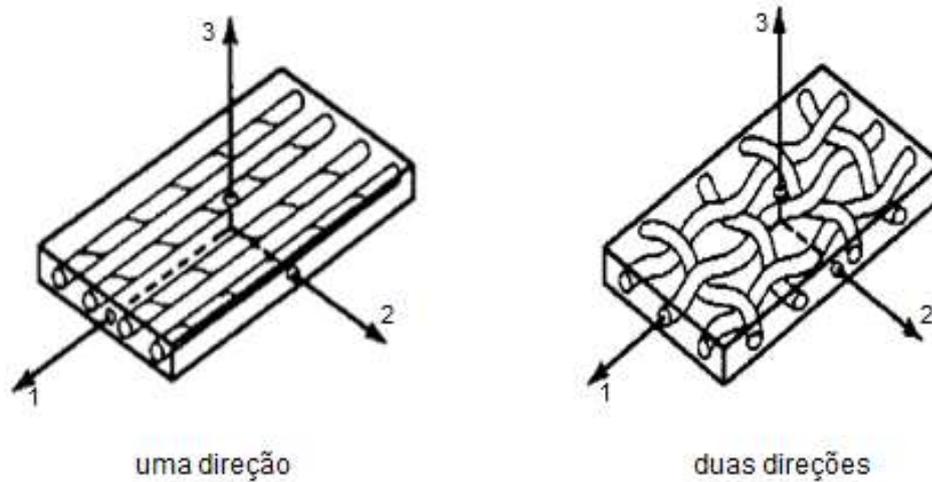


Figura. 1. Lâminas reforçadas por fibras [4,7].

As propriedades macroscópicas de um laminado, formado geralmente por lâminas idênticas, variando-se apenas a orientação de suas fibras, como resistência e comportamento elástico, dependem das propriedades individuais de cada lâmina que o forma, assim como da ordem das camadas [7].

A direção das fibras define as três direções principais de propriedades de uma lâmina, sendo estas tomadas como referência para a definição de suas propriedades mecânicas, assim como das tensões e deformações desenvolvidas (FIGURA 2) [4,6].

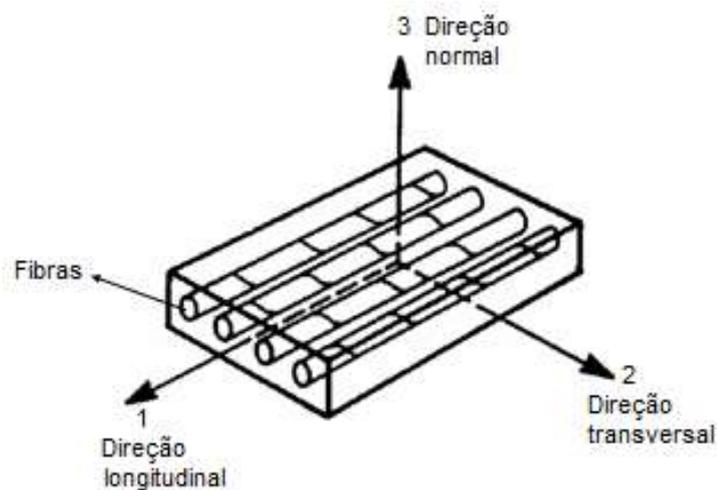


Figura 2. Direções principais em uma lâmina [4,7].

É importante destacar que, as placas de materiais compósitos laminados reforçados por fibras possuem um comportamento mais complexo que o apresentado pelas constituídas de materiais convencionais (homogêneo e isotrópico). Por serem heterogêneas e ortotrópicas, uma simples mudança na disposição das lâminas ou na orientação das fibras de um laminado pode afetar enormemente a resposta da estrutura,

o que demonstra a importância do desenvolvimento de modelos que representem adequadamente seu comportamento mecânico [4,6].

3. MODELO COMPUTACIONAL

Com o objetivo de avaliar numericamente como se comportam as tensões e as deflexões em uma placa fina, ou seja, placas em que a relação lado/espessura é igual ou superior a 10, fez-se uso do *software ANSYS*[®]. O *software* é baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF) e possui diversos tipos de elementos configurados para a simulação numérica estrutural, incluído a de materiais compósitos.

O MEF é uma das técnicas de análise numérica para a resolução de problemas das diversas áreas da engenharia. O avanço tecnológico na área computacional facilitou e aperfeiçoou a utilização dessa técnica, pois um dos entraves na sua aplicação estava relacionado à dificuldade da resolução de grandes matrizes, o que foi eliminado pelo uso de equipamentos computacionais mais potentes, inclusive de uso doméstico.

Em linhas gerais, o MEF é baseado na divisão do domínio de integração, contínuo, em um número finito de pequenas regiões denominadas elementos finitos, transformando o meio contínuo em discreto. O comportamento de cada elemento é arbitrado de forma aproximada, com a condição de que a malha formada pelos elementos se comporte de forma semelhante ao contínuo original. No chamado modelo de deslocamentos do MEF, arbitra-se o campo de deslocamentos nodais e, como consequência, a interação de componentes de tensão entre elementos adjacentes é substituída pela interação de forças nodais entre elementos. Dessa maneira, o equilíbrio infinitesimal que se considera no modelo matemático de meio contínuo é substituído pelo equilíbrio de cada elemento finito isoladamente, trocando-se as equações diferenciais de equilíbrio por equações algébricas de equilíbrio do elemento como um todo. A partir destas equações algébricas escritas para cada elemento, obtém-se o sistema de equações de equilíbrio da malha de elementos. Esse sistema global, após a introdução das condições de vinculação ao meio exterior, permite a determinação da solução em termos dos deslocamentos nodais [4].

Neste trabalho foi utilizado o elemento *SHELL 99*, por ser um dos elementos do *software ANSYS*[®] adequado para a modelagem de placas e cascas finas de material compósito laminado. A formatação do elemento *SHELL 99* permite considerar um material compósito laminado formado por até 250 camadas com espessuras uniformes ou por 125 camadas com espessuras variáveis. Para a utilização do elemento *SHELL 99* é necessário definir: o número de camadas que formarão o material compósito, as propriedades específicas do material, a orientação das fibras em relação ao sistema de

referência global e a espessura de cada camada. A FIGURA 3 apresenta o elemento *SHELL* 99 e seu sistema de referência.

O elemento *SHELL* 99 possui oito nós e seis graus de liberdade por nó, ou seja, translações nas direções x , y e z , e rotações em torno dos eixos x , y e z , totalizando vinte e quatro graus de liberdade por elemento [1]. Então, o domínio computacional discretizado através do elemento *SHELL* 99 consiste, basicamente, de uma placa fina engastada nos quatro lados sobre a qual uma carga normal uniformemente distribuída é aplicada, causando sua flexão.

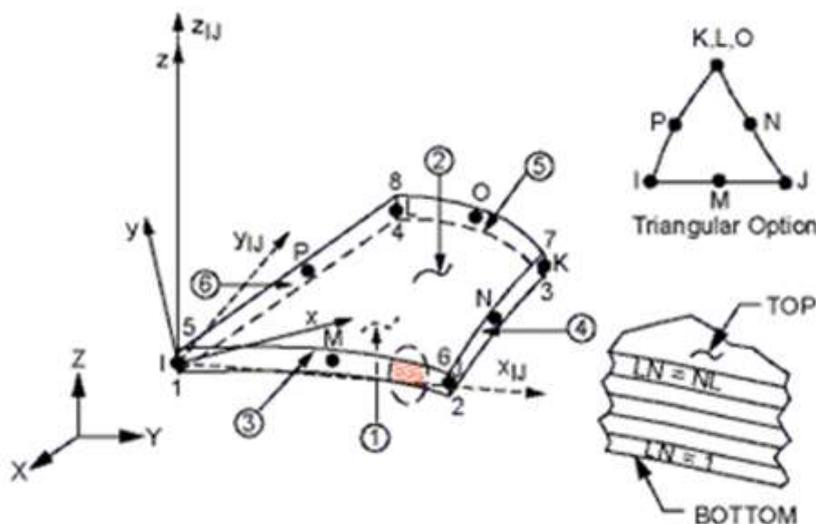


Figura 3. Elemento SHELL 99 [4].

3.1 Verificação do Modelo Computacional

Para a verificação do modelo utilizou-se uma placa de aço, isotrópica, quadrada de 1.0 m x 1.0 m e com espessura de 5.0×10^{-3} m, engastada nos quatro lados. As propriedades do aço adotadas foram: módulo de elasticidade $E = 210.0$ GPa, módulo de elasticidade transversal $G = 80.8$ GPa e coeficiente de Poisson $\mu = 0.30$. Um carregamento distribuído uniforme no valor de 100.0 Pa foi aplicado. A simulação numérica foi feita adotando o elemento *SHELL* 99, considerando quatro camadas de igual espessura, para efeito de comparação com o resultado analítico encontrado por Timoshenko e Woinowsky-Krieger [10] para o cálculo do deslocamento máximo. A solução analítica indica uma deflexão máxima de 5.24×10^{-5} m enquanto a solução numérica obtida foi de 5.27×10^{-5} m, existindo uma diferença de 0.57% o que verifica o modelo computacional proposto.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para os estudos envolvendo a comparação entre o comportamento mecânico de placas finas de materiais compósitos e de aço, um domínio computacional representando uma placa retangular fina com dimensões 0.2 m × 0.1 m, comprimento e largura, respectivamente, e 0.01m de espessura [2], foi discretizado com uma malha regular formada com 800 elementos quadrados do tipo *SHELL* 99. A placa foi submetida a um carregamento uniforme distribuído de 0.2×10^6 Pa e possui como condição de contorno seus quatro lados engastados. De acordo com Banerjee, Jain e Sanyal [2] as propriedades mecânicas para o aço e para os diferentes materiais compósitos analisados são apresentadas na TABELA 1.

Tabela 1. Propriedades dos materiais

Material	Aço (A)	Vidro E / Epoxi (B)	Boro / Epoxi (C)	Tecido de Vidro / Epoxi (D)	Boro / Alumínio (E)
E_x (GPa)	210.0	39.0	201.0	29.7	235.0
E_y (GPa)	210.0	8.6	21.7	29.7	137.0
E_z (GPa)	210.0	8.6	21.7	29.7	137.0
G_{xy} (GPa)	80.8	3.8	5.4	5.3	47.0
G_{yz} (GPa)	80.8	3.8	5.4	5.3	47.0
G_{zx} (GPa)	80.8	3.8	5.4	5.3	47.0
μ_{xy}	0.30	0.28	0.17	0.17	0.30
μ_{yz}	0.30	0.28	0.17	0.17	0.30
μ_{zx}	0.30	0.28	0.17	0.17	0.30

Os esquemas de laminação adotados estão descritos na TABELA 2.

Tabela 2. Casos e laminações

Caso	Laminação	Material
1	-	(A)
2	[0/90/90/0]	(B), (C), (D) e (E)
3	[90/0/0/90]	(B), (C), (D) e (E)
4	[0/90/0]	(B), (C), (D) e (E)
5	[90/0/90]	(B), (C), (D) e (E)
6	[45/-45/-45/45]	(B), (C), (D) e (E)
7	[45/-45/45]	(B), (C), (D) e (E)

Para exemplificar como a inclinação das fibras em cada lâmina é associada à sua direção principal, na FIGURA 4 é mostrada a sequência de laminação do caso 2 (ver TABELA 2).

Cabe destacar que nos casos 2, 3 e 6 foram considerados esquemas de laminação simétricos formado por quatro camadas, sendo cada lâmina com espessura de 2.50×10^{-3} m. Nos casos 4, 5 e 7 foram consideradas três camadas com espessura de 3.33×10^{-3} m, configurando esquemas de laminação anti-simétricos..

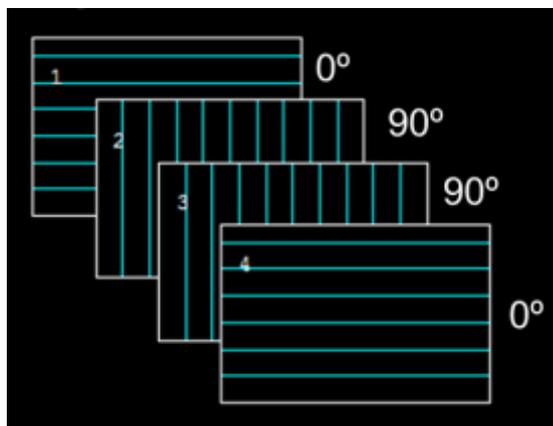


Figura 4. Esquema de laminação do caso 2.

É importante mencionar ainda que o presente trabalho não se propõe a verificar a resistência do material compósito ou de suas camadas, portanto não há considerações quanto à ruptura das fibras ou da matriz. Verifica-se apenas o comportamento das tensões e das deflexões, para os casos de 2 a 7, comparando seus resultados aos encontrados para o caso 1.

Na FIGURA 5 os valores de tensão máxima (von Mises) obtidos para cada caso simulado são apresentados. Tem-se para o material compósito Boro / Alumínio, (E), valores menores para situações de laminação, configurações de 4 camadas, casos 2 e 6, e de 3 camadas, casos 4 e 7, quando comparado à tensão máxima da placa de aço, (A), caso 1. De forma similar, o material compósito formado por Tecido de Vidro / Epóxi, (D), assume valores inferiores de tensão quando submetido às configurações dos casos 6 e 7, ou seja, quando o esquema de laminação é formado por fibras com orientações à 45° e -45° em relação ao eixo principal, independente do número de camadas. Observando a TABELA 1 é possível notar que as propriedades mecânicas do Tecido de Vidro / Epóxi,

(D), são bastante inferiores às do Aço, (A), porém devido ao esquema de laminação tensões menores foram desenvolvidas.

Para todas as demais configurações as tensões obtidas são superiores as do Aço, para as disposições de fibras sugeridas, observando-se inclusive, uma variação bastante acentuada entre os casos 4(C) e 5(C), onde uma simples mudança na orientação das fibras causou uma diferença em torno de 50% no valor da tensão máxima. Este fato pode ser explicado pela forma como as tensões se distribuem na placa, como mostra a FIGURA 6.

Quanto às deflexões máximas, FIGURA 7, o compósito laminado que mais se aproxima do comportamento do aço é o Boro / Alumínio, (E), em todos os esquemas de laminação analisados. Os demais compósitos possuem deformações superiores ao das encontradas para a placa de aço. Os valores encontrados para as deflexões das placas, para orientações das fibras a 0° e 90°, para 3 e 4 camadas, casos 3 e 5, estão bastante próximos o que permite afirmar-se que, o número de camadas possui pequena interferência no resultado da deflexão nestes casos.

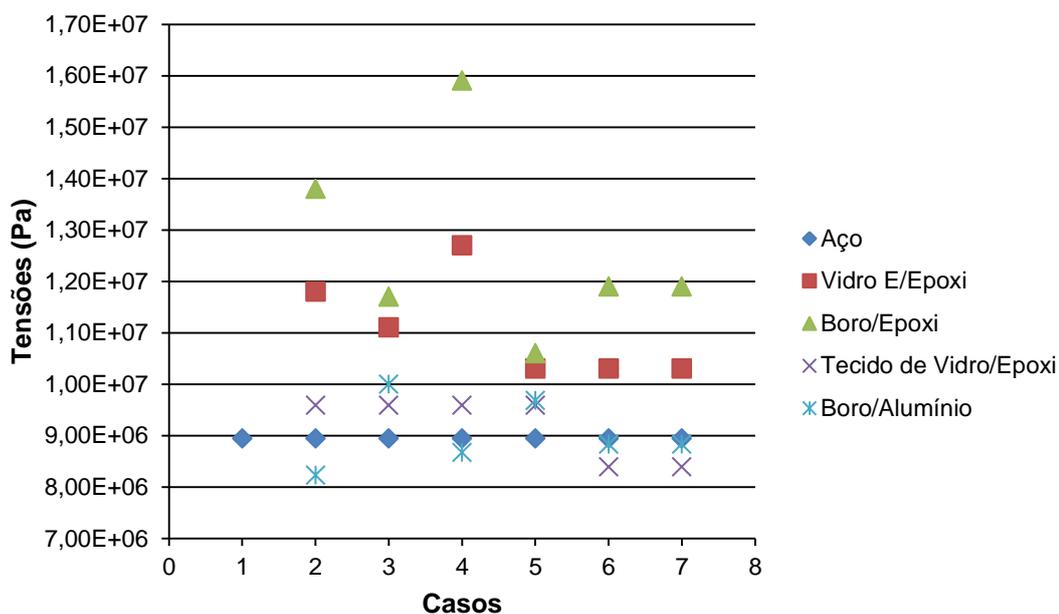


Figura 5. Tensões máximas.

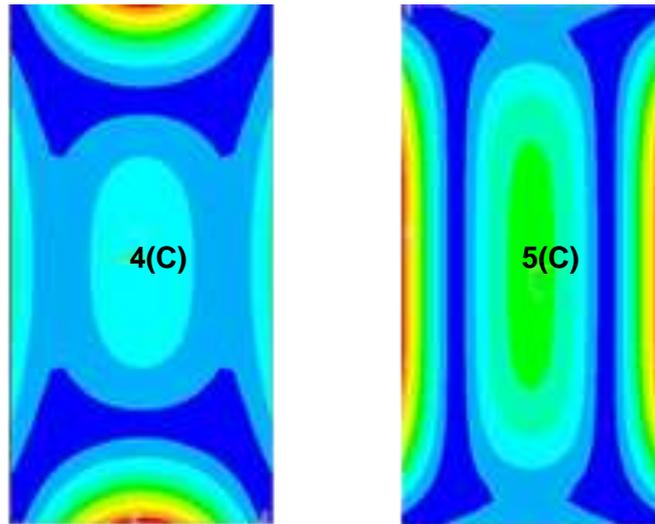


Figura 6. Distribuição de tensões dos casos 4(C) e 5(C).

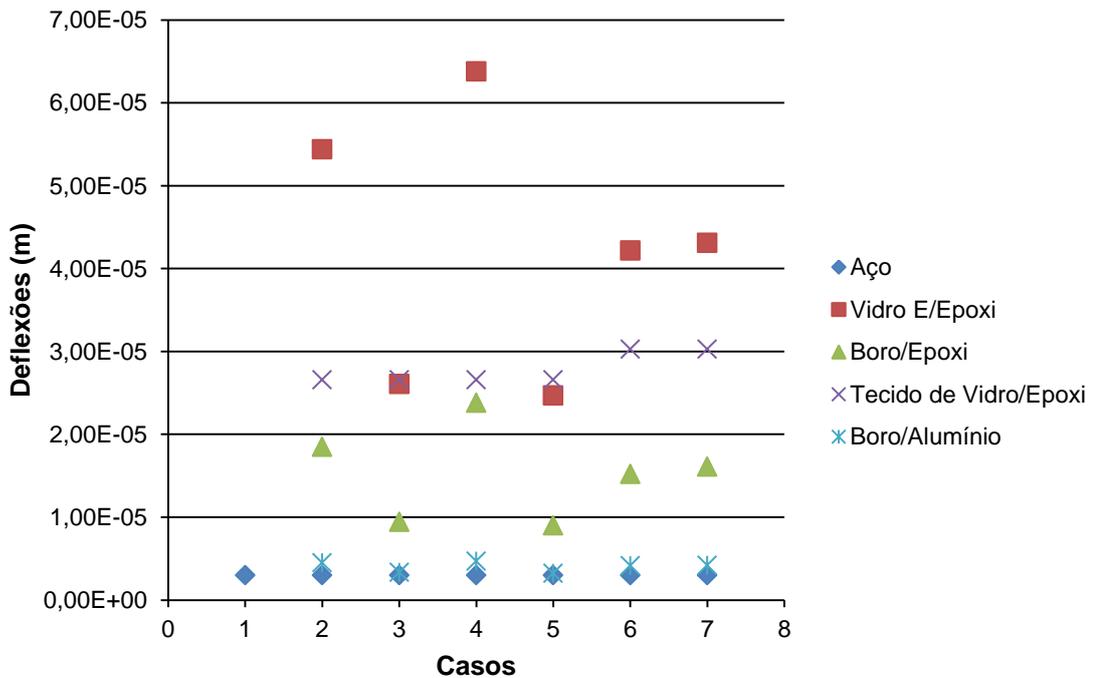


Figura 7. Deflexões máximas.

5. CONCLUSÕES

É cada vez mais frequente o emprego de placas finas constituídas de materiais compósitos laminados reforçados por fibras em projetos estruturais, sendo este, portanto, um assunto de extrema relevância dentro da engenharia.

Neste trabalho, através da análise numérica, foi possível comprovar que uma placa fina de material compósito reforçado por fibras, de iguais dimensões e sob mesmas

condições de vinculação e carregamento, pode desenvolver valores bastante próximos, ou até inferiores, de tensão e de deflexão quando comparada a uma placa de aço. Aliando este fato ao menor peso e a maior resistência à corrosão, os materiais compósitos são uma excelente opção para estruturas navais e *offshore*.

Além disso, foi possível observar que uma simples alteração no esquema de laminação pode alterar significativamente o comportamento mecânico das placas de material compósito, justificando futuras pesquisas nesta área.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANSYS®. Theory manual. 2010.
- [2] BANERJEE, M.; JAIN N. K.; SANYAL S. Three dimensional parametric analyses on effect of fibre orientation for stress concentration factor in fibrous composite cantilever plate with central circular hole under transverse loading. *IIUM Engineering Journal*, v. 13, nº. 2, p. 131-144, 2012.
- [3] BOWER, M. V. *Composite Materials*. University of Alabama, Huntsville, 2000.
- [4] ISOLDI, L. A. *Análise Estática e Dinâmica de Estruturas Delgadas de Materiais Compostos Laminados Incluindo Materiais Piezelétricos*. 197 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2008.
- [5] JONES, R. M. *Mechanics of Composite Materials*, Taylor & Francis. Philadelphia, 519 p., 1999.
- [6] MARQUES, D. C. dos S. C. *Análise Não Linear Estática e Dinâmica de Cascas e Placas Anisotrópicas*, 182 p. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS, 1994.
- [7] MENDONÇA, P. de T. R. *Materiais Compostos & Estruturas-Sanduiche*. Manole, Barueri, 632 p., 2005.
- [8] PEREIRA, J. C. *Curso de Projeto Estrutural com Materiais Compostos*. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- [9] SELVARAJU S. ; ILAIYAVEL S. Applications of Composites in Marine Industry. *JERS*, v. II, Issue II, April-June, 2011, pp. 89-91.
- [10] TIMOSHENKO, S.; WOINOWSKY-KRIEGER, S. *Theory of Plates and Shells*, McGraw-Hill. Singapore, 580 p., 1959.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPERGS (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul), ao CNPq Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e a FURG (Universidade Federal do Rio Grande) pelo apoio.