

ESTUDO SOBRE O EFEITO DE MULLINS E MODELOS HIPERELÁSTICOS PARA ELASTÔMEROS

João Paulo Alves de Paula¹, Prof.^a Debora Francisco Lalo²
^{1,2} Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Universitário FEI
 joaop_alvesdepaula@hotmail.com¹, dflalo@fei.edu.br²

Resumo: O efeito de Mullins (relaxação de tensões) é um fenômeno muito eminente na maioria dos elastômeros. Neste trabalho, será avaliado o comportamento mecânico de uma borracha natural vulcanizada com dureza de aproximadamente 50 *shore* através de ensaios experimentais no modo uniaxial de deformação. Serão avaliados os principais modelos constitutivos disponíveis em softwares comerciais de simulação via Método dos Elementos Finitos (MEF). Através de ensaios cíclicos de histerese, verificou-se o efeito de Mullins mais significativo para 400% de deformação.

1. Introdução

O Efeito de Mullins vem sendo estudado há décadas e ainda apresenta um grande obstáculo quando se trata do comportamento mecânico de elastômeros, e consiste na relaxação observada durante os primeiros ciclos de carregamento desses materiais [1].

Estudiosos propuseram várias interpretações físicas para o fenômeno da relaxação de tensões como a ruptura das cadeias na interface entre a borracha e os aglomerados, deslizamento de moléculas, ruptura dos aglomerados de carga, desentrelaçamento da cadeia, entre outras, porém, nenhuma delas fora completamente validada [2].

Devido à grande inconstância de resultados obtidos através de diferentes estados de deformação e a grande sensibilidade da borracha aos parâmetros de ensaio e ao ambiente em que está submetida, vários modelos constitutivos foram desenvolvidos para tentar caracterizar o comportamento dos elastômeros quando submetidos a diferentes tipos de esforços mecânicos, baseado em sua deformação. O comportamento complexo da borracha envolvendo grandes deformações, a não linearidade e a relaxação de tensões, provocam a necessidade de utilização dos parâmetros fenomenológicos para o modelamento mecânico [2].

Os materiais conhecidos como hiperelásticos, como os elastômeros, são descritos através da função energia densidade de deformação W , que define a energia elástica armazenada por unidade de volume não deformado [3]. W pode ser expresso em função dos invariantes de deformação I_1 , I_2 e I_3 como expresso na Equação 1:

$$W = f(I_1, I_2, I_3) \quad (1)$$

Onde:

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned} \quad (2)$$

A função W pode ser dividida em duas partes, sendo a primeira função dos invariantes I_1 e I_2 e as deformações

(parte incompressível), e a segunda, função do invariante I_3 e o módulo K (parte compressível) [3].

Os modelos constitutivos hiperelásticos podem ser divididos em fenomenológicos e micromecânicos, sendo os primeiros baseados no comportamento que o material apresenta durante os ensaios experimentais, e os micromecânicos baseiam-se nas informações químicas do material, como comprimento de cadeia e tipos de ligações químicas. Os principais modelos hiperelásticos são: Mooney-Rivlin, Polinomial, Neo-Hookeano, Ogden, Yeoh (fenomenológicos), Van Der Walls e Arruda-Boyce (micromecânicos) [3].

A Equação 3 apresenta a energia densidade de deformação para o modelo polinomial, onde C_{ij} e D_k são constantes do material e J é a relação de volumes (Jacobiana) [3].

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij}(I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j + \sum_{k=1}^N \frac{1}{D_k} (J - 1)^{2k} \quad (3)$$

Com o objetivo de contabilizar o efeito de Mullins no comportamento hiperelástico de elastômeros submetidos ao gradiente de deformação \mathbf{F} , foi definida uma variável de dano η baseado numa função de energia da forma $W(\mathbf{F}, \eta)$ [3].

2. Metodologia

A borracha natural que foi utilizada como objeto de estudo possui em sua composição 20% de negro de fumo, 3% de plastificante e uma dureza de aproximadamente de 50 *shore*. Os corpos de prova foram fornecidos pela empresa Vibtech[®] e os testes foram realizados sob uma temperatura de 23°C em um equipamento eletromecânico de bancada com coluna dupla (Instron 5567). Os corpos de prova foram desenvolvidos segundo a norma ASTM D412. Os métodos de ensaios mecânicos foram programados através do software Bluehill (versão 2.35). Três ensaios de tração foram realizados em corpos de prova do mesmo lote de forma a se obter a curva tensão-deformação média.

Com o objetivo de verificar a ocorrência do efeito de Mullins foram realizados ensaios cíclicos de histerese para os níveis de deformação de 100%, 200%, 300% e 400%. Para cada nível de deformação diferente foram feitos 5 ciclos de carregamento e descarregamento. As taxas de deformação utilizadas foram: 100 e 500 mm/min.

Através do software Abaqus[®], a curva média obtida pelos ensaios uniaxiais de tração foi utilizada para se fazer o ajuste de curvas para os modelos constitutivos hiperelásticos, de forma a se obter as constantes constitutivas para cada modelo. Para a simulação via MEF, foi desenvolvido um modelo 3D do corpo de prova segundo a norma, e uma malha foi gerada de elementos

hexaédricos de 8 nós, formulação híbrida e pressão constante (C3H8H).

3. Resultados

A Figura 1 representa a distribuição das tensões através da malha do modelo do corpo de prova para os modelos constitutivos, cuja curva tensão-deformação se aproxima da curva média obtida experimentalmente.

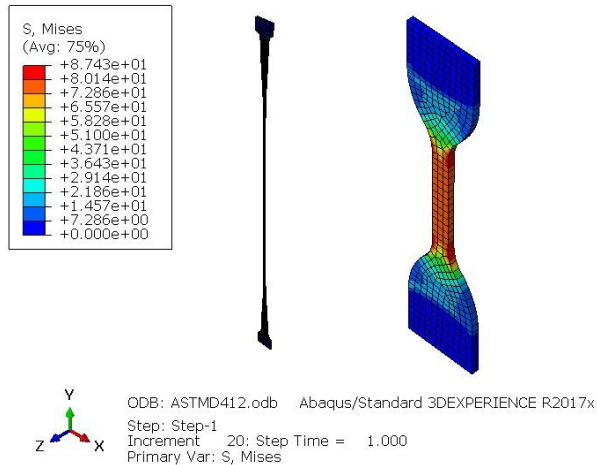


Figura 1 – Distribuição de tensões através da malha gerada para o modelo 3D do corpo de prova. Fonte: Autor, 2018.

A Figura 2 representa as curvas obtidas através da simulação pelo MEF para cada modelo constitutivo, cuja rigidez é função de constantes obtidas pelo ajuste das curvas de cada modelo constitutivo hiperelástico em relação a curva média experimental através do método dos mínimos quadrados.

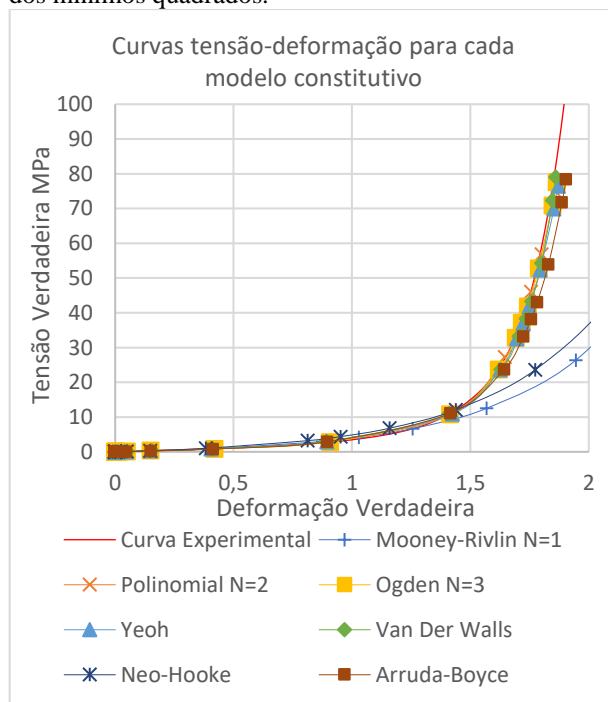


Figura 2 – Gráfico tensão-deformação obtido através da análise via MEF para os modelos. Fonte: Autor, 2018.

O gráfico da Figura 3 representa as curvas obtidas dos ensaios cíclicos de histerese a uma taxa de 500 mm/min. Pode-se observar a ocorrência do efeito de Mullins e sua proporcionalidade em relação ao nível de deformação,

pois quanto maior for este parâmetro, maior será a diminuição da rigidez apresentada (relaxação).

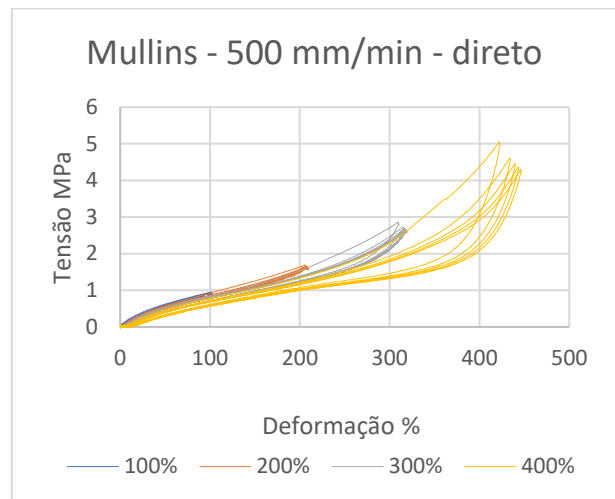


Figura 3 – Gráfico tensão-deformação para o ensaio de histerese cíclico. Fonte: Autor, 2018.

Outras análises abordadas neste trabalho são os efeitos da taxa de deformação e o tempo entre ciclos para a relaxação.

4. Conclusões

Nota-se que para a borracha natural analisada, pode-se utilizar os modelos constitutivos clássicos como o de Ogden, Yeoh, polinomial (N=2), Van Der Walls e Arruda-Boyce para descrever seu comportamento tensão-deformação para ensaios uniaxiais, através do método dos elementos finitos. O modelo que apresentou melhor aproximação foi o de Ogden (N=3) com um erro de 3,97%. Os modelos fenomenológicos obtiveram uma melhor caracterização comparado aos modelos micromecânicos. Nota-se que quanto maior o número de termos, maior é a precisão dos ajustes de curva obtidos.

Através das curvas obtidas pelo ensaio de histerese cíclica, percebe-se a influência da relaxação das tensões na queda da rigidez do material através dos ciclos de carga e descarga, e a tendência de estabilização do comportamento a partir do terceiro ciclo. Sendo assim, um modelo de dano deverá ser implementado através do MEF para capturar este fenômeno.

5. Referências

- [1] MULLINS, L. Softening of rubber by deformation. Rubber chemistry and technology, v. 42, n. 1, p. 339-362, 1969.
- [2] DIANI, Julie; FAYOLLE, Bruno; GILORMINI, Pierre. A review on the Mullins effect. European Polymer Journal, v. 45, n. 3, p. 601-612, 2009.
- [3] ALI, Aidy; HOSSEINI, M.; SAHARI, B. B. A review of constitutive models for rubber-like materials. American Journal of Engineering and Applied Sciences, v. 3, n. 1, p. 232-239, 2010.

Agradecimentos

À instituição Centro Universitário FEI por ter possibilitado a utilização do laboratório para a realização deste trabalho.

¹ Aluno de IC do Centro Universitário FEI. Projeto com vigência de 02/18 a 01/18.