

BERGH; Felipe Maues¹, ÁVILA; Antonio Ferreira²

RESUMO

1. RESUMO

As relações não lineares de tensão-deformação (S-e) são necessárias para a análise de elementos finitos de componentes elastoméricos. As curvas de resposta desses materiais são obtidas por uma série de experimentos, principalmente testes de tração e compressão. Diversas equações constitutivas desta classe de material são apresentadas na literatura, tornando necessária a escolha de um modelo adequado para que as simulações sejam bem sucedidas. Neste trabalho, ensaios de tração e compressão foram realizados em corpos de prova de borracha natural (NR-60) para determinar as constantes de material do modelo Arruda-Boyce. Além disso, com o auxílio de testes experimentais de bancada, foi obtida a curva força-deslocamento de um coxim automotivo de borracha, submetido a uma carga unidirecional. As constantes do material foram usadas como dados de entrada no software Abaqus®, para realizar a análise de elementos finitos do comportamento do coxim de borracha e comparar os dados da simulação com os experimentais. A malha tridimensional foi criada com elementos lineares de formulação híbrida dos tipos C3D4H e C3D8H. O erro relativo associado à simulação virtual atingiu um pico de 0,18% dentro da faixa de convergência do modelo de elementos finitos.

2. ABSTRACT

The nonlinear stress-strain (S-e) relations are required for finite element analysis of elastomeric components. These materials' response curves are obtained by a series of experiments, mostly tensile and compression tests. Numerous constitutive equations of this class of material are presented in literature, making it necessary to choose a suitable model for the simulations to succeed. In this work, tension and compression tests were performed on natural rubber (NR-60) specimens to determine the material constants of multiple constitutive models. In addition, with the aid of experimental bench tests, the load-displacement curve of an automotive rubber mount subjected to a unidirectional load was obtained. The material constants were used as input in the software Abaqus®, to perform the finite element analysis of the rubber mount behavior and to compare the virtual data with the experimental data. The tridimensional mesh was created with linear elements of hybrid formulation of types C3D4H and C3D8H. The relative error associated with the virtual simulation reached a peak of 0.16% within the convergence range of the finite element model.

3. INTRODUÇÃO

A utilização de materiais elastoméricos pela indústria automotiva está aumentando devido à sua versatilidade geométrica e capacidade de atender às especificações técnicas com quantidade reduzida de massa. Em um carro, esse tipo de material é geralmente aplicado em vedações de portas, pneus, buchas e guarnições (VIEIRA; LEAL; SILVEIRA, 2010).

Os elastômeros têm uma relação não linear entre as tensões (S) e as deformações (e), atingindo grandes deformações no campo elástico, sem apresentar um limite de escoamento definido. Materiais que apresentam esse comportamento são definidos como hiperelásticos. A descrição do comportamento desse tipo de material é feita por meio da determinação de uma equação constitutiva (ou modelo constitutivo),

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Minas Gerais, fbergh@gmail.com

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Minas Gerais, avila@demec.ufmg.br

capaz de relacionar matematicamente os valores de tensão e deformação observados em um corpo (HOLZAPFEL, 2000).

Há uma grande variedade de modelos constitutivos relatada na literatura e estudos como o de Steinmann (2012) buscaram listar e descrever alguns desses modelos. Em cada modelo constitutivo, diferentes constantes matemáticas são obtidas no ajuste da curva dos dados experimentais. Além de caracterizar o material, essas constantes também são utilizadas como entrada para determinar o comportamento do material em análises de elementos finitos. Assim, uma vez definidas essas constantes, é possível realizar simulações de elementos finitos para reproduzir virtualmente o comportamento de componentes mecânicos fabricados em borracha natural.

Para o presente estudo, foi selecionado o modelo micromecânico de Arruda-Boyce (ARRUDA; BOYCE, 1993), o qual determina a energia de deformação, W , a partir dos invariantes de deformação (I_1 , I_2 , I_3). Shahzad et al. (2015) mostraram que tal modelo é apropriado para a simulação de elementos finitos de borracha natural. Baseado nos conceitos expostos, será feita a simulação do comportamento de um coxim automotivo fabricado em borracha natural, da classe NR-60.

4. METODOLOGIA

4.1 Modelo constitutivo

Conhecido como um dos principais modelos micromecânicos, o modelo de Arruda-Boyce (ARRUDA; BOYCE, 1993) é baseado no conceito de uma rede em cadeia presente nas células unitárias do elemento. Existem oito cadeias que começam em cada aresta de um cubo, encontrando-se no centro, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 Modelo hiperelástico de Arruda-Boyce no estado não-deformado.

Este modelo usa apenas duas propriedades do material como constantes na equação constitutiva: a densidade das cadeias elastoméricas, n , e o alongamento máximo da cadeia, λ_{\max} . A função de energia de deformação, considerando um material incompressível, é dada por:

Onde T é a temperatura, k_B é a constante de Boltzmann, I_1 é o primeiro invariante de deformação e C_p corresponde às constantes para cada termo da expansão da série, obtido devido à integração da função inversa de Langevin (apenas cinco termos da série são geralmente usados, ou seja, $p = 5$). O modelo de Arruda-Boyce tem grande aplicação quando os dados experimentais são escassos e não há aumento acentuado na rigidez (BERDICHEVSKY, 2004). Devido ao seu baixo custo computacional, pode ser uma escolha válida quando não há uma descrição detalhada do comportamento do elastômero.

4.2 Material

O material hiperelástico selecionado para os testes experimentais foi uma borracha natural, com dureza especificada de 60 IRHD, também conhecida como NR-60.

4.3 Ensaio de tração uniaxial

Os parâmetros de execução dos ensaios e o formato dos corpos de prova são determinados com base na norma ASTM-D412 (2016). Neste estudo, utilizou-se o corpo de prova Tipo C, em formato de gravata (Figura 2).

Figura 2 Corpo de prova Tipo C usado no ensaio de tração uniaxial.

Os testes de tração foram conduzidos utilizando uma máquina Instron 5965 com velocidade do travessão constante a 500 mm/min. Três corpos de prova foram testados a uma temperatura ambiente de 23 ± 2 °C. A curva força-deslocamento

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Minas Gerais, ibergh@gmail.com

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Minas Gerais, avila@demec.ufmg.br

apresentada na Figura 3 mostra o comportamento de um dos corpos de prova, como observado durante o experimento. A tensão no corpo de prova foi calculada como a razão da carga pela seção transversal original ($S = F/A$) e a deformação foi determinada como a razão entre o comprimento da deformação e o comprimento original ($e = \Delta L/L_0$).

Figura 3 Curva força-deslocamento obtida a partir do ensaio de tração uniaxial em corpos de prova de borracha NR-60

4.4 Ensaio de compressão uniaxial

A geometria dos corpos de prova e as condições de teste foram baseadas na norma ASTM D575 (2018). No presente trabalho, usou-se um corpo de prova cilíndrico, com diâmetro nominal de 36 mm e altura nominal de 18 mm. A Figura 4 ilustra o formato do corpo de prova e sua resposta durante o teste de compressão uniaxial.

Figura 4 Ensaio de compressão em corpo de prova cilíndrico

Os testes foram realizados em uma máquina Instron 5965, com velocidade do travessão constante a 5 mm/min. Quatro corpos de prova foram testados a uma temperatura ambiente de 23 ± 2 °C. A Figura 5 apresenta o comportamento do corpo de prova sob cargas compressivas até uma deformação de 50%. Os cálculos de tensão e deformação foram realizados de maneira análoga aos do teste de tração.

Figura 5 Curva força-deslocamento obtida a partir de testes de compressão uniaxial em corpos de prova de borracha NR-60

4.5 Cálculo das constantes hiperelásticas

Para a redução do erro amostral, foram geradas 12 combinações entre os testes de tração e compressão, oriundas de 3 testes de tração e 4 de compressão uniaxial. Os valores de força-deslocamento, juntamente com as dimensões do corpo de prova de ambos os testes, permitiram o cálculo dos valores de tensão-deformação para todos os pontos de cada ensaio. Em seguida, uma nuvem de pontos foi gerada e permitiu a criação de uma curva tensão-deformação (S - e) representativa dos valores médios de S ao longo de toda a faixa de deformação utilizada. A nuvem de pontos e a curva dos valores médios, usada para determinar as constantes hiperelásticas de cada modelo, são mostrados na Figura 6.

Figura 6 Nuvem de pontos e curva dos valores médios de tensão e deformação de corpos de prova de borracha NR-60

A calibração da curva foi realizada com o auxílio do algoritmo EVALUATE, incluído no software Abaqus®. Este algoritmo calcula as constantes hiperelásticas utilizando o método dos mínimos quadrados, que minimiza o erro relativo existente entre os valores obtidos pelo modelo e aqueles medidos fisicamente em corpos de prova. Os mínimos quadrados do erro relativo são dados pela seguinte expressão:

Onde N é a quantidade de pontos discretos utilizados na regressão, S_c é a tensão calculada e S_m é a tensão medida a partir dos dados experimentais.

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Minas Gerais, fbergh@gmail.com

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Minas Gerais, avila@demec.ufmg.br

A Tabela 1 mostra as constantes hiperelásticas obtidas no ajuste da curva do modelo Arruda-Boyce.

Tabela 1 Constantes hiperelásticas calculadas e condição de estabilidade de cada modelo constitutivo

A curva tensão-deformação obtida no ajuste do modelo Arruda-Boyce, assim como o erro relativo associado a esse ajuste, são mostrados nas Figuras 7 e 8.

Figura 7 Curva tensão-deformação obtida no ajuste do modelo Arruda-Boyce

Figura 8 Erro relativo associado ao ajuste da curva do modelo Arruda-Boyce

4.6 Ensaio do coxim automotivo

O componente elastomérico avaliado neste estudo pertence a um coxim automotivo integrante do sistema de suspensão de um motor Otto de quatro cilindros. Nele, o elastômero fica aderido a um anel de aço na parte externa e a um núcleo de alumínio na parte interna (Figura 9).

Figura 9 Vistas do coxim automotivo: (a) topo e (b) lateral

O experimento consistiu na aplicação de um carregamento unidirecional, responsável pelo deslocamento do núcleo em relação ao anel externo, deformando o coxim de borracha. Utilizou-se uma máquina Instron 4487 a uma velocidade de travessão constante de 500 mm/min. Dados de força e deslocamento foram obtidos para cinco amostras testadas à temperatura ambiente de 23 ± 2 °C. Os ensaios foram iniciados do repouso (força e deslocamento nulos) e finalizados ao atingir a máxima carga de funcionamento normal do coxim (27 kN). Os valores médios coletados nos experimentos foram usados para posterior comparação com as simulações de elementos finitos (Figura 10). Fica definido, portanto, o comportamento do coxim como o deslocamento observado em consequência da aplicação de cargas em uma direção predeterminada (curva força-deslocamento).

Figura 10 Curva força-deslocamento obtida a partir de testes de carregamento unidirecional em coxim automotivo produzido em borracha NR-60

4.7 Simulação do comportamento do coxim automotivo

A malha tridimensional do corpo de borracha foi elaborada com elementos lineares de formulação híbrida dos tipos C3D4H e C3D8H. As superfícies de contato foram definidas nas faces de interesse, sendo o comportamento superficial definido como penalty não-linear e a condição de interação superficial permitindo pequeno deslizamento na interface (small sliding). O modelo completo contou com um total de 19.780 nós e 88.984 elementos, com 6 graus de liberdade.

Em seguida, como condições de contorno, as paredes externas do coxim foram engastadas, com grau de liberdade igual a zero (encastre) e foi criado um elemento rígido para conectar as paredes internas centrais do coxim a um nó de referência, ao qual foi imposto um deslocamento de 10 mm. Com a simulação, foram obtidos os dados de força de reação que o coxim impôs ao deslocamento prescrito de 10 mm. As simulações foram realizadas com o auxílio dos softwares Altair HyperWorks v.13.0 (pré e pós-processamento) e Simulia Abaqus Standard v6.11 (solver). As

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Minas Gerais, lbergh@gmail.com

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Minas Gerais, avila@demec.ufmg.br

configurações inicial e deformada da malha tridimensional estão ilustradas na Figura 11.

Figura 11 Malha de elementos finitos em 3D nos estados (a) inicial e (b) deformado

Após a construção da malha e definição das condições de contorno, utilizou-se como dados de entrada as constantes de material calculadas para o modelo Arruda-Boyce. A curva força-deslocamento obtida na simulação via elementos finitos está representada na Figura 12, assim como a curva obtida experimentalmente. A Figura 13 apresenta o erro relativo associado a essa simulação.

Figura 12 Curvas força-deslocamento obtidas a partir da simulação em 3D

Figura 13 Erro relativo associado às simulações em 3D

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ajuste da curva do modelo Arruda-Boyce apresentou um pico de erro relativo de 25% no ponto de 0,05 mm/mm de deformação de tração. A faixa de deformações $\pm 0,05$ mm/mm foi definida como valor de corte do cálculo do erro, pois a equação do erro relativo possui uma assíntota vertical na origem, o que faz com que o valor tenda ao infinito quando a deformação é nula. O erro associado às deformações compressivas reduziu e tendeu a zero com o aumento da magnitude da deformação. Por outro lado, ao se aumentar a deformação de tração, houve um crescimento quase linear do erro entre 0,2 e 1,5 mm/mm, atingindo um valor máximo de aproximadamente 12% com 1,5 mm/mm de deformação. O erro relativo encontrado nesse ajuste teve magnitude menor do que aquela exposta por Shi, Liu e Chen (2017), a qual atingiu um pico de 38% próximo à origem, oscilando ao longo da faixa de deformação pesquisada e chegando a apresentar picos de 13% em altas deformações de compressão ($\sim 0,5$ mm/mm) e de 25% em tração ($\sim 2,0$ mm/mm). É possível que o maior erro relativo relatado na literatura esteja associado a ruídos e/ou variações normais na aquisição de dados em pontos próximos à assíntota vertical, onde a deformação é nula e qualquer pequena variação nos valores captados pode gerar um alto valor de erro relativo. Além disso, ao se distanciar da origem, a curva tensão-deformação exibe uma segunda inflexão em altas deformações de tração, aumentando seu coeficiente angular (incremento na taxa de deformação) de uma maneira que o ajuste de Arruda-Boyce não consegue capturar com exatidão. Logo, como a máxima deformação de tração considerada no estudo de Shi, Liu e Chen (2017) é maior que a do presente estudo (2,0 mm/mm versus 1,5 mm/mm), o erro relativo da curva Arruda-Boyce calculado na extremidade da faixa de deformações também foi mais alto.

O modelo de elementos finitos em 3D provou ser adequado para a simulação do comportamento do coxim, contudo, devido ao elevado custo computacional, nota-se a dificuldade de se manter a convergência da simulação por elementos finitos em altas deformações. Ainda assim, enquanto convergiu, a simulação apresentou um pico de erro relativo de 0,18%, demonstrando reproduzir satisfatoriamente a força de reação do coxim sob o carregamento unidirecional. É importante pontuar que há meios de minimizar a divergência nas simulações por meio do refinamento da malha e/ou da utilização de elementos quadráticos. Entretanto, tais alternativas para o aumento do espectro de convergência da simulação implicariam em um custo computacional não suportado pelas ferramentas disponíveis para o presente estudo.

6. CONCLUSÕES

Conclui-se, portanto, que a metodologia aqui executada consegue reproduzir

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Minas Gerais, lbergh@gmail.com

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Minas Gerais, avila@demec.ufmg.br

satisfatoriamente o comportamento de um coxim automotivo feito de borracha natural NR-60. A baixa magnitude do erro relativo mostra que este método é aplicável em baixas e médias deformações, enquanto se mantém a convergência das simulações. A falta de convergência em altas deformações aparece como fator limitante, porém, há ferramentas para minimizar tal fato, como o refinamento da malha ou o uso de outros tipos de elementos na mesma.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARRUDA E, BOYCE M. A Three-Dimensional Constitutive Model for the Large Stretch Behavior of Rubber Elastic Materials. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 41, n. 2, p. 389-412, 1993.

American Society for Testing and Materials. **ASTM D412**: Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers-Tension. West Conshohocken: ASTM International, 2016.

American Society for Testing and Materials. **ASTM D575**: Standard Test Methods for Rubber Properties in Compression. West Conshohocken: ASTM International, 2018.

BERDICHEVSKY, A. On the Use of the Arruda-Boyce Model. **ABAQUS User's Conference**, 2004.

HOLZAPFEL, G. A. **Nonlinear Solid Mechanics**: a continuum approach for engineering. Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd, 2000.

SHAHZAD, M; KAMRAN, A; SIDDIQUI, M. Z; FARHAN, M. Mechanical Characterization and FE Modeling of a Hyperelastic Material. **Materials Research**, v. 18, n. 5, p. 918-924, 2015.

SHI, W; LIU, G; CHEN, Z. Effects of the bulk compressibility on rubber isolator's compressive behaviors. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 9, n. 5, p. 1-12, 2017.

Steinmann P, Hossain M, Possart G. Hyperelastic models for rubber-like materials: consistent tangent operators and suitability for Treloar's data. **Arch Appl Mech**; v. 82, p.1183–1217, 2012.

VIEIRA, A; LEAL, V; SILVEIRA, M. Avaliação de Modelos Hiperelásticos na Simulação Numérica de um Suporte de Motor Automotivo. **IX Simpósio de Mecânica Computacional**, São João Del-Rei, 2010.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Minas Gerais, ao Grupo FCA, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

PALAVRAS-CHAVE: Coxim automotivo, Elementos finitos, Simulação, Borracha natural

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Minas Gerais, fbergh@gmail.com

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Minas Gerais, avila@demec.ufmg.br