

CNEBCA: COMPARAÇÃO NUMÉRICA x EXPERIMENTAL DE BORRACHA PARA COXINS AUTOMOTIVOS

WELLINGTON ANTONIO SOARES DE LIMA
tom_legani@hotmail.com
UNITAU

LUIZ EDUARDO NICOLINI DO PATROCINIO NUNES
luiz.nunes@unitau.com.br
UNITAU

VALESCA ALVES CORREA
valesca@unitau.br
UNITAU

Resumo:No presente trabalho é realizado a implementação de modelos matemáticos constitutivos não lineares para materiais hiper-elásticos, em um código computacional, aplicando no sistema de coxinzificação, estudando o confronto numérico-experimental do elastômero em um coxim automotivo, realizando uma análise junto aos resultados de cada caso explorando acertos e divergências entre as mesmas. Entendendo-se melhor as características individuais deste material e sua variação, podem-se obter potenciais reduções de custo devido à quantidade de protótipos elaborados.

Palavras Chave: Coxinzificação - Rigidez - Elementos Finitos - -

1. Introdução

Após o início do processo de globalização da economia dos países que integram o nosso planeta, a principal consequência atualmente evidenciada, é o aumento da competitividade com foco nos setores industriais e de serviços. Isso ocorre principalmente devido à abertura dos mercados, o que nos permite obter produtos e serviços de qualidade, onde quer que eles estejam disponíveis sem limites de fronteiras.

Sendo assim, torna-se necessário o desenvolvimento de novas tecnologias de maneira a obter significativas reduções de custo das empresas em produto ou serviços prestados, garantindo a sobrevivência das empresas como um todo.

Um componente fundamental dos veículos que se destinam ao transporte de pessoas, e cargas faz o sistema de sustentação e amortecimento do motor no veículo. Esses sistemas fazem parte de um grupo de itens, que ainda provocam grandes questionamentos dentre engenheiros e projetistas, NVH (noise, vibration and harshness), ruído, vibração e aspereza, setor ascendente dentro da indústria, devido a grande exigência do consumidor por uma melhor dirigibilidade e conforto.

De uma maneira geral, após se obter as cargas dos sistemas, é analisado o 6DOF (Six Degrees of Freedom), seis graus de liberdade onde se analisa os “centros elásticos” do sistema do powertrain, e posteriormente serão alojados os coxins. Essas unidades ou sistemas tem como função primaria suportar o motopropulsor e conseqüentemente amortecer as vibrações e conter excitações periódicas do sistema. Um problema na implementação desses sistemas é adequar a rigidez especificas de cada ponto a sua especificação, o comportamento do elastômero pode ter uma biblioteca de variações com uma série de itens muito peculiar a ser considerado para o estudo do sistema.

A obtenção das características de cada coxim (rigidez estática, dinâmica, etc.) muitas vezes apresenta divergências entre resultados de análise computacional e experimental, impactando em possíveis retrabalhos e até mesmo em uma “engenharia reversa”.

Estudar esses conflitos e a peculiaridade de cada característica do material para representação virtual do mesmo representa um grande potencial de redução de custo, diminuindo tempo de projeto devido a possíveis repetições de protótipos.

2. Sistemas de coxinzicação de motores

A principal função do sistema de coxinzicação do motor é suportar o seu peso de modo que mantenha em um plano do seu centro de gravidade, o motor não deve ser apenas contido dentro da base de apoio, mas seu peso deve ser bem distribuído entre as montagens. Isso garantirá que o motor trabalhe livremente sendo mantida sua especificação de acordo com seu design. Além de suportar o peso do motor, esses sistemas tem como função é isolar a força de excitação que forçam o desequilíbrio do motor na estrutura do veículo (ANON, 1994).

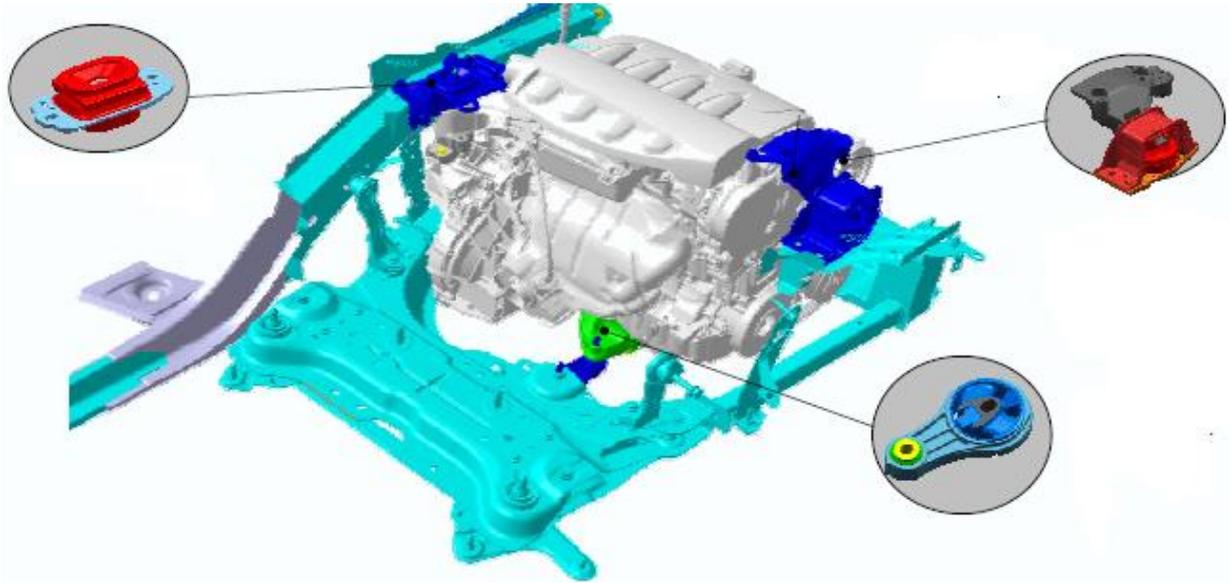


Figura 1: Modelo sistema de coxinição em um motor de combustão.

Em um motor de combustão interna, existem dois distúrbios dinâmicos básicos: os pulsos devido à explosão do combustível no cilindro; e a força de inércia e torque causada pela rotação e subsequentemente suas peças (pistão, biela e manivela) (H. ASHRAFIUN, C. NATARAJ, 1992). Esses pulsos irão causar um torque atuante no bloco do motor sobre um eixo paralelo a manivela. As direções das forças de inércia são paralelas ao eixo do pistão e perpendicular à manivela e eixos do pistão. O torque de inércia atua sobre um eixo que é paralelo ao virabrequim. Para um sistema de motor multicilindros, os componentes de distúrbio e desequilíbrio do motor dependem do número e disposição dos cilindros do motor.

Por exemplo, um motor de quatro cilindros tem uma força de inércia vertical que atua no bloco do motor, além do torque oscilante sobre o eixo de manivela, enquanto os motores de seis e oito cilindros, não têm a força de inércia e sim apenas a oscilação de torque (P.E. GECK, R.D. PATTON, SAE PAPER # 840736).

Estes distúrbios irão excitar o motor em seis graus de liberdade e modos de vibração, habitualmente citado no ramo automotivo com o termo “6DOF” que em inglês “6 Degrees of Freedom”, traduzindo “6 Graus de Liberdade” (P.E. GECK, R.D. PATTON, SAE PAPER # 840736) como mostrado na Fig. 2.

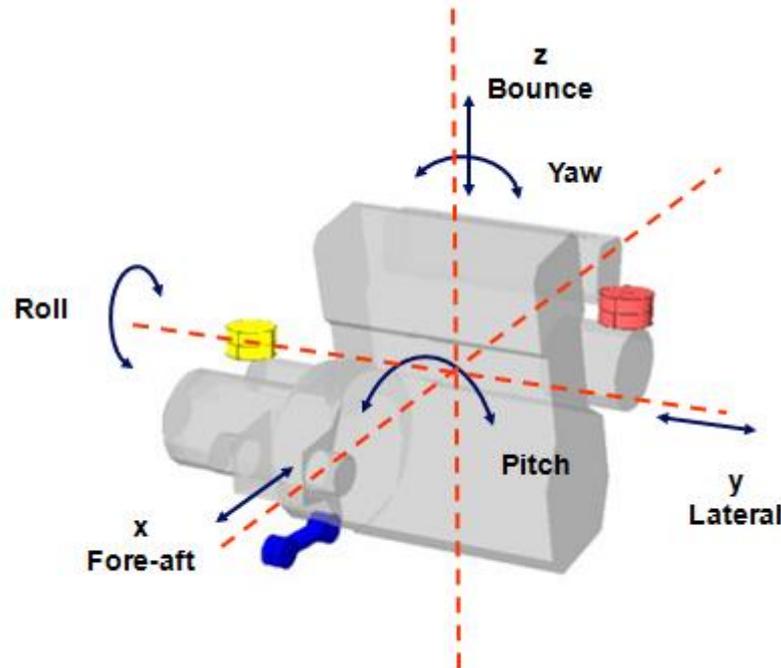


Figura 2: Modelo de motor à combustão demonstrando o “6DOF”.

2.1 COXINS ELASTOMÉRICOS

Desde a década de 1930, os coxins elastoméricos (borracha) têm sido usados para isolar a estrutura do veículo da vibração motor (LORD, 1930). Desde então, avanços significativos foram feitos para melhorar a o desempenho destes coxins.

Coxins elastoméricos devem ser projetados para as devidas faixas características de rigidez elástica necessárias em todas as direções para o isolamento de vibração adequada. Montagens de elastômeros ligadas a peças de metal são realizadas para um desempenho mais consistente e vida mais longa (N. VAHDATI, J.A. PILE, 1993).

Um coxim de borracha pode ser representado pelo conhecido modelo de Voigt composto por uma mola e um amortecedor como mostrado na Fig. 3. A rigidez dinâmica de um coxim de borracha será maior em frequências mais altas do que sua rigidez em frequências mais baixas devido ao amortecimento, como mostrado na Fig. 4. Esta característica torna difícil para projetar um sistema de coxinização que satisfaça os requisitos de projeto. Uma rigidez alta ou alto amortecimento elastomérico pode gerar um nível de baixa vibração em baixa frequência, mas seu desempenho em alta frequência será pobre. Em a outra mão, uma baixa rigidez e baixo amortecimento produzem baixos níveis de ruído, mas induz uma agitação de alto nível com pouca frequência devido a excitação de choque. A solução é a relação entre o isolamento do motor e o movimento vertical “*bounce*”. O coxim elastomérico oferece ganhos e percas entre a deflexão estática e o isolamento de vibração do sistema.

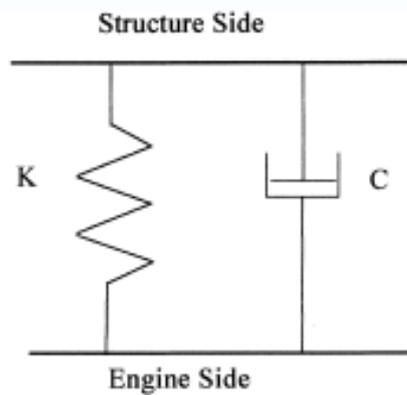


Figura 3: Modelo de Voigt; Modelo mecânico de um coxim elastomérico.

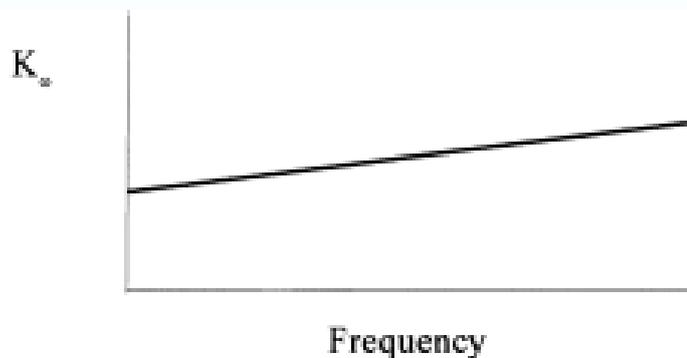


Figura 4: Rigidez Dinâmica de um coxim elastomérico.

Coxins de borracha têm sido utilizados com sucesso para montagens de motor do veículo por muitos anos. As recentes tendências de desenvolvimento do veículo, como veículos de passeio leves, tem a necessidade de usar melhores desempenhos de coxins em vez dos coxins elastoméricos. No entanto, ainda há substanciais melhorias em coxins elastoméricos usando rigidezes não lineares e características de amortecimento. O uso de características não lineares específicas para obter constante frequência natural em uma gama ampla de carga-peso, utilização de materiais com alto amortecimento interno, bem como materiais com alta amplitude dependente de amortecimento e rigidez são desejáveis (RIVIN, SAE PAPER # 850481).

3. FUNÇÕES DE ENERGIA DE DEFORMAÇÃO PARA MATERIAIS IMCOMPREENSÍVEIS

Os objetivos das teorias constitutivas são desenvolver modelos matemáticos para representar o comportamento real da matéria, determinar a resposta do material e em geral distinguir um material de outro.

Equações constitutivas para materiais hiperelásticos postulam a existência de uma função de energia de tensão W . Existem vários quadros teóricos para a análise e derivação das equações constitutivas, por exemplo, o método Rivlin-Signorini onde a idéia principal é expandir a função de energia de deformação em uma série de invariantes, ou a abordagem

Valanis-Landel expressando a energia de deformação diretamente em termos de principais trechos.

4. MODELO NEO HOOKEANO

O modelo Neo-Hookeano é uma das mais simples funções de energia de tensão. Trata-se de um único parâmetro e fornece uma matemática simples e um modelo constitutivo confiável para o comportamento de deformação não linear de materiais isotrópicos como a borracha. Sua função de energia de deformação é

$$W = \frac{\mu}{2}(I_1 - 3)$$

(Eq. 1)

onde $\mu > 0$ é o módulo de cisalhamento para deformações infinitesimais, e I_1 uma variante de Cauchy-Green. O modelo neo-Hookean vem da teoria molecular em que a borracha vulcanizada é considerada como uma rede tridimensional de moléculas de cadeia longa ligados em alguns pontos. A teoria molecular elementar das redes baseia-se no postulado de que a energia livre de elástica de uma rede é igual à soma das energias livres elásticas das cadeias individuais.

Enquanto em uma teoria fenomenológica os parâmetros constitutivos são ditados apenas pela forma funcional considerada, em uma teoria molecular os parâmetros são introduzidos com base em fenômenos modelados, e em consequência relacionam-se as grandezas físicas.

Embora ele não capte todos os recursos básicos do comportamento de borracha, o modelo Neo-Hookeano é muito usado na teoria da elasticidade finita por causa de suas boas propriedades matemáticas (por exemplo, um enorme número de soluções exatas para problemas de valores limites podem ser encontrados usando esse modelo).

3. Materiais e métodos

A metodologia empregada nesta pesquisa (abordagem quantitativa) é de caráter exploratório, foi desenvolvida, a partir de testes experimentais e simulações computacionais.

Foram analisados cinco coxins de borracha natural “NR” de 65 Sha com formulação de acordo com data sheet interno da empresa com insertos metálicos normalmente vulcanizados juntos para dar sustentação ao coxim, a figura 5 apresenta a amostra.



Figura 5: Uma de cinco amostras utilizadas para teste experimental.

A figura 6 demonstra o modelo de forma matemática mostrando os inserts metálicos internos e ele montado na sua aplicação de uso no sistema de coxinição.

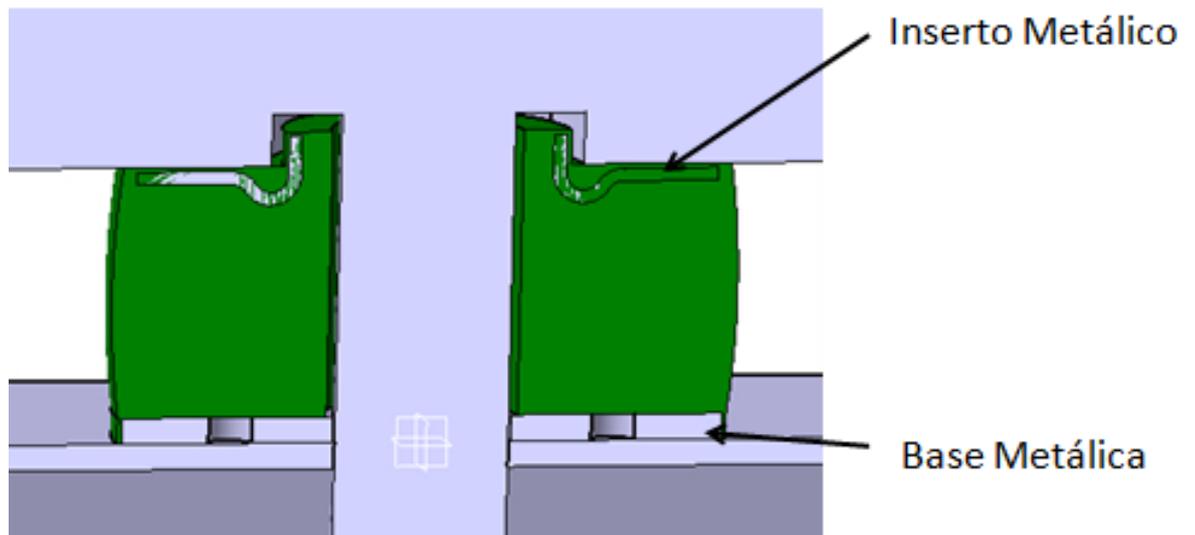


Figura 6: Modelo montado na sua aplicação. (Catia V5, 2013).

4. TESTE FÍSICO

Os experimentos consistem em simples compressão simples no plano. Esta sendo utilizada referência de testes experimentais obtidos da literatura (TREOLAR, 1944; HEUILLET E DUGAUTIER, 1997) para borracha natural incompressível.

Ensaio experimentais são realizados em tensão e simples compressão planar. Estes testes são realizados em uma máquina de teste KRATOS. Deslocamentos são aplicados ao longo do eixo vertical da amostra e uma célula de carga medindo a força normal correspondente. Segue-se o campo de deformação no plano usando uma câmera CCD.

Técnicas de processamento digital de dados (CHEVALIER ET AL., 2001) são usadas para analisar o campo de deslocamento durante o carregamento da amostra. Esta técnica permite validação de homogeneidade de campo de tensão durante o teste.



Figura 6: Configuração da máquina de teste de compressão.



Figura 7: Configuração da máquina de teste de compressão.

A compressão criada é descrita a fim de reduzir o atrito entre a amostra e os rolos e assim assegurar uma deformação homogênea, um lubrificante de baixa viscosidade é inserido entre a placa e o modelo.

O teste de compressão é realizado à temperatura ambiente ($\sim T 20^{\circ}\text{C}$). A amostra é submetida por seis cargas para remover a influência do efeito Mullins (MULLINS E TOBIN, 1965) antes de ser realizado o teste que irá extrair a curva que será levada em consideração para a plotagem da curva de rigidez estática do coxim.

A máquina transfere simultaneamente a reação do carregamento aplicado para o computador em uma série de valores respectivos a força de reação do modelo Vs o deslocamento cedido.

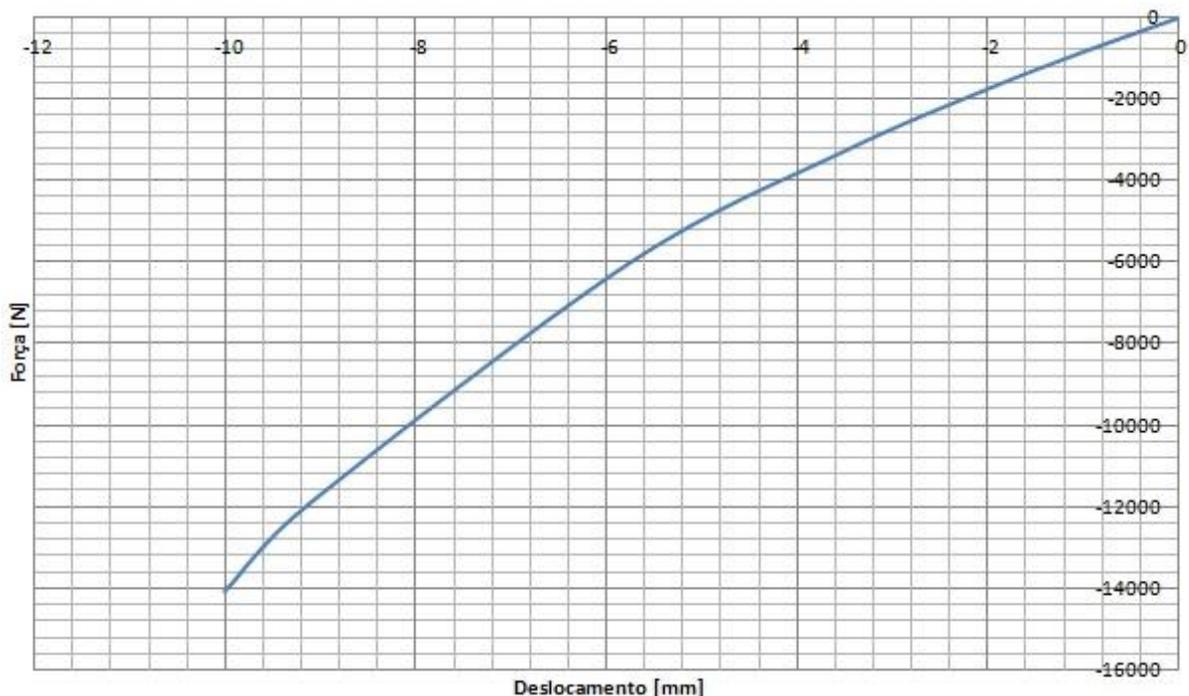


Figura 8: Gráfico de curva média de rigidez das 5 amostras testadas.

5. MODELO COMPUTACIONAL

Os cálculos foram realizados a partir da consideração de carregamentos críticos a que estarão sujeitos estes componentes e das propriedades físicas dos materiais. A análise de elementos finitos, do tipo linear estática de grandes deformações, foi realizada com o uso do software Abaqus® 6.11-1.

Agora, apresentamos o método de identificação da função de densidade de energia de tensão W Neo-Hookeana (Eq. 1). Os parâmetros de materiais são determinados aqui uma análise de regressão de mínimos quadrados dos dados experimentais de tensão simples.

Em primeiro lugar, vamos demonstrar a função de densidade de energia de tensão W Neo-Hookeana que o software interage.

$$\text{Neo-Hookean form: } W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{D_1}(J - 1)^2$$

(Eq. 2)

Onde,

$$C_{10} = G/2,$$

G = módulo de cisalhamento

D = modulo de compressão = 2/K0

onde o K0 é obtido experimentalmente em laboratório interno onde é criada a carta de matérias. Para este material foi usado 9,1E-04mm/N.

Os outros termos da equação são invariantes do tensor de deformação de Cauchy-Green. Por ter uma relação altamente não linear e reversível a função que descreve a relação entre tensão e deformação a função chamada *strain energy density*(W) mostrada na literatura do capítulo II.

Utilizando este conceito mecanicista neo hookeano extraiu se a curva de rigidez estática do modelo sob o efeito da compressão aplicada, apontado em um gráfico de tensão máxima principal como mostra as figuras 9 e 10.

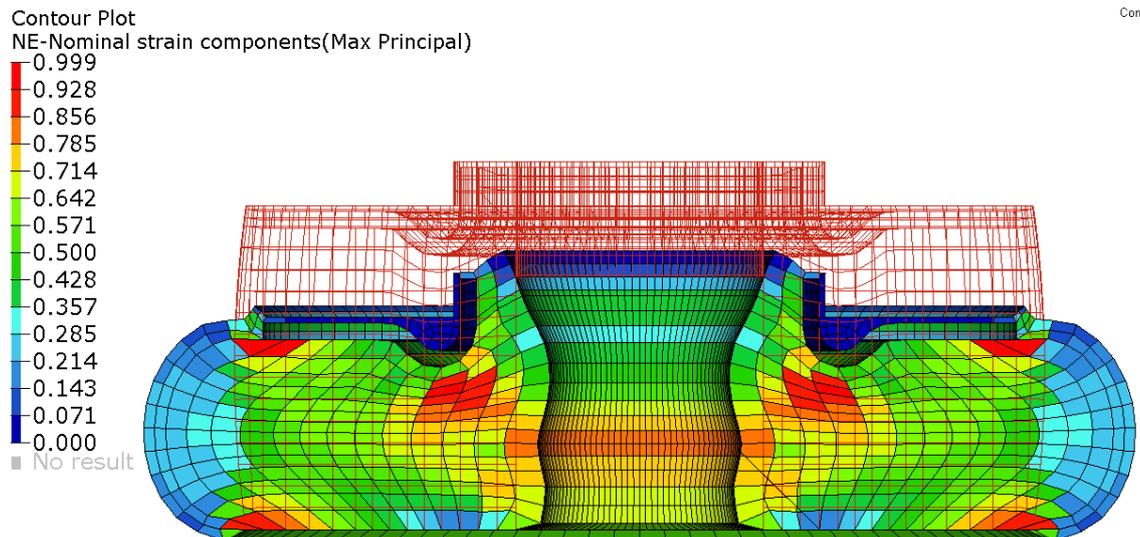


Figura 9: Modelo com o carregamento aplicado

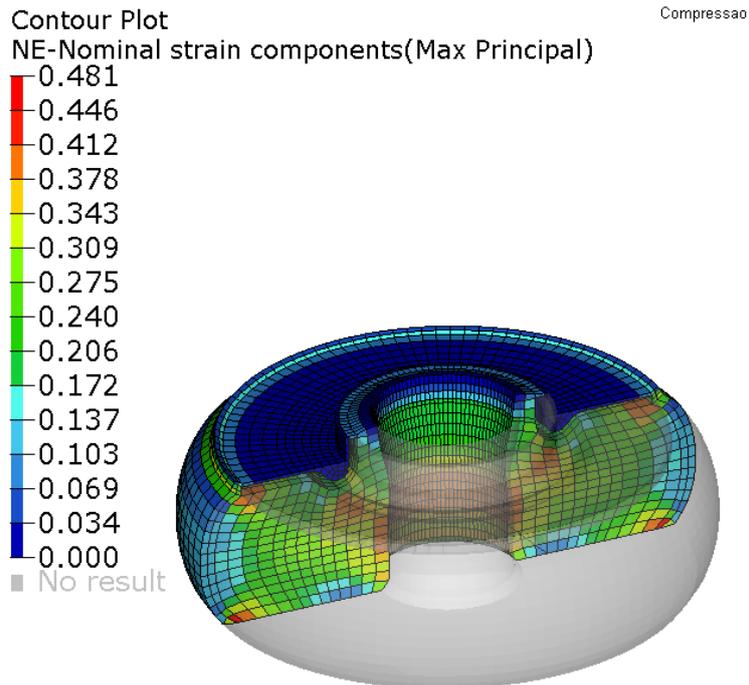


Figura 10: Modelo com o carregamento aplicado

Mesmo não seja o objetivo deste trabalho apresentar predições de durabilidade e fadiga, no resultado mostra pontos de maior concentração de tensão sob o efeito de compressão (região em vermelho), deste modo apontando quais seriam os primeiros pontos a apresentar possíveis falhas em um processo cíclico causando a fadiga.

Da mesma maneira que experimentalmente foi extraída a curva de rigidez estática do coxim sobre condições de compressão, o modelo virtual também consegue convergir numericamente todas as interações propostas e apresentando sua curva de rigidez estática muito similar à curva extraída experimentalmente como mostra a figura 11.

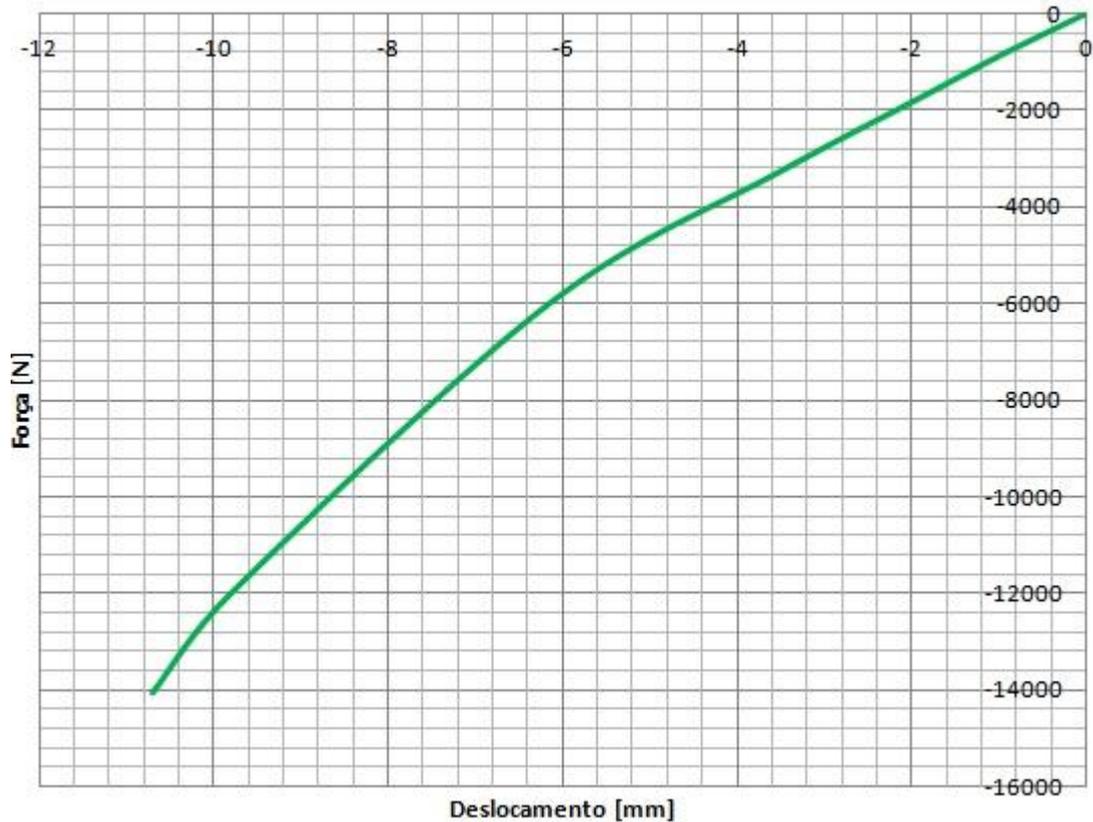


Figura 11: Curva de rigidez estática extraída pelo MEF.

Após se obter o resultado da curva de rigidez estática do coxim de maneira computacional, onde foi estabelecida uma lei de comportamento confiável para o modelo proposto, as devidas condições de contorno de modo que representem o mais próximo possível da aplicação real de trabalho do coxim e uma boa convergência numérica dos elementos, foi sobreposto as curvas de rigidezes estáticas obtidas experimentalmente em laboratório e a curva obtida do modelo virtual, levando em consideração que as curvas de rigidezes para coxins de borracha normalmente são toleradas de 10 a 15% devido as grandes variáveis possíveis no processo de fabricação e vulcanização da borracha.

A figura 12 mostra os resultados sobrepostos e com a curva de margem de tolerância na menor margem (10%) a partir da curva de rigidez extraída experimentalmente.

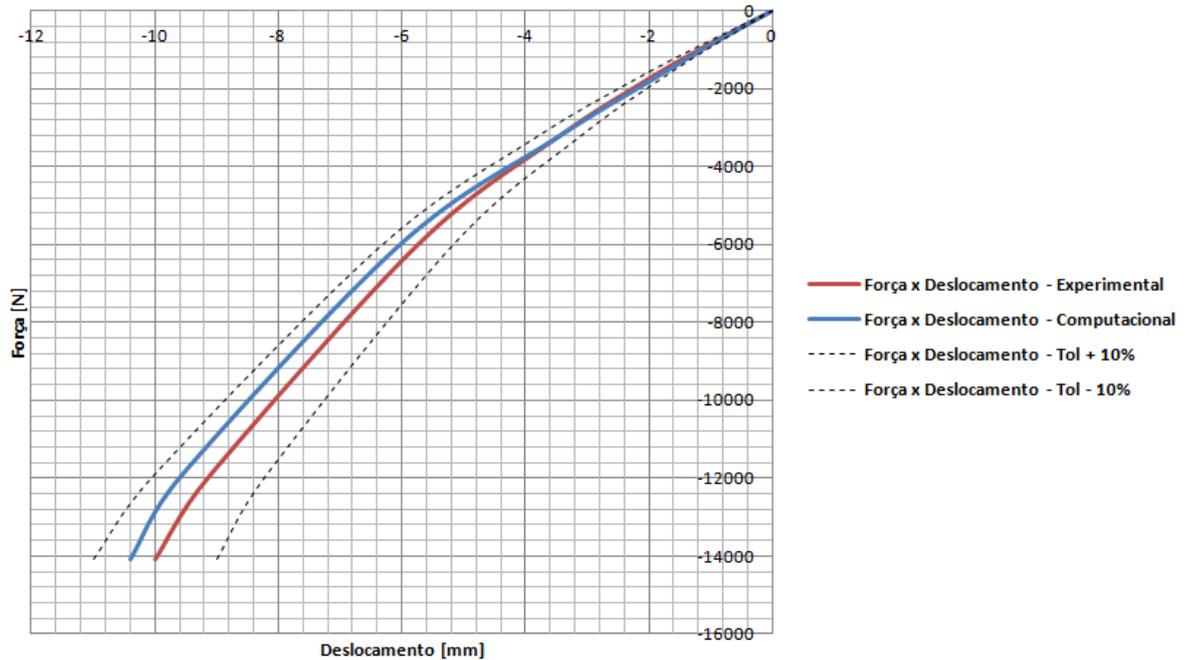


Figura 12: Curvas de rigidezes e margem de tolerância sobrepostas

4. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma proposta de cálculo de curva de rigidez da borracha pelo método dos elementos finitos e sua comparação com um modelo real de coxim utilizado no mercado automotivo

Para realizá-lo foi desenvolvido um modelo tridimensional do coxim no software CatiaV5® R20, um modelo de elementos finitos elaborado no software HYPERMESH® V11.0 e calculado pelo software ABAQUS® 6.11-1 como solver.

Uma pesquisa diagnóstica, com abordagem quantitativa e exploratória foi, então, conduzida pelos métodos de estudos descritos neste trabalho.

A análise pelo método dos elementos finitos para curva de rigidez da borracha natural NR, mostrou-se uma ferramenta de grande valor para se obter predições do comportamento do coxim elastomérico, e assim sucessivamente conseguir diminuir tempo de desenvolvimento de protótipos e custos aplicados em projetos..

Tendo-se que a análise mostrou uma boa representatividade o comportamento do coxim para a análise de sua curva de rigidez estática, mesmo não sendo o foco de este trabalho apresentar predições de durabilidade, o método apresenta a capacidade de apontar possíveis pontos em que esses coxins apresentarão algum dano, sendo que na análise estática já é possível verificar pontos de maiores concentração de tensão na borracha.

É importante salientar que devido às peculiaridades do material e a forma de representá-lo virtualmente, grande parte da metodologia e orientação de procedimento para a pesquisa é de material interno de uma empresa líder em sistemas anti vibrações automotivos, cujo qual tem seus laboratórios de pesquisa no mundo todo focados em desenvolver pesquisas e desenvolvimentos para o ramo.

Por isso, uma sugestão para trabalhos futuros seria usar fontes de pesquisas diferentes, onde provavelmente serão usados outros *guidelines*, cartas de materiais, máquinas experimentais, enfim, outras maneiras para se obter esta comparação experimental x computacional aqui apresentada.

Dessa forma, este estudo visa fornecer subsídios para a otimização de projetos, não só de coxins automotivos, mas para sistemas anti vibrantes utilizando a borracha natural como meio principal de atuação.

5. REFERÊNCIAS

HEFFER CAMBRIDGE, P. SSCHIDROWITZ AND R.T. DAWSON, FORDYCE JONES, History of the Rubber Industry –1952.

ANON, Engine mounts and NVH, Automotive Engineering July 1994.

H. ASHRA@UON, C. NATARAJ, Dynamic analysis of engine-mount systems, J. Vib. Acoust. 114 (1992).

P.E. GECK, R.D. PATTON, Front wheel drive engine mount optimization, SAE paper # 840736.

D.A. SWANSON, Active engine mounts for vehicles, SAE Paper # 932432

E.I. RIVIN, Passive engine mounts ± some directions for further development, SAE Paper # 850481.

S.R. JOHNSON, J.W. SUBHEDAR, Computer optimization of engine mounting systems, SAE paper # 790974.

J. BRETL, Optimization of engine mounting systems to minimize vehicle vibration, SAE Paper # 931322.