

**Universidade Federal de Santa Catarina
Atividades de Pesquisa
Formulário de Tramitação e Registro**

Situação: **Aprovação/Depto Coordenador**
Protocolo nº: **2014.0212**

Título:	Estudo da dinâmica vibratória de trem de potência veicular
Resumo:	A tendência mundial de aumentar a potência dos motores a combustão, para melhoria do desempenho veicular, com a busca da redução de peso tem impactado cada vez mais na elevação dos níveis de vibração e ruído de veículos automotores. Uma das principais fontes de insatisfação dos clientes e, conseqüentemente, um requisito importante para a engenharia das montadoras é o ruído gerado na transmissão. Esse ruído é excitado pela vibração torsional que propaga do motor para todo o trem de potência veicular, que além do ruído também gera, em alguns casos, o desgaste prematuro das engrenagens e sincronizadores nas caixas de transmissão. O estudo proposto neste projeto de pesquisa é a implementação de ferramentas computacionais, na forma de modelos numéricos, que possam auxiliar a engenharia de desenvolvimento de produto na rápida escolha dos parâmetros funcionais da embreagem, através de um levantamento da sensibilidade dos parâmetros e otimização dos mesmos, para minimizar o problema de ruído e vibração. O modelo é ajustado a partir de dados experimentais, obtidos em testes padronizados no veículo.
Palavras chave: (máximo 5)	Vibração; otimização; análise modal
Grande Área do conhecimento:	Ciências Exatas e da Terra
Área do conhecimento:	Mecânica, Elasticidade e Reologia
Nome do Grupo de Pesquisa: (CNPq - Diretório)	
Está vinculado a outro projeto de pesquisa?	
Período de realização:	02/01/2014 a 01/31/2017
A atividade receberá algum aporte financeiro?:	Não
Propriedade Intelectual (o resultado do projeto é ou poderá ser protegido por):	

■ ■ ■ **Envolvidos neste projeto de pesquisa**

Coordenador	
Nº do SIAPE:	1840834
Nome do Coordenador:	Sérgio Junichi Idehara
CPF do Coordenador:	27007662889
Departamento:	CAMPUS DE JOINVILLE
Centro:	CAMPUS DE JOINVILLE
Regime de trabalho:	DE
Fone de contato:	47-96249706
E-mail:	sergio.idehara@ufsc.br

Carga horária semanal nesta atividade:	5 horas
Receberá remuneração nesta atividade de pesquisa?	Não

Você gostaria de participar do guia de fontes da UFSC?	Não
--------------------------------------------------------	-----

Outros prof. ou servidores da UFSC envolvidos?	Não
Alunos da UFSC envolvidos?	Sim
Pessoas externas à UFSC envolvidas?	Não

No documents found

Outras Considerações

Nº do Processo: 2014.0212

Projeto de Pesquisa

Estudo da dinâmica vibratória de trem de potência veicular

Proponente: Sérgio Junichi Idehara

Campo de conhecimento: projeto de máquinas

Data: 27/03/2014

Resumo

A tendência mundial de aumentar a potência dos motores a combustão, para melhoria do desempenho veicular, com a busca da redução de peso tem impactado cada vez mais na elevação dos níveis de vibração e ruído de veículos automotores. Uma das principais fontes de insatisfação dos clientes e, conseqüentemente, um requisito importante para a engenharia das montadoras é o ruído gerado na transmissão. Esse ruído é excitado pela vibração torsional que propaga do motor para todo o trem de potência veicular, que além do ruído também gera, em alguns casos, o desgaste prematuro das engrenagens e sincronizadores nas caixas de transmissão. O estudo proposto neste projeto de pesquisa é a implementação de ferramentas computacionais, na forma de modelos numéricos, que possam auxiliar a engenharia de desenvolvimento de produto na rápida escolha dos parâmetros funcionais da embreagem, através de um levantamento da sensibilidade dos parâmetros e otimização dos mesmos, para minimizar o problema de ruído e vibração. O modelo é ajustado a partir de dados experimentais, obtidos em testes padronizados no veículo.

Introdução

Todo sistema mecânico está sujeito a responder dinamicamente a uma excitação, e no caso de um trem de potência de um veículo, uma das formas de resposta é a vibração torsional (há outros tipos, como o movimento de precessão do eixo cardã ou a vibração transversal dos elementos não-girantes). A fonte de energia para que o sistema “driveline” vibre provém, na maioria dos casos, da excitação do motor. Essa excitação torsional é característica do funcionamento de motores à combustão, que durante a combustão (queima do combustível), há um pico de torque e em seguida queda deste na descarga dos gases. A variação do torque gera a excitação, que pode ser vista como uma flutuação da velocidade de rotação do motor (por exemplo, na Figura 1, observa-se a oscilação da rotação em torno da marcha lenta: ~800rpm de um veículo comercial leve).

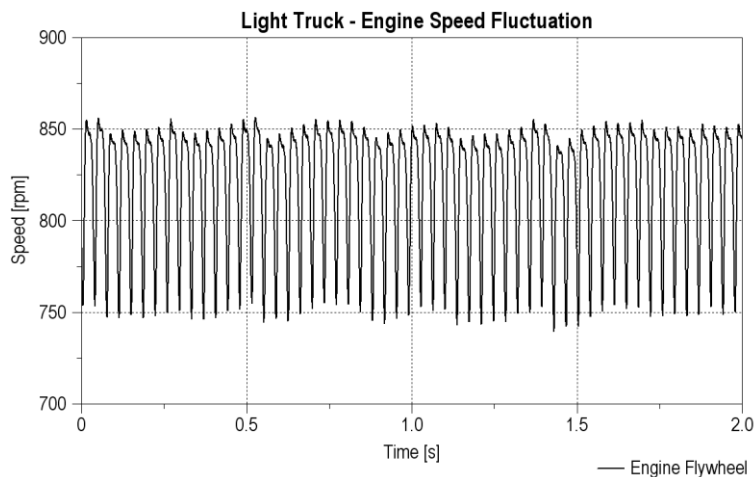


Figura 1: Flutuação da rotação do motor em um veículo de carga leve (ciclo Diesel, 4 tempos, 4 cilindros).

O tipo de excitação muda conforme o motor (tempo e o número de cilindros), cujos picos de torque da combustão aparecem mais ou menos vezes por volta do eixo do motor. Usualmente, nos veículos de passeio, o motor trabalha no ciclo Otto com 4 tempos e 4 cilindros e apresenta duas combustões por volta do eixo, enquanto que para veículos comerciais que usam um motor de ciclo Diesel, 4 tempos e 6 cilindros, ocorrem 3 combustões por volta do eixo. Essa classificação de número de picos de torque (pulsos) por rotação é denominada de “análise de ordem”, ou seja, 2 combustões por volta é a segunda ordem, e analogamente, 3 combustões por volta é a terceira ordem. Muitas vezes, na avaliação da vibração de máquinas e equipamentos, em que a rotação varia no tempo, é usada essa abordagem de “ordem”. A ordem de excitação do motor é um dado importante na avaliação da vibração, pois o trem de potência sempre vibra nessa ordem.

A maioria dos trens de potência, atuais e encontrados no país, são compostos de transmissão, cardã (para a construção longitudinal e tração traseira), diferencial, semi-eixo, roda etc (GMBH, 2011). Quando esse conjunto de elementos é excitado torsionalmente pelo motor, todos eles respondem na ordem dele. Todavia, a intensidade (ângulo máximo de torção) com que cada um desses elementos vibra varia de veículo para veículo, por causa da característica dinâmica do “powertrain”, chamada de modo(s) de vibração. A vibração torsional estará presente em maior ou menor nível nos elementos do trem de potência, podendo ser causa de desgaste prematuro, por exemplo, nos dentes de engrenagens e sincronizadores, causar fadiga nos componentes estruturais, gerar ruído sonoro na transmissão (BARTHOD et al, 2007) etc. Por estes motivos dedica-se tanto ao estudo e controle das vibrações que são propagadas ao longo do “powertrain”.

A vibração torsional que chega à transmissão faz com que as engrenagens, não solidárias ao eixo, entrem em choque com seus pares, gerando um ruído de alta frequência que é denominado de ruído de “rattle”. Esse ruído pode ser perceptível aos usuários do veículo, sendo subjetivamente um incômodo. Portanto, no teste de “tuning” - para selecionar as características torsionais da embreagem -, realizado pelas montadoras e fabricantes de embreagem, o foco principal é o controle da vibração torsional na transmissão, de modo que o ruído esteja num nível aceitável (DREXL, 1998). Este ruído, além da vibração, é influenciado pelo acabamento e folga dos dentes da engrenagem (SHIM et al, 2008 e ROCCA & RUSSO, 2011), tipo construtivo da carcaça da transmissão (BOZCA, 2010 e BOZCA & FIETKAU, 2010), isolamento acústico entre motor e painel etc. Por isso, para as mesmas amplitudes de vibração torsional, o ruído avaliado pode ser muito diferente entre os diversos veículos. Todo o processo de escolha do amortecimento torsional da embreagem envolve procedimentos específicos da indústria automobilística e aplicação de diferentes ferramentas da engenharia de produto, os quais possibilitam, numa visão global, como temática do projeto acadêmico, o intercâmbio de conhecimentos teórico-prático entre alunos, pesquisadores e engenheiros da indústria; sendo, então, uma oportunidade para apresentar aos alunos a metodologia corrente da indústria, subsidiar com pesquisa às engenharias de desenvolvimento de produto e auxiliá-la na forma de cursos de capacitação e/ ou consultorias.

Metodologia

A vibração torsional nos elementos do trem de potência do veículo pode ser quantificada através da medição da velocidade de rotação. Como cada parte vibra com diferentes amplitudes, é necessário medir os componentes de interesse independentemente (com diversos sensores

simultaneamente). Para a calibração do amortecimento torsional do disco de embreagem, em geral, tomam-se dois pontos de medição: o motor e a entrada da transmissão (Figura 2). Estes representam, respectivamente, a excitação encontrada antes da embreagem, e a resposta após a embreagem, na qual é possível avaliar a efetividade da redução da excitação/ vibração do motor após passar pelo amortecimento torsional da embreagem. Usualmente, as medições são realizadas a partir de sensores magnéticos sem contato, que são posicionadas apontando para a cremalheira do volante do motor e para a engrenagem solidária da transmissão, no eixo piloto ou secundário (LECHNER & NAUNHEIMER, 1999). Medições de vibração torsional na roda ou diferencial (no caso de motor dianteiro e tração traseira), também, podem ser realizadas a partir da instalação de rodas dentadas no eixo ou instrumentando a própria engrenagem cônica do diferencial.

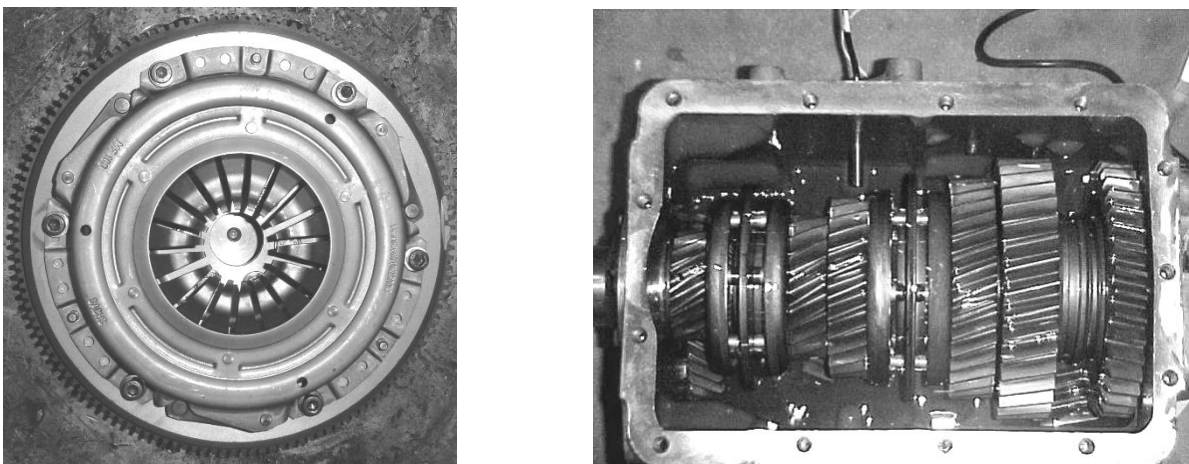


Figura 2: Ilustração da instrumentação para medição de vibração torsional.

Muitas vezes, o sinal de vibração medido da transmissão possui não somente a ordem de excitação do motor, mas outras componentes provenientes do comportamento não linear do sistema, vibrações excitadas de outras fontes como desalinhamento, desbalanceamento, mancais, sistemas auxiliares (ar condicionado, bomba hidráulica) etc. Esses sinais são gravados no domínio do tempo, i.e., armazena-se como a rotação varia a cada instante de tempo. Nesta forma, o sinal de vibração contém várias frequências (ordens), que dificultam a identificação da resposta excitada pela componente principal do motor, ou seja, existe a sobreposição de várias curvas de várias respostas (KADMIRI et al, 2011). A Figura 3 ilustra um sinal não estacionário (rotação do motor não constante) composto de diversas ordens, de um veículo de passeio com motor 4 tempos e 4 cilindros.

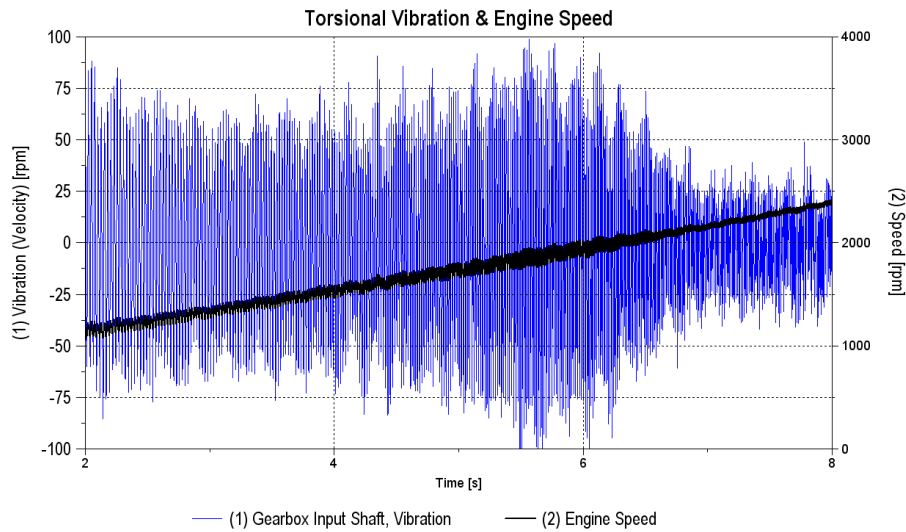


Figura 3: Flutuação da rotação ou vibração torsional, variando-se a rotação do motor de um veículo de passeio.

Assim, para facilitar a análise e interpretação do fenômeno, utiliza-se um mapa de ordem (“Order Tracking”). O mapa é um pós-processamento do sinal temporal, no qual se converte o sinal para o domínio do ângulo, ou seja, separa-se a amplitude da vibração para cada frequência ou ordem; desse modo é possível distinguir, em um gráfico 3D, quais são as ordens presentes no sinal e suas respectivas amplitudes em função da rotação. Na Figura 4, apresenta-se o sinal da Figura 3 processado na forma de um mapa de ordem. Nele é possível visualizar pelo o eixo da abscissa, as ordens presentes no sinal, que estão representados como picos. Para este exemplo, a amplitude da vibração (eixo z) varia conforme a rotação do motor (indicado no eixo da ordenada), em que é possível determinar com precisão a rotação, cuja vibração na transmissão é máxima.

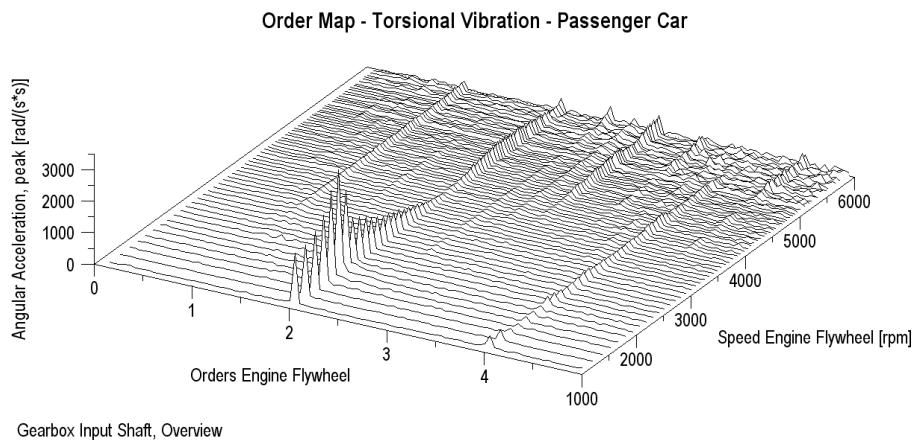


Figura 4: Mapa de ordem do sinal no eixo piloto da transmissão.

Das diversas metodologias possíveis para o estudo do comportamento dinâmico, a mais usada para a vibração torsional de trem de potência é o modelo “massa-mola” para vários graus de liberdade (GDL), Figura 5 (KADMIRI et al, 2012). Através desse modelo, é possível identificar e prever a posição da frequência natural do “powertrain” e a amplitude da resposta de vibração, se o nível da excitação do motor for conhecido. Na prática, nos estudos envolvendo a embreagem com um modelo numérico representativo, pode-se dizer qual é a frequência natural para uma rigidez colocada no amortecimento torsional do disco de embreagem, e, assim, avaliar os impactos positivos ou negativos dessa característica.

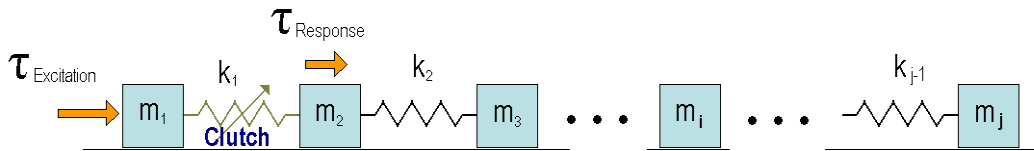


Figura 5: Modelo de múltiplos graus de liberdade (GDL).

O controle da amplitude de vibração na transmissão que gera o ruído de "rattle" é feito na rigidez torsional da embreagem. Assim, propõem-se como ações do projeto o ajuste de um modelo de massa-mola do trem de potência, a partir de dados experimentais de vibração no motor e transmissão, a fim de caracterizar os parâmetros e sua sensibilidade para reduzir a vibração torsional na transmissão. No projeto serão estudadas duas condições do veículo:

- Tração - em uma situação em que se acelera o veículo, requisitando torque do motor, o amortecimento torsional gira para o lado da tração do principal, de forma que o disco vibra somente na rigidez do amortecimento principal (faixa de maior rigidez torsional do disco de embreagem). Nessa situação, em geral, encontra-se uma frequência natural na faixa de trabalho do motor: entre a rotação de marcha lenta e a rotação máxima.
- Marcha lenta - corresponde à situação em que a transmissão está desengatada (neutro) e na menor rotação de trabalho do motor (baixa excitação), em que os únicos elementos do trem de potência que sofrem a vibração torsional são embreagem e transmissão, sendo então o sistema diferente da condição de tração. Além disso, a baixa carga de torque exigido do motor para manter a transmissão girando possibilita que o disco de embreagem trabalhe no pré-amortecimento, em uma faixa de menor rigidez torsional (SINGH & XIE, 1989; DION et al, 2009 e CHEN et al, 2012).

Resultados

Os resultados esperados no projeto de pesquisa, em um período de execução de 3 anos, são: (1) geração de modelos de massa-mola não-linear que represente o comportamento dinâmico de um trem de potência; (2) avaliação da sensibilidade dos parâmetros da embreagem na vibração torsional da transmissão; (3) estudo de metodologias de otimização para definição das

características ótimas da embreagem que minimize a vibração torsional na transmissão; (4) desenvolvimento de diferentes formas construtivas do conjunto torsional da embreagem que melhore as características dinâmicas do "powertrain".

A modelagem é feita numericamente através de softwares como o Matlab ou Scilab, que já possuem integradores numéricos dentre suas ferramentas. Sendo que o ajuste do modelo será realizado em parceria com a ZF do Brasil, São Bernardo do Campo, onde são efetuadas as medições experimentais nos veículos das montadoras de automóveis, caminhões e ônibus. O projeto já conta com a participação de um aluno de TCC (Fernando Luis Flach), cujo o estágio curricular está sendo realizado na própria empresa, iniciado em Fevereiro/ 2014.

Cronograma

Ano	1		2		3	
	1º	2º	3º	4º	5º	6º
Ajuste do modelo de powertrain						
Estudo da embreagem na vibração do powertrain						
Otimização dos parâmetros da embreagem						
Alternativas construtivas do amortecimento torsional da embreagem						
Revisão bibliográfica						
Publicação dos resultados						

Referências bibliográficas

Barthod, M., Hayne, B., Tebec, J.L. Pin, J.C. Experimental study of gear rattle excited by a multi-harmonic excitation. Applied Acoustics, 68, pp.1003-1025, 2007.

GmbH, R.B. Bosch automotive handbook. Bentley Publishers, 8º Edição, 2011, 1.256p.

Bozca, M. Torsional vibration model based optimization of gearbox geometric design parameters to reduce rattle noise in an automotive transmission. Mechanism and Machine Theory, 45, pp.1583-1598, 2010.

Bozca, M., Fietkau, P. Empirical model based optimization of gearbox geometric design parameters to reduce noise in an automotive transmission. Mechanism and Machine Theory, 45, pp.1599-1612, 2010.

Chen, Z.G., Shao, Y.M., Lim, T.C. Non-linear dynamic simulation of gear response under the idling condition. International Journal of Automotive Technology, 13, 4, pp.541-552, 2012.

Dion, J.L., Moyne, S.L., Chevallier, G., Sebbah, H. Gear impacts and idle gear noise: experimental study and non-linear dynamic model. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23, pp.2608-2628, 2009.

Drexler, H.J. *Motor vehicle clutches*. 1998.

Kadmiri, Y., Liaudet, J.P., Rigaud, E., Bot, A.L., Vary, L. Influence of multiharmonics excitation on rattle noise in automotive gearboxes. *Advances in Acoustics and Vibration*, 2011.

Kadmiri, Y., Rigaud, E., Perret-Liaudet, J., Vary, L. Experimental and numerical analysis of automotive gearbox rattle noise. *Journal of Sound and Vibration*, 331, pp.3144-3157, 2012.

Lechner, G., Naunheimer. *Automotive transmissions - fundamentals, selection, design and application*. Springer, 1999, 448p.

Reimpell, J., Stoll, H., Betzler, J.W. *The automotive chassis: engineering principles*. Elsevier, 2^o Edição, 2001, 460p.

Rocca, E., Russo, R. Theoretical and experimental investigation into the influence of the periodic backlash fluctuations on the gear rattle. *Journal of Sound and Vibration*, 330, pp.4738-4752, 2011.

Shim, S.B., Park, Y.J., Kim, K.U. Reduction of PTO rattle noise of an agricultural tractor using an anti-backlash gear. *Biosystema Engineering*, 100, p. 346-354, 2008.

Singh, R., Xie, H., Comparin, R.J. Analysis of automotive neutral gear rattle. *Journal of Sound and Vibration*, 131, 2, pp.177-196, 1989.