

## 12º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2021

### ESTUDO MECÂNICO DE VIGAS HIPERELÁSTICAS POR ENSAIO DE FLEXÃO E ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS

DANIEL B. BICALHO<sup>1</sup>, ISABELA G. T. FRANCISCO<sup>2</sup>, ALEXANDRE B. CAMPO<sup>3</sup>,  
ALEXANDRE S. CAPORALI<sup>4</sup>, SERGIO H. EVANGELISTA<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia de Controle e Automação, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Câmpus São Paulo,

<sup>2</sup> Graduanda em Engenharia de Controle e Automação, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Câmpus São Paulo,

<sup>3</sup> Doutor, Co-autor, IFSP, Câmpus São Paulo, brinca@ifsp.edu.br

<sup>4</sup> Doutor, Co-autor, IFSP, Câmpus São Paulo, caporali@ifsp.edu.br

<sup>5</sup> Doutor, Co-autor, UFSCar – Universidade Federal de São Carlos, toddyprof@ufscar.br.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.05.03.01-9 Mecânica dos Corpos Sólidos, Elásticos e Plásticos

**RESUMO:** A área de robótica mole tem cada vez mais atraído atenção devido à sua vasta aplicação, trazendo contribuições de um novo paradigma de projeto voltado para o uso de materiais hiperelásticos. A caracterização deste tipo de material em termos de propriedades mecânicas é de suma importância no projeto de sistemas robóticos moles, dada suas características não-lineares e vantagens na aplicação em garras robóticas moles utilizadas em diversos campos da engenharia e medicina. A partir disso, o presente projeto teve como objetivo a análise e caracterização das propriedades mecânicas de uma viga hiperelástica submetida à flexão pela ação da gravidade. A deformação gerada no ensaio é analisada por um sistema de aquisição de imagens composto por uma câmera e um programa computacional de processamento de imagens para a medição de deslocamento sem contato. Os resultados gráficos extraídos são comparados com simulações executadas por meio do Método de Elementos Finitos (MEF) no programa computacional Abaqus.

**PALAVRAS-CHAVE:** processamento digital de imagens; medição de deslocamento sem contato; materiais hiperelásticos; elementos finitos; robótica mole.

### MECHANICAL STUDY OF HYPERELASTIC BEAMS BY BENDING TEST AND FINITE ELEMENT ANALYSIS

**ABSTRACT:** The area of soft robotics has increasingly attracted attention due to its wide application, bringing contributions from a new design paradigm focused on using hyperelastic materials. The characterization of this type of material in terms of mechanical properties is of paramount importance in the design of soft robotic systems, given its non-linear characteristics and advantages in application in soft robotic grippers used in various fields of engineering and medicine. From that, this project aimed to analyze and characterize the mechanical properties of a hyperelastic beam subjected to bending by gravity. The deformation generated in the test was analyzed by an image acquisition system composed of a camera and an image processing computer program to measure non-contact displacement. The extracted graphical results were compared with simulations performed using the Finite Element Method (FEM) in the computer program Abaqus.

**KEYWORDS:** digital image processing; non-contact displacement measurement; hyperelastic materials; finite elements; soft robotics.

## INTRODUÇÃO

Tipicamente, quando se é desejado prever o comportamento estrutural de sistemas mecânicos com a associação de efeitos não lineares, como o de materiais hiperelásticos, os modelos matemáticos clássicos em Mecânica dos Sólidos são falhos. Neste caso os fenômenos envolvidos em comportamentos não lineares ferem hipóteses clássicas para materiais na busca da resposta tensão-deformação. (XU e LIU, 2018). Surge então a necessidade da realização de ensaios mecânicos capazes de extrair as características comportamentais desse tipo de material dada a atual relevância da área de robótica mole.

Embora já existam diversos ensaios mecânicos, os dispositivos convencionais para a medição de deslocamento apresentam problemas quando utilizados em materiais hiperelásticos. Em Jurjo (2010) foi proposta uma metodologia alternativa para a análise experimental de estruturas que permite a operação de medições de deslocamento sem contato por meio da utilização da análise e processamento de imagens digitais. Além disso, para modelos constitutivos de material com não linearidades e expressão do estado das deformações finitas o recurso mais conveniente é o uso de simulação por elementos finitos como um procedimento numérico para determinar soluções aproximadas e avaliar o comportamento de atuadores moles. (BATHE, 2014).

Sabendo da importância da caracterização das propriedades mecânicas relacionadas com a modelagem dinâmica e estática de materiais hiperelásticos, o trabalho aborda um estudo da deformação de duas vigas hiperelásticas de materiais distintos. A análise é composta pelo desenvolvimento de um sistema de aquisição e processamento de imagens em conjunto com simulações realizadas por meio do Método de Elementos Finitos.

## MATERIAL E MÉTODOS

Foi realizada a confecção de três corpos de prova do material Silpuran-2420 e três corpos de provas de Dragon Skin 20, a partir de um molde impresso em PLA com as dimensões 190x7x5 mm para serem usados como vigas na realização dos ensaios de flexão. A construção do sistema para esses ensaios foi composta por duas etapas: o projeto da estrutura física para o posicionamento da viga e aquisição das imagens e a elaboração de um software computacional para processamento e análise de imagens capaz de extrair informações relevantes para a caracterização mecânica do material estudado.

A estrutura física foi projetada para oferecer apoio e fixação do corpo submetido ao ensaio, Figura 1, permitindo também a alteração do seu comprimento exposto à flexão. A estrutura foi pintada com tinta PVA preta de modo a garantir um bom contraste com os corpos de prova que apresentam uma cor próxima ao branco. Para realizar a medição da deformação do objeto sem contato (sem a inserção de sensores que influenciam na massa do corpo) foi utilizada a câmera Nikon D3100 para a captura das imagens a uma distância de aproximadamente 40 cm da estrutura. Os ensaios foram realizados para os seguintes comprimentos de viga apoiada: 30, 50, 80, 100, 120 e 150 mm.



FIGURA 1. Estrutura do sistema para realização dos ensaios das vigas.

Após a aquisição, as imagens foram importadas no software Vision (um conjunto de ferramentas de visão computacional do software LabVIEW) onde foi desenvolvido um *script* de processamento e análise de imagens. Na etapa de calibração, sendo utilizada uma imagem de referência com um plano de calibração composto por uma matriz de pontos equidistantes, foi aplicado um algoritmo do Vision que calcula a relação pixels/mm das regiões da imagem, permitindo a extração dos pontos em unidades

reais. Já na etapa de processamento de imagem, foram realizadas correções com o objetivo de ressaltar as informações relevantes, como o perfil do corpo de prova, a partir da transformação da imagem para tons de cinza, aplicação de uma máscara e ajustes nos valores de brilho, gama e contraste. Posteriormente, com as imagens devidamente corrigidas e calibradas, foi iniciado o processo de análise com um algoritmo de *Machine Vision* para a detecção das coordenadas dos pontos que compõem o contorno da viga. Essas coordenadas foram organizadas em tabelas e importadas no MATLAB para a realização da extração de informações e geração dos gráficos das curvas obtidas nos ensaios, conforme Figura 2.

Para a parte relacionada ao Método de Elementos Finitos (MEF) foi utilizado o programa computacional Abaqus para prever o desempenho e o comportamento das vigas com base em funções matemáticas que permitem conhecer a rigidez da geometria para, a partir dela, obter o comportamento das deformações, também representado na Figura 2. A construção dessa análise foi pautada na modelagem do problema como uma geometria deformável com caracterização mecânica hiperelástica e densidade de  $1,075 \cdot 10^{-9} \text{ Mg.m}^{-3}$  para o Silpuran-2420 e de  $1,08 \cdot 10^{-9} \text{ Mg.m}^{-3}$  para o Dragon Skin 20. Os materiais foram definidos com base em dados de testes obtidos das curvas de tensão e deformação de engenharia. Os modelos computacionais selecionados para a avaliação de cada material foram tomados com base nas curvas de avaliação geradas pelo próprio Abaqus, sendo que, para o Silpuran-2420 o modelo de Yeoh estava mais próximo dos valores experimentais, e para o Dragon Skin 20 foi o modelo de Ogden.

Na preparação da malha e escolha do elemento apropriado para modelar o problema utilizou-se o Abaqus/Standard para a simulação não linear e o elemento linear *brick* de 20 nós com formulação híbrida (elemento Abaqus tipo C3D20H). A subdivisão da estrutura foi feita em elementos com formato hexaédricos e tamanho médio de  $1,4 \times 1,25 \times 1,17 \text{ mm}$ . Foi aplicada e definida a condição de contorno de encastre em uma das extremidades da viga para simular o seu engastamento e por fim, foi definido um carregamento para a gravidade com uma carga de valor  $-9810 \text{ mm.s}^{-2}$ .

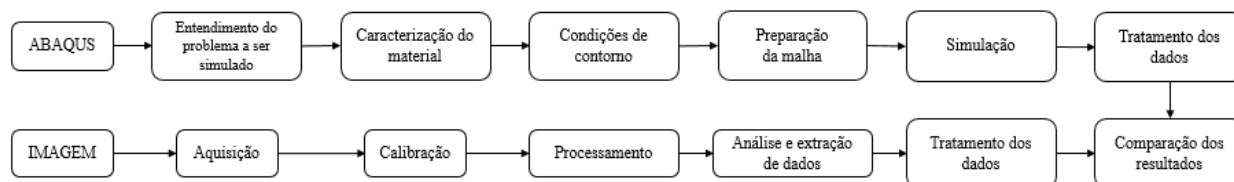


FIGURA 2. Fluxograma dos processos do sistema.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos ensaios de flexão foi identificado que houve um comprometimento da qualidade estrutural dos corpos de provas uma vez que as três vigas confeccionadas do mesmo material, tanto para o Silpuran-2420 quanto para o Dragon Skin 20, apresentaram comportamentos de rigidez diferentes. Além disso, uma viga em específico feita do material Silpuran-2420 continha bolhas internas de ar fazendo com que sua rigidez fosse menor do que a esperada, visto que apresentou uma curvatura de  $90^\circ$  em sua extremidade em relação ao eixo horizontal. Quanto a análise referente a comparação de cada material foi observado que as vigas feitas com o Dragon Skin 20 tinham mais rigidez do que as vigas de Silpuran-2420, como pode ser observado na Figura 4.

Do sistema de análise de deslocamento por imagem desenvolvido, é apresentada na Figura 3 a progressão que parte da aquisição em que pode ser observado o tratamento realizado na imagem até a aplicação do algoritmo de visão computacional. Sendo que, para a geração dos gráficos foram utilizadas as curvas superiores e inferiores extraídas dos ensaios das quais foi obtida a extração da curva média de posição utilizada para a comparação da simulação do Abaqus.



FIGURA 3. Sistema de processamento de imagem do ensaio.

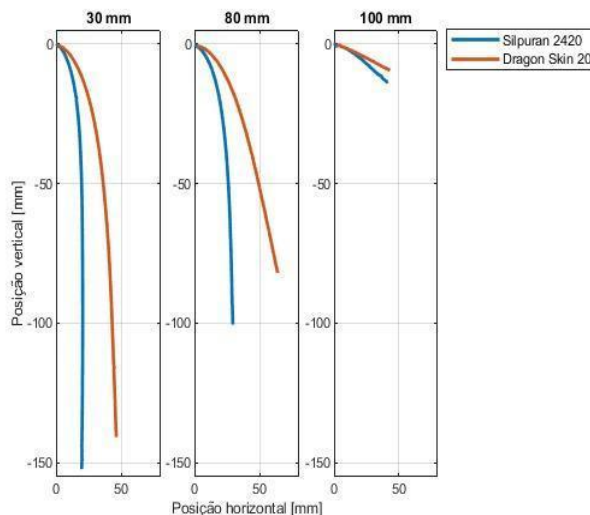


FIGURA 4. Comparação da rigidez das vigas de diferentes materiais em determinados comprimentos.

Para o estudo das propriedades mecânicas a partir do processamento de imagem escolheu-se uma viga de Dragon Skin 20 e uma de Silpuran-2420 que apresentava a melhor rigidez dentre as outras feitas com o mesmo material. As curvas do deslocamento das vigas obtidas a partir da extração dos pontos pelo método de elementos finitos e pelo processamento de imagens são apresentadas na Figura 5, para a condição de 30 mm de viga apoiada. Realizar a comparação entre essas curvas permitiu detectar que houve um conflito dos dados tensão-deformação. Como um primeiro ponto para a inferência desses resultados tem-se que para a caracterização dos materiais no Abaqus foram utilizados dados obtidos do site da SoRo (*Soft Robotics Materials Database*) para o Dragon Skin 20 e disponibilizados pela Wacker para o Silpuran-2420 cujas condições de ensaio para se obter a curva tensão-deformação desses materiais são desconhecidas. Além disso, dadas as incertezas resultantes de problemas e condições ambientais existentes durante o processo de fabricação das vigas produzidas, as divergências observadas entre o ensaio e a simulação são compreensíveis, visto que os corpos de prova não possuem as características nominais dos materiais utilizados, o que indica que possivelmente o material final é diferente.

Buscando quantificar percentualmente os desvios apresentados pela simulação computacional daqueles observados durante o ensaio, alterou-se os dados da curva tensão-deformação utilizados para caracterizar os materiais no Abaqus. Para o caso do Silpuran-2420, foi realizada uma diminuição de 50% dos valores de tensão e para o Dragon Skin 20 foi realizado um aumento de 30% (tais valores foram obtidos empiricamente, buscando-se adequar aos dados de imagem) e então as simulações foram refeitas. A Figura 5 apresenta também as curvas corrigidas com uma linha tracejada.

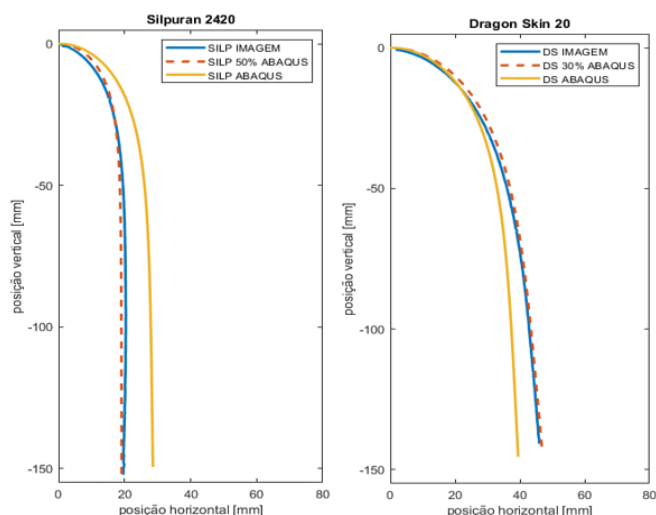


FIGURA 5. Comportamento das vigas simuladas e obtidas pelo ensaio.

## CONCLUSÕES

Por meio dos resultados iniciais infere-se que o processo de fabricação das vigas não foi inteiramente dominado, dada as inconsistências de rigidez dos corpos de provas de mesmo material, vulcanizado mole e pegajoso e bolhas internas. Tais problemas obtidos podem estar relacionados com a metodologia adotada durante a confecção dos corpos de prova, como a ausência de monitoramento e controle de temperatura e umidade, tempo de cura insuficiente, proporção de mistura incorreta e não utilização de uma câmara de vácuo para a remoção de bolhas.

Já com relação aos resultados obtidos a partir das análises gráficas, partindo do ponto em que foi possível realizar a quantificação do erro da ordem de 30 a 50% de disparidade entre os sistemas de imagem e simulação, é possível dar início a um processo de melhoria com o objetivo de diminuir a magnitude do erro para, por exemplo, 10%. Como uma das alternativas para tal finalidade sugere-se realizar a confecção de corpos de prova para ensaio de tração no mesmo processo e momento de confecção das vigas para em seguida, realizar o ensaio de modo a se obter a curva tensão-deformação do material que está sendo trabalhado.

Além disso, como sugestão para a continuação do estudo, com o domínio do processo de fabricação dos corpos de prova é importante a realização de uma análise que permita verificar a repetibilidade dos resultados obtidos por ambos os sistemas. E a partir disso, garantindo as condições de erro e repetibilidade levantadas, juntamente com o ensaio de tração, o sistema desenvolvido pode ser implementado para a validação de parâmetros de materiais em simulações de elementos finitos permitindo que sejam aplicados em modelos complexos. Além disso, pode ser empregado também como parte de um processo de controle de qualidade para avaliar o processo de cura de determinada linha de produção, contribuindo assim para o desenvolvimento da área de robótica mole.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica e Tecnológica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (PIBIFSP) pela bolsa de iniciação científica, e aos orientadores do Laboratório de Controle Aplicado (LCA) por toda a confiança e ajuda que nos foi prestada, além do incentivo para realizar o estudo proposto.

## REFERÊNCIAS

XU, Q.; LIU, J. An improved dynamic model for a silicone material beam with large deformation. *Acta Mechanica Sinica*, v. 34, n. 4, p. 744–753, mar. 2018.

JURJO, D.L.B.R.; MAGLUTA, C.; ROITMAN, N.; GONÇALVES, P.B. Experimental methodology for the dynamic analysis of slender structures based on digital image processing techniques. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 24, n. 5, p. 1369-1382, jul. 2010.

BATHE, K. J. Finite Element Procedures. Disponível em: [http://web.mit.edu/kjb/www/Books/FEP\\_2nd\\_Edition\\_4th\\_Printing.pdf](http://web.mit.edu/kjb/www/Books/FEP_2nd_Edition_4th_Printing.pdf). Acesso em: 14 de ago. 2020.

PISTORI, J. C.; EVANGELISTA, S. H.; CAPORALI, A. S.; CAMPO, A. B. Análise de uma viga engastada hiperelástica por elementos finitos no programa computacional Abaqus. In: Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - CONICT, 11, 2020, Presidente Epitácio, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo.