

Análise Numérica de um Compósito Híbrido Através do MEF

Everton C. Silva¹, Avelino M. S. Dias¹, Raimundo C. S. Freire Júnior¹

¹Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Lagoa Nova, 3000, 59078-970, Natal, RN, Brasil.

evertoncarneiro90@outlook.com, avelino.dias@ct.ufrn.br, freirej@gmail.com

Resumo. A constante evolução da tecnologia vem gerando uma necessidade de produzir novos materiais que solucionem requisitos cada vez mais particulares. Com a recente tendência da utilização de compósitos laminados, logo tem sido estudado compósitos híbridos, somando assim, uma série de materiais com características mecânicas mais específicas. De forma análoga aos laminados, tais materiais compósitos híbridos requerem novos estudos referentes à caracterização de seu comportamento mecânico. Atualmente, um aliado nos estudos destes compósitos tem sido a análise numérica, através do MEF. O principal objetivo deste trabalho foi a análise do comportamento mecânico de um material compósito híbrido confeccionado com fibras de carbono e de vidro por meio do MEF. Desta forma, foram analisados os resultados numéricos do ensaio de tração de materiais compostos por uma lâmina de compósito híbrido e comparado os resultados obtidos experimentalmente, onde foram laminados os compósitos híbridos trançados com fibra de carbono inicialmente na direção do carregamento e fibra de vidro orientado na direção perpendicular à fibra de carbono. Para as análises computacionais, as amostras foram modeladas como materiais ortotrópicos com sentidos da fibra de carbono a 0°, 30°, 45°, 60° e 90°. Introduziu-se também ao estudo a análise de concentradores de tensões nos compósitos, os quais foram modelados como sendo uma placa com furo central. Foram obtidos valores de diferença entre as tensões médias experimental e numérica para corpo de prova sem descontinuidade de 1,71% para fibras à 0°; 21,83% para fibras à 30°; 12,79% para fibras à 45°; 39,77% para fibras à 60° e 7,69% para fibras à 90°. Nas amostras com descontinuidade, obtiveram diferença de tensão média de 19,62% para fibras à 0°; 10,94% para fibras à 30°; 17,72% para fibras à 45°; 15,51% para fibras à 60° e 116,10% para fibras à 90°.

Palavras-chave: Compósitos híbridos, MEF, Fator de concentração de tensões.

1 Introdução

O constante avanço da tecnologia acarretou na necessidade de produção de materiais que atendam a condições cada vez mais singulares. Mas a evolução destes materiais também traz uma obrigação da utilização de novos processos de estudos e de caracterização. Dentre a grande variedade de novos materiais, surgiram os compósitos laminados que buscam combinar as mais diferentes e específicas propriedades mecânicas, sendo sua aplicação indispensável, em especial, na indústria aeronáutica. Com a tendência da utilização de compósitos laminados, atualmente tem sido analisado os compósitos híbridos. Neste sentido, os compósitos obtiveram também um aumento relacionado a aplicações de materiais com propriedades mecânicas mais específicas, como por exemplo, quando se pretende aliar boa resistência mecânica em uma determinada direção de solicitações de esforços e na direção menos solicitada utilizar material com custo de produção mais baixo e conseqüentemente com menor resistência mecânica que o material utilizado na direção de maiores carregamentos.

O estudo de fatores de concentradores de tensão em compósitos laminados também tem sido bastante importante, pois as descontinuidades em um componente estrutural provocam um notável aumento de tensões na região da mesma. O surgimento e propagação de trincas em regiões com descontinuidades, podem ser provocadas por tal aumento de tensões nestas regiões e são capazes de levar componentes estruturais à ruptura dependendo do esforço aplicado. Em conseqüência, este problema causa: perdas econômicas e em algumas ocasiões mais críticas, vidas humanas podem ser expostas em risco de possíveis acidentes.

Souza [1] observou que outro aspecto imprescindível a ser avaliado, é que os estudos de tais descontinuidades são bastante conhecidas em materiais de comportamento isotrópicos, como metais por exemplo, porém para materiais ortotrópicos e anisotrópicos, caso este dos compósitos, existem poucas informações a seu respeito e quando se fala em compósitos híbridos, as informações são ainda mais raras. Em projetos de componentes mecânicos, a necessidade de utilizar elementos de união, tais como parafusos e/ou rebites torna o uso de descontinuidade geométrica (furos) mais frequentes. Neste sentido, a análise da influência de descontinuidade geométricas em compósitos híbridos deve ser muito bem conhecida e avaliada.

Para Mendonça [2] e Shackelford [3], há uma tendência nos últimos anos do uso de ensaios numéricos no auxílio para resolver vários problemas tecnológicos, na otimização e desenvolvimento de projetos de engenharia. Tal fato ocorreu devido a evolução dos sistemas computacionais que nos dias atuais possibilitam a implementação de inúmeros métodos numéricos em tempo real com baixos custos de execução. O método numérico também pode operar como aliado essencial na solução de problemas e adversidades particulares ligadas aos procedimentos experimentais. Entretanto, no que diz respeito a simulação numérica aplicada ao comportamento mecânico de materiais compostos, sendo eles laminados, híbridos e sanduíches, geralmente apresentam problemas que compreendem comportamento não linear do material e também de complexos processos de dano e fratura.

Atualmente o Método dos Elementos Finitos (MEF) se tornou uma ferramenta prática na caracterização de ensaios mecânicos para estudo dos materiais de modo geral, tendo como principal vantagem o fato de ser um método não destrutivo tornando o ensaio mais viável economicamente. Melo, Bi e Tsai [4] reforçam que o MEF tem se tornado um aliado utilizado na solução de problemas de engenharia de forma abrangente, particularmente por sua capacidade de solucionar uma grande quantidade de problemas. As principais vantagens deste método é a competência em resolver problemas que envolvem geometria, materiais, carregamentos e condições de contorno que exigem maior complexidade.

Segundo Müzel et al [5], Cook [6] e Tenek e Argyris [7], devido à complexidade de caracterização dos compósitos, muitos pesquisadores recorrem a método de simulação numérica com objetivo de otimizar e melhorar o projeto estrutural, assim como para entender melhor o comportamento de tais materiais. Através do MEF, é possível compreender os danos originados na fibra, na matriz e na sua interface quando o compósito é submetido a condições severas, tais como: carregamento estático e dinâmico, diferentes temperaturas e pressões, entre outros.

Os modelos analíticos nem sempre são eficazes na abordagem de todos os fenômenos de falha que influenciam no desempenho material composto, de acordo com Dandekar e Shin [8]. Os diferentes mecanismos de falha atuam em papéis importantes durante a vida útil dos compósitos; exemplificando, a fratura do reforço trata-se de um deslocamento parcial da interface resultando no surgimento e crescimento de vazios e coalescência da matriz, assim como proposto por Müzel et al [5].

Conforme Christóforo et al [9] e Medeiros et al [10], seguindo este contexto, os modelos discretos de elementos finitos têm sido utilizados em concordância com conceitos de mecânica dos meios contínuos e da mecânica da fratura através da análise do dano na estrutura. Porém, a incorporação adequada de aspectos mecânicos relacionados aos mecanismos de falhas é a principal razão para o êxito de tais métodos de prevenção referentes à análise numérica da integridade mecânica de uma enorme gama de componentes estruturais e dos mais variados materiais.

Souza [1] realizou produção dos corpos de prova, os quais foram ensaiados experimentalmente. Os corpos de prova foram compostos por uma lâmina híbrida de tecido de fibra de carbono/vidro nas configurações desejadas para execução dos ensaios de tração, ou seja, o procedimento experimental para a análise dos compósitos.

O ensaio de tração uniaxial experimental foi realizado por Souza [1] para obtenção das propriedades mecânicas do compósito em vários sentidos de angulação das fibras, assim como verificar o efeito da redução de resistência do material provocado pelo concentrador de tensão. Na etapa de execução do ensaio, foram preparados 08 (oito) corpos de prova, os quais cada com configuração de fibra variando o ângulo (0° , 30° , 45° , 60° e 90°), os mesmos foram sujeitos a carga de tração através de uma máquina de ensaios mecânicos universal (AGI-250 kN SHIMADZU) tendo capacidade máxima de 300 kN.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo usar o MEF para estudar o comportamento mecânico de um tecido bidirecional com uma única lâmina de material compósito confeccionado combinando fibra de carbono com fibra de vidro em uma matriz polimérica de epóxi éster-vinílica, produzido através do processo de laminação manual

de compósitos, também conhecido como *hand lay-up*. No estudo numérico, o composto foi modelado através do MEF sem e com presença de concentrador de tensão do tipo furo central na seção transversal da placa retangular com propósitos de comparar o comportamento mecânico obtido numericamente como ensaio experimental quando o material é exposto a um carregamento uniaxial.

2 Metodologia

Na etapa de produção de corpos de prova para os ensaios experimentais, Souza [1] realizou o processo de moldagem manual com intuito de confeccionar placas laminadas. Ao término do processo, três placas com dimensões de aproximadamente 650 mm x 650 mm e espessura média de 0,5 mm foram produzidas. A Resina polimérica epóxi éster-vinílica MOMENTUM 441-350 da empresa DERAKANE® foi utilizada no compósito como matriz tendo função principal de reforço estrutural aplicado em um tecido híbrido bidirecional carbono/vidro de configuração sarja 2x2 da empresa FIBERTEX®, no qual segundo o fabricante, o tecido possui aproximadamente 5 mechas/cm no urdume e 5 mechas/cm na trama, e gramatura de 200 g/m² (100 g/m² de fibra de carbono e 100 g/m² de fibra de vidro).

Segundo Souza [1], os corpos de prova sem descontinuidade foram produzidos nas dimensões baseadas na norma ASTM D 3039-08 [11] para ensaio de tração ilustrado na Figura 1(a). A Norma ASTM D 5766-02 [12] foi utilizada como referência dos corpos de prova com furo central, como representado na Figura 1(b). Os corpos de prova tiveram verificação de suas dimensões através do auxílio de um paquímetro analógico com precisão de 0,05 mm. Foram realizadas 5 medições para obtenção da média de cada dimensão das amostras produzidas.

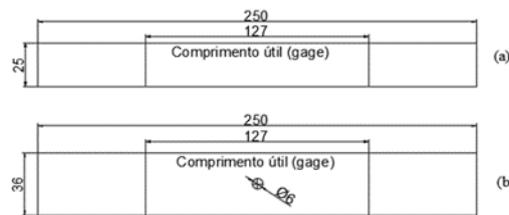


Figura 1(a) e 1(b). Dimensões do corpo de prova de ensaio de tração sem descontinuidade e com furo central, respectivamente e 0,5 mm de espessura [1]

Na realização de ensaios numéricos, utilizou-se o software comercial de elementos finitos MARC™ [13] para a análise do comportamento mecânico dos corpos de prova do compósito híbrido. As simulações dos modelos numéricos, foram realizadas utilizando apenas o comprimento útil das amostras, assim como no método experimental, pelo fato de ser o comprimento unicamente válido em ensaios de tração uniaxial.

As dimensões representadas na Figura 1(a) foram utilizadas na confecção dos modelos numéricos sem descontinuidade, porém apenas com o comprimento útil. Foram utilizados elementos 3D do tipo *Structural 3-D Solid Composite/Gasket* na malha do corpo de prova, este elemento é do tipo isoparamétrico, tridimensional, de 8 nós que admite inserir propriedades de materiais em camadas distintas dentro do elemento, logo este tipo de elemento representa melhor o comportamento dos compósitos laminados. Os modelos foram preparados para as simulações no regime linear elástico. Não foi necessário inserir elementos especiais, tais como elementos de delaminação, nas análises. Na representação numérica dos corpo de prova com descontinuidade, foi aplicado furo central com 6 mm de diâmetro, do mesmo modo que na Figura 1(b), no qual teve refinamento de malha muito mais acentuado na região próxima descontinuidade, com o intenção de se alcançar melhores resultados na região do furo central.

No ensaio de tração numérico para os materiais compostos, uma vez que o material é anisotrópico, foi essencial o uso de algumas propriedades mecânicas dos corpos de prova obtidos experimentalmente na entrada de dados do software, propriedades estas: o módulo de elasticidade atribuído a fibra de carbono (E_1); na direção da carga de tração, o módulo de elasticidade atribuído a fibra de vidro (E_2); orientada perpendicularmente a direção do a direção da fibra de vidro, o módulo de elasticidade da resina (E_3); orientada perpendicularmente a (E_1) e (E_2); os coeficientes de Poisson (ν_{12}), (ν_{23}), e (ν_{31}) todas obtidas por Souza [1] e Campos [14]; outras 3(três) propriedade

mecânicas foram indispensáveis para realização do trabalho, foram elas: o módulo de cisalhamento (G_{12}); obtido por Campos [14] através do ensaio de cisalhamento à tração a $\pm 45^\circ$, já os módulos de cisalhamento (G_{23}) e (G_{31}) forma estimados devido não apresentar influência no ensaio a tração. O esquema da Figura 2 ilustra as propriedades mecânicas utilizadas na alimentação do software. Todas estas propriedades ilustradas na Figura 2 estão na Tabela 1.

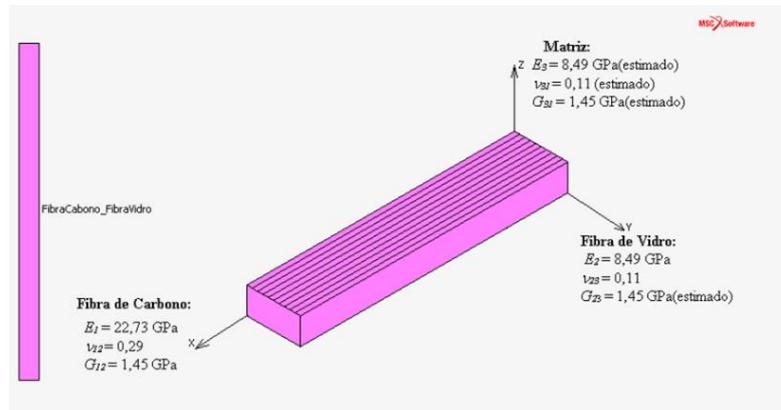


Figura 2. Propriedades mecânicas do compósito híbrido

Tabela 1. Propriedades mecânicas dos tecidos de fibra de carbono/vidro

Propriedades Mecânicas	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	E_3 (GPa)	ν_{12}	ν_{23}	ν_{31}	G_{12} (GPa)	G_{23} (GPa)	G_{31} (GPa)
Fibra de Carbono/Vidro	22,73	8,49	8,49	0,29	0,11	0,11	1,45	1,45	1,45

Na etapa de aplicação das condições dos apoios e carregamento do ensaio numérico foram fixados os nós na direção da carga na extremidade oposta ao carregamento representando o lado fixa da amostra do ensaio. Foram aplicados deslocamentos nos nós do carregamento. As condições de apoios, restrições de movimentos e carregamento dos nós estão ilustrados na Figura 3(a) para os modelos sem descontinuidade confeccionados com 1600 elementos e Figura 3(b) nos modelos com descontinuidade com 1687 elementos.

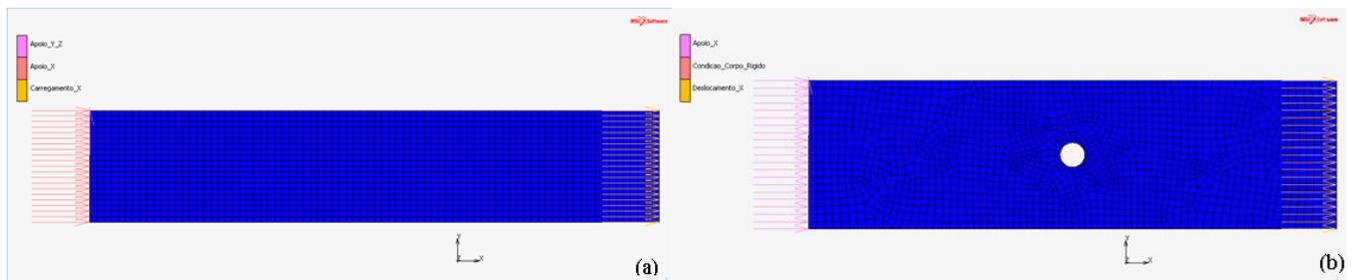


Figura 3(a) e 3(b). Condições de apoios do modelo sem descontinuidade e com descontinuidade, respectivamente

Após estas fases de modelagem do ensaio, foram executadas as simulações do ensaio numérico de tração para o compósito híbrido laminado, com isto foram comparados os comportamentos mecânicos numéricos com experimentais, com objetivo de obter uma boa representatividade do modelo numérico para este ensaio. Todos esses passos foram feitos para todas as configurações de angulação de fibras propostas por Souza [1], isto é, orientações da fibra de carbono em 0° , 30° , 45° , 60° e 90° e fibra de vidro sempre perpendicularmente a fibra de carbono.

3 Resultados e Discussão

Na etapa de execução do ensaio numérico dos materiais sem descontinuidade para orientações da fibra de carbono em 0° , 30° , 45° , 60° e 90° , respectivamente, nas qual foram aplicadas as deformações percentuais de

0,25%; 0,25%; 0,25%; 0,25% e 0,50%, por essa ordem. Estas deformações foram utilizadas com objetivo de alcançar resultados de comportamento mecânico do compósito na região do regime elástica baseado na curva obtida experimentalmente. Tais resultados experimentais e numéricos de tensão na direção do carregamento podem ser verificados na Tabela 2 e o resultado das tensões na direção preferencial 1 (componente numérica 11), na direção do carregamento, pode ser visualizado nas figuras 4 para modelo com fibras orientadas a 0°.

Tabela 2. Resultados experimentais e analíticos de tensões para as propriedades para diferentes angulações das fibras

Ângulo das Fibras	0°	30°	45°	60°	90°
Tensão Experimental (MPa)	57,8	20,4	13,9	9,2	39,4
Tensão Numérica (MPa)	56,8	15,9	12,1	12,9	42,5

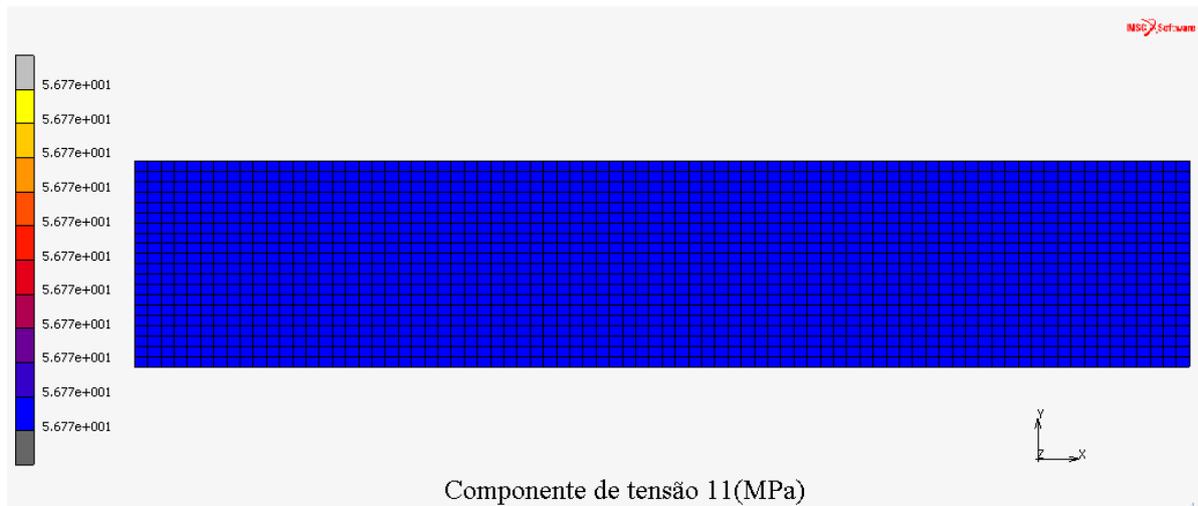


Figura 4. Simulação do modelo sem descontinuidade para tensão principal (componente 11), na angulação de fibras orientadas a 0°

De modo semelhante a análise do modelo sem descontinuidade, foram utilizadas as deformações percentuais de 0,25%; 0,25%; 0,25%; 0,25% e 0,125%, para as configurações de ângulos de 0°, 30°, 45°, 60° e 90°, respectivamente, para os modelos com furo central. Os resultados obtidos de tensão experimentalmente e numericamente na direção do carregamento podem ser observadas na Tabela 3 e o resultado da tensão principal (componente 11), na direção do carregamento, pode ser visualizado nas figuras 5(a) para modelos com fibras orientadas a 0° e 5(b) a 45°.

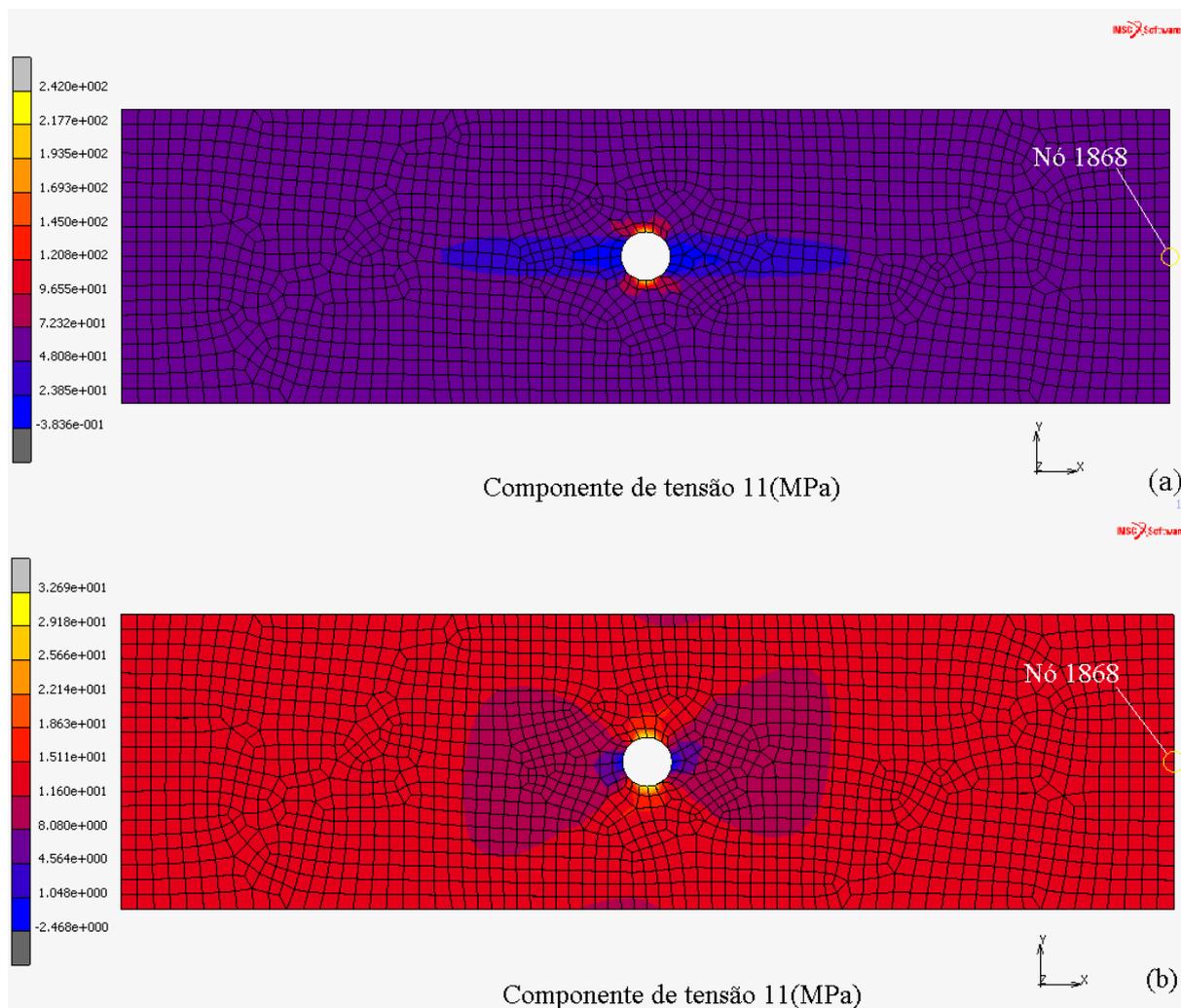
Tabela 3. Resultados experimentais e analíticos de tensões para as propriedades para diferentes angulações das fibras

Ângulo das Fibras	0°	30°	45°	60°	90°
Tensão Experimental (MPa)	41,5	17,7	14,2	14,9	4,8
Tensão Numérica (MPa)	53,9	15,7	11,7	12,6	10,3

Foi observado um comportamento mecânico do ensaio numérico muito bom em comparação ao obtido experimentalmente, onde nas simulações em modelos sem descontinuidade houve distribuição uniforme em todo o corpo de prova, assim como no ensaio experimental e em comparação com a literatura. Devido a uniformidade de tensões devido ao modelo ter sido simulado no regime linear elástico, logo não houve a necessidade de utilizar um nó específico para comparação com a curva obtida experimentalmente. Os valores da tensão principal (componente 11), ou seja, na direção do carregamento axial, obtiveram 1,71%; 21,83%; 12,79%; 39,79% e 7,69% para angulações de fibra de 0°, 30°, 45°, 60° e 90°, respectivamente. As diferenças mais acentuadas ocorreram nos ângulos de 30° e 60° devido ao modelo numérico de laminado adotado no presente estudo não representar exatamente um compósito laminado híbrido, pois neste modelo numérico existe apenas uma camada de compósito no qual a fibra de carbono está em uma determinada direção e as propriedades mecânicas da fibra de vidro estão

inseridas na direção perpendicular à fibra de carbono, caracterizando um tecido unidirecional e no caso das amostras obtidas experimentalmente, há fibra de carbono em uma determinada direção e fibra de vidro em direção perpendicular à fibra de carbono, ou seja, tecido bidirecional.

As simulações dos modelos com presença de furo central apresentaram um excelente comportamento mecânico, onde houve uma elevação de tensões na região do furo e redistribuição de tensões ao longo da amostra, assim como no procedimento experimental e na literatura. Na região do furo dos modelos, houveram também uma região de tensões compressivas, característica encontrada em compósitos. Os valores da tensão principal (componente 11) foram analisadas através da tensão que ocorre no nó 1868 localizado na extremidade onde há a redistribuição das tensões, devido ser o um nó localizado em uma região mais afastada o possível do furo, ou seja, ponto onde há uma melhor redistribuição das tensões ao longo do modelo para comparar com a curva de tensão média obtida para a amostra ensaiada experimentalmente. Foram obtidas diferenças de 19,69%; 10,94%; 17,12%; 15,51% e 116,10% para angulações de fibra de 0°, 30°, 45°, 60° e 90°, respectivamente. A maior diferença ocorreu em fibras com ângulo de 90° devido as fibras não resistirem ao carregamento de forma adequada nesta configuração, pois o modelo numérico de laminado adotado no presente estudo se caracteriza por ser um tecido unidirecional e as amostras experimentais são compostas por tecido bidirecional.



Figuras 5(a) e 5(b). Simulação dos modelos com descontinuidade para tensão principal (componente 11), nas angulações de fibras a 0° e 45°, respectivamente

4 Conclusões

As simulações do modelo numérico representaram de forma satisfatória o comportamento mecânico do material compósito híbrido com fibra de carbono e vidro em modelos sem descontinuidade. Nos modelos com

descontinuidade, houveram tensões mais elevadas na região próxima ao furo, caracterizando bem o efeito causado pelo concentrador de tensões e uma região de tensões compressivas também em regiões próximas ao furo, característica encontrada em materiais compósitos ensaiado experimentalmente, desta forma garantindo boa representatividade para estes modelos também.

Na análise dos modelos simulados sem descontinuidade, observou-se que, nos materiais produzidos com fibras na direção preferencial 0° e 90° obtiveram menores diferenças entre o valor de tensão obtida experimentalmente e numericamente do que os materiais que possuíam fibras orientada em ângulos 30° , 45° e 60° .

No estudo das amostras com furo central, verificou-se que, nos materiais produzidos com fibras na direção de 90° obtiveram uma diferença entre o valor de tensão experimental e numérica maior que nos materiais que possuíam fibras orientada em ângulo à 0° , 30° , 45° e 60° , diferença essa na qual pode ser explicada pelo motivo da fibra nesta configuração não apresentar resistência mecânica na direção onde o material está sendo tracionado no modelo numérico (apenas resistência da propriedade mecânica nesta direção e não resistência da fibra), já no modelo experimental o compósito é do tipo tecido bidirecional e apresentam fibras de vidro alinhadas ao carregamento nesta configuração.

Nos modelos produzidos na simulação numérica sem furo central com fibras de carbono configuradas a 30° , 45° e 60° apresentaram distorções durante o ensaio, devido fenômeno provocado pelo não alinhamento das fibras em relação ao carregamento. Nos ensaios numéricos de corpos de prova com descontinuidade com fibra a 30° , 45° e 60° , este fenômeno é mais notável na região próxima ao furo.

Outro aspecto importante a ser observado para tal diferença entre modelos ensaios experimentalmente e numericamente, se dá pelo modelo numérico ter sido realizado com uma única camada de material, isto é, simulando um tecido unidirecional, pelo qual as propriedades mecânicas foram atribuídas nas três direções do plano x, y e z, por ser um material ortotrópico e os corpos de prova do ensaio experimental foram confeccionados com fibras de carbono orientados de forma perpendicular à fibra de vidro, isto é, em forma de tecido bidirecional.

Agradecimentos. Os autores são gratos ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela bolsa de estudo, modalidade mestrado (GM), processo número 155767/2019-4. O primeiro autor também é grato ao PPGEM (programa de pós-graduação em engenharia mecânica) pela realização deste trabalho.

Direitos autorais. Direitos autorais reservados à Everton Carneiro da Silva, Avelino Manuel da Silva Dias e Raimundo Carlos Silvério Freire Júnior.

Referências

- [1] F.M. Souza. Estudo da descontinuidade geométrica em lâmina de tecido híbrido bidirecional vidro/carbono. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2017.
- [2] P.T.R. Mendonça. *Materiais Compostos e Estruturas Sanduiche: Projeto e Análise*. Barueri/SP: Ed. Monolo, 1ª Ed., 2015.
- [3] J. F. Shackelford. *Introdução à ciência dos materiais para engenheiros*. 6ª Ed. SP: Pearson Prent. Hall, 2008. *International Journal of Materials Engineering*, vol. 2, pp. 61-66, 2012.
- [4] J.D.D. Melo; J. Bi and S.W. Tsai, “A novel invariant-based design approach to carbon fiber reinforced laminates”. *Composite Structures*, vol. 159, pp. 44–42, 2017.
- [5] S.D. Müzel; E.P. Bonhin; N.M. Guimarães and E.S. Guidi, “Application of the Finite Element Method in the Analysis of Composite Materials: A Review”. *Polymers*, vol. 12, pp. 1–59, 2020.
- [6] R.D. Cook, “Finite Element Modeling for Stress Analysis”. *JohnWiley & Sons*, vol. 1, 1995.
- [7] L.T. Tenek and J. Argyris, “Finite Element Analysis for Composite Structures. In Solid Mechanics and Its Applications”. *Springer*, vol. 59, 1998.
- [8] C.R. Dandekar and Y.C. Shin, “Modeling of machining of composite materials: A review”. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 57, pp. 102–121, 2012.
- [9] A. L. Christóforo; M. E. Silveira; A.M.S. Dias; V.A. Araújo and F.A.R. Lahr, “Numerical Study of Finite Fracture Growth in an Epoxy Resin”. *International Journal of Materials Engineering*, vol. 6, pp. 15-21, 2016.
- [10] E. E. Medeiros; A. M. S. Dias and A. L. Christóforo, “Numerical Simulation of Mechanical Fracture Testing”.
- [11] ASTM D 3039-08. “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials”. Philadelphia, 2008.
- [12] ASTM D 5766-02. “Standard Test Method for Open-Hole Tensile Strenght of Polymer Matrix Composite Laminates”. Philadelphia, 2002.
- [13] MCS.MARC. “Volume A: Theory and User Information”. User’s Manual, 2017.
- [14] V.B.O. Campos, Análise de critérios de falha em lâmina reforçada com tecido híbrido de fibra de vidro e carbono. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2017.