

A EFETIVIDADE DE UM COXIM DE SUSPENSÃO NA ATENUAÇÃO DAS VIBRAÇÕES

Lucas Uriel de Oliveira Sérgio (Unifacid) E-mail: lucasengmec67.lu@gmail.com

Ítalo Rodrigo Monte Soares(Unifacid) E-mail: italo.rodrigo@unifacid.edu.br

Ediones maciel de souza (UFPI)E-mail: Edionesmaciel.36@gmail.com

Lauriene Gonçalves da Luz Silva (UFPI)E-mail: lauriene@ufpi.edu.br

Rômulo Ribeiro Magalhães de Sousa (UFPI) e-mail: romulorms@gmail.com

Francisco de Tarso Ribeiro Caselli (UFPI) E-mail: tarso.caselli@ufpi.edu.br

Thercio Henrique de Carvalho Costa (UFRN) e-mail: thercioc@gmail.com

Renan Matos Monção (UFPI) E-mail: renan.matos@ufpi.edu.br

Marcos Guilherme Carvalho Braulio Barbosa (UFPI) E-mail: marcosguilherme@ufpi.edu.br

Francisco Rafael Campos de Macedo (Unifacid) E-mail: francico.macedo@professores.facid.edu.br

José Weliton Nogueira Júnior(Unifacid)E-mail: jose.nogueira@professores.facid.edu.br

Resumo: Materiais isoladores de vibração têm sido comumente utilizados com o objetivo de diminuir vibrações indesejadas e garantir uma vida útil de diversos componentes. As características do comportamento dos materiais elastômeros são realizadas através da deliberação de um modelo constitutivo, capaz de fazer uma relação matematicamente dos valores de tensão e deformação estudados em um corpo. Para este fim, foi realizada uma avaliação bibliográfica do desempenho automotivo de um coxim de suspensão quanto à capacidade de absorção das vibrações no qual os veículos estão sujeitos no cotidiano. Esse trabalho foi desenvolvido para demonstrar a importância de um coxim de suspensão automotiva sob a influência de vibrações. A metodologia utilizada nesta pesquisa (abordagem qualitativa) é de caráter descritivo. A pesquisa foi feita através de uma revisão bibliográfica, e serviu-se de artigos publicados referentes às vibrações e materiais elastômeros com os resultados obtidos através de estudos dos modelos teóricos propostos, viabilizando uma boa opinião sobre o comportamento dinâmico de uma suspensão automotiva e as características do material nas condições estudadas.

Palavras-chave: Coxim. Suspensão Automotiva. Elastômeros. Vibrações.

THE EFFECTIVENESS OF A SUSPENSION CUSHION IN MITIGATING VIBRATIONS

Abstract: Vibration insulating materials have been commonly used in order to reduce unwanted vibrations and ensure a useful life for various components. The characteristics of the behavior of elastomer materials are realized through the deliberation of a constitutive model, capable of making a mathematical relationship of the values of stress and deformation studied in a body. For this purpose, a bibliographic evaluation of the automotive performance of a suspension pad was carried out regarding the vibration absorption capacity to which vehicles are subjected in everyday life. This work was developed to demonstrate the importance of an automotive suspension pad under the influence of vibrations. The methodology used in this research (qualitative approach) is descriptive. The research was carried out through a bibliographic review, using published articles referring to vibrations and elastomeric materials with the results obtained through studies of the proposed theoretical models, providing a good opinion on the dynamic behavior of an automotive suspension and the characteristics of the material under the conditions studied.

Keywords: Cushion. Automotive suspension. elastomers. Vibrations.

1. Introdução

Materiais isoladores de vibração têm sido comumente utilizados com o objetivo de diminuir vibrações indesejadas e garantir uma vida útil de diversos componentes. Problemas relacionados à vibração e ruído são diariamente percebidos em diversos

campos, como: pontes, edifícios, máquinas, carros, motocicletas, aviões, entre outros (TABATABAEI, BEHBAHANI, SILVA, 2016; WANG, ZHU, 2017). Os materiais elastômeros tem uma ligação não-linear entre tensão e deformação, alcançando amplas deformações no campo elástico, sem uma certeza concreta do patamar de escoamento. Por demonstrarem este comportamento, são denominados materiais hiperelásticos. As características do comportamento dos materiais elastômeros são realizadas através da deliberação de um modelo constitutivo, capaz de fazer uma relação matematicamente dos valores de tensão e deformação estudados em um corpo (HOLZAPFEL, 2000). Uma enorme variedade de modelos é mostrada na literatura, onde é viável destacar os modelos de Arruda-Boyce, Ogden, Mooney-Rivlin, Neo-Hookeano e Gent.

Existe, de uma forma geral, uma grande dificuldade e variedade de área aplicável dos modelos constitutivos hiperelásticos. Um exemplo, no qual é possível encontrar relatos nos materiais de estudo de sua aplicação em pesquisas sobre otimização geométrica (PARK et al., 2012; KAYA, 2014), compressibilidade (SHI; LIU; CHEN, 2017) e vida em fadiga (LI et al., 2019; FENG et al., 2016). Dessa forma, é observado que, cada um dos modelos demonstra uma situação na qual seu uso é mais adequado.

Apesar das peculiaridades veiculares alusivos ao conforto e dirigibilidade serem vistos de modo antagônico, eles estabelecem vários pontos em comum que podem ser desenvolvidos para garantir um bom acordo de desempenho em dirigibilidade e conforto essenciais para os ocupantes. Tal fato pode estar relacionado ao tipo de material a ser avaliado, o número de dados experimentais adquiridos, à amplitude de deformação ao qual o material será submetido e ao custo computacional, onde está correlacionado à quantidade de constantes solicitadas pelo modelo.

A suspensão é um dos principais componentes de um veículo, desempenhando um importante papel na manutenção da estabilidade e na redução das vibrações. Um coxim de suspensão é um dispositivo que suporta o peso do veículo e amortece as vibrações geradas pelas irregularidades da superfície da estrada. A efetividade de um coxim de suspensão na atenuação das vibrações é crucial para o conforto e a segurança dos ocupantes do veículo. Este estudo visa avaliar a efetividade de um coxim de suspensão na redução das vibrações do veículo de acordo com o material da sua composição.

2. Revisão Bibliográfica

As primeiras aparições das suspensões automotivas aconteceram quando foi aplicada em carruagem real tracionada por animais no século VIII, na busca de ser o elemento mecânico capaz de reter energia vertical advindas das irregularidades da pista, mantendo, assim, a maximização do contato pneu-solo. A característica mais relevante para qualquer sistema de suspensão é o contato direto dos pneus e a estrada, visto que, caso não tenha o contato nas acelerações, travagem e manobras de curva, serão impossíveis de serem concluídas (DINIZ, Diego David Silva 2014).

2.1 Tipos de suspensão

2.1.1 (Suspensão dependente): No presente sistema de suspensão, o movimento oscilatório da roda de um lado do automóvel fica sujeito a obedecer ao movimento da outra roda do mesmo eixo. Portanto, no momento que a roda de um dos lados do veículo passa por uma irregularidade no solo, a outra tomará para si esse efeito, e isso depreciará a dinâmica do veículo, dado que esta roda levará a ter uma grande oscilação entre de forças de contato do pneu com o solo, que pode, em determinadas situações, até perdê-lo por completo. Todavia, a suspensão dependente dispõe do benefício de conseguir suportar mais peso na massa da carroceria e de não ocorrer uma variação de

cambagem no decorrer da rolagem do chassi, preservando-se do efeito de rollster, o que acabará causando desfechos na dirigibilidade (DINIZ, Diego David Silva 2014).

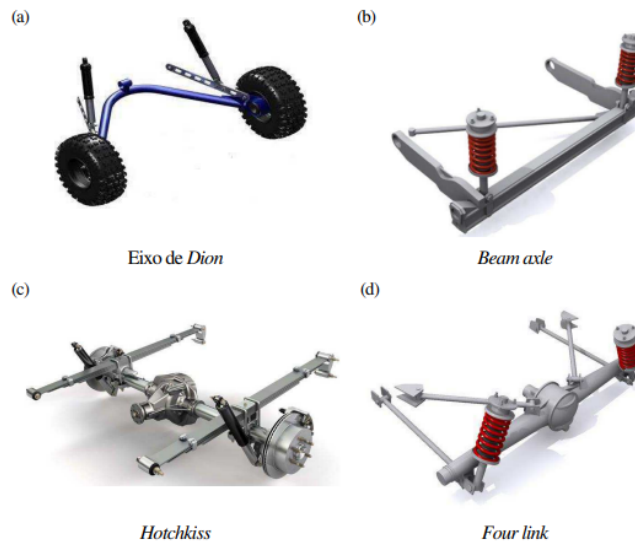


Figura 1: Suspensão dependente

2.1.2 (Suspensão Independente): Este modelo de suspensão outorga que cada roda realize seu movimento vertical sem influir na roda oposta. Na grande maioria dos veículos populares e caminhões leves, eles utilizam suspensão independente na parte dianteira, já nos veículos de competição, é comum utilizar este tipo de suspensão nas rodas dianteiras (principalmente) e também na parte traseira. Ademais, a suspensão independente viabiliza o controle de vários parâmetros de geometria, das quais são: comprimento do roll center, variações de bitola e controle das moções verticais das rodas, acordando que o projetista tenha uma cadeia de parâmetros fáceis de serem modificados para que ele venha alcançar os atributos dinâmicos diligenciados para o veículo (DINIZ, Diego David Silva 2014).

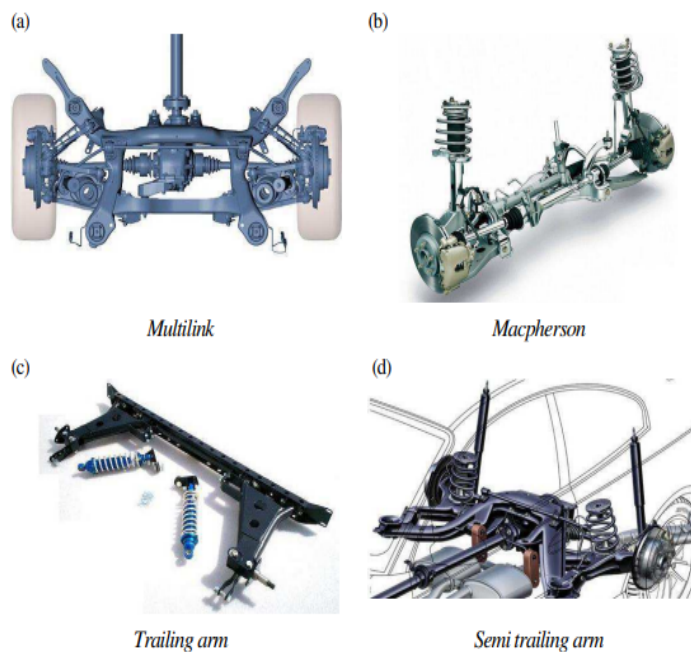


Figura 2: Suspensão independente

2.2 Componentes de um sistema de suspensão

2.2.1 Mola: Em uma suspensão, a mola funciona desenvolvendo o papel de aguentar as cargas impostas ao veículo, influenciando na conduta dinâmica global, que detem a capacidade de caracterizar os movimentos relativos do chassi e do pneu. Os tipos de molas que encontramos usualmente nas suspensões automotivas são: feixe de mola, molas helicoidais e molas pneumáticas (DINIZ, Diego David Silva 2014).

2.2.2 Feixe de mola: A mola semi-elíptica, é um componente de força, do qual o arranjo longitudinal é confeccionado por várias lâminas sobrepostas, onde tem ampla utilidade em veículos de cargueiros, agregado com a suspensão do tipo eixo rígido. Segundo (DINIZ, Diego David Silva 2014), essas molas proporcionam benefícios em sua aplicação, como a sua construção simples, a robustez e o baixo custo. Além do mais, este componente exibe um atrito interno, em razão do baixo atrito entre as lâminas quando a suspensão é ativada. Esta particularidade concede uma dissipação de energia, sendo conhecida como um amortecimento de Coulomb.



Figura 3: Feixe de mola

2.2.3 Mola helicoidal: A mola helicoidal, é composta pela torção de um arame de forma helicoidal. Ela pode conter seu passo e diâmetro do arame estável (rigidez constante) ou pode ter casos com passos e diâmetros variáveis, gerando uma ação progressiva (rigidez variável). As molas helicoidais tem uma gama de utilização nas suspensões independentes dos veículos, e tem aplicação em suspensões de eixo rígido (DINIZ, Diego David Silva 2014).

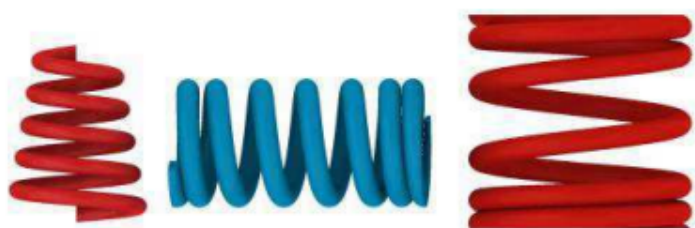


Figura 4: Mola Helicoidal

2.2.4 Mola pneumática: Este componente compõe-se em um cilindro de borracha, que em seu interior é preenchido por ar ou gás que é comprimido por um pistão aparelhado no braço de controle inferior da suspensão. O pistão vai exercer a função de mola quando se mover para cima ou para baixo sob ordenação do movimento do braço de controle da suspensão, fazendo o ar dentro da câmara ser comprimido. A mola pneumática detém a capacidade de conservar uma ampla quantidade de energia por unidade de massa, sendo vantajosa se colacionar com as molas metálicas. Essa mola

ainda dispõe de outra vantagem que é a habilidade de alterar sua rigidez, transformando a pressão interna na bolsa, dando permissão para obter diferentes aptidões no carregamento (DINIZ, Diego David Silva 2014).

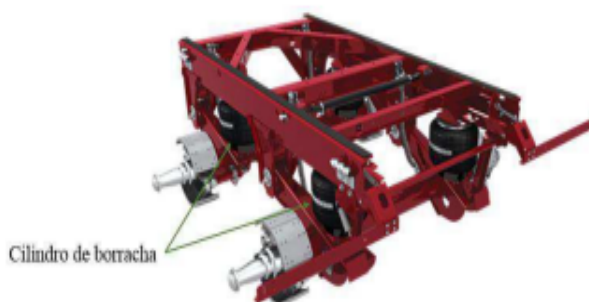


Figura 5: Mola pneumática

2.3 Amortecedor

Um amortecedor é definido como sendo um componente de força do sistema de suspensão que, trabalhando relacionado com a mola, a sua função é desvanecer energia do sistema na forma de calor. Partindo da forma de modificação de energia, pode-se, basicamente, ramificar em dois tipos de amortecedores: amortecedor de atrito seco, onde o deslizamento das peças que o compõe dissipa energia; e amortecedor hidráulico, cuja transição da energia cinética em calor é originada pela passagem de um fluido viscoso através de orifícios que conjugam as câmaras do amortecedor, desanexado por um pistão móvel (DINIZ, Diego David Silva 2014).

As suspensões dos veículos tem maior emprego dos amortecedores telescópicos hidráulicos e dividem-se em: amortecedores hidráulicos convencionais e amortecedores pressurizados. De acordo com (DINIZ, Diego David Silva 2014), o fator de amortecimento médio para veículos de passeio varia entre 0,2 e 0,4. Para carros cuja finalidade são esportes e competições off-road, estão arranjados na faixa de 0,4 a 1,0. Este valor propicia o controle da amplitude das vibrações em ocorrência de ressonância, simultaneamente em que leva a uma atenuação considerável das vibrações da suspensão quando a frequência das excitações ultrapassa 1,4 vezes do que a frequência natural da massa suspensa em função do seu atributo de transmissibilidade.

Uma das maneiras de alterar a conduta de um amortecedor é entre sua inclinação de trabalho relacionado ao sistema e ao movimento imposto. Os amortecedores quando arranjados em posição vertical à direção do pavimento, trabalham com máxima eficiência; por outra perspectiva, sendo montado com uma inclinação, somente um componente da força do amortecedor trabalha no manejo da cinesia da suspensão. Posto isso, é interessante montar os amortecedores com o mínimo de inclinação. Um ângulo de aclave superior à 30°, os amortecedores operam de forma sem nenhuma eficiência, sobrecarregando os elementos da suspensão (DINIZ, Diego David Silva 2014).

2.4 Isoladores ou buchas de suspensão

(DINIZ, Diego David Silva 2014) demonstra que os isoladores, também conhecidos usualmente de coxins ou buchas de suspensão, são os elementos de uma suspensão localizados, normalmente, nas articulações, dos quais a principal função é atenuar ou isolar as vibrações que escaparam pelo sistema de suspensão. Esse elemento é, de forma

geral, confeccionado de borracha e um metal que o envolve e sua forma é ligada à sua aplicação.

As buchas de borracha possuem como vantagem: nenhuma existência de lubrificação, proporciona melhor retraimento das excitações da pista, detém um elevado grau de complacência e baixo custo de confecção. Em ocorrências onde é solicitado alta performance do veículo, a utilização das buchas de borracha não tem recomendação, visto que estas permitem deflexões excessivas. A dinâmica veicular é prejudicada por deflexões, tendo em vista que esta decorrência originam variações angulares nas rodas, como cambagem, caster e convergência, por causa das forças que atuam no sistema.

2.5 Coxins elastoméricos

Alto fator de rigidez ou alto amortecimento elastomérico pode originar um patamar de baixa vibração em baixa frequência, porém sua capacidade de desempenho em alta frequência será crítico. Em outra mão, um declive na rigidez e no amortecimento implementam poucos níveis de ruído, mas sugere uma excitação de alto nível em baixa frequência por conta da excitação de choque. O coxim elastomérico oferece prós e contras frequência por conta da excitação de choque. O coxim elastomérico oferece prós e contras entre a deflexão estática e o isolamento de vibração do sistema (WELLINGTON, LUIZ, VALESCA, 2013).

As predisposições mais atuais no tocante ao desenvolvimento do veículo, tendo como exemplo os veículos de passeio leves, contam com uma necessidade de utilizar sumos desempenhos de coxins em vez dos coxins elastoméricos. Apesar disso, ainda há significativas melhorias quando em coxins elastoméricos manejando rigidezes não lineares e especificações de amortecimento (WELLINGTON, LUIZ, VALESCA, 2013).

2.6 Estudo das vibrações

A oscilação que uma massa exerce ao redor de um ponto fixo qualquer é conhecida como vibração, sendo Hertz (Hz) a quantidade de ciclos do movimento que é repetido em um espaço de tempo (s). Segundo o autor, um ciclo é estabelecido no momento que o corpo parte da sua posição de equilíbrio e se move de uma extremidade a outra voltando para o seu estado inicial de equilíbrio.

De acordo com (PINHO, Marivan da Silva 2012), a vibração é um atributo inerente de corpos que possuem em sua composição massa e rigidez. Cada órgão do corpo humano porta uma frequência natural, o que poderá favorecer um engrandecimento da vibração, caso a frequência externa estimulante seja a mesma frequência natural do corpo, equiparando-se ao fenômeno de ressonância.

De acordo com (PINHO, Marivan da Silva 2012), a teoria concernente à vibração se originou aproximadamente há 500 a.C com a observação do uso de instrumentos musicais, de modo que, foi diagnosticado que independe da maneira em que os instrumentos fossem tocados, a mesma frequência natural permanecia constante. Desde as primeiras eras, o homem teve uma profunda relação com os fenômenos no que se refere à vibração, visto que foi através desta interação que ele pode expressar suas ideias e pensamentos com as coisas ao seu redor.

No corpo humano, cada órgão dispõe de uma frequência natural dissemelhante, isto é, o corpo responde de forma diferente, em cada parte, a frequência externa a ela submetida, no caso do conjunto cardiovascular, frequências abaixo de 20 Hz implementam um aumento da operação cardíaca, tendo em vista que períodos de 0,1 a 0,7 Hz elaboram

efeitos como insônia, enjôos e diminuição da função ocular (PINHO, Marivan da Silva 2012).

3. Metodologia

Esse trabalho foi desenvolvido para demonstrar a importância de um coxim de suspensão automotiva sob a influência de vibrações. A metodologia utilizada nesta pesquisa (abordagem qualitativa) é de caráter descritivo. A pesquisa foi feita através de uma revisão bibliográfica, e serviu-se de artigos publicados referentes às vibrações e materiais elastômeros. Utilizou-se das palavras-chave, sendo estas: coxim, suspensão automotiva, coxim elastomérico, vibrações e o corpo humano. Esta pesquisa, através de revisão bibliográfica, foi primordialmente desenvolvida para reafirmar a importância do coxim na absorção das vibrações e o conforto dos que utilizam um automóvel, fazendo valer-se para futuras pesquisas.

Os artigos que foram analisados reúnem informações sobre vibrações e materiais elastômeros publicadas entre os anos 2012 e 2022. Os materiais avaliados apresentavam uma proposta de solução para os problemas destacados e instruções imprescindíveis para análise e comparação dos casos. A pesquisa foi realizada com base em alguns mecanismos como: métodos utilizados, ano de publicação, metodologia adotada e critérios considerados. Os materiais foram estudados para identificar características dos revestimentos e melhorias recentemente estudadas, levantar possíveis lacunas na área de conhecimento e, dessa forma, revelar direções para futuros desenvolvimentos.

4. Resultados e discussões

Segundo (Bergh, Felipe Maues 2021), em seu estudo para a seleção de um material hiperelástico para a análise de elementos finitos de um coxim automotivo de borracha, foram concebidas 12 combinações de tração e compressão, advindas de três testes de tração e quatro de compressão uniaxial. Os valores de força-deslocamento, integradas com as características do corpo de prova dos três testes, viabilizaram o cálculo para todos os pontos de cada ensaio. Com isso, um conglomerado de pontos foi gerado e permitiu a criação de uma curva Tensão-Deformação representativa do teste de valor médio da Tensão ao longo de toda a faixa de deformação utilizada.

Relacionado ao ajuste de curvas, o autor (Bergh, Felipe Maues 2021) utilizou como critério de exclusão a instabilidade no ajuste realizado pela função nativa do *software* Abaqus, *EVALUATE*. A tabela mostra as constantes hiperelásticas adquiridas para cada um dos modelos avaliados, identificando aqueles que estão livres de estabilidade e, consequentemente não foram utilizados para a análise do coxim de um automóvel.

| Modelo | Constantes do modelo | Condição de estabilidade |
|------------------|----------------------|--------------------------|
| Arruda-Boyce | $\mu = 1.0249$ | Estável |
| | $\lambda = 3804.68$ | |
| Mooney-Rivlin | $C_{10} = 0.2707$ | Estável |
| | $C_{01} = 0.1587$ | |
| | $C_{10} = 0.7114$ | |
| Polinomial (N=2) | $C_{01} = 0.08790$ | Instável |
| | $C_{20} = 0.5082$ | |
| | $C_{11} = -1.4401$ | |
| | $C_{02} = 0.6127$ | |
| Neo-Hookeano | $C_{10} = 0.5125$ | Estável |
| Yeoh | $C_{10} = 0.6684$ | Estável |
| | $C_{20} = -0.1255$ | |
| | $C_{30} = 0.01597$ | |
| Ogden (N=3) | $\mu_1 = 8.7216$ | Instável |
| | $\mu_2 = 0.001157$ | |
| | $\mu_3 = -7.4716$ | |
| | $\alpha_1 = -1.3617$ | |
| | $\alpha_2 = 10.1196$ | |
| | $\alpha_3 = -1.6779$ | |

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

Dos modelos que foram avaliados, os que apresentaram estabilidade foram Arruda-Boyce, Mooney-Rivlin, Neo-Hookeano e Yeoh. O autor obteve, para esses modelos, as curvas de tensão-deformação e o erro relativo de cada ajuste onde, no ajuste dos modelos, observou-se que as curvas geradas pelos modelos Arruda-Boyce e Neo-Hookeano foram praticamente iguais. As modelagens Arruda-Boyce e Neo-Hookeano, cujas curvas de ajuste foram iguais, mostram um pico de erro relativo de 25% no ponto de 0,05 mm/mm de deformação de tração (Bergh, Felipe Maues 2021).

O modelo de Yeoh obteve uma curva, por ser cúbica, apresentou duas concavidades, divergente do comportamento observado no experimento nessa faixa de deformações, o qual estabelece uma relação com um polinômio de 4º grau. O ápice do erro relativo com 0,05 mm/mm de deformação de tração foi aproximadamente de 17%, praticamente 8 vezes mais alto que o erro observado nessa magnitude de deformação compressiva (~2%). O modelo de Yeoh mostrou o menor erro dos ajustes de compressão ($\leq 2\%$), mas, o ajuste da parte de tração apresentou um pico de aproximadamente 9% em 0,38 mm/mm de deformação (Bergh, Felipe Maues 2021).

Para o estudo de validação metodológica (Bergh, Felipe Maues 2021) contou com análises em duas e três dimensões, no qual, o objetivo foi corroborar que a metodologia utilizada no seu estudo estava de acordo com os conceitos elaborados na literatura especializada e no manual do software Abaqus®. Na simulação em 2D, possibilitou reproduzir de maneira fiel os resultados encontrados analiticamente por Han, Duan e Wang (2020), no estudo da deformação imposta em um tubo de paredes grossas produzido em borracha.

Na apresentação dos resultados de (Bergh, Felipe Maues 2021), tendo em vista que nós de mesma coordenada radial apresentam os mesmos valores de tensão na situação estudada, levou-se em conta o nó 1 como sendo aquele situado na parede interna do tubo, com numeração ascendente ao longo da parede do tubo chegando no nó 11, encontrado na parede externa. A comparação entre os valores obtidos analiticamente por Han, Duan e Wang (2020) e aqueles obtidos na validação do trabalho de (Bergh, Felipe Maues) são apresentados na Tabela 2.

| Nó | Radial | | | Axial | | | Tangencial | | |
|----|-----------------|-------------------------|-------------------|-----------------|-------------------------|-------------------|-----------------|-------------------------|-------------------|
| | Análítica (MPa) | Elementos finitos (MPa) | Erro relativo (%) | Análítica (MPa) | Elementos finitos (MPa) | Erro relativo (%) | Análítica (MPa) | Elementos finitos (MPa) | Erro relativo (%) |
| 1 | -0,0351 | -0,0338 | 0,1445 | 0,1180 | 0,1248 | 0,3294 | 0,3290 | 0,3381 | 0,0767 |
| 2 | -0,0304 | -0,0316 | 0,1517 | 0,1155 | 0,1228 | 0,3944 | 0,3136 | 0,3291 | 0,2430 |
| 3 | -0,0261 | -0,0273 | 0,2233 | 0,1132 | 0,1190 | 0,2598 | 0,2995 | 0,3119 | 0,1724 |
| 4 | -0,0221 | -0,0233 | 0,2945 | 0,1110 | 0,1157 | 0,1756 | 0,2866 | 0,2966 | 0,1229 |
| 5 | -0,0183 | -0,0195 | 0,4067 | 0,1089 | 0,1127 | 0,1238 | 0,2746 | 0,2829 | 0,0922 |
| 6 | -0,0148 | -0,0158 | 0,4778 | 0,1069 | 0,1102 | 0,0926 | 0,2636 | 0,2706 | 0,0704 |
| 7 | -0,0115 | -0,0124 | 0,5529 | 0,1051 | 0,1079 | 0,0695 | 0,2533 | 0,2594 | 0,0586 |
| 8 | -0,0083 | -0,0091 | 0,8210 | 0,1033 | 0,1058 | 0,0607 | 0,2437 | 0,2493 | 0,0530 |
| 9 | -0,0054 | -0,0059 | 0,8690 | 0,1015 | 0,1040 | 0,0627 | 0,2348 | 0,2401 | 0,0508 |
| 10 | -0,0026 | -0,0029 | 1,3275 | 0,0999 | 0,1024 | 0,0642 | 0,2264 | 0,2317 | 0,0543 |
| 11 | 0,0000 | -0,0014 | --- | 0,0983 | 0,1017 | 0,1177 | 0,2185 | 0,2277 | 0,1756 |

Tabela 2: Comparação das tensões na parede do cilindro

O valor maior do erro relativo obtido na validação em 2D foi de 1,33% e tinha relação com a tensão radial calculada no décimo nó da malha, ou seja, a 0,5 mm da parede de fora. Fica salientado que a deformação radial na parede de fora do cilindro, nas condições de contorno predefinidas, é zero. Esse fato faz com que a função de erro relativo tenha uma assíntota vertical no décimo primeiro nó, isto é, era esperado que a magnitude do erro crescesse ao se aproximar do ponto de deformação radial nula. De acordo com os valores de tensão axial e tangencial calculados, o erro relativo não superou 0,33% em nenhum dos nós da malha de elementos finitos.

Logo, (Bergh, Felipe Maues 2021) verificou-se que o modelo de Yeoh, comparado ao de Arruda-Boyce, dominou com mais exatidão o comportamento do sólido ao longo de toda a faixa de deformações determinadas. O modelo de Yeoh teve um ápice de 4%, erro relativo próximo de 1 mm/mm de deformação, mas, no geral, o erro foi constante abaixo de 2% ao longo da simulação. Já no modelo de Arruda-Boyce, o mesmo apresentou picos perto de 5% com 0,1 e 2,5 mm/mm de deformação, mostrando valores de abaixo que no modelo de Yeoh, somente entre 0,6 e 1,8 mm/mm.

Relacionado à simulação do comportamento do coxim automotivo, a simulação de duas dimensões mostrou que é insatisfatório venerar o estado plano de deformações na situação que foi estudada, tendo em vista que nenhum dos modelos constitutivos teve capacidade de capturar de maneira correta o comportamento força-deslocamento demonstrado experimentalmente. Ainda assim, em razão do baixo custo computacional, é possível acatar a simulação em 2D como um limite abaixo da curva força-deslocamento.

Nesse cenário, o modelo que apresentou o menor erro relativo no decorrer da curva com a simulação 2D foi o de Yeoh, desse modo, esse é o modelo mais propício para o uso em simulações cuja formulação tem como base o estado plano de deformações. As curvas força-deslocamento adquiridas na simulação em 3 dimensões utilizando cada um dos modelos de material estão representadas na figura, assim como a curva obtida experimentalmente. O autor percebeu a redução do erro relativo nas simulações 3D, comparadas àquelas realizadas em 2D.

Os resultados obtidos por (Bergh, Felipe Maues) na simulação 3D mostraram que, dessemelhante do que ele observou na simulação em 2D, a modelagem de Yeoh foi o que teve menos aproximação do comportamento real do componente. Entretanto, tal

modelo foi o que relatou maior estabilidade nas condições definidas. O modelo de Mooney-Rivlin mostrou uma predição melhor que aquela do modelo Yeoh, não obstante, foi o modelo cuja falta de convergência se tornou crítica em baixos valores de deformação. Os modelos Arruda-Boyce e Neo-Hookeano foram os que melhor conseguiram o comportamento real do coxim durante a simulação em 3 dimensões. Devido às curvas geradas pelo ajuste de ambos os modelos serem idênticas, as predições dos dois modelos foram iguais.

Na análise de (WELLINGTON, LUIZ, VALESCA, 2013) em seu estudo que consistia na Comparação numérica x Experimental de borracha para coxins automotivos, foi analisado 5 protótipos de borracha natural “NR” de 65 Sha e se basearam na referência de testes experimentais adquiridos da literatura (TREOLAR, 1944; HEUILLET E DUGAUTIER, 1997) para borracha natural incompressível. Os testes foram realizados em uma máquina KRATOS, sendo submetidos a tensão e simples compressão planar. A máquina transfere paralela a reação do carregamento aplicado para o computador em uma série de valores particulares a força de reação do modelo VS o deslocamento cedido e a curva base para o estudo dos autores estão representados na figura.

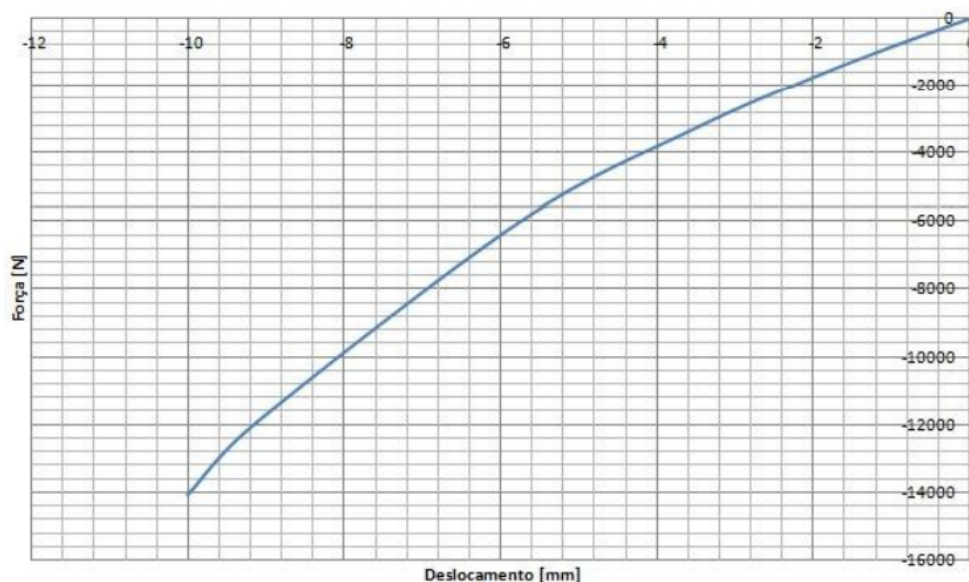


Figura 6: Gráfico de curva média de rigidez das 5 amostras testadas.

Os cálculos foram feitos a partir da consideração de carregamentos críticos a que estarão subordinados estes componentes e das propriedades físicas dos materiais. Os autores apresentaram o método de identificação da função de densidade de energia de tensão W Neo-Hookeana. As características dos materiais são determinados numa análise de regressão de mínimos quadrados dos dados experimentais de tensão simples. A função de densidade de energia de tensão W Neo-Hookeana que o software interage é

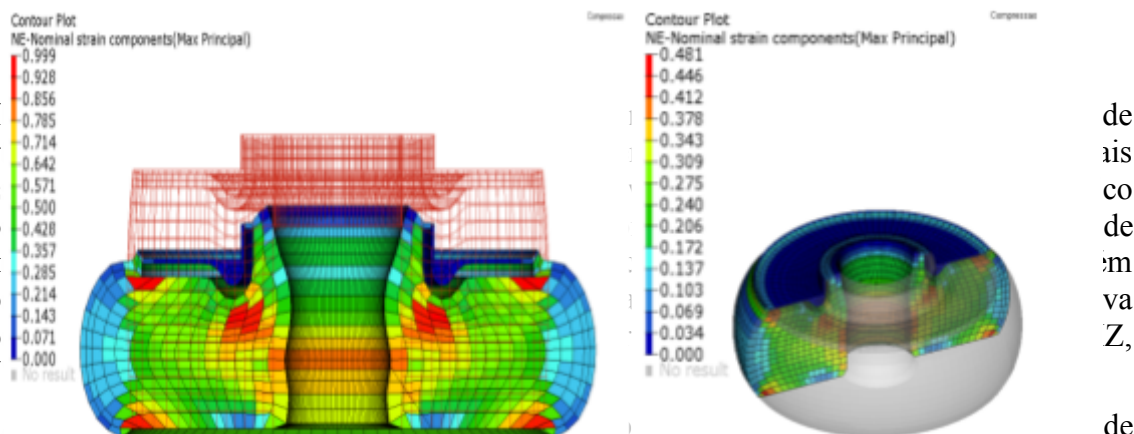
representada como
$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{D_1}(J - 1)^2 \quad W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{D_1}(J - 1)^2$$
,

onde $C_{10} = \frac{G}{2}$, $C_{10} = \frac{G}{2}$, G é o módulo de cisalhamento e D é o módulo de compressão,

que é igual a $\frac{2}{K_0 K_0}$ e o K_0 K_0 é obtido experimentalmente em laboratório interno onde é criada a carta de materiais. Para este material os autores usaram 9,1E-04mm/N.

Utilizando este conceito mecanicista neo hookeano, (WELLINGTON, LUIZ, VALESCA, 2013) extraíram a curva de rigidez estática do modelo sob o efeito da

compressão aplicada, mostrado em um gráfico de tensão máxima principal como mostra as figuras.



de tolerância na menor margem (10%) a partir da curva de rigidez foi extraída

Figura SEQ Figura * ARABIC 7: Modelo com carregamento aplicado

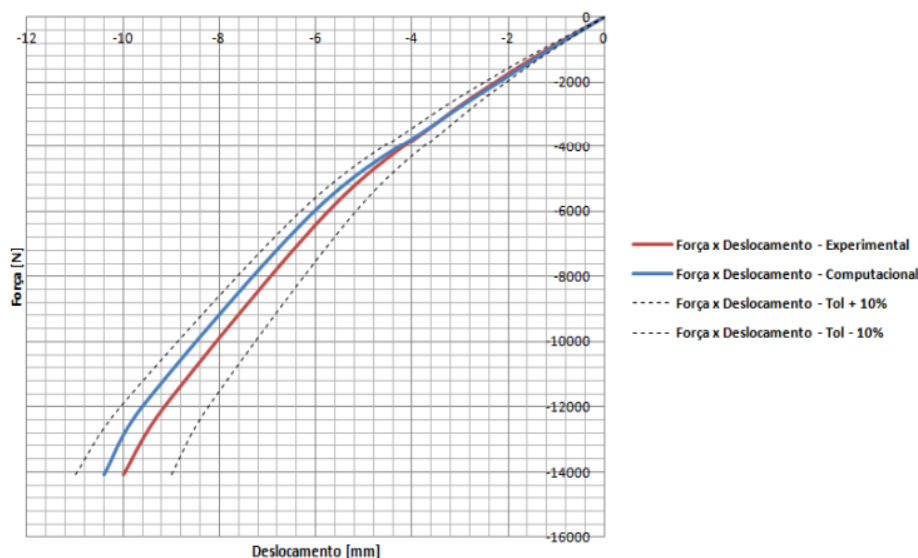


Figura 8: Gráfico das curvas de rigidezes e margem de tolerância sobrepostas.

5. Conclusão

Este trabalho apresentou um estudo na qual foram mostrados os métodos para a avaliação de coxins elastoméricos de suspensão. Os métodos de avaliação encontraram curvas, por meio de programas computacionais, o qual foi possível usar como referência para a obtenção dos resultados referente ao estudo. Para o ajuste de curvas, os autores adotaram um critério de exclusão realizado pela função *EVALUATE* disposta no software. Conclui-se que os resultados obtidos através desse estudo dos modelos teóricos propostos, viabilizaram uma boa opinião sobre o comportamento dinâmico de uma suspensão automotiva e as características do material nas condições estudadas. As informações disponibilizadas nesse trabalho serão grande valia para a abertura de novas pesquisas que venham a se concretizar ou acrescentar e enriquecer o presente estudo, ou ainda, auxiliar uma nova linha de pesquisa relacionada à pesquisa do comportamento veicular, como um item de referencia para o setor automotivo e aos desenvolvedores de projetos nos futuros tipos de veículos.

Referências

ANDRECIOLI, Fernando. **Modelagem da coxinição de motores para aplicações automotivas**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Controle e Automação Mecânica) - Escola Politécnica, University of São Paulo, São Paulo, 2018.

BERGH, Felipe Maués. **Seleção de um modelo de material hiperelástico para a análise de elementos finitos de um coxim automotivo de borracha**. 2021. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

DE LIMA, Wellington Antônio Soares; NUNES, Luiz Eduardo Nicolini do Patrocinio; CORREA, Valesca Alves. **CNEBCA: Comparação numérica x experimental de borrachas para coxins automotivos**. 2013. 14 f. Artigo (Publicação em uma revista científica) – Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia. Resende, Rio de Janeiro, 2013.

DINIZ, D. D. S. **Estudo da dinâmica vertical em suspensão duplo A de um veículo off-road tipo baja**. 2014. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/260>

GANZAROLLI, Francisco. **Influência das frequências de ride no conforto e dirigibilidade veiculares na faixa linear de uso do veículo**. 2012. Dissertação (Mestrado em Dinâmica das Máquinas e Sistemas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

MARIN, Bianca. **Aplicação de redes neurais artificiais na modelagem matemática do comportamento dinâmico de um isolador viscoelástico**. 2018. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2018