

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DOS PNEUS NAS FORÇAS GERADAS NA SUSPENSÃO DE UM VEÍCULO UTILIZANDO A TÉCNICA DE ANÁLISE DE CAMINHOS DE TRANSMISSÃO

Rogério Gondim Costa, rogeriogondim@gmail.com¹

Claysson Bruno Santos Vimieiro, claysson@pucminas.br²

Frederico Luiz Carvalho de Moura, frederico.moura@fcagroup.com³

^{1,2}Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Av. Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, BH - MG

³Fiat Chrysler Automobiles, Av. Contorno, 3455, bairro Paulo Camilo, Betim - MG

Resumo: Dentre os itens que compõem o conforto vibroacústico global de um veículo, o ruído de rolagem dos pneus tem grande importância. Em algumas velocidades e tipos de pavimentos, este ruído predomina no interior do veículo. Sua transmissão ao habitáculo é principalmente por via estrutural. Um estudo dos caminhos de transmissão do ruído desde os pneus até os ocupantes do veículo se faz necessário para maior entendimento e possível atuação em propostas de melhoria para o inconveniente. Este trabalho contempla um estudo das forças geradas pela suspensão de um veículo utilizando a técnica de análises de caminhos de transmissão quando se varia a pressão de ar dos pneus e consequente influência no ruído interno. Para o desenvolvimento do trabalho foram realizados testes objetivos de ruído (ponto de resposta) e vibração (pontos de entrada) com o veículo em estrada e medições de funções resposta em frequência em laboratório para a construção do modelo de análise de caminhos de transmissão.

Palavras-chave: acústica, NVH (Noise Vibration Harshness), TPA (Transfer Path Analysis), análise de caminhos de transmissão, conforto vibroacústico.

1. INTRODUÇÃO

Estudos para maior compreensão dos fenômenos vibroacústicos de veículos têm sido desenvolvidos para adequação dos produtos às exigências dos clientes. Um melhor entendimento da geração e transmissão de ruído e vibração a partir das fontes até a recepção pelos ocupantes do veículo se faz necessário para tal.

Wang (2010) descreve o cenário atual do desenvolvimento de veículos e sua importância com a afirmação de que o ruído e a vibração de veículos automotores vem a cada dia se tornando mais importante para a indústria automotiva e é atualmente uma preocupação tanto para fabricantes de veículos quanto para fabricantes de componentes automotivos, e, portanto, sendo considerados como um dos mais importantes fatores de qualidade no desenvolvimento do veículo.

A técnica de análise de caminhos de transmissão é uma ferramenta experimental que permite determinar a contribuição de fontes no ruído interno global de um veículo, através de dados experimentais de ruído interno, de forças operacionais das fontes e de funções de sensibilidade dos caminhos de transmissão estrutural (funções resposta em frequência). Segundo Gajdàtsy (2011), o objetivo principal do método de análise de caminhos de transmissão é a identificação dos componentes ativos, ou fontes, mais importantes, e quais os caminhos pelos quais essa energia se propaga, para assim encontrar uma solução eficiente para o problema vibro acústico. Harrison (2004) apresenta a importância do método de análise de caminhos de transmissão para determinar as contribuições no ruído interno de cada fonte que transmite energia por diferentes caminhos, pois, dependendo da natureza do caminho predominante, diferentes formas de controle devem ser aplicadas.

O ruído de rolagem de pneus observado no interior do veículo é bastante incômodo em algumas condições de velocidades e tipo de pavimento. Devido a diversos fatores construtivos de um veículo, a maior parte do ruído de rolagem é transmitida por via estrutural.

Neste trabalho pretende-se analisar as forças geradas na suspensão de um veículo que geram a parcela estrutural do ruído interno e o efeito da variação destas forças com a modificação da pressão de ar dos pneus, utilizando a técnica de análise de caminhos de transmissão.

2. TRANSMISSÃO DO RUÍDO

A transmissão do ruído em um veículo pode ser por via aérea ou via estrutural. A transmissão por via aérea é dependente das características de isolamento de ruído da estrutura e a capacidade de absorção dos materiais utilizados no interior do veículo. A transmissão por via estrutural ocorre devido à propagação de vibrações geradas pelas fontes através da estrutura do veículo, e podem ser percebidas pelos ocupantes tanto como vibração em pontos de contato, quanto como ruído, uma vez que a energia vibratória é propagada pela estrutura do veículo, causando vibração nos painéis, que por sua vez, estando em contato com a cavidade interna do veículo, induzem flutuações da pressão interna, que são transmitidas até o ouvido dos ocupantes. A Fig. 1 apresenta a divisão entre sistema ativo (fonte) e passivo (receptor) e formas de transmissão de ruído (estrutural e aéreo) e de vibração (estrutural).

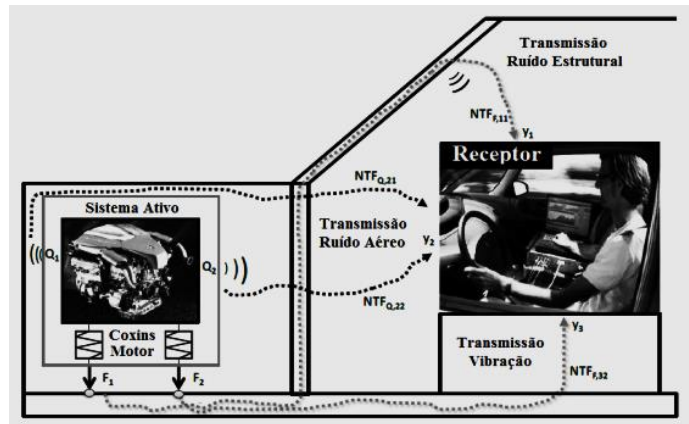


Figura 1. Fontes e caminhos de propagação em modelo de análise de caminhos de transmissão em veículo (Gajdàtsy, 2011).

3. RUÍDO DE ROLAGEM DE PNEUS

Mesmo sob condições de aceleração, o ruído de rolagem representa a maior contribuição para o ruído total emitido pelo veículo, após o ruído do sistema motopropulsor (Gerges, 2005). De modo geral, pode-se dizer que, para baixas velocidades, o ruído global gerado pelo veículo é proveniente do sistema motopropulsor e, em altas velocidades, a maior contribuição provém dos pneus. O ruído de rolagem está relacionado diretamente às características construtivas do veículo, dependendo, basicamente, do tipo de suspensão e da carroceria além do tipo dos pneus.

A geração de ruído devido aos pneus pode ser dividida em duas partes: os mecanismos de geração de energia e os mecanismos de amplificação. Os mecanismos de geração de energia são devidos à excitação da carcaça do pneu. A carcaça pode ser excitada através dos impactos do pneu na superfície, excitações tangenciais do pneu devido à fricção (*stick-slip*) e bombeamento de ar próximo à banda de rodagem. Os mecanismos de amplificação são a vibração da carcaça do pneu, vibrações da banda lateral, ressonâncias da cavidade do pneu, ressonância nos sulcos do pneu e amplificação por efeito “corneta”.

4. ANÁLISE DE CAMINHOS DE TRANSMISSÃO

A análise de caminhos de transmissão é uma técnica experimental para identificação de caminhos vibroacústicos de um sistema, bastante utilizada para realizar diagnósticos de inconvenientes de ruído e vibração. Ela estima a contribuição de cada fonte de ruído através das funções sensibilidade (Função de Resposta em Frequência – FRF) e das forças operacionais experimentais. Na literatura é possível encontrar o método de análise de caminhos de transmissão referenciado de diferentes maneiras, tais como TPA (*Transfer Path Analysis*), SPC (*Source Path Contribution*) e NPA (*Noise Path Analysis*).

Neste método são utilizados modelos com o conceito de fonte-caminho-receptor, onde cada ligação (ou caminho) entre a fonte geradora de ruído ou vibração e o receptor são considerados. Os receptores são o ruído interno do veículo ou vibração percebida em algum ponto do veículo. A Fig. 2 ilustra este modelo.

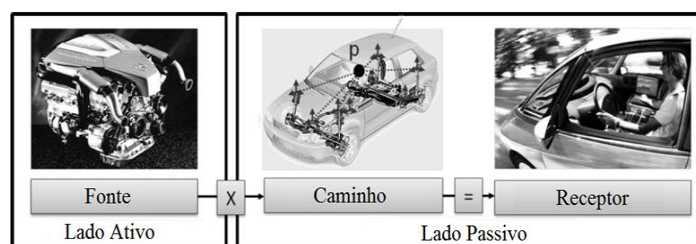


Figura 2. Modelo de análise de caminhos de transmissão (Gajdàtsy, 2011).

4.1. Formulação Matemática

Para formulação do método, Gadjàtsy (2011) divide as fontes em dois tipos, fontes estruturais e fontes acústicas, sendo que os caminhos estruturais são definidos como aqueles que se iniciam em uma fonte estrutural enquanto que os caminhos aéreos são aqueles que se iniciam em uma fonte acústica. Os pontos de entrada dos caminhos de transmissão são definidos na interface entre o lado ativo e lado passivo do sistema. As funções que representam as características do lado passivo são as FRFs (Funções de Resposta em Frequência) e as funções de transferência entre os pontos de entrada dos caminhos e o ponto receptor são denominadas NTF (*Noise Transfer Functions*) no caso em que a fonte e o receptor são acústicos, ou seja, caso de ruído aéreo, ou VTF (*Vibration Transfer Functions*) no caso que a fonte é estrutural, sendo que o receptor pode ser acústico, no caso ruído estrutural, ou vibratório, sendo relacionado à percepção de vibração, conforme a Eq. (1).

$$y_k(\omega) = \sum_{i=1}^n VTF_{ik}(\omega) * F_i(\omega) + \sum_{j=1}^p NTF_{jk}(\omega) * Q_j(\omega) \quad (1)$$

onde $F_i(\omega)$ ($i=1, 2, 3, \dots, n$) são os carregamentos na estrutura ou forças, $Q_j(\omega)$ ($j=1, 2, 3, \dots, n$) os carregamentos acústicos, tipicamente aceleração de volume, e $VTF_{ik}(\omega)$ e $NTF_{jk}(\omega)$ as funções de resposta do sistema dos pontos de entrada dos carregamentos até o ponto de análise. Todos os termos são quantidades complexas, contendo informação de magnitude e fase relacionada a uma referência global.

4.2. Método da Inversão de Matriz

Existem dois métodos de estimativa das forças por métodos indiretos, o Método da Rigidez Complexa, onde as forças são estimadas baseadas nas respostas do lado ativo e passivo e a rigidez dinâmica complexa do elemento elástico de conexão, e o Método da Inversão da Matriz, que é baseado na inversão da matriz contendo as funções de resposta em frequência da estrutura, que trazem a informação do comportamento dinâmico da estrutura, e as acelerações medidas em condições operacionais.

O Método da Inversão da Matriz é de aplicação mais ampla em relação ao Método da Rigidez Complexa, pois pode ser utilizado em casos onde existem conexões mais rígidas, como o caso de parafusos e coxins de borracha mais rígida. A Figura 3 ilustra o modelo da inversão de matriz.

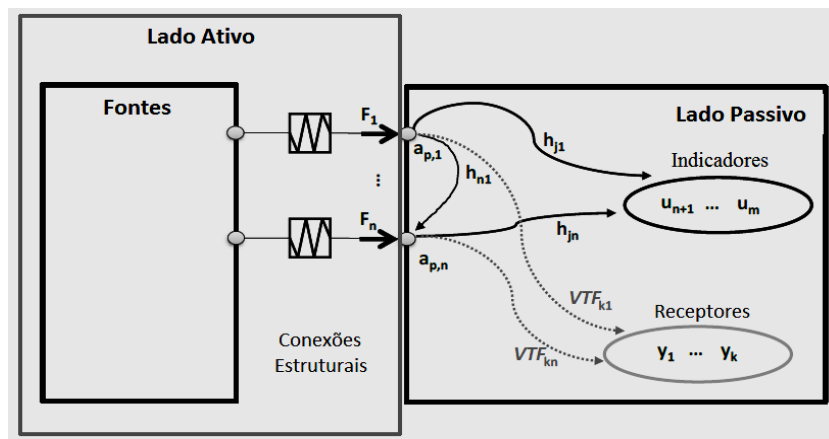


Figura 3. Modelo de inversão de matriz (Gadjàtsy, 2011).

Para criação do modelo e estimativa das forças operacionais, inicialmente o lado ativo do sistema deve ser removido e todas as funções de resposta em frequência (h_{ij}), denominadas acelerações ou inertâncias, entre os caminhos e os pontos indicadores extras (u_j) são medidas juntamente com as funções de transferência entre os caminhos e os pontos receptores (VTF_{kj}). Para cada um dos pontos definidos como caminhos de transmissão, as funções de resposta em frequência são medidas com a excitação na direção do caminho considerado e a resposta relativa ao ponto de excitação (resposta pontual) e também em relação a todos os outros pontos, em todas as direções (respostas cruzadas). A matriz completa pode ser representada conforme a Eq. (2).

$$H(\omega) = \begin{bmatrix} \frac{\ddot{x}_{11}}{F_1} & \frac{\ddot{x}_{12}}{F_2} & \cdots & \frac{\ddot{x}_{1n}}{F_n} \\ \frac{\ddot{x}_{21}}{F_1} & \frac{\ddot{x}_{22}}{F_2} & \cdots & \frac{\ddot{x}_{2n}}{F_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\ddot{x}_{m1}}{F_1} & \frac{\ddot{x}_{m2}}{F_2} & \cdots & \frac{\ddot{x}_{mn}}{F_n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

A matriz obtida é então invertida e multiplicada pelas acelerações operacionais medidas em todos os pontos, nas três direções ortogonais, conforme a Eq.(3).

$$\{F(\omega)\}_{nx1} = [H(\omega)]_{nxm}^{-1} \{\ddot{x}(\omega)\}_{mx1} \quad (3)$$

5. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para o desenvolvimento deste trabalho foram realizados testes experimentais em um veículo de passeio em condições dinâmicas e em laboratório, conforme será detalhado abaixo.

Para aquisição e análise dos dados foi utilizado o Hardware de medição *LMS Scadas Mobile* e o software *LMS TestLab*. A instrumentação utilizada está ilustrada na Fig. 4.



Figura 4. Instrumentação utilizada para as medições.

Os testes dinâmicos foram realizados em uma estrada com o pavimento de asfalto rugoso com o veículo a 75 km/h constante, uma vez que, nestas condições, o ruído de rolagem de pneus se sobressai. A Figura 5 ilustra este tipo de asfalto, comparando-o com um asfalto liso.



Figura 5. Tipos de pavimento com asfalto liso e rugoso.

Os testes foram realizados com os pneus calibrados com pressão do ar de 28 psi (nominal) e de 32 psi (máxima).

Para a aplicação da técnica de análise de caminhos de transmissão e determinar a influência da pressão dos pneus nas forças geradas, primeiramente são definidos os pontos de medição da entrada e resposta.

5.1. Medição das Forças (Pontos de Entrada)

Os pontos definidos para medição das forças de entrada foram os montantes das rodas dianteira direita e traseira direita. Através de acelerômetros o veículo em condição dinâmica citada acima, são adquiridos os níveis de aceleração que serão utilizados para cálculo da estimativa das forças operacionais. A Fig. 6 indica o posicionamento dos acelerômetros.

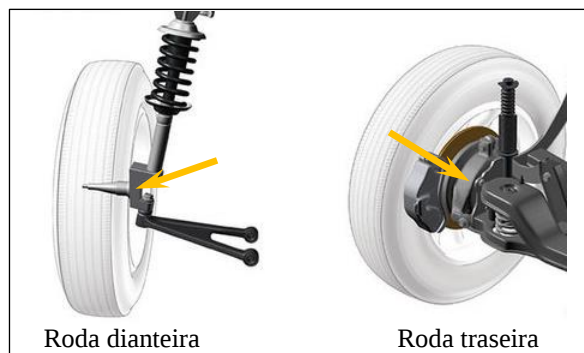


Figura 6. Posicionamento dos acelerômetros (montantes das rodas dianteira e traseira).

5.2. Medição do Ruído Interno (Ponto de Resposta)

Para a medição do ruído interno foi considerado o ponto situado próximo ao ouvido direito do motorista (Fig. 7). Através de um microfone, o nível de ruído é adquirido com o veículo nas condições dinâmicas especificadas.

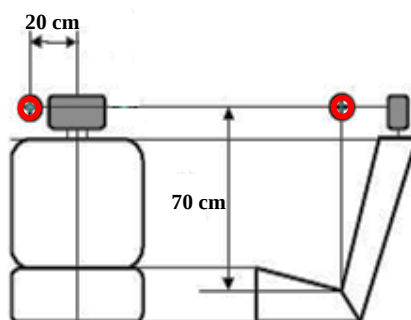


Figura 7. Banco do motorista - Posicionamento do microfone (ouvido direito do motorista).

5.3. Medição das Funções de Sensibilidade (Caminhos de Transmissão)

As funções de sensibilidade de transmissão de ruído estrutural (Sensibilidade Acústica) são obtidas pela relação entre a excitação dos pontos de entrada, medida através de um martelo de impacto com transdutor de força, e os níveis nos pontos de respostas, que são medidos em pressão sonora (Pa).

Os pontos de entrada que foram considerados para a medição das Funções de Sensibilidade são os pontos de conexão dos elementos da suspensão com a carroceria. Os pontos de entrada da suspensão dianteira estão indicados na Fig. 8, que são as fixações dos amortecedores, pontos de fixação dos braços oscilantes e os pontos de fixação da travessa de suspensão à carroceria, cada um nas três direções ortogonais.

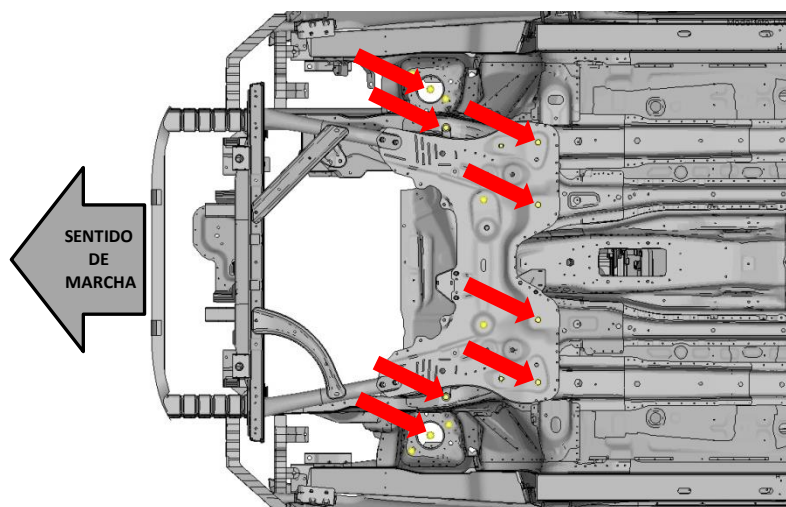


Figura 8. Pavimento do veículo - Pontos de medição das funções de sensibilidade da suspensão dianteira.

6. RESULTADOS E ANÁLISES

O gráfico representado na Fig. 9 compara os níveis de ruído interno nas duas condições de pressão de pneus testadas.

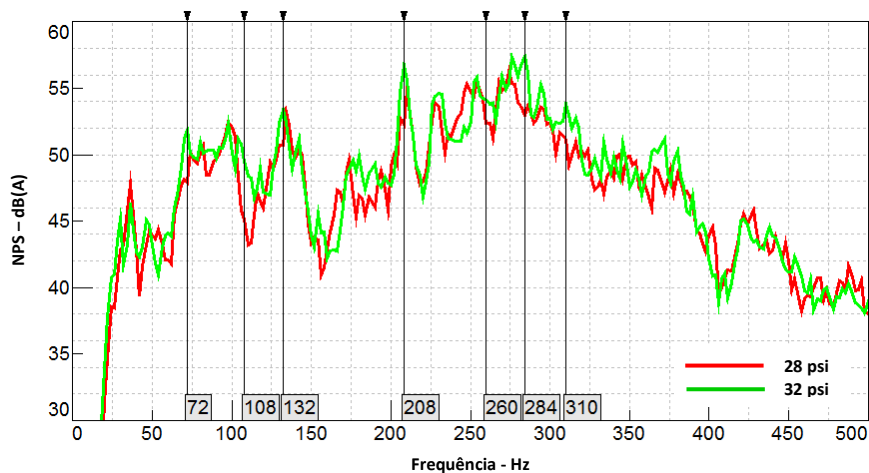


Figura 9. Gráfico de ruído interno – Nível de pressão sonora [dB(A)] x Frequência [Hz].

No gráfico da Fig. 9 pode-se observar que nas faixas de frequências marcadas com o cursor, o veículo na condição de pressão de pneus com 28 psi apresentou níveis de ruído mais baixos que a condição com 32 psi.

Para as análises de caminhos de transmissão será utilizada a faixa de frequência de 284 Hz, por ter apresentado níveis significativamente mais baixos na condição do veículo com 28 psi de pressão nos pneus.

O gráfico representado na Fig. 10 demonstra a função múltipla coerência total. Indica quanto o ruído medido nos microfones está correlacionado à vibração medida nos montantes de roda, ou seja, o quanto do ruído que é de origem estrutural. Quanto mais próxima a função coerência estiver do valor 1 (um), indica maior correlação.

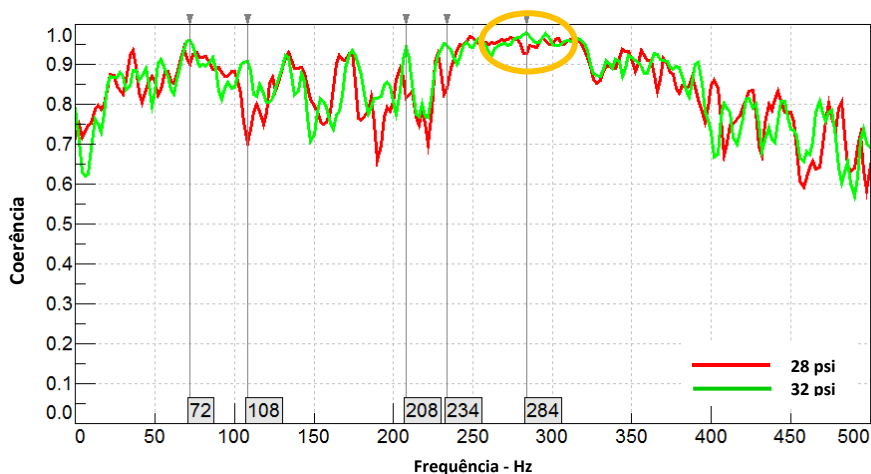


Figura 10. Gráfico da Função Coerência x Frequência [Hz].

Na faixa de frequência de interesse, 284 Hz (destacada no gráfico), a função coerência apresenta valores próximos a 0,97, o que confirma que a parcela do ruído transmitido por via estrutural é predominante.

Na sequência serão apresentados nas figuras 11 e 12 respectivamente, os gráficos das múltiplas coerências das suspensões anterior e posterior para análise.

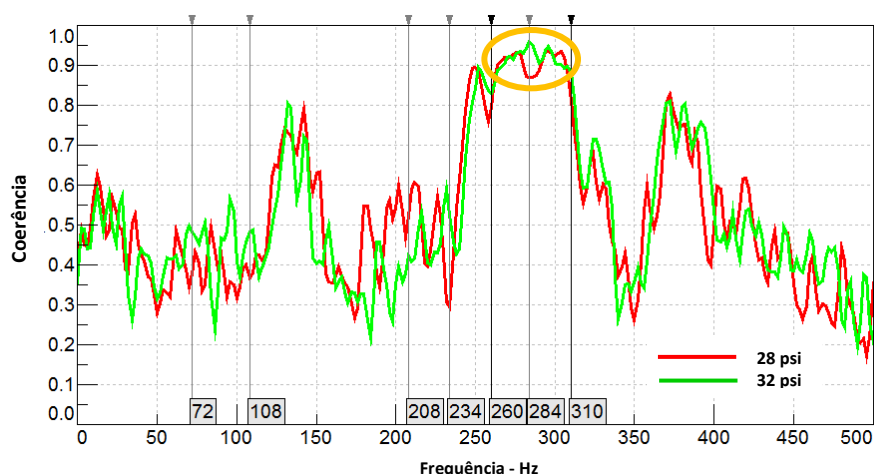


Figura 11. Gráfico da Função Coerência x Frequência [Hz] – suspensão anterior.

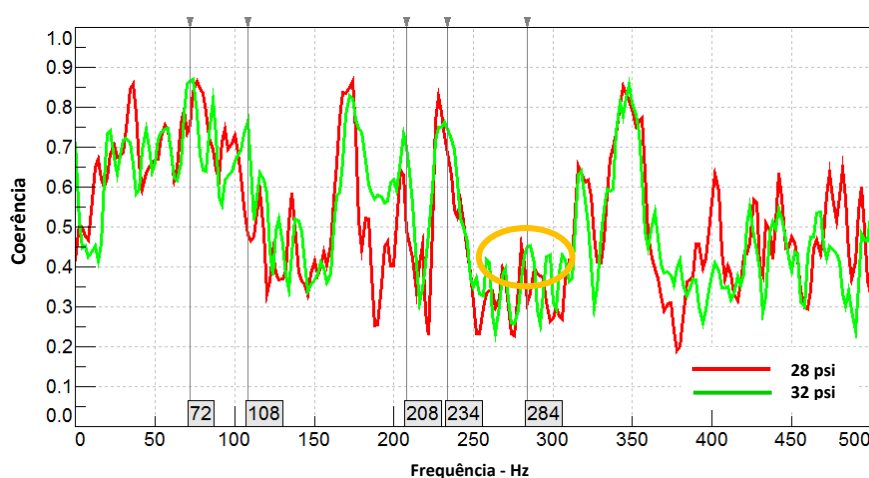


Figura 12. Gráfico da Função Coerência x Frequência [Hz] – suspensão posterior.

Analisando os gráficos das Fig. 11 e 12 observa-se, nas faixas destacadas, que a coerência da suspensão anterior está próxima de 0,95 e da suspensão posterior apresenta baixos valores. Desta forma pode-se concluir que a contribuição no ruído interno na faixa de frequência de 284 Hz tem sua predominância pelos caminhos da suspensão anterior.

Na sequência serão apresentados os resultados das forças estimadas de cada ponto da suspensão anterior nesta faixa de frequência para as duas pressões de pneus testadas. Foram definidos oito pontos de medição das funções de sensibilidade na suspensão dianteira, cada um nas três direções ortogonais, totalizando vinte e quatro pontos de análise de forças estimadas.

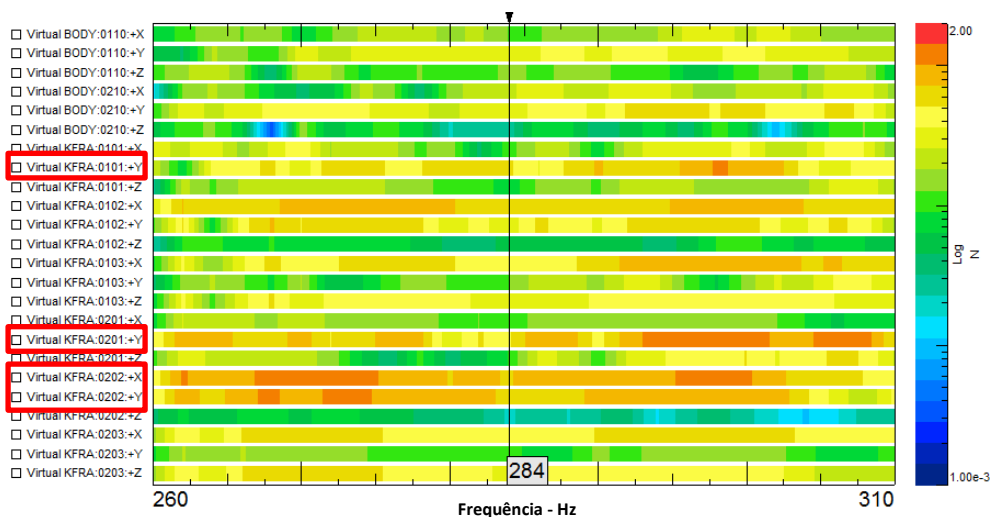


Figura 13. Gráfico de Força Estimada dos 24 caminhos de transmissão – 28 psi – 260 a 310 Hz.

No gráfico da Fig. 13 que é do tipo *colormap*, as análises devem ser realizadas observando a escala à direita do gráfico, onde se demonstra que a cor vermelha representa os níveis mais elevados. Foram destacados quatro pontos que apresentam níveis mais elevados para comparação com as forças estimadas com o veículo com 32 psi de pressão de pneus.

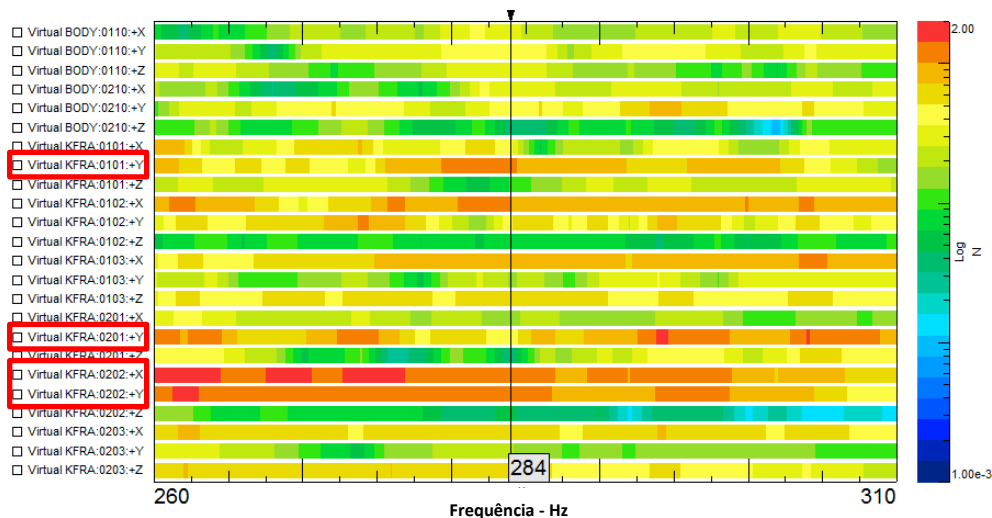


Figura 14. Gráfico de Força Estimada dos 24 caminhos de transmissão – 32 psi – 260 a 310 Hz.

No gráfico da Fig. 14 foram destacados os mesmos pontos do gráfico anterior para comparação. É possível observar que os níveis de força estimada na faixa de frequência de interesse estão mais elevados com 32 psi comparando com 28 psi. Em geral, todos os caminhos de transmissão apresentam maior força estimada com a pressão de 32 psi.

No gráfico da Fig. 15 serão apresentados os resultados da sensibilidade acústica para cada ponto da suspensão anterior. Os pontos destacados apresentam níveis mais elevados.

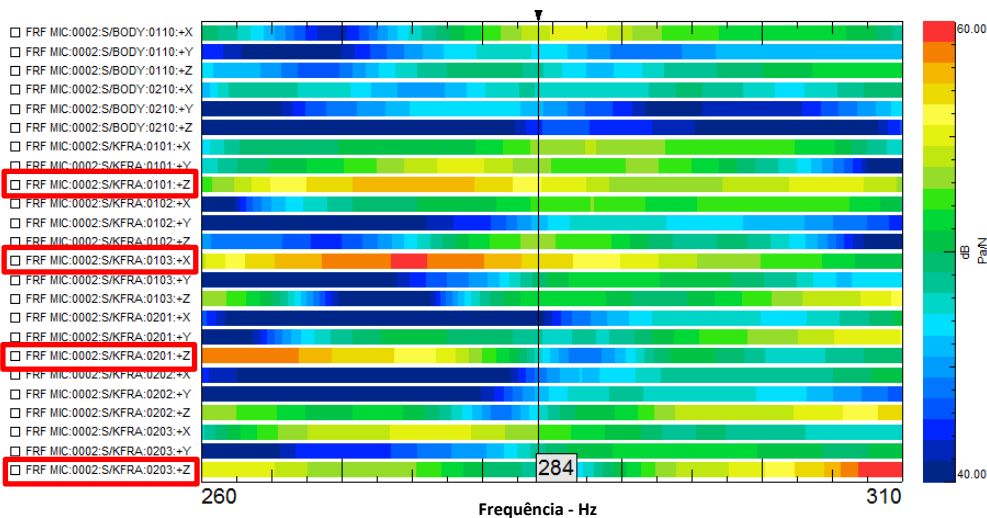


Figura 15. Gráfico de Sensibilidade Acústica dos 24 caminhos de transmissão – 260 a 310 Hz.

Os níveis mais elevados de pressão sonora no gráfico da sensibilidade acústica indicam quais são os caminhos onde a carroceria apresenta maior fragilidade, ou seja, os caminhos que a excitação provoca níveis de ruído interno mais elevados. Foram destacados quatro pontos, mas nenhum destes coincide com os pontos que apresentaram elevados valores de força estimada conforme os gráficos das Fig. 13 e 14, portanto, os elevados valores de força estimada encontrados não foram amplificados pela estrutura do veículo.

7. CONCLUSÕES

Os resultados dos testes realizados neste trabalho demonstram que existem diferenças significativas nos níveis de forças estimadas quando se compara as pressões de pneus do veículo com 28 psi e 32 psi.

A carroceria do veículo não influenciou nas diferenças de níveis de ruído apresentadas com o aumento de pressão dos pneus.

A atenuação das forças de entrada dos pneus do veículo proporciona uma melhoria de conforto acústico para os ocupantes. Os resultados dos testes realizados com modificação de pressão dos pneus indicam que se podem conseguir ganhos significativos de conforto acústico trabalhando no projeto de um pneu.

A utilização da técnica de análise de caminhos de transmissão demonstrou ser eficaz para indicar os principais caminhos de ruído estrutural além de propiciar que se façam testes de propostas específicas com intuito de atenuar o ruído de rolagem de pneus.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao suporte da FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais) e da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) para a realização deste trabalho.

9. REFERÊNCIAS

- Gajdàtsy, P.A., Advanced Transfer Path Analysis Methods. 2011. 208p. Doctoral Dissertation – Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven.
- Gerges, S. N. Y., 2005. Ruído e vibrações veiculares. 1ª Ed. NR Editora, Consultoria e Treinamento, Florianópolis, Brasil, 739p.
- Harrison, M., Vehicle Refinement: Controlling Noise and Vibration in Road Vehicles. 1a ed. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. 345p.
- Wang, X., Vehicle noise and vibration refinement. 1a ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2010. 434p.

10. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

TIRE PRESSURE INFLUENCE IN GENERATED FORCES IN SUSPENSION OF A VEHICLE USING TRANSFER PATH ANALYSIS

Rogério Gondim Costa, rogeriogondim@gmail.com¹

Claysson Bruno Santos Vimieiro, claysson@pucminas.br²

Frederico Luiz Carvalho de Moura, frederico.moura@fcagroup.com³

^{1,2}Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Av. Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, BH - MG

³Fiat Chrysler Automobiles, Av. Contorno, 3455, bairro Paulo Camilo, Betim – MG

Abstract. *Among the items that make up the global vibroacoustic comfort of a vehicle, the tire rolling noise is very important. In some speeds and types of pavements, this noise predominates in the vehicle. Its transmission to the interior is mainly structural way. A study of noise transmission paths from the tires to the occupants of the vehicle is necessary for better understanding and possible role in improvement proposals for the inconvenience. This work includes a study of the forces generated by the suspension of a vehicle using the technique of transmission paths analysis when change the tire air pressure and consequent influence on the internal noise. For the development of the work carried noise and vibration tests with the vehicle on roads and response functions of frequency measurements in the laboratory for the construction of the analysis model of transmission paths.*

Keywords: *acoustic, NVH (Noise Vibration Harshness), TPA (Transfer Path Analysis), vibroacoustic comfort.*