

Propriedades elásticas de polímeros reforçados por fibras de vidro pelo método de homogeneização numérica e elementos finitos: um estudo comparativo

Elastic properties of glass fiber reinforced polymers by numerical homogenization and finite elements method: a comparative study

DOI:10.34117/bjdv7n6-471

Recebimento dos originais: 07/05/2021

Aceitação para publicação: 21/06/2021

César Tadeu Nasser Medeiros Branco

Mestre em engenharia mecânica e doutorando pela UFSC

Instituição: Universidade Federal de Santa Catarina

Endereço: R. Eng. Agrônomo Andrei Cristian Ferreira, s/n. Florianópolis-SC

E-mail: engmbcesar@gmail.com

Jullyane Milena Silva de Figueiredo

Mestranda em engenharia mecânica pela UFSC

Instituição: Universidade Federal de Santa Catarina

Endereço: R. Eng. Agrônomo Andrei Cristian Ferreira, s/n. Florianópolis-SC

E-mail: jullyane.figueiredo17@gmail.com

Roberto Tetsuo Fujiyama

Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Instituição: Universidade Federal do Pará

Endereço: Rua Augusto Corrêa, n° 01. Belém-PA

E-mail: fujiyama.ufpa@gmail.com

RESUMO

Predição de propriedades elásticas de materiais compósitos reforçados por fibras unidirecionais já vem sendo estudada há muito tempo. Entretanto, com o advento de fibras naturais aplicados em compósitos, as análises ainda são recentes por conta da irregularidade da seção transversal das fibras naturais. O presente trabalho apresenta uma comparação dos resultados das propriedades elásticas de fibras com seção circular e hexagonal, visando analisar o comportamento das tensões em um elemento de volume representativo (EVR) para fibras com geometrias não circulares, como é o caso das fibras naturais. Este trabalho é apresentado em duas etapas. A primeira analisa as propriedades elásticas de um compósito de fibras de vidro e uma matriz de epóxi considerando o compósito como um elemento de volume representativo, sendo a fibra de vidro de seção transversal circular e hexagonal. O elemento de volume representativo apresenta dimensões microscópicas, tanto a matriz quanto o filamento da fibra de vidro. As fibras de vidro e a matriz epóxi foram consideradas como materiais homogêneos e isotrópicos e com módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson definidos pela literatura. As propriedades elásticas foram calculadas de forma analítica pelo método de homogeneização numérica. Na segunda etapa deste trabalho é feita uma investigação por meio da análise de elementos finitos. Deste modo, foi criado um elemento com fibras

circulares e hexagonais. A finalidade do trabalho ao simular uma fibra hexagonal foi estudar as propriedades elásticas em programas computacionais para fibras que não possuem uma seção perfeitamente circular, como as fibras naturais. Os resultados das análises de elementos finitos, tanto para a fibra circular quanto para a fibra hexagonal, concordaram com os resultados analíticos. Porém, um erro de 10% foi encontrado no módulo de cisalhamento longitudinal.

Palavras-chave: micromecânica, módulo de elasticidade, elemento de volume representativo, elementos finitos.

ABSTRACT

Prediction of elastic properties of composite materials reinforced by unidirectional fibers has been studied for a long time. However, with the advent of natural fibers applied in composites, the analyzes are still recent due to the irregularity of the cross section of natural fibers. The present work presents a comparison of the results of the elastic properties of fibers with circular and hexagonal section, aiming to analyze the stress behavior in a representative volume element (EVR) for fibers with non-circular geometries, as is the case of natural fibers. This work is presented in two stages. The first analyze the elastic properties of a composite of glass fibers and an epoxy matrix considering the composite as a representative volume element, being glass fiber with circular and hexagonal cross section. The representative volume element has microscopic dimensions, both the matrix and the fiberglass filament. The glass fibers and the epoxy matrix were evaluated as homogeneous and isotropic materials with modulus of elasticity and Poisson's coefficient defined at the literature. The elastic properties were calculated analytically using the numerical homogenization method. In the second stage of this work, an investigation is carried out through finite element analysis. In this way an element with circular and hexagonal fibers was created. The purpose of the work when simulating a hexagonal fiber was to study the elastic properties in computer programs for fibers that do not have a perfectly circular section, such as natural fibers. The results of finite element analysis, both for circular fiber and for hexagonal fiber, agreed with the analytical results. However, a 10% error was found in the longitudinal shear modulus.

Keywords: Micromechanics, elastic modulus, representative volume element, finite elements.

1 INTRODUÇÃO

Os compósitos são definidos como materiais heterogêneos e multifásicos. Conforme Freire et al (1994), os compósitos são distintos tanto em escala microscópica quanto na escala macroscópica. Eles também são multifásicos, onde um dos componentes descontínuos (fibra) confere a principal resistência ao esforço e o outro, contínuo (matriz), o meio de transferência desse esforço.

Segundo Gibson (2016), os materiais estruturais podem ser divididos em quatro categorias básicas: metais, polímeros, cerâmicos e compósitos. Com propósito à utilização de novos materiais para aplicação em indústrias como: automotiva, naval e

aeroespacial, surge a necessidade de se analisar as tensões entre a fibra e a matriz em um compósito reforçado por fibras sintéticas, para que o material formado resista às solicitações mecânicas as quais eles são submetidos.

Conforme Barbero (2014), o estudo da mecânica de um compósito reforçado por fibras é bastante complexo em função de sua característica anisotrópica e heterogênea. A análise de tensões desses materiais pode ser feita a nível microscópico, a nível laminar e à nível do laminado.

Estudos a nível da lâmina ou até mesmo do laminado, já foram desenvolvidos em aplicações estruturais em componentes veiculares para fibras unidirecionais (BRANCO, 2017a; BRANCO, 2017b). Nesse caso, o material compósito ou laminado foi considerado como um material homogêneo com propriedades elásticas variantes nos planos de orientação do reforço.

Quando é necessário um grande nível de detalhe, a deformação e a tensão são calculadas ao nível do constituinte, isto é, fibra e matriz. Neste caso, é necessário descrever a microestrutura, incluindo a forma da fibra e a distribuição geométrica, e as propriedades dos materiais dos constituintes.

Embora já tenham sido feitos grandes trabalhos sobre compósitos poliméricos reforçados com fibras com seção circular e com fibras de vidro como reforço, o presente trabalho apresenta uma comparação dos resultados das propriedades elásticas de fibras com seção circular e hexagonal, visando analisar o comportamento das tensões em um elemento de volume representativo (EVR) para fibras com geometrias não circulares, como é o caso das fibras naturais.

Para este fim, o presente trabalho desenvolve um EVR micromecânico tridimensional com geometria da fibra de seção hexagonal e circular dispersos em uma ordem hexagonal dentro da matriz. A técnica de homogeneização numérica, baseada na análise de elementos finitos, foi utilizada para avaliar as propriedades elásticas do elemento, como módulo de elasticidade, Poisson e módulo de cisalhamento. Os resultados dos elementos finitos são comparados com os métodos de homogeneização analíticas. O objetivo é demonstrar a aplicabilidade da técnica de homogeneização usando o método de elementos finitos para estimar as características mecânicas do material.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

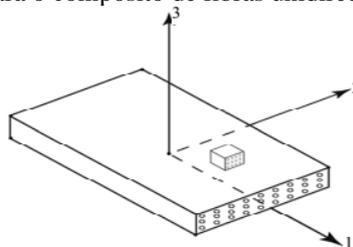
2.1 TIPO DO ELEMENTO

O elemento utilizado na análise de elementos finitos foi o SOLID186, que é um elemento sólido tridimensional com 20 nós de ordem superior que exibe comportamento de deslocamento quadrático, de acordo com a biblioteca de elementos do ANSYS 17.2 Academic®. Ele apresenta três graus de liberdade por nó: translações nas direções x (UX), y (UY) e z (UZ). O sólido estrutural homogêneo é bem adequado para modelar malhas irregulares, como as produzidas por vários sistemas CAD/CAM. O elemento pode ter qualquer orientação espacial.

2.2 MATERIAL COMPÓSITO REFORÇADO POR FIBRAS CONTÍNUAS E ALINHADAS

No compósito laminado de fibras unidirecionais, as fibras contínuas e a matriz são orientadas nas direções desejadas e ligadas entre si para formar um laminado, conforme a Fig. (1). Embora o laminado de fibras contínuas seja amplamente utilizado, o potencial de delaminação, ou separação das lâminas, é ainda um grande problema porque a força interlaminar é dominada pela matriz.

Figura 1. Disposição das fibras para o compósito de fibras unidirecionais. (Pal e Haseebuddin, 2015).



2.3 MATERIAL TRANSVERSALMENTE ISOTRÓPICO

Esse tipo de material apresenta um eixo de simetria. Como nos compósitos reforçados por fibras unidirecionais, pode ser considerado um eixo de simetria se as fibras estiverem dispostas aleatoriamente no sentido de corte da seção transversal. Qualquer plano contendo a direção da fibra é considerado como um plano de simetria.

Um material transversalmente isotrópico é descrito por cinco constantes. Para uma análise com fibras unidirecionais, conforme ilustrado na Fig. (1), as equações para uma análise tridimensional da Lei de Hooke se reduzem à Eq. (1). Para encontrar a matriz de compliance, é necessário inverter a matriz de rigidez [C].

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & (C_{22} - C_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Em termos de constantes de engenharia, como módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν) e módulo de cisalhamento (G), e levando em consideração que as direções 2 e 3 são indistinguíveis, as seguintes relações se aplicam para esse tipo de material conforme a Eq. (2). Também, outras duas direções perpendiculares no plano 2-3 podem ser consideradas como eixo, ou seja, o plano 2-3 é isotrópico. Dessa forma, pode-se encontrar o valor do módulo do cisalhamento no plano 2-3 conforme a Eq. (3).

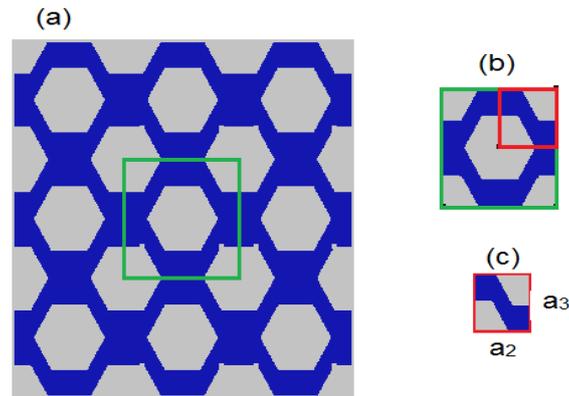
$$E_2 = E_3; \nu_{12} = \nu_{13}; G_{12} = G_{13} \quad (2)$$

$$G_{23} = \frac{E_2}{2(1 + \nu_{23})} \quad (3)$$

2.4 ELEMENTO DE VOLUME REPRESENTATIVO (EVR)

A primeira aproximação para a determinação das propriedades elásticas denomina-se elemento de volume representativo (EVR). O EVR consiste em elementos cúbicos ou quadrados que são usados em aproximações numéricas por conta da facilidade em resolver problemas de contorno com essas geometrias, como ilustrado na Fig. (2a). Por questões de simetria, o EVR pode ser simplificado para um elemento menor como visto na Fig. (2b) e Fig. (2c). Neste trabalho as simulações são realizadas conforme a Fig. (2c).

Figura 2. (a) Elemento de volume representativo, (b) uma parte do EVR e (c) simetria do elemento.



Para cada EVR há uma fração volumétrica de fibras (V_F). Essa fração é útil para a inserção desse valor durante os cálculos analíticos e para o desenho da geometria circular e hexagonal. A Eq. (4), mostra a fração volumétrica para o elemento de volume representativo com fibras circulares (V_{F_c}).

$$V_{F_c} = \frac{\pi R_c^2}{2a_2 a_3} \quad (4)$$

Por questões de comparação da geometria da fibra com seção circular, um outro elemento de volume representativo foi desenhado com fibras de seção hexagonais, conforme a Fig. (2a). Afim de manter a mesma fração volumétrica que as fibras com seção circular, foi necessário determinar o raio equivalente entre o raio do círculo (R_c) e o raio da seção hexagonal (R_6). Em termos práticos, o raio da seção hexagonal é dado conforme a Eq. (5) que é obtida pela igualdade entre a área de um círculo e de um hexágono.

$$R_6 = 1,0996R_c$$

2.5 MODELO DE UMA MICROESTRUTURA PERIÓDICA

Segundo Barbero (2014), a determinação analítica das propriedades elásticas do material compósito, conforme o método de homogeneização numérica, requer uma série de cálculos. Partindo da Eq. (1), que trata da matriz de rigidez, é necessário determinar

cada valor de C dentro da matriz. Os valores da matriz de rigidez podem ser determinados pelo bloco de Eq. (6).

$$\begin{aligned}
 C_{11} &= \lambda_m + 2\mu_m - \frac{VF}{D} \left(\frac{S_3^2}{\mu_m^2} - \frac{2S_6S_3}{\mu_m^2g} - \frac{aS_3}{\mu_m^2c} + \frac{S_6^2 - S_7^2}{\mu_m^2g^2} + \frac{aS_6 + bS_7}{\mu_mgc} + \frac{a^2 - b^2}{4c^2} \right) \\
 C_{12} &= \lambda_m + \frac{VF}{D} b \left(\frac{S_3}{2\mu_m c} + \frac{S_6 - S_7}{2\mu_m cg} + \frac{a + b}{4c^2} \right) \\
 C_{23} &= \lambda_m + \frac{VF}{D} \left(\frac{aS_7}{2\mu_m gc} - \frac{ba + b^2}{4c^2} \right) \\
 C_{22} &= \lambda_m + 2\mu_m - \frac{VF}{D} \left(-\frac{aS_3}{2\mu_m c} + \frac{aS_6}{2\mu_m gc} + \frac{a^2 - b^2}{4c^2} \right) \\
 C_{44} &= \mu_m - VF \left[-\frac{2S_3}{\mu_m} + (\mu_m - \mu_f) \right] + \frac{4S_7}{\mu_m(2 - 2\nu_m)} \\
 C_{66} &= \mu_m - VF \left[-\frac{S_3}{\mu_m} + (\mu_m - \mu_f) \right] \tag{6}
 \end{aligned}$$

2.6 HOMOGENEIZAÇÃO NUMÉRICA

Como mostrado na Figura (2a), o material compósito considerado nessa seção tem fibras de seção circulares com comprimento infinito, imersos em uma matriz elástica. Em função da periodicidade, o EVR tridimensional pode ser simulado por meio de uma análise de elementos finitos.

A análise dessa microestrutura produz diretamente um tensor de rigidez isotrópico transversal, representado pela Eq. (1), mas agora na Eq. (10) apresenta um traço sobre a constante, indicando a tensão e deformação média calculada no volume do elemento.

$$\begin{Bmatrix} \bar{\sigma}_1 \\ \bar{\sigma}_2 \\ \bar{\sigma}_3 \\ \bar{\sigma}_4 \\ \bar{\sigma}_5 \\ \bar{\sigma}_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (C_{22} - C_{23})/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{\epsilon}_1 \\ \bar{\epsilon}_2 \\ \bar{\epsilon}_3 \\ \bar{\gamma}_4 \\ \bar{\gamma}_5 \\ \bar{\gamma}_6 \end{Bmatrix} \tag{10}$$

Uma vez que os componentes do tensor transversal isotrópico são conhecidos, as cinco propriedades elásticas do material homogeneizado podem ser calculadas conforme o bloco de Eq. (11).

$$\begin{aligned}
 E_1 &= C_{11} - \frac{2C_{12}^2}{C_{22} + C_{23}} \\
 E_2 &= \frac{(2C_{11}C_{22} + 2C_{11}C_{23} - 4C_{12}^2)(C_{22} - C_{23} + 2C_{44})}{3C_{11}C_{22} + C_{11}C_{23} + 2C_{11}C_{44} - 4C_{12}^2} \\
 G_{12} &= G_{13} = C_{66} \\
 \nu_{12} &= \nu_{13} = \frac{C_{12}}{C_{22} + C_{23}} \\
 \nu_{23} &= \frac{C_{11}C_{22} + 3C_{11}C_{23} - 2C_{11}C_{44} - 4C_{12}^2}{3C_{11}C_{22} + C_{11}C_{23} + 2C_{11}C_{44} - 4C_{12}^2}
 \end{aligned} \tag{11}$$

Segundo Pal e Haseebuddin (2015), a lâmina do material compósito é modelada como um meio homogêneo ortotrópico com módulos efetivos que descrevem as propriedades médias dos compósitos. Para descrever este meio macroscopicamente homogêneo, macro-tensões e macro-deformações são encontrados pela média do tensor de tensão e de deformação sobre o volume do EVR. As tensões e deformações médias são determinadas conforme a Eq. (12) e Eq. (13).

$$\bar{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{V} \int_V \epsilon_{ij} dV \tag{12}$$

$$C_{\alpha\beta} = \bar{\sigma}_\alpha = \frac{1}{V} \int_V \sigma_\alpha(x_1, x_2, x_3) dV; \text{ onde } \alpha, \beta = 1 \dots 6 \tag{13}$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS PARA A SIMULAÇÃO

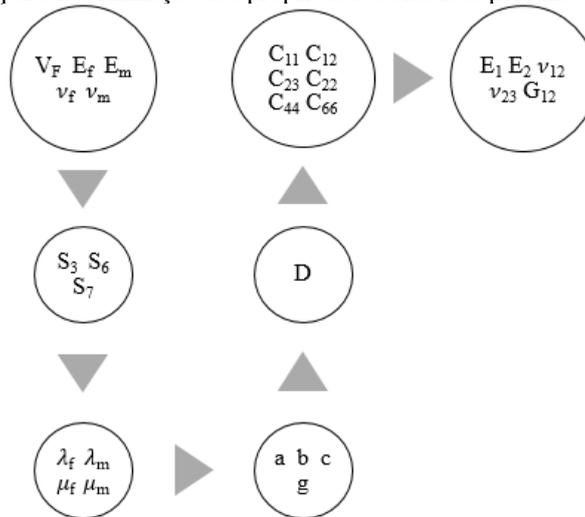
Foram utilizados dois materiais para a simulação: a matriz de epóxi e a fibra de vidro. A matriz de epóxi possui 3,45GPa de módulo de elasticidade, enquanto que a fibra de vidro possui 73,1GPa. Outra propriedade elástica útil para as simulações, é o coeficiente de Poisson que apresenta os valores de 0,35 e 0,22 para a matriz de epóxi e para a fibra de vidro, respectivamente.

Cada constituinte é inserido separadamente em cada elemento do EVR. O EVR tem dimensões de 3x2x1 (altura x largura x espessura). O elemento tem dimensões de $a_2=2$ mm, $a_3=3$ mm e $a_1=1$ mm enquanto que a fibra circular tem um raio de 1,00mm e a fibra hexagonal tem raio de 1,21mm. A diferença entre os raios justifica a mesma fração volumétrica, com valor de 26%, para ambos os elementos.

3.2 MÉTODOS PARA OS CÁLCULOS ANALÍTICOS

Um fluxograma foi desenvolvido para melhor explicação do procedimento para a determinação das propriedades elásticas do compósito de uma maneira analítica, conforme a Fig. (3).

Figura 1. Fluxograma para determinação das propriedades elásticas pelo método da homogeneização.



3.3 CONDIÇÕES DE CONTORNO PARA A ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS (AEF)

Para o início da simulação, foi necessário aplicar as restrições quanto ao deslocamento. Ao todo, foram realizadas três simulações, analisando os deslocamentos nos três eixos. A Fig. (4) apresenta o elemento de volume representativo no eixo tridimensional. Dessa forma, o bloco de Eq. (14) aplica um deslocamento de a_1 na face frontal do EVR, engastando o elemento na face oposta.

$$\begin{aligned}
 u_1(0, x_2, x_3) &= 0 \\
 u_1(a_1, x_2, x_3) &= a_1 \\
 u_2(x_1, 0, x_3) &= 0 \\
 u_2(x_1, a_2, x_3) &= 0 \\
 u_3(x_1, x_2, a_3) &= 0 \\
 u_3(x_1, x_2, 0) &= 0
 \end{aligned} \tag{14}$$

u_1 A segunda etapa da simulação consiste em determinar os deslocamentos na face lateral do elemento de volume representativo. As condições de contorno são dadas conforme a Eq. (15).

$$\begin{aligned}
 u_1(a_1, x_2, x_3) &= 0 \\
 u_1(0, x_2, x_3) &= 0 \\
 u_2(x_1, a_2, x_3) &= a_2 \\
 u_2(x_1, 0, x_3) &= 0 \\
 u_3(x_1, x_2, a_3) &= 0 \\
 u_3(x_1, x_2, 0) &= 0
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

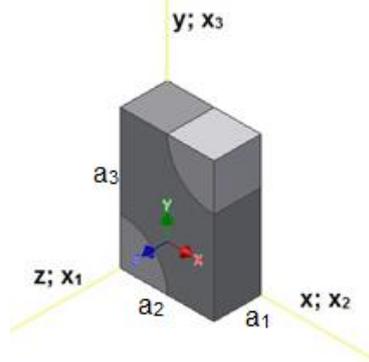
A terceira e última etapa da simulação consiste na determinação dos deslocamentos da face superior do elemento de volume representativo, conforme a Fig. (4). As condições de contorno são dadas segundo a Eq. (16).

$$\begin{aligned}
 u_1(a_1, x_2, x_3) &= 0 \\
 u_1(0, x_2, x_3) &= 0 \\
 u_2(x_1, a_2, x_3) &= 0 \\
 u_2(x_1, 0, x_3) &= 0 \\
 u_3(x_1, x_2, a_3) &= a_3 \\
 u_3(x_1, x_2, 0) &= 0
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

A Eq. (17) mostra o domínio da geometria no espaço tridimensional, bem como o domínio das condições de contorno de acordo com as dimensões do elemento de volume representativo.

$$\begin{aligned}
 0 &\leq x_1 \leq a_1 \\
 0 &\leq x_2 \leq a_2 \\
 0 &\leq x_3 \leq a_3
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

Figura 2. Geometria homogênea estrutural do sólido SOLID186.



3.4 MÉTODOS PARA A ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS (AEF)

A AEF foi determinada conforme os procedimentos explicitados na seção 2.6 sobre homogeneização numérica. O elemento de volume representativo foi simulado sob três

condições de deslocamento, em conformidade com as condições de contorno da seção anterior. Todas as tensões normais e de cisalhamento representam parte das tensões médias da integral da Eq. (13), ou seja, o elemento foi simulado sob um estado triaxial de tensão. As tensões, tanto no sentido axial quanto no plano, nos sentidos de x, y e z, foram multiplicadas pelo volume do elemento. Por fim, as tensões foram integradas ao longo de todo o volume do elemento e depois dividido pelo volume total do EVR.

Cada valor dentro da matriz de rigidez C é calculado de acordo com cada subscrito do componente na matriz quando inseridos nos valores de α e β da Eq. (13), assim os resultados das propriedades elásticas são calculados pela Eq. (11).

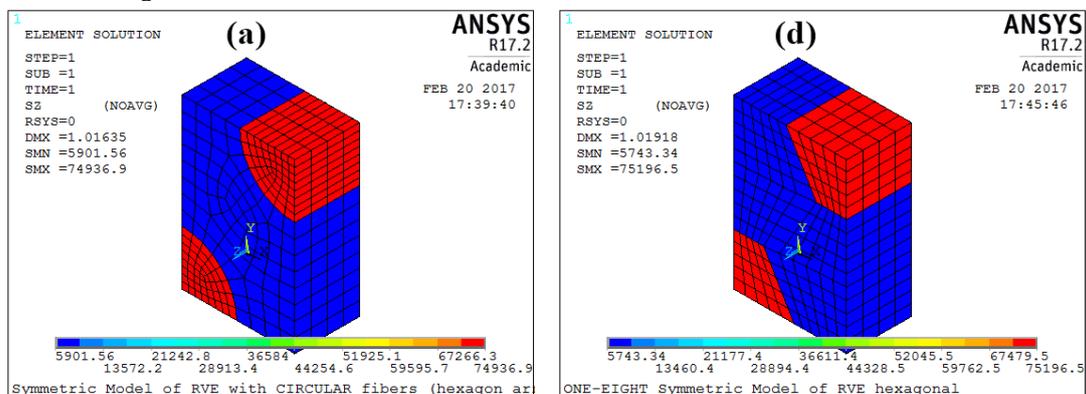
3.5 DISCRETIZAÇÃO DA MALHA

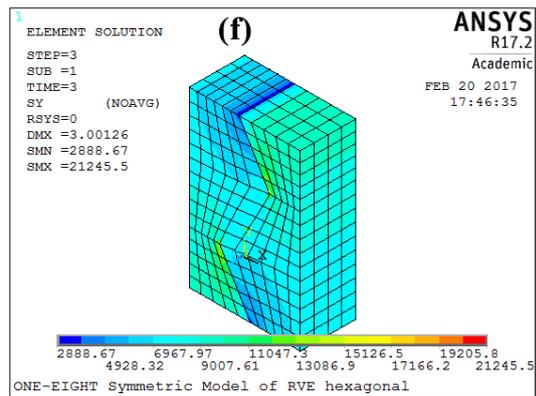
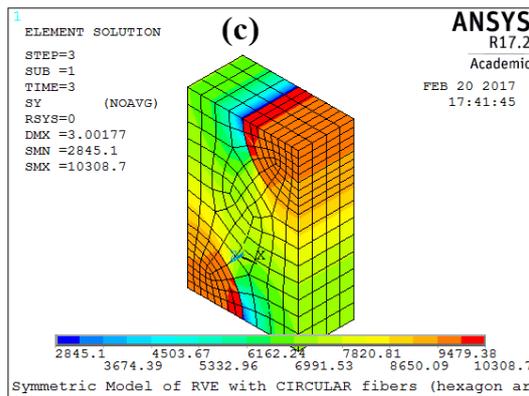
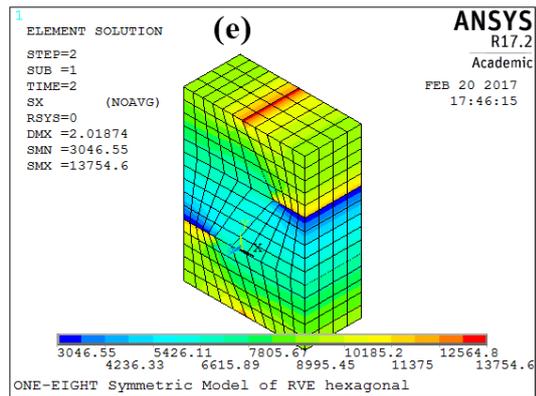
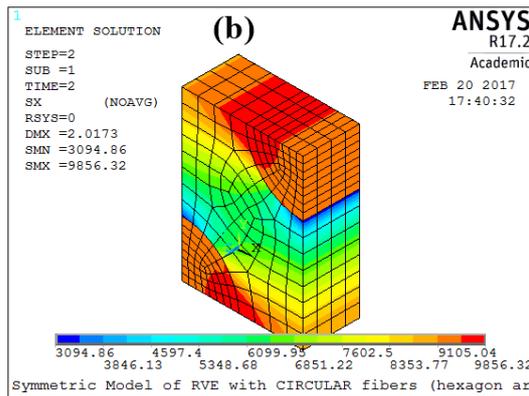
A malha foi gerada automaticamente pelo programa APDL ANSYS® R17.2 Academic, com 4 divisões no sentido da espessura do elemento. A fibra circular foi dividida em 8 partes e a matriz em 3 e 6 partes, no sentido de x e y, respectivamente. A fibra hexagonal foi dividida em 5 partes e a matriz em 6 e 10 partes, no sentido de x e y, respectivamente. Para o EVR com fibras circulares, foram encontrados 3205 nós e 704 elementos, enquanto que para o elemento de fibras hexagonais, foram encontrados 3508 nós e 660 elementos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Fig. (5), mostra os resultados das tensões normais encontradas no elemento de volume representativo atuantes nos três sentidos do compósito.

Figura 3. Tensões normais nos elementos simulados em MPa: (a), (b) e (c) para fibra circular e (d), (e) e (f) para fibra hexagonal.





A princípio, as tensões das fibras de seção hexagonal são superiores às fibras de seção circular, isso porque na fibra hexagonal há um ponto de concentração de tensão formado ao lado da geometria. As Figs. (5b) e (5e) mostram que as tensões são maiores na interface das fibras com a matriz na direção de x, diferente do que é mostrado na Fig. (5c), onde, na interface, a tensão assume um valor máximo e mínimo entre a fibra e a matriz, quando o deslocamento é na direção de y.

A Tab. (1), mostra os resultados das constantes usadas para a determinação das propriedades elásticas pelo método analítico, como: módulo de elasticidade transversal e longitudinal, coeficiente de Poisson e módulo de cisalhamento. Cada constante foi calculada em uma planilha de dados.

Tabela 1. Constantes para os resultados analíticos.

S_3	0,366606	μ_m	1277,778	C_{11}	23975,68
S_6	0,310706	a	8272,149	C_{12}	3700,117
S_7	0,05575	b	1726,851	C_{23}	3833,009
λ_f	23539,23	c	-2,9E+08	C_{22}	8127,996
λ_m	2981,481	g	1,3	C_{44}	1830,164
μ_f	29259,02	D	-1,6E-13	C_{66}	2091,849

A Tab. (2) mostra os resultados analíticos em relação aos resultados decorrentes da simulação de elementos finitos aplicados às tensões médias da Eq. (10) e Eq. (11), bem como os erros entre os resultados, tanto para o EVR com fibras circulares e hexagonais.

Tabela 2. Resultados analíticos da homogeneização e análise de elementos finitos.

Propriedades elásticas	Resultados analíticos	Resultados da AEF - fibra circular	Erro	Resultados da AEF - fibra hexagonal	Erro
Módulo de elasticidade longitudinal - E_1	21686,4 MPa	21700,8 MPa	0%	21700,38MPa	0%
Módulo de elasticidade transversal - E_2	5816,7 MPa	5598,7MPa	4%	5635,9MPa	3%
Coefficiente de Poisson - ν_{12}	0,309	0,309	0%	0,309	0%
Coefficiente de Poisson - ν_{23}	0,462	0,480	4%	0,478	3%
Mód.de cisalhamento longitudinal - G_{12}	2091,8 MPa	1891,1 MPa	10%	1906,18 MPa	9%

Como observado na Tab. (3), os resultados da análise de elementos finitos para a fibra circular são bem próximos em relação aos resultados analíticos, determinados pelo método da homogeneização numérica. Constata-se que os valores do módulo de elasticidade longitudinal e o coeficiente de Poisson no plano longitudinal, apresentam erros de aproximadamente 0%. Para o módulo de elasticidade transversal e coeficiente de Poisson no plano transversal, a diferença entre os resultados foi de 4%. Ademais, foi encontrado um erro de 10% para o módulo de cisalhamento longitudinal.

Para as fibras hexagonais, foram encontrados erros menores. Os erros foram iguais para o módulo de elasticidade na direção longitudinal e para o coeficiente de Poisson (ν_{12}), tal qual os erros foram bem próximos para as outras constantes, com diferença de 1% entre os resultados das fibras circulares. O maior erro entre os resultados foi para o módulo de cisalhamento longitudinal, apresentando um valor de 9% em relação aos valores analíticos.

No trabalho de Sudheer *et al* (2015), os autores realizam uma análise numérica e analítica para a determinação das propriedades elásticas, por meio da regra das misturas simples e inversa, e por meio de análise de modelos semi-empíricos. No mesmo trabalho, o autor analisa o módulo de cisalhamento a um ângulo de 45° do elemento de volume representativo imerso em uma matriz externa. Os resultados da análise numérica para o módulo de cisalhamento divergiram drasticamente dos resultados analíticos. Nos

trabalhos de Devireddy e Biswas (2014) e Pal e Haseebuddin (2015), os autores analisaram as propriedades elásticas pelo método da homogeneização numérica, e por esse método os resultados das simulações apresentam-se aproximados aos resultados apresentados pelos modelos analíticos.

5 CONCLUSÕES

A célula unitária, ou elemento de volume representativo tridimensional reforçado por fibras unidirecionais e com um empacotamento em forma de hexágono, foi identificada como um bloco de construção básico para determinar as propriedades mecânicas gerais do compósito e estimar as propriedades elásticas. A forma do empacotamento é utilizada por outros autores como Sudheer *et al* (2015) e Pal e Haseebuddin (2015), pois aproximam a disposição das fibras dentro da matriz.

A análise de elementos finitos forneceu um meio implícito de modelagem de compósitos poliméricos, contribuindo para uma maior visualização das distribuições das tensões entre a fibra e a matriz, para um estado triaxial de tensão. Foram desenvolvidas metodologias de homogeneização numérica para a avaliação das propriedades elásticas do material compósito e os resultados das simulações mostraram-se apropriados aos valores numéricos.

A análise das propriedades elásticas do compósito com fibras de vidro com seção hexagonal, representa uma aproximação do que seria uma análise microscópica de um compósito reforçado por fibras naturais. Embora as fibras naturais não apresentem propriedades isotrópicas, nem seção transversal regular, o trabalho fez uma aproximação para as propriedades dessas fibras naturais utilizando a fibra de vidro.

Portanto a variação da seção transversal da fibra pelo método de elementos finitos, não apresentam uma grande divergência com os resultados analíticos. Dessa forma pode-se usar tanto uma análise numérica quanto analítica para prever as propriedades elásticas de compósitos reforçados por fibras de vidro, restando apenas uma comparação teórica e experimental para verificar maiores diferenças nas abordagens.

REFERÊNCIAS

FREIRE, E.; MONTEIRO, E.; CYRINO, J. Propriedades Mecânicas de Compósitos de Polipropileno com Fibra de Vidro. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 4, n. 3, p. 25-32, 1994.

GIBSON, R. F. **Principles of composite material mechanics**. 4 ed. Boca Raton: Flórida, CRC Press - Taylor & Francis Group. 2016. ISBN-13: 978-1-4987-2072-4.

BARBERO, E. J. **Finite element analysis of composite materials using ANSYS®**. 2 ed. Boca Raton: Flórida, CRC Press - Taylor & Francis Group, 2014, 363.

BRANCO, C.; FIGUEIREDO, J.; VELOSO, M.; FUJIYAMA, R. **Computational Analysis From a Front Chassis Rail Made of Carbon/Epoxy Composite Material**. SAE Technical Paper 2017-36-0380. 2017a. <https://doi.org/10.4271/2017-36-0380>.

BRANCO, C.; FIGUEIREDO, J.; VELOSO, M.; FUJIYAMA, R. **Modelling a Rear Bumper of Goods Transport Vehicle Made of Glass Fiber Reinforced Polymer**. SAE Technical Paper 2017-36-0413, 2017b, <https://doi.org/10.4271/2017-36-0413>.

PAL, B.; HASEEBUDDIN, M. Analytical Estimation of Elastic Properties of Polypropylene Fiber Matrix Composite by Finite Element Analysis. **American Journal of Materials Science**, v. 2, p. 162-168. 2015

NEMAT-NASSER, S.; IWAKUMA, T.; HEJAZI, M. On composite with periodic structure, **Mechanics of Materials**, v. 1, p. 239-267. 1982.

DEVIREDDY, S.; BISWAS, S. Effect of Fiber Geometry and Representative Volume Element on Elastic and Thermal Properties of Unidirectional Fiber-Reinforced Composites. **Journal of Composites**, v. 2014, 12 p.

SUDHEER, M.; PRADYOTH, K. R.; SOMAYAJI, S. Analytical and Numerical Validation of Epoxy/Glass Structural Composites for Elastic Models. **American Journal of Materials Science**, v. 5, n. 3, p. 162-168, 2015.