

ANÁLISE DOS MOVIMENTOS E GRAUS DE LIBERDADE REQUERIDOS PARA UM SISTEMA ATENUADOR DE VIBRAÇÕES EM MACAS DE AMBULÂNCIAS

Luana Marques Nóbrega e Silva ¹; Fernando Malvezzi ²

¹ Aluna de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

² Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *O trabalho proposto consiste em analisar quantos graus de liberdade e quais movimentos são necessários em um sistema absorvedor de vibrações de uma maca de ambulância para preservar a integridade física dos enfermos durante seu transporte. Foi realizada uma análise dinâmica dos movimentos da ambulância considerando a trajetória do veículo em diversas condições de operação, como frenagem e passagem sobre lombadas e irregularidade do pavimento. Um dos objetivos dessa pesquisa é fornecer informações para o desenvolvimento de um mecanismo capaz de atenuar vibrações em macas de ambulâncias.*

Introdução

Quando um indivíduo é acometido de um mal subido ou tiver sofrido ferimentos mais graves após um acidente, necessitará ser transportado rapidamente e com segurança a um local onde lhe será prestado atendimento. Os veículos utilizados para este transporte, as ambulâncias, são relativamente mais pesados e menos confortáveis que automóveis de passeio. No Brasil, é muito comum o emprego de ambulâncias cuja fabricação é o resultado de adaptações de veículos de transporte de carga, como caminhonetes, furgões ou vans.

As ambulâncias modernas geralmente percorrem superfícies muito melhores que antigamente, mas as vibrações induzidas pela estrada durante um trajeto ainda são desagradáveis e em alguns casos prejudiciais. Como os enfermos são transportados na parte traseira do veículo, eles estão sujeitos a acelerações durante os diversos trechos do trajeto, seja pela frenagem, manobra em curvas, passagem por obstáculos ou irregularidade no pavimento que influenciam diretamente na resposta dinâmica do veículo (Joshi *et al*, 2015). A vibração induzida pela superfície tem um grande efeito na função vital do corpo humano (sistema cardiovascular, esqueleto, sistema nervoso central, sistema respiratório), podendo-se agravar ainda mais a situação do indivíduo (Menon, 2018). Em caso de pacientes que sofreram um infarto, um acidente vascular cerebral (AVC) ou com deficiência que tem condições que causam dor e desconforto crônico (artrite, esclerose múltipla, dor nas costas), os mesmos necessitarão de um cuidado especial em virtude da sua maior sensibilidade às vibrações geradas durante o trajeto, podendo exacerbar essas condições (Kennedy *et all*, 2004).

A norma ISO 2631 (ISO, 1997) descreve maneiras de se avaliar a exposição do corpo humano à vibração (Eriksson e Svensson, 2015). A vibração do corpo humano é mais desconfortável quando as frequências das vibrações estão na mesma faixa de ressonância do corpo e a tolerância a elas é reduzida em pacientes doentes ou feridos. Além disso, a sensibilidade de um paciente deitado, posição que o enfermo fica durante o transporte na ambulância, é maior do que quando comparado a uma pessoa em pé ou sentada (Raemaekers, 2005).

Vibrações de até 12 Hz afetam todos os órgãos humanos, enquanto aquelas acima de 12 Hz tem efeitos locais, como por exemplo, uma hora de exposição à vibração pode causar fadiga muscular e tornar a pessoa mais suscetível a lesões nas costas (Nahvi, Fouladi e Nor, 2009).

Com o passar do tempo, a qualidade das vias e estradas melhoraram, com consequente aumento do conforto no transporte. No entanto, vale destacar que no Brasil cerca de 80% das estradas não são pavimentadas. As irregularidades nas vias são observadas tanto ao longo do

percurso como em pontos localizados. As irregularidades ao longo do percurso podem ter perfil senoidal ou estocástico. A norma ISO 8608 classifica o perfil de excitação de pistas como estocástico através da Densidade Espectral de Potência (PSD), tanto para vias pavimentadas quanto não pavimentadas, em oito classes distintas, de acordo com a rugosidade do piso (ISO, 1995).

Com relação às irregularidades localizadas, as lombadas são instaladas nas vias com o intuito de controlar a velocidade dos automóveis, reduzindo o número e gravidade dos acidentes de trânsito (Garcia-Pozuelo *et al.*, 2014). Um tipo de lombada bastante empregada em trabalhos sobre conforto veicular é a *Watts Profile*, representado na figura 1. A maioria dos veículos consegue atravessá-la com conforto e segurança a 30 km/h (Weber e Braaksma, 2000), podendo ser prejudicial para uma ambulância que precisa chegar rapidamente ao seu destino, visto que acima dessa velocidade o enfermo deve sofrer um nível crescente de desconforto (Pizzolante Neto, Sugimoto e Camanho, 1984). No Brasil, o Contran especifica um tipo de lombada similar ao *Watts Profile*, porém, em muitas vias são encontrados redutores de velocidade que não seguem este padrão (Pizzolante Neto, Sugimoto e Camanho, 1984).

Neste contexto, este trabalho apresenta uma análise detalhada dos movimentos do piso da ambulância sujeita a diversas condições de operação, como por exemplo, frenagem, curvas e passagem por irregularidades do pavimento. O objetivo do trabalho é analisar quais movimentos e suas respectivas acelerações geram desconforto ao enfermo, gerando informações úteis para o desenvolvimento de um mecanismo atenuador de vibrações da maca.

Material e Métodos

Para a realização das análises dinâmicas dos movimentos da ambulância foi utilizado o programa para simulação de dinâmica veicular CarSim, que emprega um modelo multicorpos de veículo completo, com 16 graus de liberdade e 32 corpos. Os amortecedores são não lineares e o efeito elastocinemático da suspensão também é considerado. O modelo matemático do pneu é não linear. Os parâmetros da ambulância utilizados nas simulações são compatíveis com o veículo Sprinter 415 CDI 7,5 m³ da Mercedes-Benz adaptada ao modelo UTI, bastante empregado para transporte de enfermos no Brasil. Na tabela 1 e 2 estão os principais parâmetros do veículo e da maca utilizada.

Tabela 1 - Parâmetros da Maca utilizada para efeito de simulação

Maca	Comprimento	Altura	Largura
Padronizada	1080 mm	435 mm	560 mm

Tabela 2 – Parâmetros da Ambulância utilizada para efeito de simulação

Ambulância	Entre-eixos	Distância entre caixa de roda	Eixo-dianteiro até começo da maca	Lado esquerdo da ambulância até o início da maca (largura)
Sprinter 415 - UTI	3250 mm	1350 mm	2270 mm	600 mm

A análise dinâmica simulou o comportamento do veículo durante uma frenagem brusca e ao passar sobre quatro obstáculos distintos: *Watts Profile*, ondulação na pista (com dois comprimentos diferentes) e *chassis twists road*.

Frenagem brusca: o intuito desta manobra foi simular uma situação em que o motorista precise realizar uma frenagem inesperada, a partir de uma velocidade inicial de 50 km/h e uma pressão máxima no cilindro mestre de 4 MPa.

Watts Profile: foi utilizada com o intuito de analisar o comportamento do veículo em uma lombada normatizada em uma velocidade de 35 km/h, um pouco acima do indicado para

atravessá-la com um bom nível de conforto, porém, sem a perda do contato dos pneus com o solo, garantindo o controle do veículo pelo motorista (Weber e Braaksma, 2000).

Ondulação na pista: foram considerados dois tipos de ondulações para simular as irregularidades na via, ambas com perfil senoidal. A manobra chamada de “L” indica que a medida entre os picos de elevação é igual à distância entre os eixos do veículo simulado e a “2L” que a distância é duas vezes essa medida. Em ambas as manobras foram considerados três picos sucessivos, de altura 0,1 metros. As velocidades de passagem nas manobras “L” e “2L” foram 15 km/h e 30 km/h, respectivamente.

Chassis twists road: essa manobra, baseada em (Ismail, 2014), é conhecida popularmente como “costela de vaca”, simulando excitações nos pneus geradas por irregularidades encontradas em nas vias (Figura). Na simulação, a velocidade de passagem foi de 20 km/h, com altura das elevações igual a 0,05 metros.

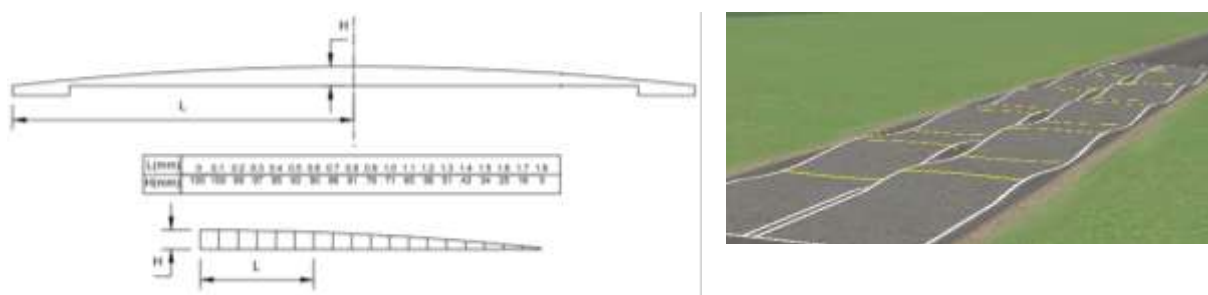


Figura 1 – (a) *Watts Profile*; (b) *Chassis twists road*

É importante ressaltar que nas manobras “L”, “2L” e *chassis twists road* o critério para escolha da velocidade levou em conta a passagem da ambulância pelo obstáculo sem a perda do contato dos pneus com o solo, garantindo o controle do veículo pelo motorista.

A variável relacionada com o desconforto do enfermo, de acordo com a norma ISO 2631, é a aceleração, tanto translacional como rotacional. Nos resultados foram apresentados tanto o valor de pico quanto a média quadrática ou RMS (*Root Mean Square*) da aceleração. Assim, durante as manobras foram calculadas as acelerações angulares em torno dos eixos longitudinal (*roll*) e lateral (*pitch*) do veículo, bem como as acelerações nas direções vertical e lateral, em três pontos distintos: no baricentro do veículo, na cabeça (ponto 1) e na região abdominal do enfermo (ponto 2). A localização dos pontos 1 e 2 foi baseada nas dimensões antropométricas de um indivíduo de estatura mediana, obtidas no trabalho de Pheasant e Haslegrave (2006).

Resultados e Discussão

Na manobra *Watts Profile* foi analisada a aceleração vertical e as acelerações angulares em torno dos eixos longitudinal (*roll* - rolagem) e lateral (*pitch* - arfagem), representadas nas figuras 2, 3 e 4, respectivamente. Os pontos de máximo, mínimo e o RMS obtidos nesta manobra estão representados na tabela 3. Estes resultados são condizentes àqueles apresentados por Raemaekers (2009). De acordo com a norma ISO 2631 (ISO, 1997; Long, 2018), o valor RMS da aceleração vertical é classificado como muito desconfortável.

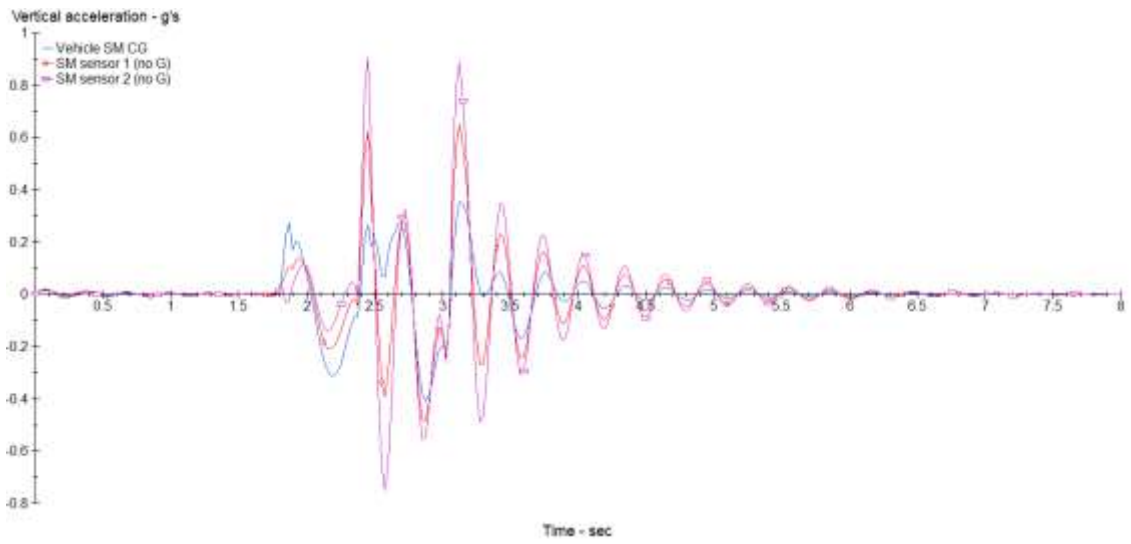


Figura 2 - Aceleração Vertical (Az)

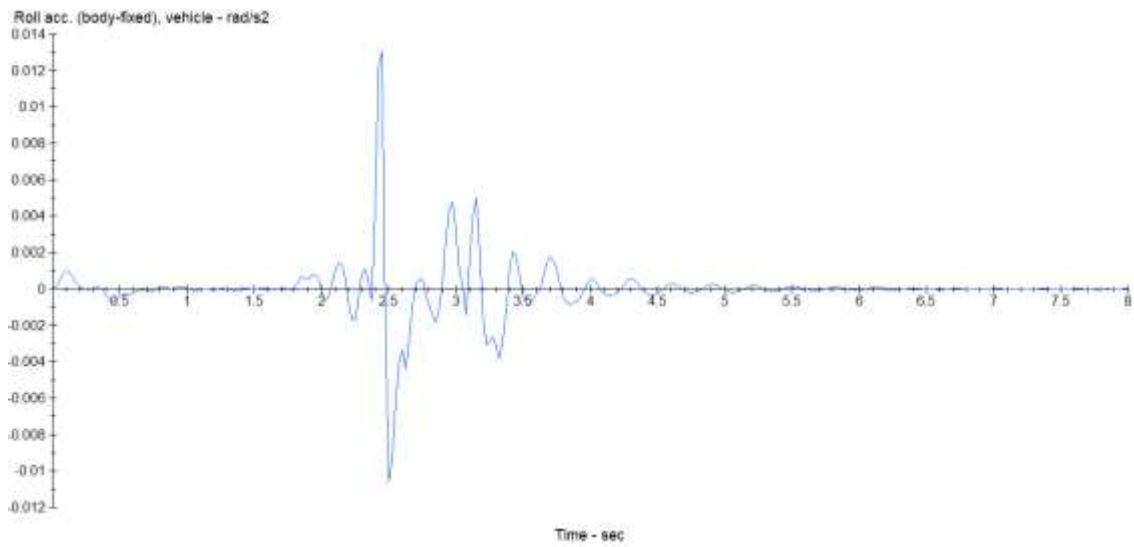


Figura 3 - Aceleração angular na rolagem

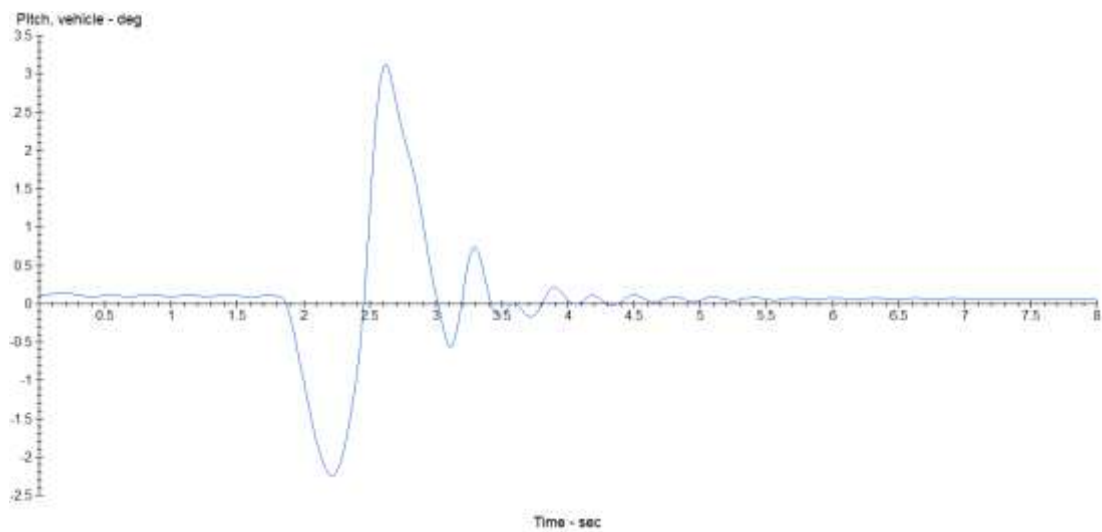


Figura 4 - Aceleração angular na arfagem

Tabela 3 - Designação de pontos máximos, mínimos e RMS - *Watts Profile*

<i>Watts Profile</i>	Máximo	Mínimo	RMS
Aceleração Vertical Az [g]	0,88857 (ponto 2)	-0,74977 (ponto 2)	0,1728
Aceleração angular no Roll [rad/s ²]	0,013076	-0,010572	0,0016
Aceleração angular no Pitch [rad/s ²]	3,1199	-2,2366	0,6882

Na frenagem brusca, foram analisadas as acelerações vertical, longitudinal (figura 5) e angular na arfagem (figura 6). Na tabela 4 estão designados os pontos de máximo, mínimos e RMS dos gráficos dessa manobra. De acordo com a norma ISO 2631, o valor RMS da aceleração longitudinal é classificado como muito desconfortável.

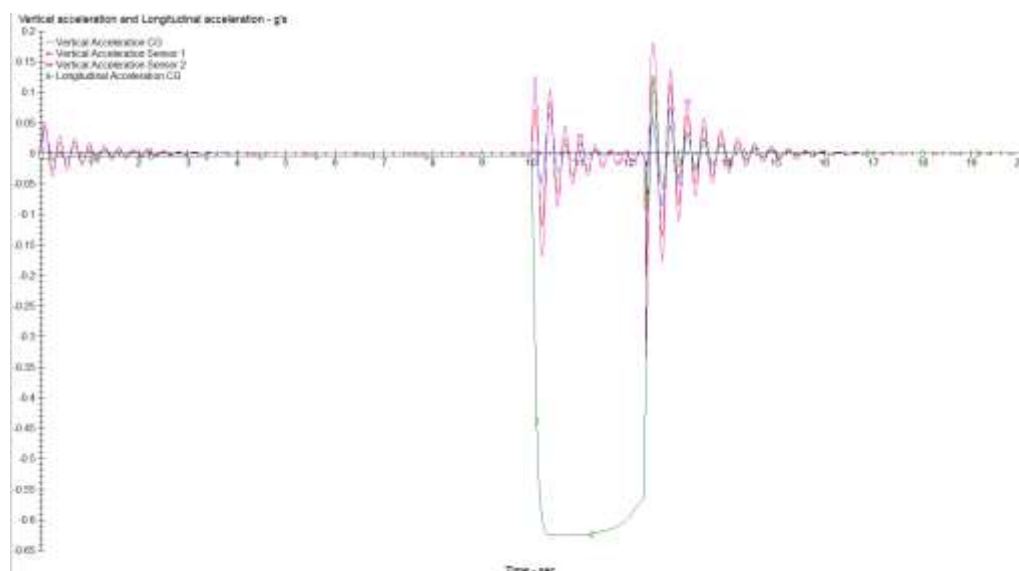


Figura 5 - Aceleração vertical (Az) e longitudinal (Ax)

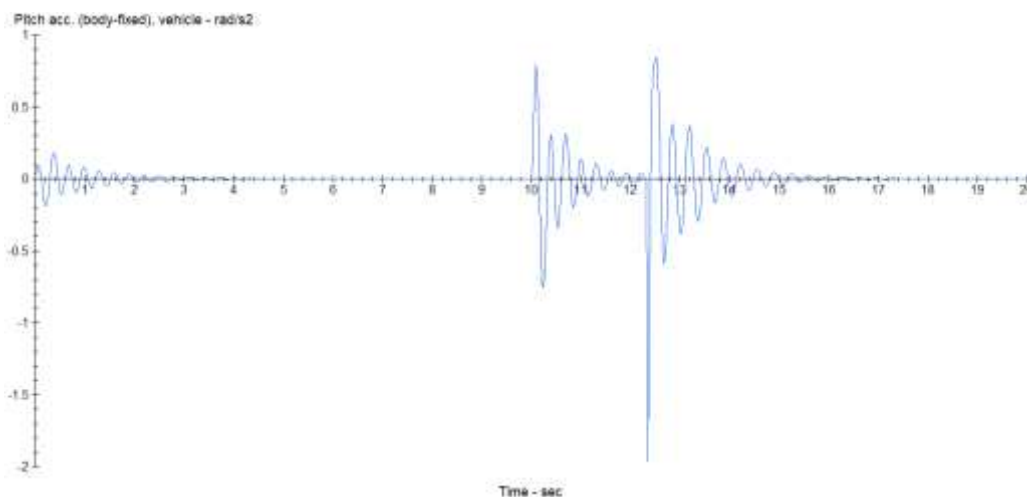


Figura 6 - Aceleração angular na arfagem

Tabela 4 - Designação de pontos máximos, mínimos e RMS - Frenagem brusca

Frenagem brusca	Máximo	Mínimo	RMS
Aceleração vertical Az [g]	0,18024 (ponto 2)	-0,33271 (ponto 2)	0,0368
Aceleração longitudinal Ax [g]	0,12554	-0,62582	0,2368
Aceleração angular no pitch [rad/s ²]	0,84106	-1,9656	0,3092

Quando a ambulância percorreu por uma ondulação na pista, tanto na manobra “L” como na “2L”, foram analisadas a aceleração vertical e a angular, na arfagem e na rolagem. Os resultados da passagem pela ondulação “L” estão apresentados nas figuras 7, 8 e 9 e as figuras

10, 11 e 12 mostram os resultados da passagem pela ondulação “2L”. Os respectivos valores de máximo, mínimo e RMS estão representados nas tabelas 5 e 6.

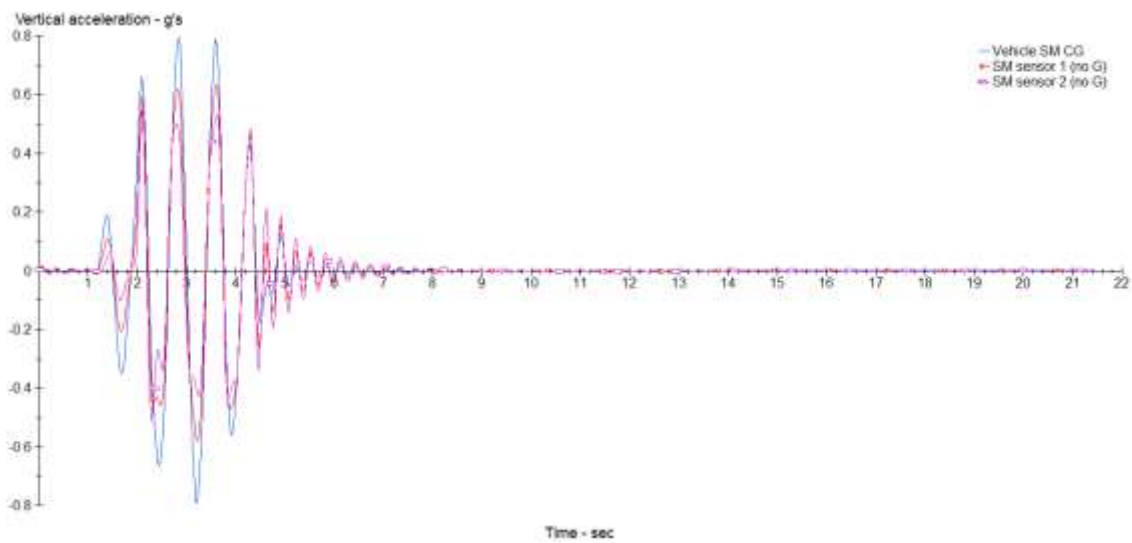


Figura 7 - Aceleração vertical (A_z) – ondulação “L”

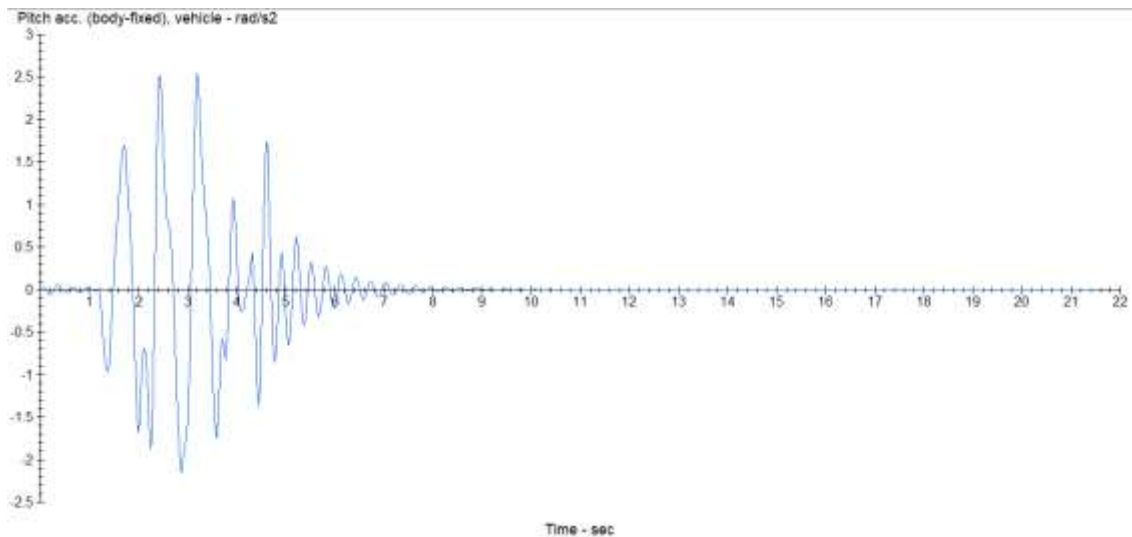


Figura 8 - Aceleração angular na arfagem – Ondulação “L”

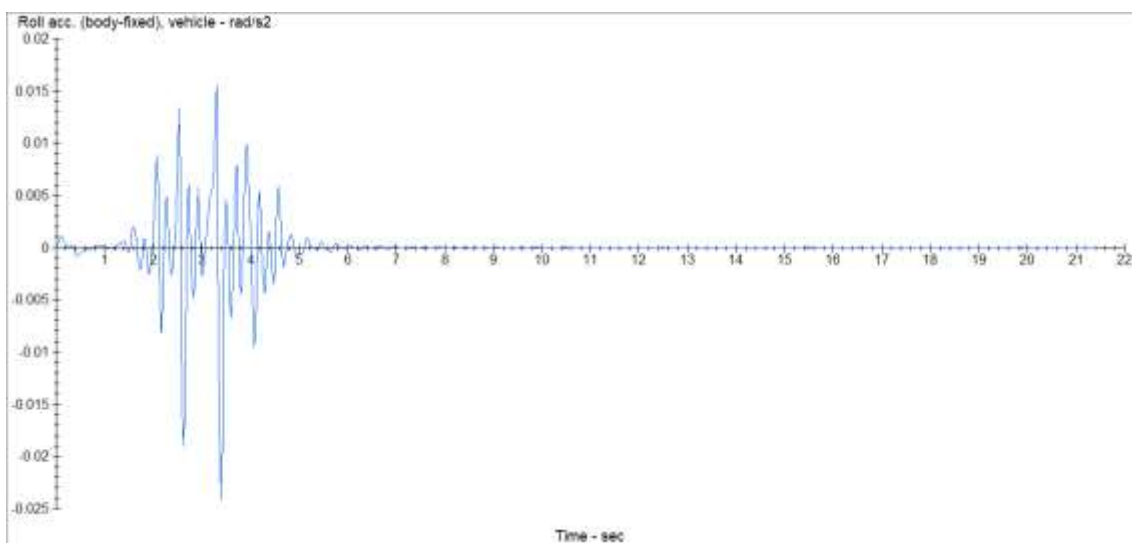


Figura 9 - Aceleração Angular na rolagem – Ondulação “L”

Comparando estes resultados nota-se que na manobra “L” o veículo atinge a maior aceleração vertical, enquanto que na manobra “2L” a aceleração rotacional no movimento de arfagem é máxima. Isto ocorre devido à distância entre os eixos do veículo, conforme Gillespie (1994).

Com relação ao conforto do enfermo, de acordo com a norma ISO 2631 o valor RMS da aceleração vertical é classificado como desconfortável na manobra “2L” e muito desconfortável na manobra “L”.

Tabela 5 - Designação de pontos máximos, mínimos e RMS - Ondulação “L”

Ondulação “L”	Máximo	Mínimo	RMS
Aceleração vertical Az [g]	0,79593 (CG)	-0,79056 (CG)	0,1686
Aceleração no Pitch [rad/s ²]	2,548	-2,150	0,4872
Aceleração no Roll [rad/s ²]	0,015516	-0,024095	0,0024

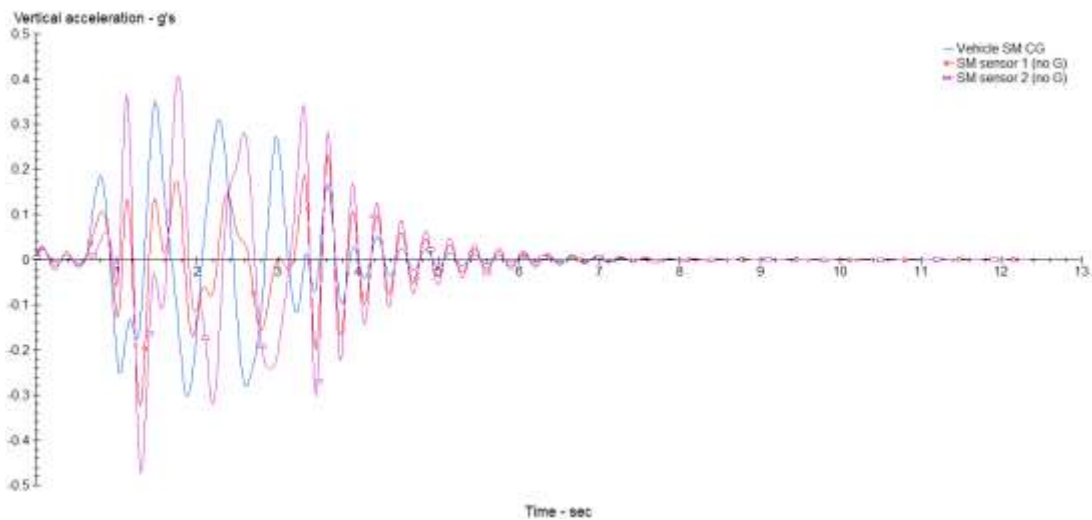


Figura 10 - Aceleração vertical (Az) – Ondulação “2L”

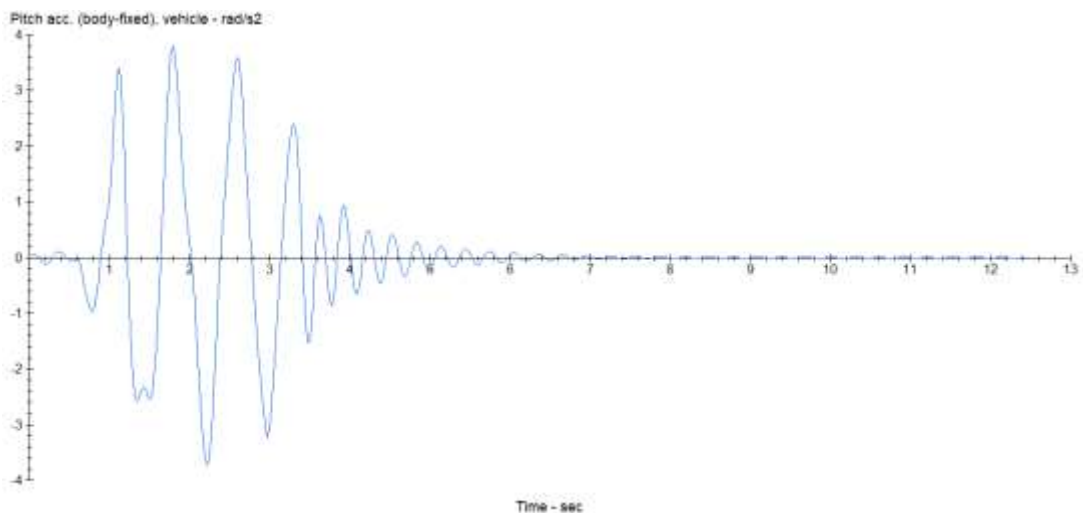


Figura 11 - Aceleração angular na arfagem – Ondulação “2L”

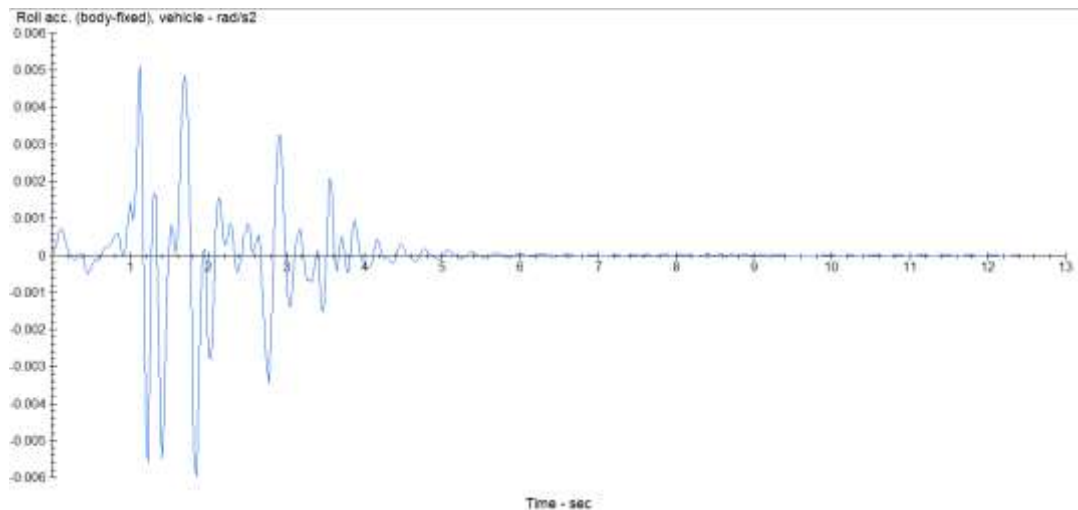


Figura 12 - Aceleração angular na rolagem – Ondulação “2L”

Tabela 6 - Designação de pontos máximos, mínimos e RMS - Ondulação “2L”

Ondulação “2L”	Máximo	Mínimo	RMS
Aceleração vertical Az [g]	0,40483 (ponto 2)	-0,47548 (ponto 2)	0,1069
Aceleração no Pitch [rad/s ²]	3,7914	-3,7288	1,0179
Aceleração no Roll [rad/s ²]	0,0051284	-0,0059646	0,001

Na manobra *chassis twists road* foram determinadas as acelerações vertical e lateral, figura 13, e as acelerações angulares nos movimentos de arfagem, figura 14, e rolagem, figura 15. Nessa manobra é possível analisar o maior efeito de rolagem dentre as manobras estudadas, por conta da variação alternada da amplitude dos obstáculos. De acordo com a norma ISO 2631, o valor RMS da aceleração lateral é classificado como um pouco desconfortável.

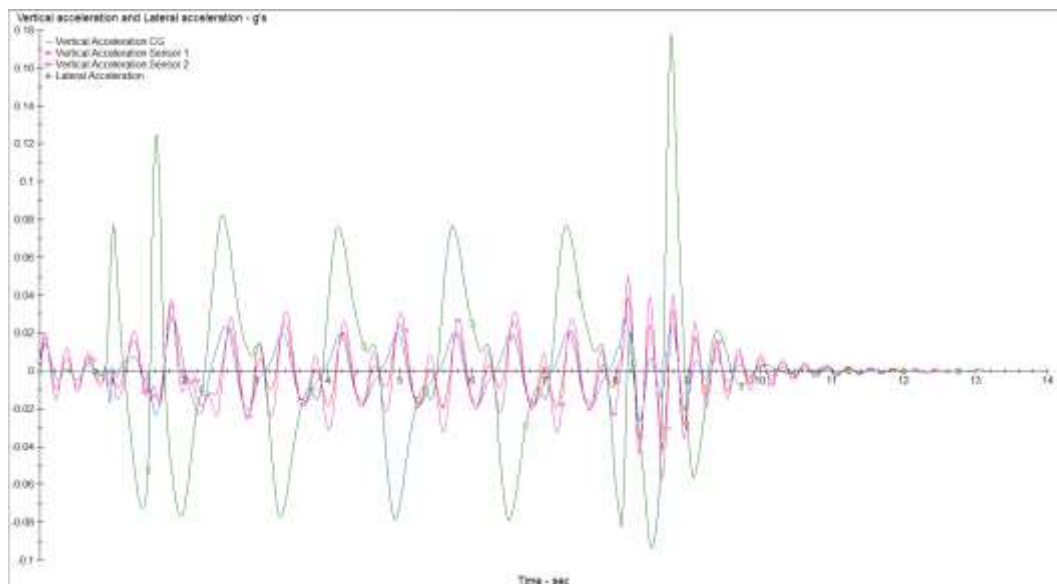


Figura 13 - Aceleração vertical (Az) e lateral (Ay)

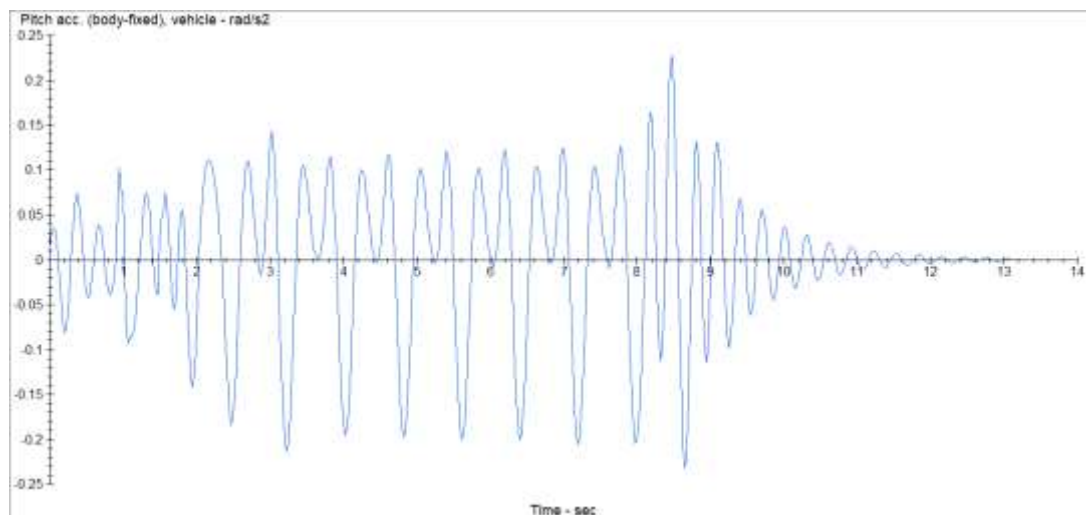


Figura 14 - Aceleração angular na arfagem

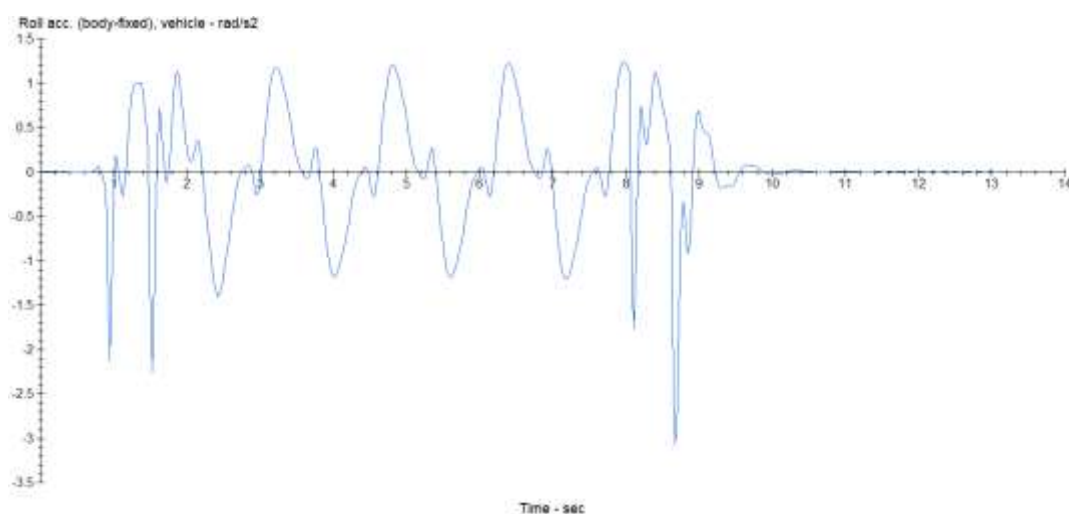


Figura 15 - Aceleração angular na rolagem

Tabela 7 - Designação de pontos máximos, mínimos e RMS - *Chassis twists road*

<i>Chassis twists road</i>	Máximo	Mínimo	RMS
Aceleração Vertical Az [g]	0,050243 (ponto 2)	-0,057756 (ponto 2)	0,0155
Aceleração Lateral Ay [g]	0,1754	-0,093783	0,0411
Aceleração - Arfagem [rad/s ²]	0,22736	-0,23305	0,0800
Aceleração - Rolagem [rad/s ²]	1,248	-3,0731	0,6050

Conclusões

A partir dos resultados apresentados neste trabalho, pôde-se perceber durante as manobras os picos de aceleração em regiões como a cabeça e o abdômen do enfermo (pontos 1 e 2, respectivamente). De acordo com os trabalhos citados na introdução, isto pode ser prejudicial à integridade física do enfermo transportado na ambulância, o que sugere a necessidade da liberação das restrições de movimento da maca da ambulância. Com um mecanismo montado sob a maca o efeito da vibração induzida por agentes externos ao veículo poderia ser reduzido. Com a liberação de quatro graus de liberdade, sendo eles as rotações referentes aos movimentos de arfagem e rolagem e as translações nas direções vertical e longitudinal, seria possível reduzir os valores de pico de acelerações na maca, minimizando os efeitos negativos e muitas vezes prejudiciais ao paciente.

Referências Bibliográficas

- Baumal, A.E.; McPhee, J.J.; and Calamai, P.H. (1998). Application of Genetic Algorithms to the Design Optimization of an Active Vehicle Suspension System, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **163**, 87-94.
- Eriksson, J.; Svensson, L. (2015). *Tuning for Ride Quality in Autonomous Vehicle*. Master's Thesis, Uppsala University, Uppsala, Sweden.
- Garcia-Pozuelo, D.; Gauchia, A., Olmeda, E.; Diaz, V. (2014). Bump Modeling and Vehicle Vertical Dynamics Prediction. *Advances in Mechanical Engineering*, doi: 10.1155/2014/736576.
- Gillespie, T. D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. 3th edition, Warrendale, SAE Inc.
- Nahvi, H.; Fouladi, M. H.; Nor, M. J. M. (2009). Evaluation of Whole-Body Vibration and Ride Comfort in a Passenger Car, *International Journal of Acoustics and Vibrations*, **14**, 143-149.
- Ismail M.F., Sam Y.M., Sudin S., Peng K., Aripin M.K. (2014) *Modelling and Control of MacPherson Active Suspension System Using Composite Nonlinear Feedback under Chassis Twisted Road Condition*. In: Tanaka S., Hasegawa K., Xu R., Sakamoto N., Turner S.J. (eds) *AsiaSim 2014. Communications in Computer and Information Science*, **474**, Springer, Berlin, Heidelberg
- ISO 2631-1. (1997). Mechanical Vibration and Shock – Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration. International Organization for Standardization, Switzerland.
- ISO 8608. (1995). Mechanical Vibration-Road Surface Profiles-Reporting of Measured Data. International Organization for Standardization, Switzerland.
- Joshi, O. P.; Jadhav, T. A.; Pawar, P. R.; Saraf, M. R. (2015). Investigating Effect of Road Roughness and Vehicle Speed on the Dynamic Response of the seven degrees-of-freedom Vehicle Model by using Artificial Road Profile. *International Journal of Current Engineering and Technology*, **5**, 2596-2602.
- Kennedy, J.; Oakley, C., Sumon, S., Parry, I., Wilkinson, E., & Brown, J. (2004). *Impact of road humps on vehicles and their occupants*. Prepared for Charging and Local Transport Division, TRL Report TRL614.
- Long, L. X.; Quynh, L. V.; Cuong, B. V. (2018). Study on the influence of bus suspension parameters on ride comfort. In: *Vibroengineering PROCEEDIA*, **21**, 77-82.
- Menon, V. A. (2018). *Product Development Approach For a Stabilized Ambulance Stretcher*. Master's Thesis, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal.
- Pheasant, S.; Haslegrave, C. M. (2006). *Bodyspace: Anthropometry, Ergonomics and the Design of Work*. 3rd edition. Boca Raton, CRC Press.
- Raemaekers, A. (2009). *Active vibration isolator design for ambulance patients*. Master's Thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, Holland.
- Weber, P. A.; Braaksma, J. P. (2000). Towards a North American Geometric Design Standard for Speed Humps. *ITE Journal*.