

MODELAGEM DE CARROCERIA DE ÔNIBUS PELO MEF PARA ESTUDO DE DINÂMICA VEICULAR

Ronaldo Klein Schweder

ronaldo.schweder@poli.usp.br

Em projetos de veículos automotivos, prever adequadamente a durabilidade de um componente estrutural é vital para a redução de custos assim como para se estipular prazos de garantia e de manutenção. Para isso, é de suma importância que se tenha um conhecimento aprofundado acerca da dinâmica do veículo e da influência da carroceria nesta. O processo de desenvolvimento do setor de encarroçamento de ônibus no Brasil ocorreu de forma extremamente acelerada e, até certo ponto, com poucos recursos financeiros. Conseqüentemente, este se fundamentou através de descobertas empíricas embasadas nas observações dos problemas de campo. Desencadeando assim, na falta de estudos estruturais aprofundados acerca de modos de vibrar, dinâmicas veiculares, pontos de concentração de tensões, otimizações de geometria e problemas relacionados a super ou sub dimensionamento de carrocerias. Assim sendo, o presente trabalho visa realizar uma análise dinâmica da carroceria através da realização de uma simulação conjunta entre a dinâmica veicular e uma análise estática pelo MEF (Método dos Elementos Finitos). Sendo que esta análise deve seguir a rigor as limitações de um projeto de carroceria de ônibus impostas por normas de trânsito, manuais de encarroçamento e demandas de mercado.

Palavras chave: Análise dinâmica-MEF, Carroceria ônibus, Carroceria Flexível.

1. Introdução

O fenômeno de evolução do capitalismo tem historicamente desencadeado no processo de formação de grandes centros urbanos, ligados principalmente ao processo de industrialização. Estes centros demandam volumosos investimentos em infra-estrutura, destacando-se a necessidade de locomoção e transporte.

As crescentes tendências mundiais de globalização tiveram o grande avanço tecnológico dos meios de transporte como um dos principais alicerces. Este avanço baseou-se, tanto no aumento das malhas de transporte, quanto no desenvolvimento de veículos.

O desenvolvimento das malhas de transporte brasileiras iniciou-se de forma maciça na década de 50, adotando-se uma solução similar à então adotada na reconstrução da Europa do pós Segunda Guerra Mundial. Infelizmente, graças à precariedade gerencial e orçamentária do país, em poucos anos tal malha viária deteriorou-se rapidamente, de modo que, não havendo investimentos significativos em manutenção, as principais rodovias apresentam hoje péssimo estado de trafegabilidade. [4]

Pudemos observar acima que, ao mesmo tempo em que houve a implantação de uma malha de transporte predominantemente rodoviária no Brasil, em detrimento de vias férreas, não houve um investimento contínuo em serviços de ampliação e manutenção. Isto levou à exigência de veículos robustos de transporte rodoviários tanto para carga quanto pessoas (Fig 1).

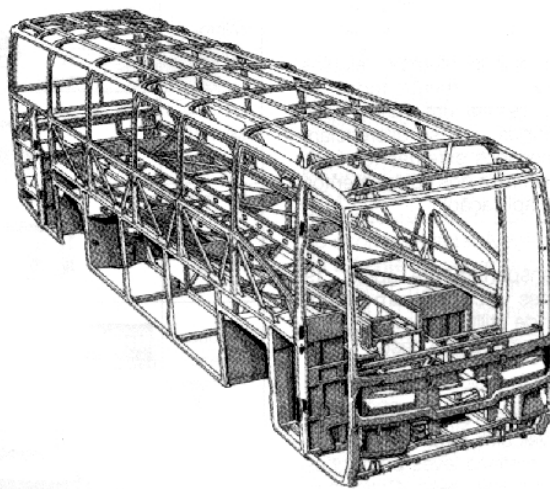


Figura 1: Ônibus rodoviário da década de 50 e carroceria de ônibus rodoviário.

A falta de investimentos brasileiros em infra-estrutura para mobilidade, vinculada à crescente demanda por sistemas de transporte urbano levaram a um intenso investimento em soluções de curto prazo, privilegiando assim sistemas de transporte que utilizam ônibus urbanos.

Este aumento crescente na demanda por ônibus desencadeou no surgimento de fábricas de carrocerias (Fig. 1) brasileiras que suprissem a demanda de mercado.

O processo de desenvolvimento do setor de encarroçamento de ônibus no Brasil ocorreu de forma extremamente acelerada e com poucos recursos financeiros. Conseqüentemente, este fundamentou-se através de descobertas empíricas

embasadas nas observações dos problemas de campo. Desencadeando assim, na falta de estudos estruturais aprofundados acerca de modos de vibrar, dinâmicas veiculares, pontos de concentração de tensões, otimizações de geometria e problemas relacionados a super ou sub dimensionamentos de carrocerias.



Figura 2: Ônibus biarticulado em circulação na cidade de Curitiba.

A conjuntura atual do mercado de ônibus exige que estes supram duas principais vertentes. A primeira é desenvolver produtos suficientemente robustos para aplicações de transporte rodoviário em estradas precárias, garantindo conforto e segurança aos passageiros. Já a segunda vertente tende à demanda por produtos urbanos de transporte em massa como alternativa a sistemas caros como o metrô. Um importante exemplo é o sistema implantado na cidade de Curitiba, premiado internacionalmente e reconhecido por aliar baixo custo operacional a serviço de qualidade, que dentre suas principais inovações está a introdução de grandes corredores com ônibus que podem carregar até 270 passageiros (Fig 2).

2. Metodologia

O intuito deste trabalho é avaliar a influência do modelamento da flexibilidade de uma carroceria de ônibus no estudo do comportamento da suspensão em contraposição à hipótese de uma carroceria infinitamente rígida.

Para isso, uma análise por elementos finitos precede o estudo dinâmico do veículo. Nesta análise, uma carroceria é modelada por elementos de viga, onde são aplicados carregamentos de forma a obter como saída os deslocamentos desta carroceria.

Finalmente uma vez determinados os deslocamentos da carroceria e conhecendo o carregamento imposto, uma rigidez torcional equivalente é determinada. Esta rigidez torcional equivalente, por sua vez, é utilizada no modelamento dinâmico para confrontar as saídas entre o modelo infinitamente rígido e o modelo sujeito à flexão (Fig 3).



Figura 3: Fluxograma das etapas do processo de análise.

2.1. Modelagem em CAD

A modelagem em software CAD foi realizada através do *CATIA v4*, utilizando como referência desenhos em planta de uma carroceria de um ônibus rodoviário 4x2 com entre-eixos de 5950 mm (Fig 4).

O desenvolvimento de um modelo da carroceria em CAD justifica-se pois a obtenção de parâmetros inerciais torna-se imediata e precisa. Por outro lado, a estrutura foi modelada novamente para análise por elementos finitos, uma vez que a utilização de elementos de viga não permitiu a conversão do modelo em CAD para o software de elementos finitos adotado (*Ansys v 11*).

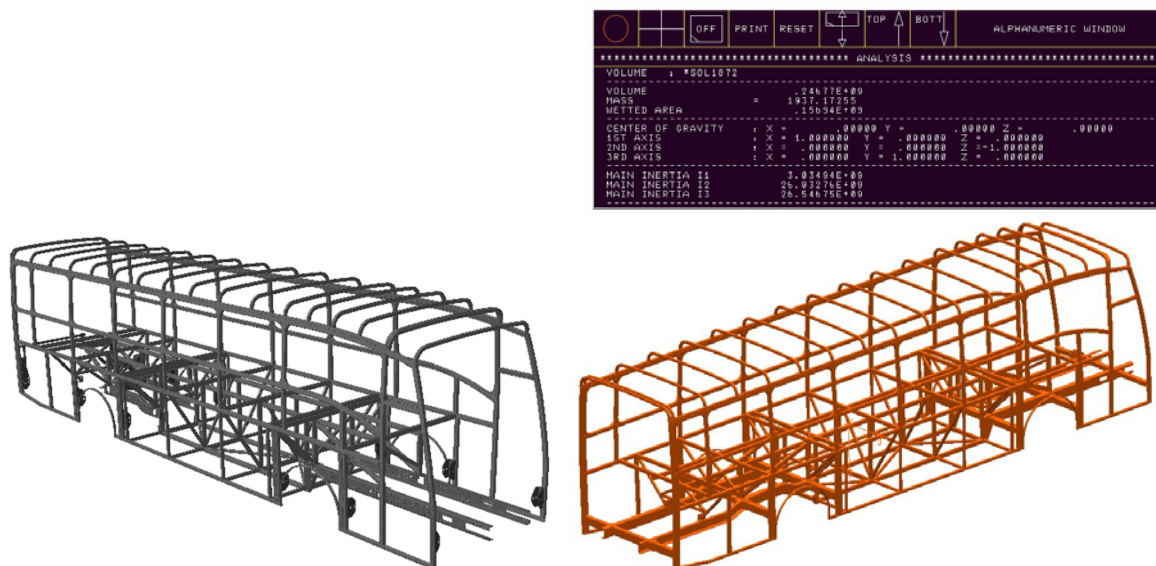


Figura 4: Modelos desenvolvidos em CAD de carrocerias de ônibus rodoviário e urbano articulado respectivamente.

2.2. Modelagem Matemática

A modelagem matemática utilizada na análise dinâmica deste trabalho baseou-se na Mecânica de Lagrange e na posterior representação no Espaço de Estados, com a finalidade de tornar a formulação mais versátil através da padronização da obtenção das equações do movimento. Inicialmente considerou-se a carroceria como um único corpo rígido (Fig 5), já o segundo modelo introduz uma rigidez torcional no centro de gravidade (CG) do veículo (Fig 6), de forma a representar esta flexão da carroceria. Sendo que a obtenção da rigidez torcional da carroceria realizou-se através do modelo por elementos finitos.

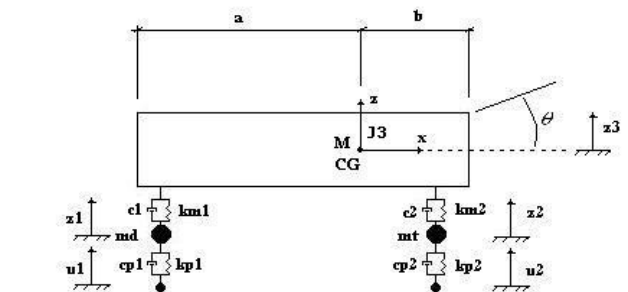


Figura 5: Representação de modelo simplificado para análise de carroceria rígida.

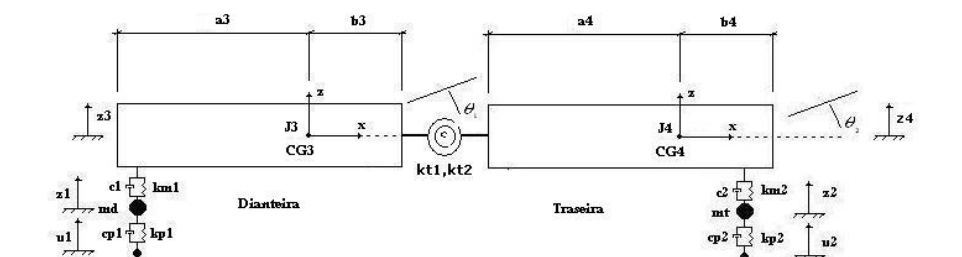


Figura 6: Representação do modelo simplificado da carroceria flexível.

2.3. Modelagem por Elementos Finitos

A modelagem por elementos finitos utilizou elementos de viga (Fig 7) para representar os tubos da carroceria, por estes aproximarem-se suficientemente da representação física necessária para obtenção das saídas. Informações referentes às propriedades dos materiais são especificadas. Neste caso, os tubos da carroceria são feitos com aço ZAR

230, cujo Módulo de Young e Coeficiente de Poisson são respectivamente 270 MPa e 0,31%. O refinamento da malha foi variado até que se obteve uma variação máxima de 5% na saída.

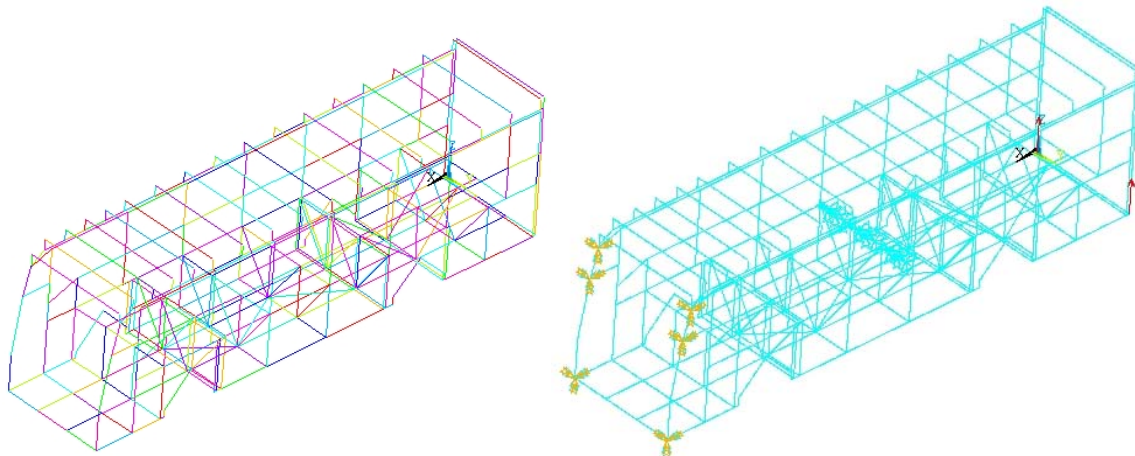


Figura 7: Representação dos elementos e das restrições impostas a um modelo de elementos finitos.

A determinação da rigidez torcional das diferentes partes do veículo em torno do CG foi realizada através da obtenção do deslocamento vertical da carroceria quando um carregamento é submetido em uma de suas extremidades, os deslocamentos translacionais são restringidos no CG e a extremidade oposta é engastada (Fig 7).

A saída do modelo com as restrições acima é o deslocamento vertical máximo da carroceria em torno do CG. De posse do deslocamento vertical (Δ), do carregamento imposto à carroceria (2P) e da distância do ponto de aplicação do carregamento ao CG (L), pode-se aproximar uma rigidez torcional (k_T) equivalente pela expressão:

$$k_T = \frac{2P L}{a \tan\left(\frac{\Delta}{L}\right)} \quad (1)$$

3. Resultados

3.1. Modelagem por Elementos Finitos

As saídas da análise por elementos finitos nos permitiram comprovar que existe uma considerável flexibilidade da carroceria quando se tratam de veículos rodoviários de grande porte, dado que os deslocamentos obtidos para a carroceria foram da ordem de 5 mm quando aplicado um carregamento constante de 10000 N.

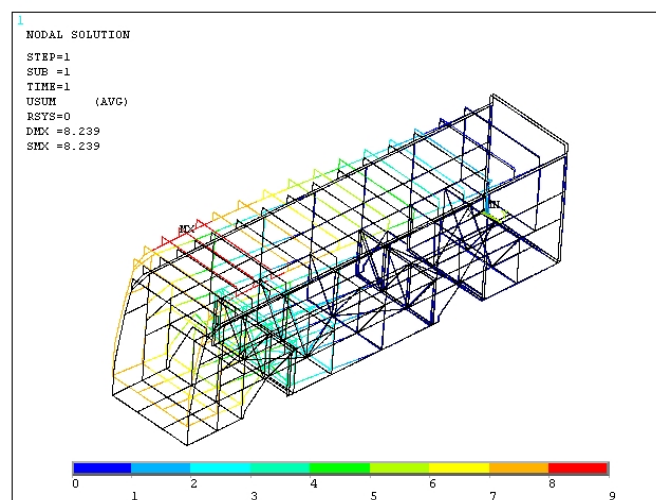


Figura 8: Vista isométrica da representação dos deslocamentos da estrutura com carregamento frontal.

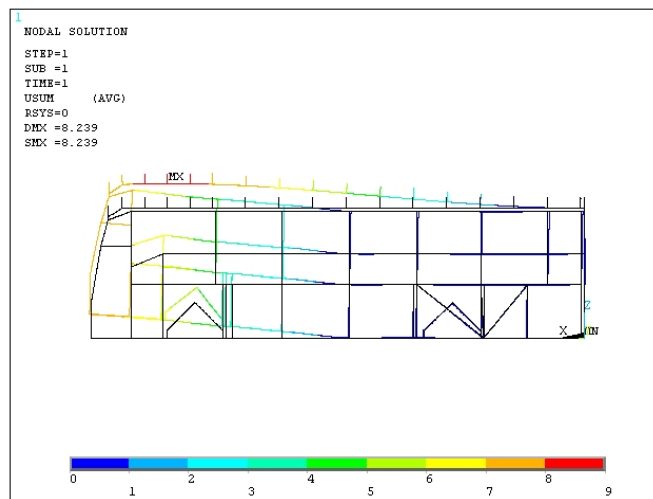


Figura 9: Vista lateral da representação dos deslocamentos da estrutura com carregamento frontal.

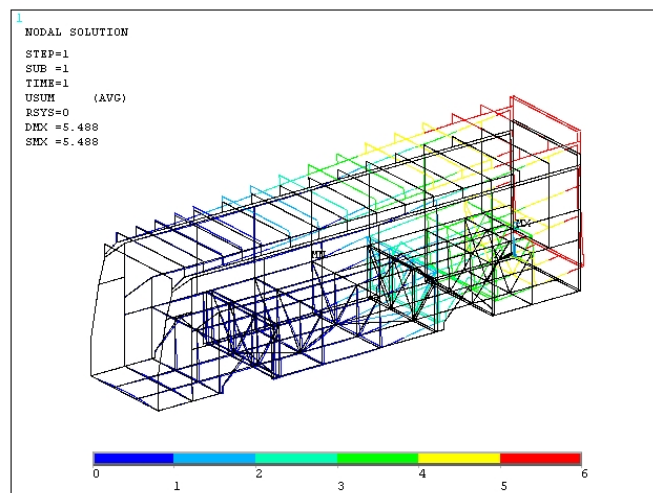


Figura 10: Vista isométrica da representação dos deslocamentos da estrutura com carregamento traseiro.

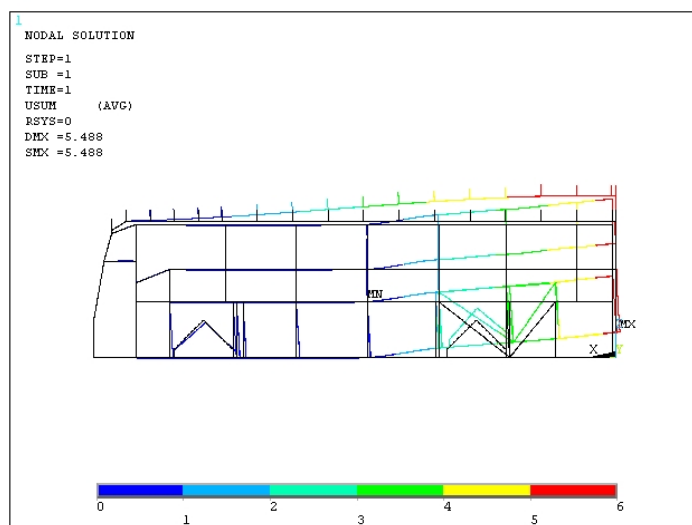


Figura 11: Vista lateral da representação dos deslocamentos da estrutura com carregamento traseiro.

3.2. Modelagem por Elementos Finitos

Os parâmetros da suspensão foram retirados da referência [4], os parâmetros inerciais dos modelos rígido e flexível foram obtidos da representação em CAD e finalmente, os parâmetros de flexão foram obtidos da modelagem por elementos finitos, conforme abaixo:

$J_3=26546,75 \text{ Ns}^2$;
 $M=16000 \text{ kg}$;
 $m_3=10002 \text{ kg}$;
 $m_4=5998 \text{ kg}$;
 $a=3,7195 \text{ m}$;
 $b=2,2305 \text{ m}$;
 $a_3=0,4695 \text{ m}$;
 $b_3=3,2500 \text{ m}$;
 $a_4=2,2305 \text{ m}$;
 $b_4=0 \text{ m}$;
 $J_3=3252,69 \text{ Ns}^2$;

$J_4=2755,43 \text{ Ns}^2$;
 $k_{p1}=2500000 \text{ N/m}$;
 $k_{p2}=5000000 \text{ N/m}$;
 $c_{p1}=70000 \text{ Ns/m}$;
 $c_{p2}=70000 \text{ Ns/m}$;
 $km_1=2400000 \text{ N/m}$;
 $km_2=400000 \text{ N/m}$;
 $c_1=100000 \text{ Ns/m}$;
 $c_2=100000 \text{ Ns/m}$;
 $k_{T1}=33583452 \text{ Nm/rad}$;
 $k_{T2}=18130978 \text{ Nm/rad}$;

A entrada do sistema para análise foi uma entrada do tipo degrau com amplitude 0,100 m (Fig 12).

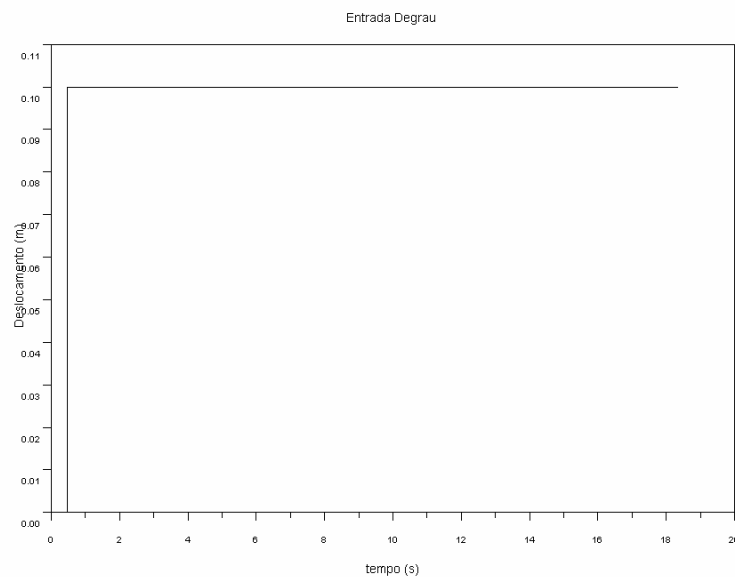


Figura 12: Entrada do modelo dinâmico.

A solução das equações dos sistemas com carroceria rígida ou flexível foram realizadas através do software Scilab. Abaixo encontram-se as saídas dos deslocamentos verticais das suspensões dianteira e traseira quando submetidas a uma entrada degrau:

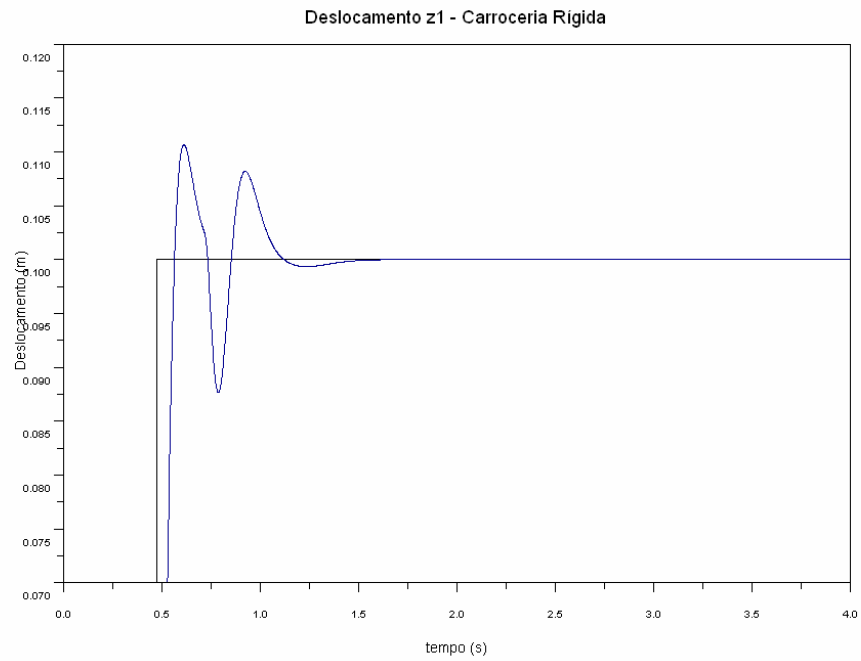


Figura 13: Deslocamento vertical da suspensão dianteira (z_1) no modelo com carroceria rígida.

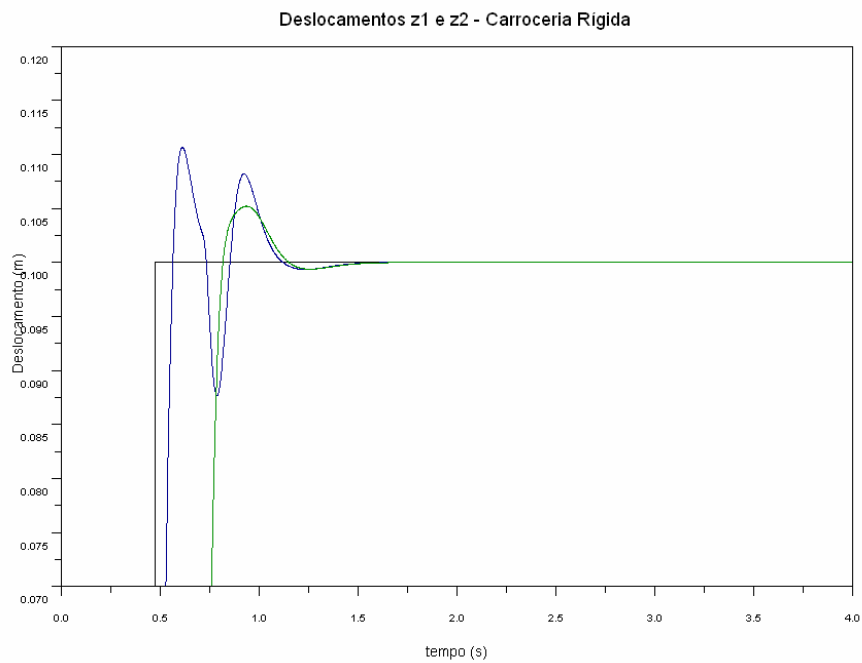


Figura 14: Deslocamento vertical das duas suspensões (z_1 e z_2) no modelo com carroceria rígida.

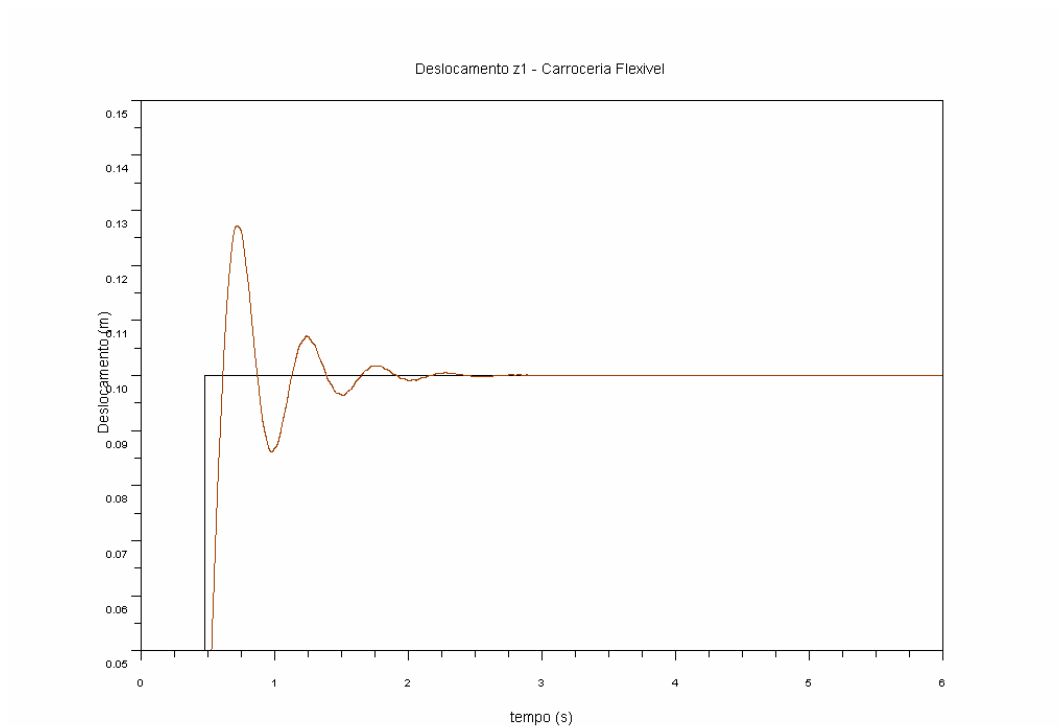


Figura 15: Deslocamento vertical da suspensão dianteira (z_1) no modelo com carroceria flexível.

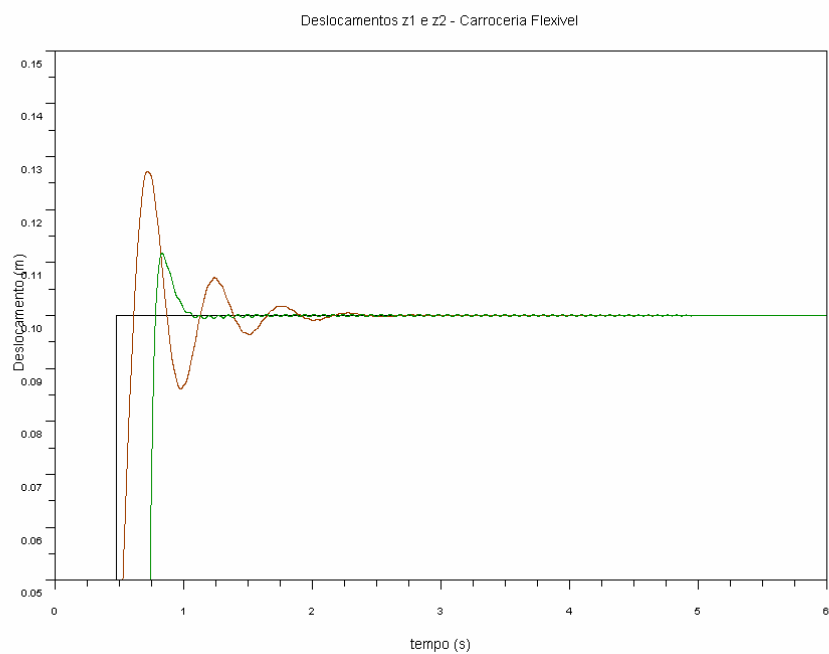


Figura 16: Deslocamento vertical das duas suspensões (z_1 e z_2) no modelo com carroceria flexível.

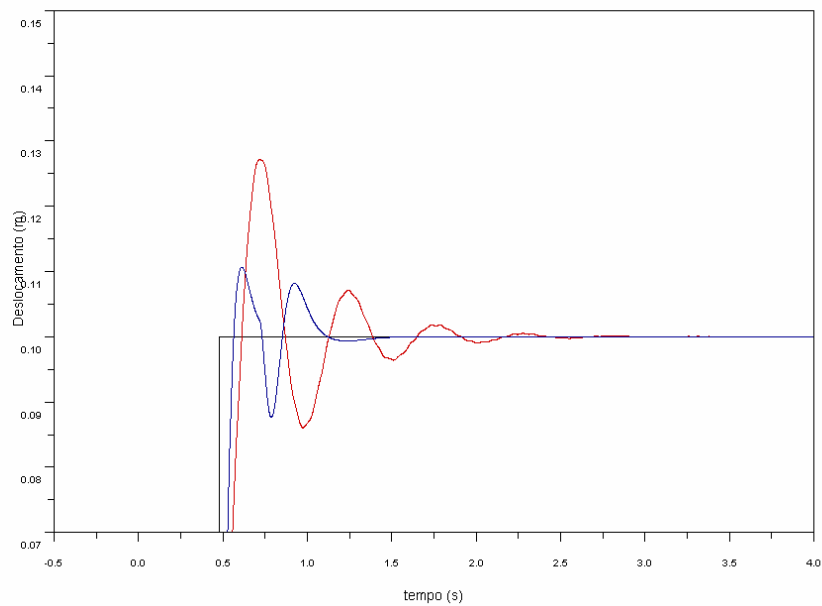


Figura 17: Deslocamento vertical da suspensão dianteira (z_1) nos dois casos (rígido e flexível).

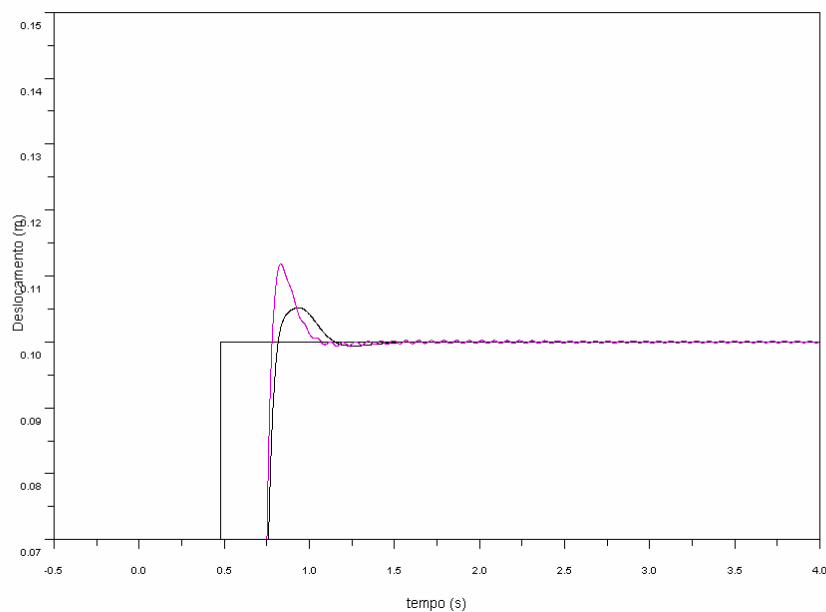


Figura 18: Deslocamento vertical da suspensão traseira (z_2) nos dois casos (rígido e flexível).

A análise dos gráficos apresentados acima indica que existe uma significativa variação da resposta do sistema quando comparamos a curva da carroceria flexível com a carroceria infinitamente rígida.

Dentre as principais diferenças, destacam-se uma maior amplitude e um maior tempo de amortecimento quando analisamos a carroceria flexível. Desta forma, podemos concluir que há uma significativa perda de amortecimento total do sistema, provavelmente decorrente de uma menor transmissibilidade do amortecimento entre as suspensões traseira e dianteira, uma vez que há um movimento relativo entre estas.

4. Conclusão

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de modelos dinâmicos de uma carroceria de ônibus para análise da influência da flexibilidade da carroceria na resposta do sistema quando submetido a uma entrada degrau. A ausência de

resultados experimentais foi suprida pela modelagem de um veículo considerando a hipótese de carroceria infinitamente rígida, cujos resultados foram comparados com os do modelo de carroceria flexível.

A metodologia empregada na análise iniciou-se com a modelagem de uma carroceria de ônibus rodoviário em software CAD, onde foram obtidos parâmetros inerciais. Em seguida, modelou-se a mesma carroceria em um software de elementos finitos (utilizando elementos de viga) para obtenção da deflexão da carroceria quando impostos carregamentos verticais. Finalmente, estes parâmetros foram compilados e inseridos como entrada nos modelos dinâmicos do comportamento do veículo.

As respostas dos modelos dinâmicos apresentaram significativas diferenças de amplitude e tempo de amortecimento, justificado pela menor transmissibilidade de amortecimento entre as suspensões dianteira e traseira devido ao movimento relativo entre as duas partes da carroceria.

A partir dos resultados acima, uma nova proposta de trabalho futuro pode ser apontada, a análise do comportamento dinâmico do veículo quando considera-se a torção da carroceria. Uma vez que o comportamento do veículo em curva pode variar quando considera-se a flexibilidade da carroceria.

As análises apresentadas neste trabalho indicam que é de suma importância o modelamento da carroceria como elemento flexível quando do projeto de suspensão de veículos de grande porte, neste caso um ônibus.

5. Referências

- [1] Alves Filho, A. Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE. 4ª edição, São Paulo: Érica, 2006. 292p.
- [2] Balázs, G. Dynamic analysis of a bus body frame: determination of the loads and stresses. *Vehicle System Dynamics*, 43(11), 807-822.
- [3] Bathe, K. J. Finite Element Procedures in Engineering Analysis. New Jersey: Prentice-Hall, 1982. 735p.
- [4] Cebon, D. Handbook of Vehicle Road Interaction. 1ª edição, Taylor & Francis, 2000. 612p.
- [5] Hougaz, A. B. Análise Probabilística de Durabilidade Aplicada a Veículos de Carga Rodoviária. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2005. 112p.
- [6] Macneal, R. H. Finite elements: their design and performance. New York: M. Dekker, 1994. 531p.
- [7] Shabana, A. A. Dynamics of Multibody Systems. New York: John Wiley & Sons, 1989. 470p.
- [8] Silva, M. M. Análise de dirigibilidade de um veículo comercial leve em ambiente multicorpos considerando flexibilidade do quadro. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2004. 100p.
- [9] Zerbini, E. J. et al. Manual de Tecnologia Automotiva. tradução da 25ª edição alemã: Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, São Paulo: Edgard Blücher, 2005. 1232p.

6. Direitos autorais

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

BUS BODY FRAME MODELING BY FEM FOR VEHICLE DYNAMICS ANALYSIS

Ronaldo Klein Schweder

ronaldo.schweder@poli.usp.br

In automotive vehicle design, preventing the durability of a structural component is vital when dealing with cost reduction and also for scheduling warranty and workshop services. This way, it's highly important to have deep knowledge regarding vehicle dynamics and the influence of the body frame on this. The body building development process in Brazil occurred in a very accelerated way and with few financial resources. Consequently, it was based through empiric discoveries of field problems observations. Therefore, it caused a lack of deep structural analysis regarding the vibration modes, vehicle dynamics, local concentration stress points and geometry optimization. The present work intends to make a dynamic analysis of the body frame through a coupled simulation between dynamic and FEM (Finite Elements Method). Considering that this analysis has to strictly follow the design limitations imposed by traffic legislations, bodybuilder's manuals and market demands.

Keywords. *Coupled dynamic-FEM analysis, Bus body frame, Flexible body frame.*