

Modelagem numérica de espuma rígida de poliuretano com fibras de madeira

Numerical modeling of rigid polyurethane foam with wood fibers

RESUMO

Moiseis Kaluã Oliveira Lima
moiseiskalua@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil

Romeu Rony Cavalcante da Costa
romeu.rony@outlook.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil

Guilherme Pereira Bacil
guilhermepbacil@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil

Júlia Camargos Ferreira
juliacaquiar18@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil

O propósito desta pesquisa é encontrar um modelo computacional no software comercial ABAQUS que represente o comportamento mecânico de um ensaio de flexão da espuma rígida compósita de poliuretano derivada de óleos vegetais com fibras de madeira *Eucalyptus spp.* No software foi trabalhado o modelo *Crushable Foam With Volumetric Hardening* (CVH), onde pesquisas apontaram resultados significativos para materiais que possuem células fechadas, posteriormente foi realizado uma comparação com modelo isotrópico denominado *Elastic-Plastic*. Os resultados obtidos com o modelo CVH foram significativos, onde o comportamento da curva de tensão-deformação se mostrou semelhante ao real, sendo que a tensão máxima obtida foi de 0,88 MPa, próxima a real de 1,15 MPa, vindo a ter um erro relativo de 23%, se explicando devido a anisotropia do material e algumas limitações do modelo, porém superando o modelo *Elastic-Plastic* que obteve uma tensão máxima de 2,2 MPa.

PALAVRAS-CHAVE: Anisotropia. Biopolímeros. Métodos de simulação.

ABSTRACT

The purpose of this research is to find a computational model in the commercial software ABAQUS that represents the mechanical behavior of a flexural test of rigid polyurethane composite foam derived from vegetable oils with *Eucalyptus spp* wood fibers. The software used the Crushable Foam With Volumetric Hardening (CVH) model, where research showed significant results for materials that have closed cells, later a comparison was made with an isotropic model called Elastic-Plastic. The results obtained with the CVH model were significant, where the behavior of the stress-strain curve was similar to the real one, with the maximum stress obtained being 0,88 MPa, close to the real one of 1,15 MPa, a relative error of 23%, explained due to the anisotropy of the material and some limitations of the model, but surpassing the Elastic-Plastic model that obtained a maximum stress of 2.2 MPa.

KEYWORDS: Anisotropy. Biopolymers. Simulation methods.

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

A utilização de materiais compósitos biodegradáveis na engenharia vem se tornando cada vez mais comum e, portanto, torna-se muito importante adquirirmos novos materiais com propriedades mecânicas significativas para diferentes tipos de aplicação. Com o avanço da tecnologia os estudos dessas propriedades mecânicas dos materiais possibilitam a simulação computacional, as quais se tornaram de grande proveito para otimização do tempo e economia de recursos.

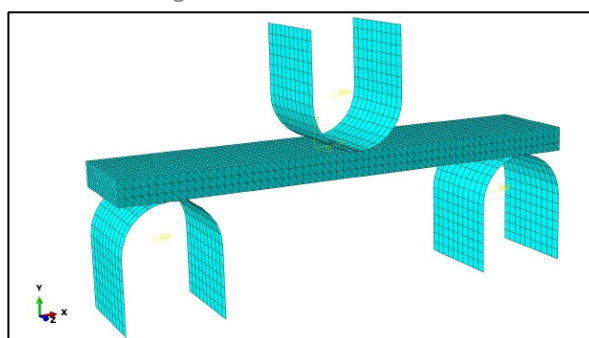
Ao passar dos anos foram criados diversos modelos com a finalidade de representar o comportamento de diversos materiais e com isso tornaram-se parte do pacote de simulação computacional de softwares comerciais existentes no mercado, porém se tratando de materiais específicos como espumas, podemos encontrar diversas barreiras que dificultam o processo de representar de maneira computacional tal comportamento. Com isso, o objetivo deste trabalho foi de definir um modelo computacional, dentro do pacote, que represente o comportamento da espuma rígida compósita de poliuretano derivada de óleos vegetais com fibras de madeira *Eucalyptus* e comparar com o ensaio experimental de flexão de 3 pontos no software comercial ABAQUS® utilizando os modelos contidos neste pacote denominado *Crushable Foam With Volumetric Hardening e Elastic-Plastic*.

MATERIAL E MÉTODOS

Nesse projeto de pesquisa, a modelagem e simulação foram realizados no software comercial ABAQUS®. O ABAQUS/CAE é um software de grande aplicação em diversas áreas da engenharia e conta com O ABAQUS/Standard e o ABAQUS/Explicit que simulam computacionalmente carregamentos estáticos e dinâmicos, respectivamente.

Inicialmente foi realizado uma modelagem usando o elemento C3D10M representando o corpo de prova feito de poliuretano derivado de óleos vegetais com fibra de madeira *Eucalyptus spp.* utilizados no ensaio de flexão de 3 pontos e como os spans possuem uma rigidez muito maior do que o corpo de prova feito de espuma rígida compósita de óleos vegetais reforçada com madeira e retardante de chama, foi utilizado o elemento R3D4, elemento de corpo rígido presente no pacote ABAQUS®. O Modelo CAE Figura 1, possui 100 × 21 × 5,2 mm.

Figura 1 – Modelo CAE



Fonte: Autoria própria (2020).

Com o objetivo de representar ao máximo o ensaio realizado, todos os corpos rígidos, ou seja, os apoios, foram restringidos os movimentos, e livre somente o atuador na direção vertical.

Para a simulação foi imposto um carregamento como deslocamento vertical do aplicador de carga. Nas regiões de contato entre modelo CAE e apoios, foi utilizado o algoritmo de contato presente no ABAQUS® e a área de contato podendo ser modelado automaticamente.

O material foi modelado como *Crushable Foam with Volumetric Hardening* presente no pacote ABAQUS®. Além disso:

O termo *Crushable* implica na deformação plástica permanente ou fratura de uma espuma comprimida. Poliestireno (PS), polipropileno (PP), polietileno (PE) e algumas espumas rígidas de PU se enquadram nesta categoria. O limite de elasticidade aparente dessas espumas de células fechadas aumenta com a deformação. Este mecanismo de endurecimento é devido à compressão do gás da célula, portanto está relacionado à deformação volumétrica imposta (Mills, 2007, p. 127.).

Para calibrar o modelo, (Rizov, 2006) mostra que é necessário entrar com a curva Tensão x Deformação do ensaio de flexão. Em seguida foi possível definir os parâmetros elásticos e plásticos do material através de pontos característicos ao longo da curva automaticamente, através da relação:

$$\sigma_v = \sigma_n(1 + \varepsilon_n), \quad (1)$$

$$\varepsilon_v = \ln(1 + \varepsilon_n), \quad (2)$$

$$\varepsilon_{vp} = \varepsilon_v - \frac{\sigma}{E}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{lv} = \ln(1 + \varepsilon_{vp}), \quad (4)$$

onde tem-se que (σ_v) é a tensão verdadeira, (σ_n) tensão nominal, (ε_n) deformação nominal, (ε_v) deformação verdadeira, (ε_{vp}) deformação plástica verdadeira, (E) modulo de elasticidade e (ε_{lv}) é a deformação plástica volumétrica logarítmica.

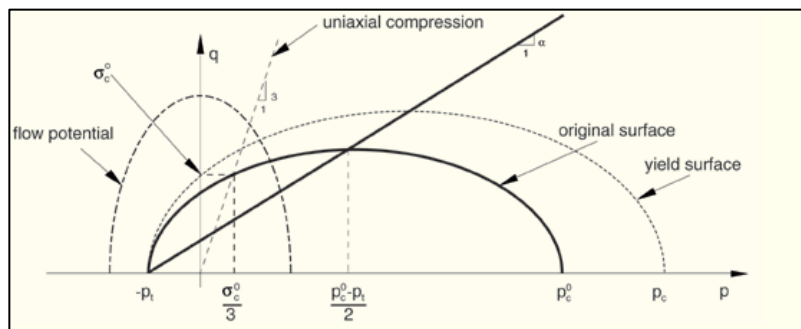
No software comercial ABAQUS® temos que:

Com base nos resultados experimentais, o software Abaqus®, contém modelos de materiais implementados para *Crushable Foams* baseados no trabalho de Deshpande e Fleck. Na verdade, um dos modelos é uma representação autêntica da versão simplificada do modelo de Deshpande e Fleck. Este modelo de material é conhecido como *Crushable Foam with Isotropic Hardening* (CIH). No entanto, existe também um outro, disponível dentro do Abaqus®, que é responsável pela resposta frágil na tensão e pela alta capacidade de energia de deformação das espumas em compressão. Este modelo de material é denominado *Crushable Foam With Volumetric Hardening* (CVH), (TITA, 2012).

O modelo *Crushable foam with volumetric hardening*, usa uma superfície de escoamento com uma dependência elíptica de tensões desviadoras. Pressupõe que a evolução da superfície de escoamento seja controlada pela tensão plástica de compactação volumétrica experimentada pelo material.

A superfície de escoamento Figura 2, representa o círculo de Mises no plano das tensões desviadoras e é uma elipse no plano de tensão meridional, a superfície de escoamento evolui seguindo o fator de forma (α).

Figura 2 – Superfície de escoamento (Volumetric Hardening)



Fonte: ABAQUS/CAE User's Manual.

O fator de forma pode ser computado utilizando a tensão de escoamento na compressão uniaxial (α_c^0), a tensão de escoamento inicial na compressão hidrostática (p_c^0) e a resistência ao escoamento na tensão hidrostática (p_t):

$$\alpha = \frac{3k}{\sqrt{(3k_t + k)(3 - k)}} \quad (5)$$

$$k = \frac{\alpha_c^0}{p_c} \quad (6)$$

$$k_t = \frac{p_t}{p_c^0} \quad (7)$$

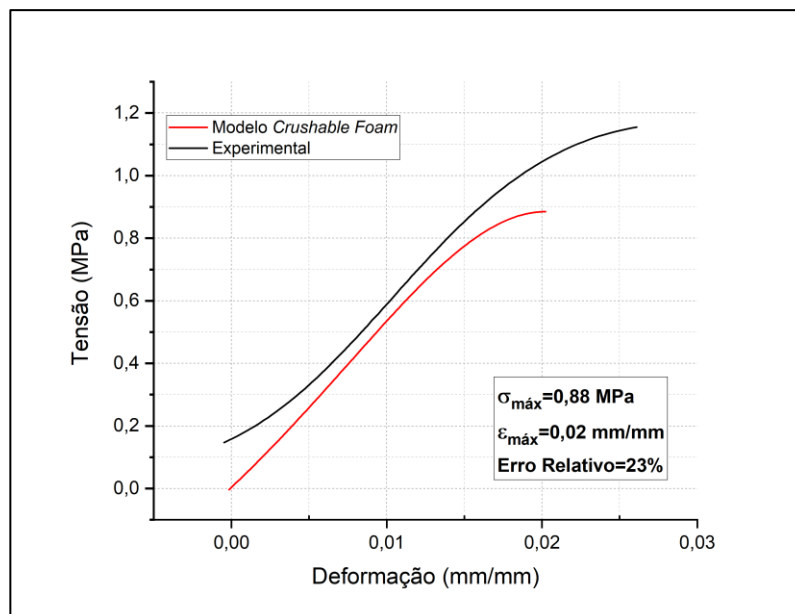
Para calibrar o modelo *Crushable With Volumetric Hardening*, segundo o manual do ABAQUS® para uma superfície de escoamento válida devem-se levar em conta as relações de resistência tal que $0 < k < 3$ e $k_t \geq 0$, onde $k_t = 5\%$ a 10% da tensão de escoamento inicial na compressão hidrostática p_c^0 , portanto, $k_t = 0,05$ a $k_t = 0,10$.

Por fim, para calibrar o modelo foi utilizado um $k = 1,5$ e um $k_t = 0,05$, o módulo de elasticidade computado pelo software para análise é de $E_s = 52,72$ MPa bem próximo ao do experimental $E = 52,85$ MPa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a simulação computacional realizada foi possível analisar os dados de saída através das curvas da deformação no tempo e da tensão no tempo, em seguida após aplicar um *fitting* polinomial foi gerado o gráfico Tensão x Deformação Figura 3, e comparar com o experimental:

Figura 3 – Tensão x Deformação (*Crushable Foam* - Experimental)



Fonte: Autoria própria (2020).

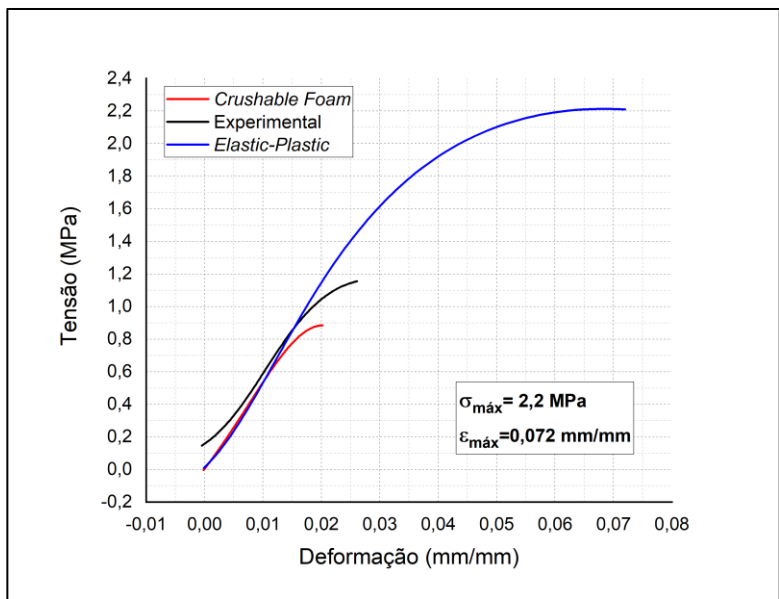
A partir da Figura 3, pode-se notar que utilizando o modelo *Crushable Foam With Volumetric Hardening*, a curva tensão x deformação do modelo utilizado demonstra um comportamento semelhante a curva obtida no ensaio experimental, apresentando uma tensão máxima de 0,88 MPa, sendo menor do que a apresentada no ensaio onde obtivemos uma tensão máxima de 1,15 MPa. Em relação a deformação, a máxima foi de 0,02 mm/mm novamente vindo a ser menor, onde a máxima no ensaio é de 0,026 mm/mm.

No início da curva *Crushable Foam*, Figura 3, tem-se um comportamento linear o que difere do experimental e isso se dá porque o modelo *Crushable Foam* possui limitações de assumir a isotropia do material e que o início do escoamento ocorre de maneira semelhante em vários estados de tensão. Vale ressaltar que o modelo ignora fraturas.

Ao comparar as duas curvas temos ainda um fator limitante que é a anisotropia do material, onde não foi possível realizar o modelo de forma celular e ainda representar de fato a mistura PU (Poliuretano) + Fibras de madeira de *Eucalyptus spp.*, o que implica numa má representação da interação entre a mistura dos dois materiais. Tal fator é acompanhado de um erro em relação ao experimental de 23%.

Porém, para podermos de fato realizar uma comparação mais assertiva de que o modelo proposto possui uma boa aproximação do real, foi realizado uma simulação utilizando o modelo comum para materiais isotrópicos contido no pacote do ABAQUS®, denominado *elastic-plastic*. Os dados de saída foram tratados da mesma maneira do modelo anterior e com isso foi possível exibir a Figura 4, onde tem-se uma diferença significativa:

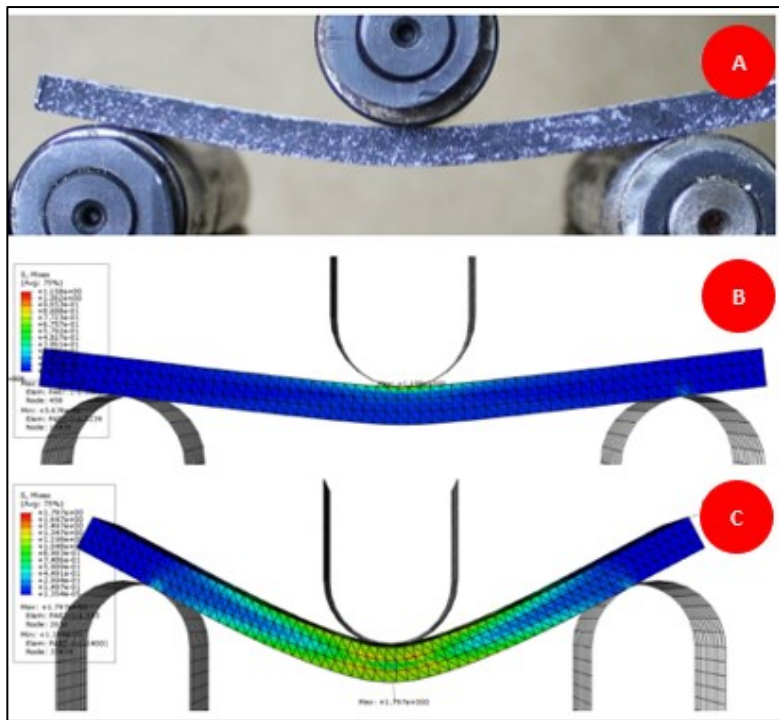
Figura 4 – Tensão x Deformação (Comparação com Elastic-Plastic)



Fonte: Autoria própria (2020).

Da figura 4, tem-se que a tensão máxima obtida utilizando o modelo isotrópico *Elastic-Plastic* foi de 2,2 MPa e uma deformação máxima de 0,072 mm/mm, muito superior dos dados obtidos no modelo *Crushable Foam With Volumetric Hardening (CVH)* e no ensaio experimental. Na Figura 5, somente em nível de comparação está a representação gráfica do comportamento:

Figura 5 – A) Experimental (Um dos corpos de prova), B) CVH, C) *Elastic-Plastic*.



Fonte: Autoria própria (2020).

CONCLUSÃO

No início do projeto de pesquisa foi proposto buscar um modelo computacional que representasse o comportamento do material obtido através da mistura de espuma rígida de poliuretano derivada de óleo de mamona com fibras de madeira *Eucalyptus spp.*, ao realizar pesquisas juntamente com estudo do pacote do software utilizado ABAQUS®, chegou-se no modelo denominado *Crushable Foam With Volumetric Hardening (CVH)*.

Após analisar os resultados das simulações, temos que o modelo proposto apresentou comportamento e valores significativos comparado ao real, ou seja, o ensaio experimental. Além disso comparando o modelo (CVH) com o comumente utilizado para materiais isotrópicos denominado *Elastic-Plastic*, o mesmo se mostrou superior em representar o comportamento e valores de tensão e deformação muito condizentes com o experimental, mesmo se tratando da complexidade em modelar o material.

AGRADECIMENTOS

Agradeço meu orientador e colegas, em especial a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR); e a Kehl por disponibilizarem todo o suporte para que tal pesquisa torna-se realidade e a USP- São Carlos na pessoa do professor Marcelo Leite Ribeiro por nos permitir o uso da licença do Abaqus.

REFERÊNCIAS

ABAQUS/CAE User's Manual. ABAQUS Version 6.14 - Documentation. © Dassault Systemes. Disponível em: <http://ivt-abagusdoc.ivt.ntnu.no:2080/v6.14/books/usb/default.htm>. Acesso em 18 set. 2019.

Mills, N. J. **Polymer foams handbook: engineering and biomechanics applications and design guide**. 1. Ed. [s.l.]: Elsevier Science, 2007. Disponível em: <https://pt.scribd.com/book/282485955/Polymer-Foams-Handbook-Engineeringand-Biomechanics-Applications-and-Design-Guide>. Acesso em 18 set. 2019.

Rizov, V., Altenbach, H. Elastic-plastic response of structural foams subjected to localized static loads. **Materials & Design**. v. 27, n. 10, p. 947-954, 2006. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306905000713?via%3Dihub>. Acesso em: 04 abri. 2020.

TITA, V.; CALIRI JUNIOR, M. F. Numerical simulation of anisotropic polymeric foams. **Lat. Am. J. Solids Struct.**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 2, p. 1-21, Apr. 2012. Disponível em:

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-78252012000200005&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 31 mai. 2020.