

APLICAÇÃO DE ANÁLISE FRF PARA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UM COMPONENTE AUTOMOTIVO COMPÓSITO SUBMETIDO À ALTAS TEMPERATURAS

Luis Antônio Gonçalves Junior, luis.antonio@fieb.org.br¹

Caio Luis Pinheiro Arenas, caioarenas96@gmail.com¹

Valter Estevão Beal, valter.beal@fieb.org.br¹

Juan Carlos Romero Albino, juan.albino@fieb.org.br¹

¹SENAI CIMATEC - Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã, Salvador, BA, Brazil, 41650-010

Resumo: Em linhas gerais, sistemas mecânicos complexos são submetidos a estímulos que variam ao longo do tempo. Por este motivo, a adequada predição da resposta dinâmica dos componentes que integram determinado sistema deve ser realizada, de modo que a sua funcionalidade possa ser garantida em condições de operação. Frequentemente, durante o desenvolvimento de determinado componente, as frequências e amplitudes de ressonância são de especial interesse. Neste caso, é conveniente obter a resposta dinâmica do componente no domínio da frequência por meio de análises FRF (Frequency Response Function). Para este fim, o Método de Elementos Finitos (MEF) tem sido amplamente empregado, especialmente nos casos em que a complexidade geométrica do componente torna complicada a utilização de abordagens analíticas que produzam resultados representativos. Neste contexto, o presente trabalho apresenta um modelo de elementos finitos para a avaliação da resposta em frequência (análise FRF) do suporte, feito em material compósito (termoplástico com fibra de vidro), de um sistema empregado em veículos automotores, submetido a altas temperaturas de operação (máxima de 120 °C). As respostas em frequência obtidas por estas análises são comparadas aos resultados alcançados em testes experimentais realizados sob as mesmas condições operacionais, sendo observada uma boa concordância geral entre ambos.

Palavras-chave: Análise FRF, resposta em frequência, ressonância, Método de Elementos Finitos, comportamento dinâmico

1. INTRODUÇÃO

Uma breve investigação das atividades humanas revela que grande parte delas produzem estímulos que variam ao longo do tempo. Quando sistemas submetidos a estímulos dinâmicos são avaliados, percebe-se que cada um deles reage de maneira única às solicitações impostas (RAO, 2008). Por exemplo, o simples dedilhar das cordas de um violão produz sons que são característicos do instrumento utilizado. Em linhas gerais, a resposta dinâmica de determinado sistema está relacionada com suas propriedades física, em particular com a sua distribuição de massa, rigidez e com o seu amortecimento global.

Neste contexto, quando o desenvolvimento de um componente submetido a carregamentos variáveis é considerado, a avaliação da sua resposta dinâmica representa um fator crítico de projeto. Como exemplo representativo desse tipo de análise pode-se citar o estudo feito por Matsubara e outros, 2017, o qual propõe um modelo tridimensional composto por uma casca cilíndrica fina e molas para representar o comportamento dinâmico de pneus automotivos, com o intuito de dar suporte ao projeto deste tipo de produtos com os parâmetros de desempenho NVH (Noise, vibration e harshness) adequados às aplicações correntes. Já Huang e outros, 2017 mostram que o movimento de rotação de hélices utilizadas para a propulsão de navios produz como consequência ruídos e vibrações que são transmitidas para o casco dos navios. Desta maneira, eles propõem um modelo dinâmico para a predição destes fenômenos e um método de otimização geométrica das hélices com objetivo de minimizar a transmissão das vibrações para o casco.

Tanto Matsubara e outros, 2017 quanto Huang e outros, 2017 utilizam como base para os modelos propostos por eles, respostas no domínio da frequência, comumente chamadas de análises FRF (Frequency Response Function). Neste tipo de análise, a resposta do componente em estudo, obtida em termos de amplitudes de deslocamento, velocidade ou aceleração, é calculada para diferentes frequências, ao longo do intervalo de interesse, sem que informações adicionais sobre o instante de ocorrência dos eventos sejam levadas em consideração.

Durante o projeto de um componente, nem sempre é possível de se obter modelos matemáticos que representem adequadamente o seu comportamento. Por outro lado, a construção de protótipos para a avaliação experimental deste

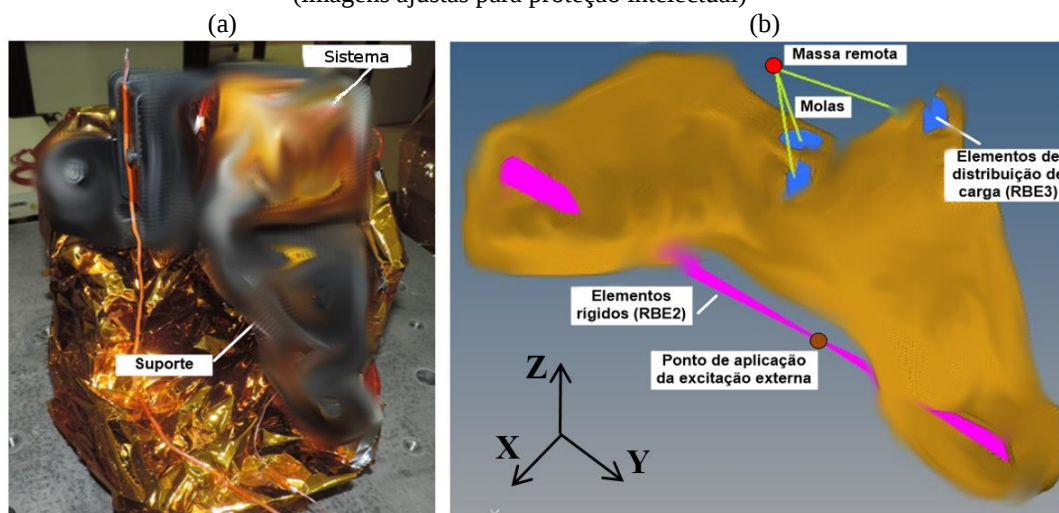
comportamento, especialmente nas fases iniciais de projeto, pode resultar em aumentos exponenciais nos custos de desenvolvimento do produto. Neste ponto, o emprego de ferramentas de simulação numérica baseadas no Método de Elementos Finitos (MEF) tem ganhado cada vez mais projeção por propiciarem a simulação do comportamento global do componente, especialmente quando modelos matemáticos analíticos não produzem bons resultados na avaliação de produtos de geometria complexa (ZAMBRANO, 2003).

Neste trabalho, o Método de Elementos Finitos é aplicado para a avaliação do comportamento dinâmico no domínio da frequência do suporte de um sistema que fica montado no cofre do motor de veículos automotores de passeio, desenvolvido em material compósito (termoplástico com fibra de vidro). Devido à sensibilidade deste tipo de material a variações térmicas, os efeitos das temperaturas de operação (máxima de 120 °C) são incluídos no modelo MEF. Finalmente os resultados apresentados pelas simulações numéricas são comparados àqueles obtidos em testes experimentais realizados sob as mesmas condições operacionais.

2. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

A avaliação da resposta dinâmica do conjunto suporte-sistema da figura 1 (a) foi realizada utilizando análises FRF no ambiente do pacote de elementos finitos comercial HyperWorks 14.0TM.

Figura 1 - Suporte do sistema: (a) protótipo experimental com sistema montado, (b) modelo de elementos finitos (imagens ajustas para proteção intelectual)



Fonte: Própria

Para modelar o corpo do suporte foram utilizados elementos tetraédricos lineares com tamanho médio de 0,8 mm. Análises prévias de convergência revelaram que todas as frequências de ressonâncias convergem para desvios inferiores a 2% com este tamanho de elemento. O sistema, por sua vez, foi incluído no modelo como uma massa remota localizada no seu centro de gravidade. A conexão suporte-sistema foi realizada por meio elementos de distribuição de carga (RBE3) e de molas com 6 graus de liberdade que simulam a rigidez das buchas de fixação. Com objetivo de reproduzir os experimentos realizados, uma excitação externa de 1g variando senoidalmente no intervalo de frequência de 5 a 100 Hz foi definida para as direções X, Y e Z individualmente. Essa excitação foi aplicada ao nó central do elemento rígido (RBE2) e transmitida ao suporte por meio dos seus pontos de fixação superior e inferior. Para realizar a análise na direção X, as direções Y e Z do nó de aplicação da aceleração externa foram restringidas, de tal maneira que as condições de contorno dos testes experimentais realizados fossem replicadas. Uma abordagem análoga foi utilizada para as direções Y e Z. Adicionalmente as propriedades do material do suporte condicionado a 120 °C também foram levadas em consideração nas simulações realizadas.

Finalmente o processamento do modelo apresentado acima foi realizado pelo “solver” OptiStruct e os resultados visualizados por meio do pós-processador HyperGraph 2D.

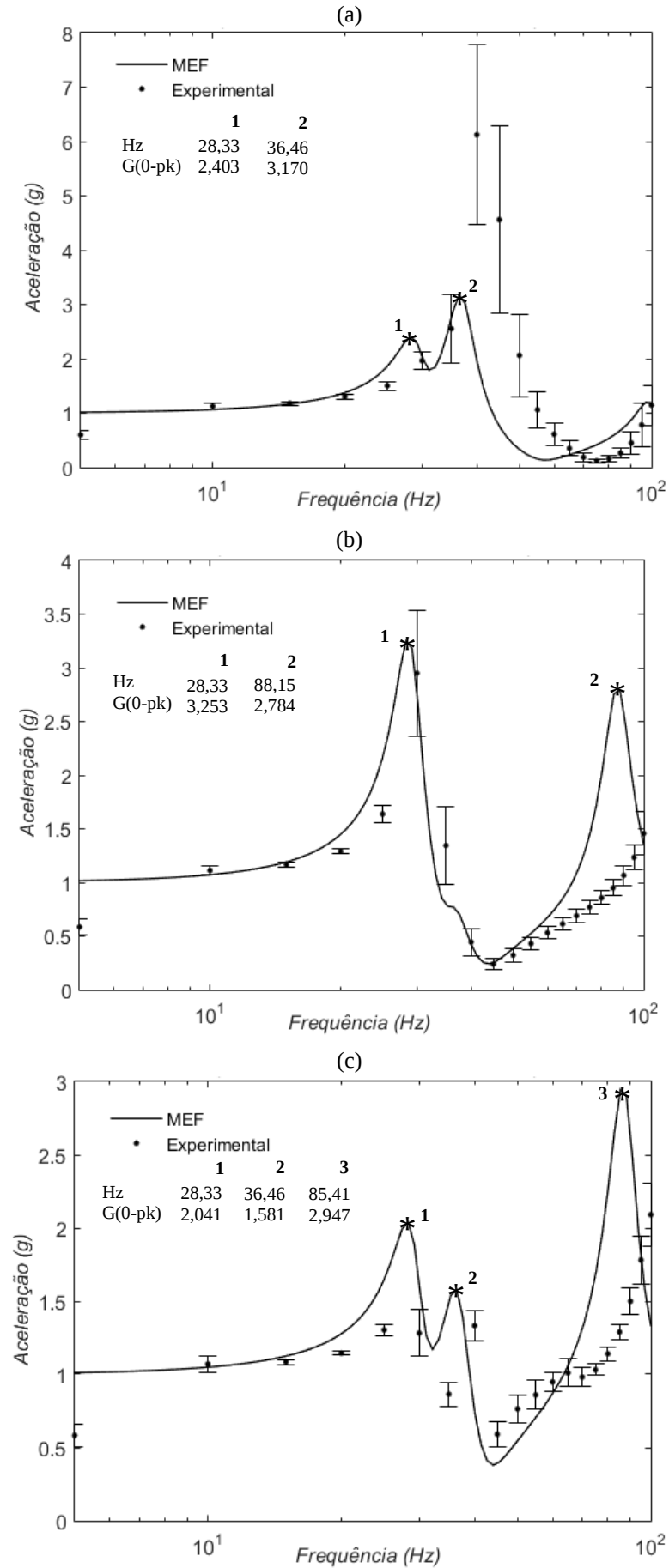
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A resposta do componente em estudo é avaliada através da aceleração da massa remota normalizada pela aceleração da gravidade em função da frequência de excitação transmitida ao conjunto módulo-sistema.

A análise dos gráficos da figura 2 permite perceber inicialmente uma boa concordância geral entre o comportamento das acelerações obtidas em ambiente de simulação e aquelas medidas experimentalmente. Entretanto, para frequências inferiores a 10 Hz é possível notar uma diferença apreciável nas acelerações apresentada por ambos. Esta discrepância é explicada pela fase transiente que ocorre antes da estabilização da excitação de saída de 1g que é aplicada pelo *shaker*.

Figura 2 - Resposta em frequência para o intervalo de 5 a 100 Hz da aceleração do centro de gravidade do sistema na:

(a) direção X, (b) direção Y, (c) direção Z



Do ponto de vista de resposta dinâmica do suporte, é possível perceber duas frequências de ressonância representadas por dois picos de aceleração, nas direções X e Y, conforme evidenciado pelas figuras 2 (a) e (b). Já para a direção Z, três picos de ressonância são notados (figura (c)). Em todos os três casos, os resultados numéricos e experimentais apresentaram uma boa concordância na predição das frequências de ressonância, com erros máximos inferiores a 11,2% para a direção X, 11,7% para a direção Y e 14,5 % para a direção Z. De maneira similar, uma boa consonância geral foi alcançada para as amplitudes de aceleração, com respectivos erros máximos de aproximadamente 8,8%, 0,3% e 16,4%. Exceções a estas análises são feitas as amplitudes de aceleração das últimas frequências de ressonância que apresentaram erro consideráveis, superiores a 41,5% em todos os casos. Análises de sensibilidade realizadas no modelo MEF revelam que este erro tem maior parcela associada às propriedades de amortecimento do conjunto suporte-sistema.

Por fim, é possível perceber a partir dos dados medidos, que a primeira frequência de ressonância na direção X é a mais crítica do ponto de vista desempenho dinâmico (níveis de ruído, integridade estrutural, etc), pois produziu uma amplitude de aceleração no mínimo 2,4 vezes maior que as demais (aprox. 7,93 g).

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho é apresentada uma análise FRF utilizando o Método de Elementos Finitos (MEF) para a determinação do comportamento dinâmico do suporte do sistema empregado em veículos automotores de passeio, feito em material compósito (termoplástico com fibra de vidro) e submetido a altas temperaturas de operação (máxima de 120 °C).

A avaliação numérica da resposta em frequência do suporte submetido a uma aceleração de excitação senoidal de 1g nas direções X, Y e Z (uma a uma individualmente) evidenciou três picos de ressonância que ocorrem a frequências aproximadas de 28 Hz, 36 Hz e 88 Hz. Uma boa concordância geral com as medições experimentais foi obtida para estas frequências, com erro máximo inferior a 14,5% em todos os casos. Assim, em que pese desempenho o dinâmico do suporte estudado (níveis de ruído, integridade estrutural, etc), faixas de frequência no entorno destes pontos devem ser evitadas para a sua utilização.

Quando a análise recai sobre as amplitudes de aceleração, uma boa consonância foi alcançada para os dois primeiros picos (erro máximo de aprox. 16,4%), enquanto erros consideráveis ocorreram para o terceiro pico (superiores a 41,5%). Análises de sensibilidade revelaram que a maior parcela destes erros é dominada pela constante de amortecimento global da estrutura. Desta maneira, melhoramentos dos resultados numéricos para as amplitudes de aceleração podem ser alcançados caso métodos de otimização de identificação de sistemas sejam empregados, tomando por base as medições experimentais realizadas para calibração desta constante.

A comparação dos resultados obtidos em ambiente de simulações com as medições experimentais evidenciou, com exceções pontuais, uma boa concordância geral entre ambos, tanto para as frequências de ressonância como para as acelerações de pico. Desta maneira, a análise FRF pelo Método de Elementos Finitos se mostrou uma ferramenta eficiente para a predição do comportamento dinâmico do suporte em estudo, de modo que a sua aplicação se põe como uma alternativa para utilização em projetos de componentes similares, contribuindo para a redução do tempo e dos custos de desenvolvimento.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao programa EMBRAPPII e a empresa RENAULT pela parceria neste projeto de inovação.

6. REFERÊNCIAS

HUANG, X.; Ni, Z.; Zhang, Z.; Hua, H., Stiffness optimization of marine propulsion shafting system by FRF-based substructuring method and sensitivity analysis, *Ocean Engineering*, 144 (Supplement C) (2017) 243–256.

MATSUBARA, M.; TAJIRI, D.; ISE, T.; KAWAMURA, S., Vibrational response analysis of tires using a three-dimensional flexible ring-based model, *Journal of Sound and Vibration*, 408 (Supplement C) (2017) 368–382.

RAO, S., *Vibrações Mecânicas*, 4. Ed., São Paulo, Pearson, 2009.

ZAMBRANO, G.M.V., Simulação do ensaio de resposta em frequência em máquina síncrona de pólos salientes utilizando o método dos elementos finitos, *Dissertação de Mestrado*, Rio de Janeiro, Brasil, 2003, p.97.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

USE OF FRF ANALYSIS TO THE ASSESSMENT OF THE DYNAMIC BEHAVIOR OF AN AUTOMOTIVE COMPONENT SUBMITTED TO HIGH TEMPERATURES

Luis Antônio Gonçalves Junior, luis.antonio@fieb.org.br¹

Caio Luis Pinheiro Arenas, caioarenas96@gmail.com¹

Valter Estevão Beal, valter.beal@fieb.org.br¹

Juan Carlos Romero Albino, juan.albino@fieb.org.br¹

¹SENAI CIMATEC - Av. Orlando Gomes, 1845, Pitã, Salvador, BA, Brazil, 41650-010

Abstract. *In general cases, complex mechanical systems undergo variable stimulus along the time. For this reason, the adequate prediction of the dynamic response of the parts which comprise a specific system shall be performed, in order to ensure its functionality under operation. Frequently, the resonance frequencies and amplitudes are from special interest during the development of a specific component. In this case, it is convenient to obtain the dynamic response of the component in the frequency domain by means of FRF analysis (Frequency Response Function). For this matter, the Finite Element Method (FEM) has been widely employed, especially in the cases in which the geometric complexity of the component makes difficult the utilization of analytical approaches capable to provide representative results. In this context, the current work presents a finite element model for the assessment of the frequency response (FRF analysis) of a bracket of passenger cars made of composite material (thermoplastic with glass fiber) submitted to high operational temperatures (maximum of 120 °C). The frequency responses obtained by these analyses are compared to the results of experimental tests performed under the same operational conditions; a general good agreement between both was achieved.*

Keywords: *FRF analysis, frequency response, resonance, Finite Element Method, Dynamic behavior*