



COMPARAÇÃO ENTRE ESTRATÉGIAS NUMÉRICAS PARA MODELAGEM DE BUCHAS COM VISTAS AO CÁLCULO DE FADIGA

André Weijh

Rogério José Marczak

andreweijh@gmail.com

rato@mecanica.ufrgs.com

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Av. Osvaldo Aranha 99, 90035-190, Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

Abstract. *This paper presents a comparison between different numerical models of mechanical bushings used in cargo transport vehicles as connecting element or transmitting movements and forces. The numerical models are based on the finite element method and different representations of the bushing are analyzed. Fatigue life is evaluated at a point of interest of the component through traditional methods. The importance of correct modeling of these components in numerical models of similar structures largely used in industry is also discussed. As main results have the necessity of bushing modeling in transient analysis, besides the impossibility of utilization of rigid bushing as an alternative industrial way to modeling this component.*

Keywords: *Bushing modeling, fatigue, rainflow method, finite element method.*

1 INTRODUÇÃO

Dentre os diversos problemas de engenharia, a modelagem de um embuchamento mecânico está entre os tópicos mais discutidos dentro da indústria, por ser um componente presente em grande parte das estruturas veiculares e de máquinas em geral. Essa discussão deve-se em grande parte à complexidade do problema, envolvendo não linearidades, fins de curso, batentes, impactos e diversos outros fatores que dificultam a modelagem desse tipo de junta, tornando imprescindível o uso de modelos mais simples para sua representação. Por outro lado, na tentativa de mitigar essas dificuldades, é comum engenheiros e analistas tenderem a simplificar demasiadamente os modelos numéricos desses componentes, sem muitas vezes a compreensão de sua influência no resultado da análise.

O presente trabalho compara diferentes estratégias de modelagem numérica de uma bucha mecânica. A comparação é feita em torno do dano de componentes através da tensão em pontos críticos próximos à localização da bucha, com diferentes formulações de embuchamento, apontando a importância do uso das simplificações, as possíveis consequências das mesmas em uma análise estrutural e a necessidade da modelagem desse componente na estrutura.

As formulações utilizadas são baseadas nos três tipos de simplificações que comumente são encontrados na indústria. Dentro das diversas hipóteses simplificativas questões de simulação de juntas de embuchamento mecânico são o uso de embuchamentos como ligações rígidas entre componentes da estrutura, fenômenos transientes analisados estaticamente com escalonamento de carga, uso coeficientes de rigidez constante em buchas e desconsideração de amortecimento no problema, sendo discutidas no decorrer do trabalho.

2 OBJETIVOS

Esse trabalho visa discutir e validar simplificações, caso sejam pertinentes, e alertar sobre simplificações excessivas, que alteram em demasia ou invalidam os resultados da análise para o caso de embuchamentos mecânicos e suas diferentes estratégias de modelagem. Para tanto, será feita uma análise de dano em fadiga para os diferentes tipos de bucha analisados, usando o método rainflow para o cálculo de dano por desgaste e por sobrecarga, comparando as vantagens e desvantagens de cada modelagem.

Esse trabalho tem como objetivos avaliar a influência da modelagem do embuchamento como junta rígida, da desconsideração de não linearidades nos modelos de buchas e da inclusão do amortecimento no dano em fadiga no ponto crítico escolhido, avaliando os métodos de modelagem e apresentando alternativas que reduzam as discrepâncias dos resultados.

3 METODOLOGIA DE ANÁLISE

O trabalho foi realizado em software comercial, cujas análises de elementos finitos foram feitas em Ansys® Workbench [Ansys, 2014]. A metodologia pode ser dividida em partes distintas, englobando definição do problema, definição das condições de contorno, execução da análise pelo método de elementos finitos e escolha dos métodos de avaliação dos resultados.

3.1 Definição do problema

A escolha do problema a ser resolvido foi feita com base na grande utilização de buchas mecânicas dentro da indústria, cujo uso é feito de forma simplificada e sem o total conhecimento dos efeitos da simplificação sobre a estrutura como um todo.

A estrutura escolhida é um chassi de um veículo de transporte de carga, contendo embuchamentos na barra tensora, responsável por segurar o movimento de rolagem da estrutura em curvas, sendo um importante componente para estabilidade na dinâmica lateral, e doravante chamada de barra V.

O conjunto da barra V é formado por dois suportes fundidos presos às longarinas através de parafusos; pela barra V e pelas buchas de ligação entre a barra V e os suportes fundidos do chassi. Na outra extremidade, a barra é presa ao eixo através de outra bucha, transferindo os esforços provenientes da dinâmica lateral do eixo para a estrutura do chassi.

Para objeto de estudo foi desenhada a estrutura do chassi; os suportes fundidos da barra V no chassi; a barra V e as buchas de ligação entre esta e seus suportes fundidos. Será aplicada a força proveniente do eixo diretamente no centro da fixação da barra V, como forma de simplificação do problema, não sendo representados demais componentes como molas, e conjunto do eixo, por exemplo.

Com isso, a estrutura escolhida tem finalidade didática para aplicação e comparação das diferentes modelagens de embuchamento na vida em fadiga de um ponto crítico escolhido próximo à junta, não sendo pretendido simular o comportamento dinâmico de um veículo rodoviário de transporte de carga propriamente dito, visto que o uso de embuchamentos é muito mais genérico do que o uso automotivo.

A influência das diferentes modelagens de embuchamento escolhidas será feita através da análise de tensões no ponto na estrutura do chassi (furação introduzida no chassis), calculando parâmetros de fadiga para esse ponto, que serão descritos em seções posteriores.

3.2 Modelagens de embuchamento propostas

Para avaliação da influência da modelagem das buchas mecânicas no ponto crítico da estrutura têm-se propostas seis análises distintas, baseadas em três principais simplificações utilizadas na indústria. As duas primeiras são feitas em análise estática através de uma força unitária aplicada à estrutura, fazendo um escalonamento de carga conforme o sinal aplicado nas análises transientes, não levando em conta a parcela dinâmica do problema, desconsiderando as inércias envolvidas e suas consequências. As outras quatro análises são transientes, sendo aplicada na estrutura uma força variável no tempo e resolvendo o problema dinâmico. As diferentes modelagens e o tipo de análise utilizada são descritas através da Tabela 1. Para ambas as análises são utilizadas as mesmas malhas, propriedades mecânicas dos materiais, condições de contorno e condições iniciais do problema, diferindo unicamente nas modelagens dos embuchamentos mecânicos, podendo então ser comparada a influência desse componente no problema.

As buchas com rigidez infinita são modeladas com elementos de ligação rígida entre as estruturas. Quando modelados com coeficientes de rigidez constantes, esses elementos recebem uma rigidez associada, e quando são associados coeficientes de rigidez variável, a força de reação na bucha varia conforme o deslocamento, tendo portanto rigidez variável com o deslocamento.

Tabela 1– Condições de análise das buchas para as diferentes simulações.

Casos	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
Análise	Estática	Estática	Transiente	Transiente	Transiente	Transiente
Bucha	Ligação rígida/ Rigidez infinita	Rigidez constante	Ligação rígida/ Rigidez infinita	Rigidez constante	Rigidez variável	Rigidez variável com amortecimento

3.3 Parâmetros de análise

Definindo as condições de contorno do problema, têm-se os perfis das longarinas bi apoiados, com deslocamentos prescritos em 0mm nas três direções do lado esquerdo e deslocamento prescrito em 0mm na direção x no lado direito da estrutura. A força é aplicada no centro na barra V. As condições de contorno podem ser vistas através da Figura 1.

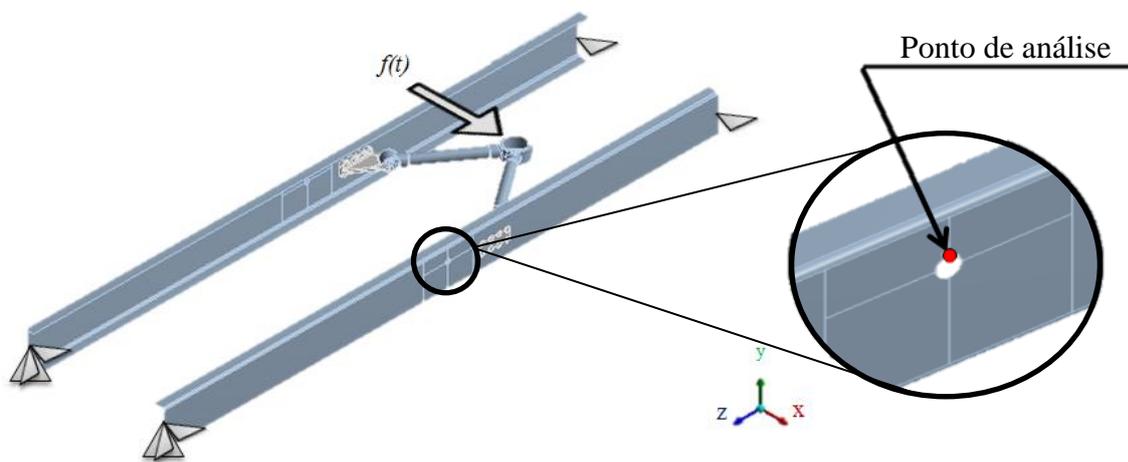


Figura 1 – Condições de contorno do problema proposto. Estrutura do chassi bi apoiada, deslocamentos restritos em todas as direções no lado esquerdo e restrito em x pelo lado direito. No centro da barra V é aplicada a força variável no tempo na direção do eixo x, representada por $f(t)$.

Para a malha de elementos finitos utilizou-se elementos de casca de triangulares de 6 nós, com interpolação quadrática, para ambas as longarinas e elementos sólidos tetraédricos de 10 nós e interpolação quadrática no restante do modelo.

Assim, malha a ser utilizada em todos os modelos é composta por 23482 elementos e 43279 nós, podendo ser vista na Figura 2. Para as conexões entre a estrutura da barra V com a longarina utilizou-se do contato de cola (bonded) disponível no software, cuja formulação é feita por penalização. A área de cola utilizada é do tamanho da área da arruela de fixação dos parafusos utilizados na estrutura. Para um parafuso M16 o tamanho da área colada é de 477mm². Por fim utilizou-se o contato de frictionless nas regiões que não estavam coladas, para que não houvesse penetração de uma estrutura na outra, permitindo também a abertura de folgas entre as partes envolvidas, cuja formulação também é feita por penalização.

A força utilizada para a análise transiente segue o gráfico da Figura 3, e é composta por um somatório de senos, dado pela equação 3.1. Conforme Fui e Rahman, 2007, as excitações típicas de pista de rodagem tem valores definidos entre 0 e 100Hz, sendo a força escolhida

composta por um somatório de senos dentro da faixa típica de frequência de excitação para essa estrutura.

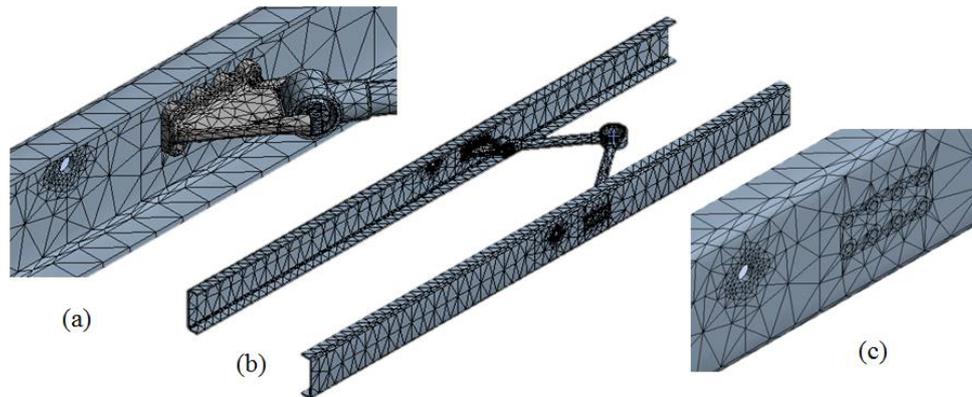


Figura 2 – Estrutura e malha utilizada para as simulações. Longarinas utilizando elementos de casca de 6 nós com espessura de 9,5mm e restante da estrutura utilizando elementos tetraédricos sólidos de 10 nós. Em (a) tem-se a bucha de ligação entre a barra V e seu suporte fundido. Em (b) tem-se a fixação da barra V ao eixo, onde é aplicada a força $f(t)$. Em (c) tem-se o ponto crítico para o estudo da influência das diferentes modelagens de embuchamentos.

A força utilizada para a análise transiente segue o gráfico da Figura 3, e é composta por um somatório de senos, dado pela equação 3.1. Conforme Fui e Rahman, 2007, as excitações típicas de pista de rodagem tem valores definidos entre 0 e 100Hz, sendo a força escolhida composta por um somatório de senos dentro da faixa típica de frequência de excitação para essa estrutura.

$$\sum A_i \sin \omega_i = 2260,8(2,1 \sin 50t + 3 \sin 30t + 1,3 \sin 28,5t + 0,9 \sin 7t + 0,5 \sin 5t + 0,3 \sin t) \quad (1)$$

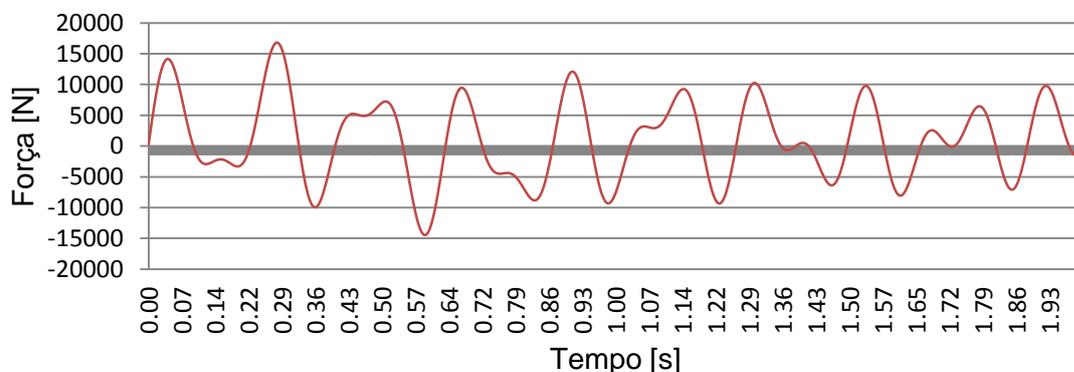


Figura 3 – Gráfico da força (em Newton) pelo tempo (em segundos) para a análise transiente. A força é aplicada no centro da barra V e é dada pela Equação 3.1.

Os valores de pico de aplicação da força aplicada são associados a medições efetuadas pelo fabricante de suspensões, cujos valores de pico típicos de tração na barra V ficam na faixa de 14kN. Assim, decidiu-se pela aplicação da força cujas reações se apresentassem dentro da faixa esperada de valores de pico para o embuchamento. No modelo proposto, essas reações são dadas por forças de aproximadamente 16,8kN aplicadas no centro da barra V. Com isso, tem-se forças cujas magnitudes são próximas aos esforços que são suportados pela estrutura, tendo então um balizador da amplitude da força que se pode aplicar nesse problema.

Para os modelos estáticos é feita a aplicação de uma carga unitária, onde retira-se o valor de tensão no ponto crítico, e faz-se um escalonamento de carga, proporcional à carga aplicada no modelo transiente (supondo-se a previsão do comportamento dinâmico através da análise estática com escalonamento de carga), considerando o valor absoluto da força para fazer essa proporção, retirando uma tensão de Von Mises escalonada.

Definidas as condições de contorno conforme os esforços suportados pela estrutura pode-se passar para os parâmetros da análise transiente, escolha dos métodos de avaliação dos resultados e para a seção de resultados.

3.4 Métodos de avaliação dos resultados

Como forma de avaliação dos resultados, escolheu-se um ponto de interesse na estrutura, localizado na parte superior do furo da longarina direita, como pode ser visto na Figura 1. A escolha do ponto na longarina é feita para que não haja interferência de outros fatores da análise, como modelamento dos contatos entre as partes, na influência do embuchamento no dano em fadiga do ponto de interesse. Tendo o ponto de interesse inserido na longarina, relativamente distante do contato, tem-se a influência pura das diferentes modelagens de buchas na tensão no ponto crítico, podendo desconsiderar os parâmetros de contato entre partes nessa análise.

Para avaliação das diferenças entre as modelagens de embuchamento, resolveu-se fazer uma análise de dano em fadiga, através da contagem de ciclos de tensão no ponto crítico, comparando o dano acumulado para os diferentes modelos propostos.

Para a contagem de ciclos de tensão escolheu-se o método rainflow, recomendado pela norma ASTM E 1049 para refletir o mecanismo de dano por fadiga de maneira mais eficiente, segundo Reckziegel et al, 2002.

O parâmetro escolhido para comparar os resultados é o dano do material na análise de sua vida em fadiga.

A análise de falha por dano acumulado é dada pelo método de Palmgren-Miner, conforme a equação [Shigley, 1984].

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \quad (4)$$

Onde n é o número de ciclos a uma determinada carga que causa dano, N é o número de ciclos necessário para falha do material naquela tensão e D é o dano do material.

Isso significa que a relação entre o número de ciclos em que atua um dado nível de tensão e o número de ciclos que o material resistiria sob este mesmo nível de tensão deve ser menor que ou igual à unidade para que o material resista.

Para análise de falha por desgaste, onde o carregamento é dado por um processo gaussiano de banda estreita, é possível determinar o dano médio por desgaste para uma determinada vida através da equação [Rosa, 2002]:

$$D = f_0 t \left(\sqrt{2} \frac{\sigma_t}{C} \right)^{-\frac{1}{m}} \Gamma \left(1 - \frac{1}{2m} \right) \quad (5)$$

Onde D é o dano médio, f_0 é a frequência média da sollicitação, t é o tempo de vida, σ_t é o desvio padrão da sollicitação, C e m são constantes do material e Γ é a função gama.

A frequência média da solicitação pode ser feita pelo cálculo da expectativa média de picos ou de forma mais simples pela contagem de picos pelo método rainflow e determinação do número de picos por unidade de tempo, escolhida por simplicidade.

A avaliação do comportamento do dano faz-se através da curva de Wöhler, que é definida pela equação 3.6 e que define as constantes características para cada material.

$$\sigma_n = CN^m \quad (6)$$

Onde N é o número de ciclos e σ_n é o valor de tensão para determinado número de ciclos.

Assim, pode-se determinar a falha por desgaste do componente, que é devida a uma perda gradativa das propriedades do material, e que depende dos parâmetros químicos, metalúrgicos associados ao tipo de material, à frequência de solicitação e também ao grau de agressividade do meio onde o componente irá operar [Reckziegel et al, 2002; Rosa,2002; Rosa et al, 1993].

O material comumente usado nessas estruturas – aço A-36 – tem como coeficiente C o valor de 925 MPa e para m o valor de -0,132, equivalendo à inclinação da curva do Wöeler [Efatigue, 2015].

Assim, seguindo a metodologia pode-se comparar o nível de dano para o mesmo ponto crítico (Figura 1) causado pelas diferentes modelagens de embuchamento, avaliando se é possível obter resultados confiáveis para as simplificações apresentadas na Tabela 1.

4 RESULTADOS

Nessa seção é feita a análise dos históricos de tensão das diferentes estratégias de modelagem de embuchamento, tendo em vista a comparação do número de ciclos para cada modelo proposto.

Inicialmente, pode-se gerar um gráfico de tensão de Von Mises pelo tempo no ponto crítico escolhido para todas as modelagens propostas. Esse gráfico pode ser visto na Figura 4. A escolha de Von Mises é feita por conservadorismo, apesar de considerar tensões compressivas no cálculo de fadiga, tem-se uma previsão de fadiga conservadora quando comparada a previsão conforme a tensão máxima principal.

Através da Figura 4 já é percebida a semelhança visual entre os modelos dos casos 1 e 2 (casos de escalonamento de carga) e entre os modelos dos casos 4, 5 e 6 (casos transientes). Já entre os casos estáticos e transientes há uma grande diferença, que também é percebida na diferença entre o caso 3 (ligação rígida) e todos os outros casos propostos. No entanto, análises visuais podem induzir a conclusões errôneas, e o cálculo de fadiga deve ser empregado para gerar valores numéricos comparativos entre cada caso.

No caso do embuchamento com rigidez variável (caso 6) e amortecimento não houve uma defasagem significativa na análise visual do gráfico, pois a força aplicada tem frequências muito grandes, não dando tempo suficiente para o amortecimento agir sobre a estrutura.

Para a análise através de contagem de ciclos por rainflow, e posteriormente análise de dano por desgaste e sobrecarga, os sinais são discretizados em faixas de amplitudes de tensão, onde são contados o número de ciclos para cada faixa, podendo ser comparadas através da Figura 5, que corresponde à contagem de ciclos para os casos 1 até 6.

No gráfico pode-se perceber que os resultados para ambas as análises estáticas com escalonamento de carga (casos 1 e 2) divergem muito do resultado de todas as análises

transientes, não conseguindo representar a severidade do problema, sendo inviável o uso desse tipo de simplificação, pelo fato de desconsiderarem os fatores dinâmicos de inércia do problema.

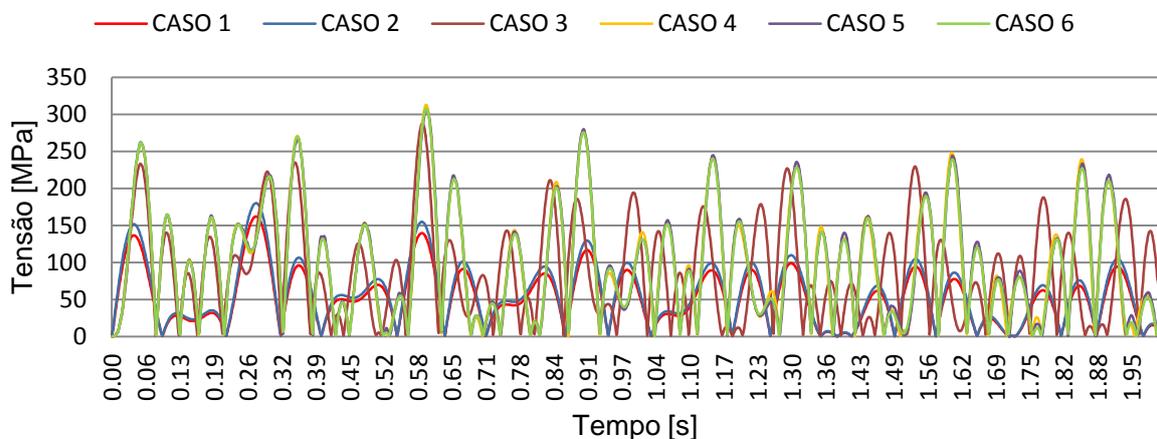


Figura 4 – Gráfico de tensão de Von Mises pelo tempo no ponto crítico para as análises transientes propostas.

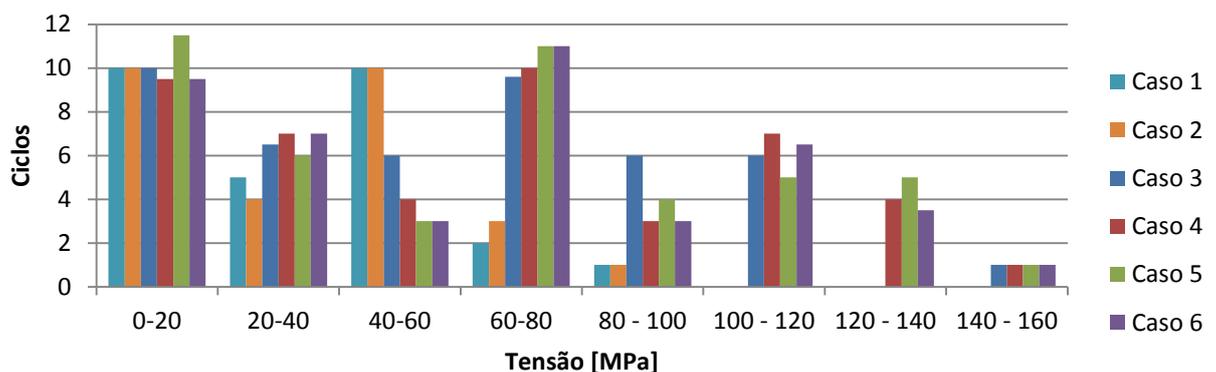


Figura 5 – Contagem de ciclos pelo método de rainflow para os casos 1 a 6 conforme especificado na Tabela 1.

Nas análises transientes, percebe-se que o embuchamento do caso 3 não registrou ciclos de tensão dentro da faixa até 140MPa, enquanto as outras modelagens tem-se 4 ciclos para o caso 4, 5 ciclos para a bucha do caso 5 e 3,5 ciclos para a bucha do caso 6. Na faixa de 140 a 160MPa, todas as modelagens transientes registraram um ciclo. Essa igualdade se deve à discretização em faixas largas de tensão, sendo que os valores registrados não são necessariamente os mesmos, mas acabam sendo contabilizados na mesma região.

No caso 3 tem-se uma ciclagem com tensões abaixo dos modelos mais completos, enquanto a bucha com coeficiente variável (caso 5) é a formulação mais conservadora, visto que apresenta o maior número de ciclos para as tensões mais altas em comparação com as outras modelagens. Ainda assim, as modelagens com coeficientes constante de rigidez (caso 4) e com amortecimento (caso 6) apresentam resultados muito próximos dos obtidos através da bucha com coeficiente variável (caso 5), levando a um dimensionamento muito próximo independentemente da formulação escolhida.

Na Tabela 2 pode-se ver a comparação entre o número de ciclos e as faixas de tensão para o sinal, onde se pode calcular o dano para cada um dos embuchamentos propostos, sendo

demonstrado pela Tabela 3. O cálculo é realizado pela equação de acumulo de dano de Miner (equação 3.5). Através da equação 3.6 calcula-se o dano por desgaste, apresentado na mesma tabela.

Tabela 2 – Comparação do número de ciclos por faixa de tensão.

Faixa de tensão [MPa]	80 - 100	100 -120	120 -140	140 - 160
Caso 1 [ciclos]	1	0	0	0
Caso 2 [ciclos]	1	0	0	0
Caso 3 [ciclos]	6	6	0	1
Caso 4 [ciclos]	3	7	4	1
Caso 5 [ciclos]	4	5	5	1
Caso 6 [ciclos]	3	6,5	3,5	1

Tabela 3– Comparação do valor de dano por desgaste e dano por sobrecarga para cada modelagem de bucha.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6
Dano por desgaste	1,30E-08	2,87E-08	6,60E-07	1,98E-06	2,02E-06	1,70E-06
Dano por sobrecarga	0	0	1,68697 E-06	4,14075 E-06	4,75419 E-06	3,83403 E-06

Conforme o cálculo de dano tanto por desgaste quanto por sobrecarga (Tabela 3) pode-se perceber que os casos 1 e 2 divergem dos demais inclusive na grandeza do dano calculado. O caso 3 subestima o valor de dano significativamente, enquanto os modelos 4, 5 e 6 têm valores muito próximos uns dos outros, sendo o valor da modelagem mais completa o menor dano calculado dentre os três, tendo os outros dois modelos abordagens conservativas em relação ao caso mais completo e distanciando-se aproximadamente 15% no valor de dano do caso 6 para o dano por desgaste, e aproximadamente 24% para o dano por sobrecarga.

Cabe salientar que mesmo com maiores diferenças entre os cálculos de dano, esses são independentes entre si, e ambos no mesmo comportamento para as diferentes modelagens de embuchamentos, confirmando a influência dessas modelagens na vida em fadiga do ponto crítico e a ordem de criticidade dessas modelagens.

5 CONCLUSÕES

Através do cálculo de dano no ponto crítico para os diferentes modelos de embuchamento, tem-se uma diferença significativa no dano calculado para todos os casos.

As análises estáticas produziram resultados muito díspares dos demais casos analisados, demonstrando ser uma simplificação equivocada, pois não produzem efeitos de fadiga significativos. Isto se deve à ausência dos efeitos dinâmicos na estrutura, e constitui uma crítica a métodos que conjugam de escalonamento de aceleração e análise estática, tão comuns na indústria.

Já as análises transientes geraram resultados bastante comparáveis, onde a modelagem com embuchamento de rigidez variável com amortecimento apresenta menor dano que as modelagens com embuchamento variável sem amortecimento e que o modelo com rigidez constante. Sendo assim, ambas as abordagens são válidas em projeto, visto que os resultados extraídos das outras análises são conservadores em relação à modelagem mais completa.

No caso de rigidez infinita e análise transiente tem-se que as solicitações no ponto crítico são menores do que nas outras análises transientes, gerando menor dano comparado aos casos mais completos, contrariando o resultado esperado, onde se mensurava que esse seria um caso de superdimensionamento.

Portanto, a metodologia aqui empregada é interessante para elucidar as diferenças entre as modelagens propostas, e responde a perguntas comuns no ambiente industrial. Pode-se afirmar que a modelagem da bucha como ligação rígida, ao contrário do que se imaginava, não é uma hipótese conservadora, podendo acarretar em menores valores de tensão em locais próximos ao embuchamento. Já as modelagens com rigidez constante e variável podem ser utilizadas com certa segurança, visto que essas apresentam valores de tensão maiores que a abordagem mais completa, tornando-se hipóteses conservadoras.

Portanto, como principal conclusão do presente trabalho, a modelagem de embuchamentos para casos de análise de fadiga deve ser realizada sem simplificações exageradas – considerando a respectiva rigidez, tendo o projetista a possibilidade de desconsiderar o amortecimento para ganho de tempo na simulação, fazendo um estudo prévio da influência desse fator na análise. Dependendo do caso, o uso de rigidezes lineares ajuda a simplificar um pouco o problema, isto é, desde que esses tenham uma faixa de operação sem grandes não linearidades e não sofram deflexões excessivas além dessa faixa.

Para trabalhos futuros sugere-se o estudo com modelos mais completos de veículos de transporte de carga, combinando carregamentos e fazendo uso de dados reais de solicitação de pavimentos. Outro estudo sugerido é o efeito da desconsideração do amortecimento em bandas mais largas de frequência.

REFERÊNCIAS

Ansys, 2014. Ansys User's Guide, Ansys® Mechanical™.

Fui, T. H.; Rahman, R. A., 2007. Statics and Dynamisc Structural Analysis of a 4.5 ton Truck Chassis. *Jurnal Mekanikal*, pp 56-67.

Reckziegel, G.; Schmidt, M. A.; Marczak, R. J., 2002. Uma Metodologia para Análise de Vida para um Semi-reboque para Transporte de Automóveis. UFRGS. Porto Alegre.

Rosa, E., 2002. Análise de Resistência Mecânica, Apostila da disciplina de Mecânica da Fratura e Fadiga, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Grante.

Rosa, E. Marczak, R.J. Luersen, M.A., 1993. Método para Análise de Resistência de Peças Submetidas a Solicitações Aleatórias, Anais do VII SIMEA, São Paulo, 333-342.

Shigley, J. E., 1984. Elementos de Máquinas. Tradução de Edival Ponciano Carvalho. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora LTDA, Volume 1.

Socie D, Malton G, Socie B, Prycop J, Socie M, Cook B. eFatigue. Acessado em 28 de maio de 2015; < <https://www.efatigue.com/#materials>>.