



## **ESTUDO EM AMBIENTE MULTICORPOS DA DINÂMICA DE UMA SUSPENSÃO A SER APLICADA EM PERFILÔMETRO INERCIAL**

**Malthus Rodrigues**

**Rita de Cássia Silva**

**Alessandro B. de S. Oliveira**

malthus.rs@gmail.com

ritasilva@unb.br

abso@unb.br

Universidade de Brasília - Faculdade Gama

Área Especial de Indústria Projeção A Brasília. Gama - Setor Leste. CEP: 72.444-240,  
Brasília Brasil.

**Resumo:** *O Perfilômetro inercial é um equipamento de medição utilizado para a obtenção de perfis de pista. É formado a partir da combinação de um sensor de distância à laser, um acelerômetro e um computador para aquisição e tratamento de dados, acoplados a um veículo real de teste. Os perfis de pista são uma valiosa fonte de dados para estudos sobre a influência de irregularidades do pavimento no ciclo de vida de elementos da suspensão. Diante de sua importância para a segurança veicular, os autores se propuseram a desenvolver um modelo de perfilômetro inercial rebocável, para obtenção de informações sobre as pistas nacionais, favorecendo a realização de estudos futuros de verificação da vida útil dos componentes desse subsistema. Embora o uso de protótipos físicos para auxiliar no dimensionamento seja bastante difundido, tal escolha pode demandar mais tempo e recursos, quando comparado à criação de modelos virtuais. Portanto, este trabalho apresentará as etapas de desenvolvimento de um modelo virtual de  $\frac{1}{4}$  de suspensão do perfilômetro inercial rebocável em ambiente multicorpos, a fim de auxiliar no dimensionamento do equipamento.*

**Palavras-Chave:** *Perfilômetro inercial, Ambiente Multicorpos, Suspensão Veicular, Segurança Veicular*

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo dados do DNIT (2014), o Brasil possui uma malha rodoviária de aproximadamente 1,7 milhão de quilômetros de estrada, sendo que apenas 12,9%, o equivalente a 221.820 km, é pavimentada. Em condições ideais, o pavimento deve garantir uma rolagem segura, econômica e confortável aos passageiros, como apresentado por Barella (2008). Porém, ao transitar pelas estradas nacionais é fácil observar que boa parte desta pequena porcentagem de estradas pavimentadas está em condições precárias, dificultando o tráfego.

Segundo Gillespie (1992a), o pavimento representa um ponto chave na determinação do conforto dos ocupantes e na segurança veicular, já que, no contexto da dinâmica vertical, as irregularidades da pista representam uma fonte de excitação sobre os veículos, manifestando-se na forma de vibrações na cabine. O estudo da dinâmica veicular vertical, tratado na seção 3.1, visa descrever um automóvel como um sistema dinâmico e analisar a magnitude das vibrações, resultantes do tráfego, observadas na carroceria e como estas vibrações são percebidas pelos ocupantes.

Duarte (2011) realiza um estudo numérico em ambiente multicorpos, para estudar a dinâmica vertical veicular para  $n$  graus de liberdade. Para tanto, coletou dados sobre as irregularidades de um pavimento real e estes dados foram utilizados para excitar um modelo veicular virtual.

No contexto da estrutura veicular, as excitações decorrentes das irregularidades do pavimento representam uma fonte de cargas cíclicas atuantes no sistema de suspensão, podendo resultar na ocorrência de fadiga nas bandejas do sistema, comprometendo sua vida útil.

Visando o entendimento do efeito das irregularidades de pavimentos na vida útil dos componentes da suspensão veicular, Rodrigues (2015) desenvolveu uma metodologia para avaliar o ciclo de vida das bandejas de suspensão dianteiras sob fadiga, ao serem excitadas por perfis de pista experimental e teórico, este último baseado em uma função senoidal dupla.

A percepção da correlação entre a qualidade do pavimento e o conforto dos ocupantes data de épocas posteriores à criação dos automóveis, conforme citado por Gillespie (1992a).

Gillespie (1992 b) *apud* Hveem (1986) cita o *Viagraph*, desenvolvido em 1900, como o primeiro dispositivo criado para a medida de irregularidades de pista. Este dispositivo, apresentado na Fig. 1, registrava de modo contínuo, em um papel, os desvios verticais de uma régua de madeira que era apoiada e arrastada pelo pavimento



Figura 1- Esquema do *Viagraph*. Fonte: Gillespie (1992b).

Com o advento dos automóveis com motor de combustão interna, a velocidade do tráfego passou a ser maior e os ocupantes ficaram mais expostos a um amplo espectro de vibrações,

conforme apresentado por Gillespie (1992a). A necessidade de proporcionar uma viagem mais confortável para os ocupantes intensificou o desejo de se obter um sistema de suspensão melhor e um pavimento que promovesse uma rolagem mais suave.

Na década de 50, conforme citado por Sayers e Karamihas (1998), a AASHO (*American Association of State Highway Officials*) desenvolveu um método de análise denominado *Panel Ratings*, onde a avaliação de uma pista requereria que avaliadores a percorressem em um veículo de testes, atribuindo nota de 0 a 5, referente à qualidade da rolagem no pavimento. A partir dos resultados obtidos era possível determinar se o pavimento estava adequado ao uso. A Fig.2 apresenta a ficha utilizada nesta análise.

The figure shows a form for the Panel Ratings method. On the left, there is a section titled "Acceptable ?" with three vertically stacked boxes labeled "Yes", "No", and "Undecided". To the right is a vertical scale from 0 to 5, with corresponding quality levels: 0 - Very Poor, 1 - Poor, 2 - Fair, 3 - Good, 4 - Very Good, and 5 - Very Good. Below the scale is the label "Rating". At the bottom of the form, there are fields for "Section Identification", "Rater", "Date", "Time", and "Vehicle", each followed by a line for text entry.

**Figura 2. Representação da ficha utilizada para avaliação de pavimentos *Panel Ratings*. Fonte: Sayers e Karamihas (1998).**

Determinar a qualidade de um pavimento utilizando este método é bastante subjetivo, já que a nota final da pista está diretamente ligada às percepções de conforto que cada avaliador tem durante o teste, tornando a análise imprecisa. Gillespie (1992a) reforça a ideia do parágrafo anterior ao destacar que a própria percepção humana da qualidade do veículo de teste também é subjetiva, ou seja, o veículo utilizado tem influência sobre a sensação de conforto dos avaliadores acerca do pavimento.

Sob outro prisma, Hu (2006) apresenta a repetibilidade como um fator vital para dispositivos de medição. A repetibilidade consiste em repetir uma mesma medição várias vezes sob as mesmas condições e observar a diferença entre cada resultado. Um bom dispositivo irá mostrar uma diferença mínima entre as repetições. Da análise de *Panel Ratings*, Fig.2, pode-se considerar os avaliadores como dispositivos de medição, já que suas notas qualificarão o pavimento. Por se tratar de seres humanos com emoções e sensações complexas, a repetibilidade do teste pode ser comprometida.

A fim de se obter uma análise mais acurada no estudo de pavimentos, dispositivos de medição, como o perfilômetro inercial, foram desenvolvidos para minimizar a interferência humana no processo de avaliação. Enquanto o *Panel Ratings*, Fig. 2, retorna uma nota de 0 a 5 dada pelos avaliadores para o pavimento, o perfilômetro inercial fornece aos avaliadores um conjunto de pontos que descrevem a irregularidade do pavimento.

No contexto do controle administrativo de malhas viárias, Sayers e Karamihas (1998) citam três aplicações para os dados coletados sobre as irregularidades: monitorar uma rede de

pavimentos, avaliar a qualidade de pistas novas ou reparadas, realizar reparos preventivos e manter uma base de dados sobre as condições de locais específicos.

Os perfilômetros inerciais são compostos por um sensor de distância à *laser*, um acelerômetro montado na estrutura do sensor e um computador utilizado para a aquisição e tratamento dos dados. Maiores detalhes sobre o funcionamento desse conjunto serão apresentados na seção 2. Esses equipamentos devem ser instalados em um veículo de teste que tráfegará na pista a ser analisada conforme apresentado na Fig. 3(a) com fixação frontal, e na 3(b) com fixação lateral.



**Figura 3. (a) Perfilômetro inercial com fixação frontal (b) Perfilômetro inercial com fixação lateral Fonte: SSI.**

Como não há uma norma que padronize o tipo de veículo de teste (onde os sensores serão fixados) que deva ser utilizado ou as propriedades dinâmicas deste, pode-se empregar modelos diversos. Diante disto, os autores propõem o desenvolvimento de um perfilômetro inercial rebocável para obtenção de perfis de pista. O resultado esperado é o desenvolvimento de um dispositivo rebocável de testes, dedicado à avaliação de pavimentos, que tenha propriedades dinâmicas conhecidas.

O desenvolvimento do equipamento foi dividido em 3 etapas: dimensionamento do chassi, carroceria e suspensão. Este trabalho abordará o desenvolvimento virtual do sistema de suspensão, apresentado na seção 4.

De fato, Rezende (2007) discorre que, tradicionalmente, durante o processo de fabricação de um novo veículo pela indústria, havia a produção de diversos protótipos até a conclusão do modelo final. Esta metodologia requeria bastante tempo e recursos financeiros da montadora ao longo do desenvolvimento do produto final.

Com o desenvolvimento dos softwares CAD e CAE voltados para o desenvolvimento de projetos, permitiu-se a criação de protótipos virtuais para simular o comportamento dos mecanismos em estudo e efetuar alterações antes da construção do produto final. Rezende (2007) cita que a implementação destas ferramentas auxiliou na diminuição do custo e tempo necessário para o desenvolvimento de um produto.

Nesse estudo, o perfilômetro proposto contará com dois eixos, suspensão independente com geometria *Trailing Arms*, molas pneumáticas e pneus aro 13. O sensor à *laser*, o acelerômetro e o computador para aquisição e processamento de dados serão instalados na carroceria do dispositivo, que será produzido em chapa polimérica composta. A função desta chapa é garantir o isolamento térmico dos equipamentos. O perfilômetro terá em torno de 2m de comprimento e 1m de largura, contando com um lastro de 200 kg adicionado à carroceria

para estabilização. A Fig. 4 apresenta uma vista isométrica em ambiente CAD do equipamento proposto.



**Figura 4. Vista isométrica em ambiente CAD do perfilômetro inercial rebocável.**

Um dos pontos importantes no desenvolvimento do projeto da suspensão foi a decisão pela geometria *Trailing Arms* para compor o sistema, e o uso de molas pneumáticas ao invés de molas helicoidais. As molas pneumáticas permitem o controle da pressão utilizada, tal característica oferece uma flexibilidade quanto à rigidez da mola e permite aos pesquisadores alterar as propriedades da suspensão conforme necessário.

Portanto, este trabalho apresentará as etapas de modelagem de um modelo virtual da suspensão do perfilômetro inercial rebocável representada como  $\frac{1}{4}$  de suspensão. Também será apresentada uma análise de sensibilidade dos deslocamentos verticais da carroceria em função da pressão da mola pneumática utilizada na suspensão. Na seção 2, será apresentado um panorama geral sobre os perfilômetros inerciais. A seção 3 tratará sobre a suspensão a ser modelada, apresentando as características da geometria selecionada. A seção 4 apresentará as etapas de modelagem dividida em 5 subseções: importação dos dados do CAD e construção dos *parts* do modelo multicorpos, modelagem do pneu e pista, juntas, mola e amortecedor, resultados e análises preliminares. As conclusões com sugestões para trabalhos futuros serão apresentadas na seção 5.

## 2 PERFILÔMETROS INERCIAIS

Esta seção discorrerá sobre o perfilômetro inercial, seu funcionamento e os sensores que compõem o conjunto. Ao fim desta seção será discutida a justificativa, sob o prisma da metrologia, para a decisão de se construir uma estrutura rebocável padronizada para acoplar os equipamentos ao invés de utilizar um veículo de teste.

Desenvolvido pela GM na década de 60, os perfilômetros inerciais utilizam um *laser* e um acelerômetro para obter um perfil longitudinal de pista; conceito melhor apresentado a seguir, nesta seção.

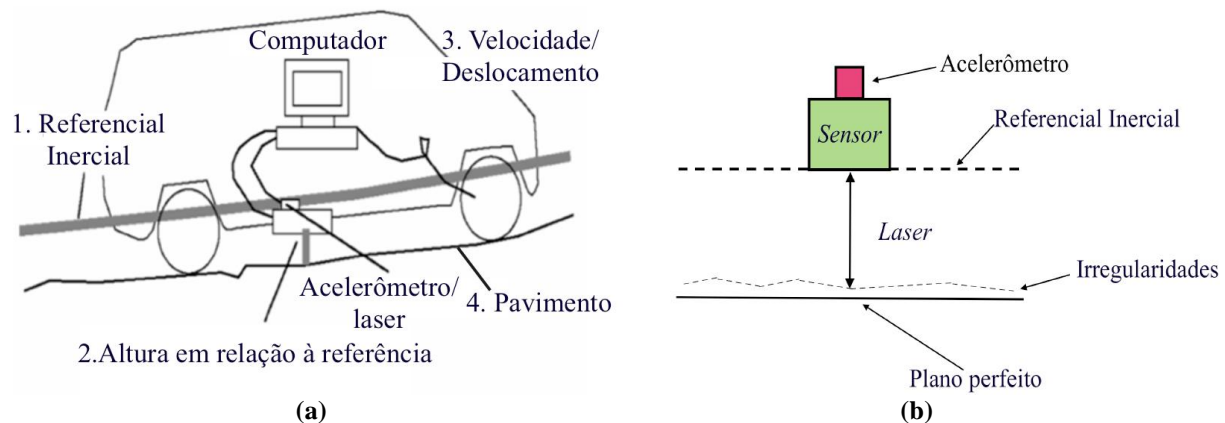
Conforme apresentado por Sayers e Karamihas (1998), as irregularidades de um pavimento são obtidas através da relação entre 3 três informações: a Elevação (ou altura) de referência, a Variação em relação à referência e Distância longitudinal.

Para os perfilômetros inerciais, a elevação de referência, indicada pelo número 1 na Fig. 5(a), corresponde à distância vertical entre o conjunto acelerômetro-*laser* e um plano perfeito imaginário, indicado na Fig.5 (b).

A altura em relação à referência, indicada pelo número 2 na Fig.5 (a), é referente à distância entre o referencial inercial e o pavimento é registrada pelo sensor de distância, à *laser*. Para este trabalho foi selecionado o sensor de distância da Keyence® modelo GM-3000, que tem uma faixa de medição de  $150\pm 40$  mm.

De acordo com Hu (2006) e Barella (2008), a distância medida pelo sensor de distância será diferente da distância entre o pavimento e o referencial inercial devido aos desvios na pista, indicadas na Fig. 5(b). Portanto, as irregularidades do pavimento, para um determinado ponto, será a subtração entre o valor constante do referencial inercial e a medida obtida pelo sensor de distância à *laser*, indicado nas Fig.5(a) e Fig.5 (b)

A distância longitudinal é referente à extensão de pista que o perfilômetro irá percorrer durante o teste. O pavimento a ser analisado está representado pelo número 4 na Fig.5(a). Segundo Hu (2006) a velocidade de teste, indicada pelo número 3 na Fig. 5(a), segue a velocidade de tráfego podendo chegar a 80 Km/h.

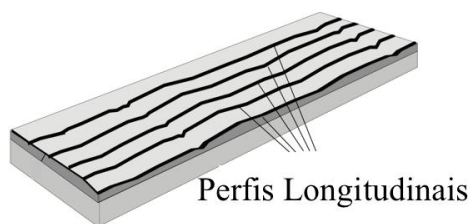


**Figura 5 . (a) Elementos do perfilômetro inercial. Fonte: Adaptado de Sayers e Karamihas (1998). (b) Detalhe dos elementos para medição de irregularidades.**

Hu (2006) destaca que há outra variável envolvida na medição das irregularidades: o deslocamento vertical da carroceria. Conforme Gillespie (1992a), ao transitar por um pavimento o veículo responde às irregularidades do pavimento na forma de vibrações; impondo deslocamentos verticais na cabine, alterando a elevação do referencial inercial.

Essa modificação de referencial é corrigida com a instalação de um acelerômetro em conjunto com o sensor de distância à *laser*. Segundo Hu (2006), este sensor irá registrar as acelerações verticais na carroceria. Barella (2008) ressalta que o acelerômetro deve ser acoplado em perfeito alinhamento com o sensor de distância para que ambos possam gerar informações na mesma frequência. O computador, Fig. 5 (a), após programação adequada, efetuará dupla integração dos dados, determinando o deslocamento da carroceria, retornando a elevação de referência para cada instante.

Visto que seria impraticável medir a irregularidade de toda área de uma pista, é preferível medir um trecho entre dois pontos do pavimento, para que este represente uma amostra local da pista avaliada. Esta amostra é denominada perfil longitudinal de pista (sentido do tráfego) e é medida tendo por base uma linha paralela à superfície do pavimento, no sentido longitudinal apresentado na Fig. 6.



**Figura 6. Orientação de perfis de pista. Fonte: Adaptado de Sayers e Karamihas (1998).**

Como apresentado anteriormente na seção 1, no perfilômetro inercial (reboçável) os sensores estarão acoplados em uma estrutura reboçável. Sob o ponto de vista metrológico esta montagem oferece um diferencial em relação à montagem tradicional em um veículo de teste.

Como visto no início desta seção, o acelerômetro é um sensor de grande importância para a medição, já que corrige as variações do referencial inercial. Emmendoefer (2008) apresenta que todos os sensores e equipamentos estão sujeitos a incertezas que reduzem a exatidão da variável medida. Quando os dados destes sensores são utilizados como entradas em um sistema, estas incertezas podem se tornar relevantes e interferir no resultado final. No contexto do perfilômetro inercial, onde o acelerômetro é utilizado para determinar deslocamento vertical, estas incertezas são propagadas pelo processo de dupla integração.

Dentre as incertezas citados por Emmendoefer (2014) estão: o erro de *bias*, fator de escala, desalinhamento de eixos, erros de integração e erros de linearidade, dentre outros. No caso dos veículos de teste esses erros são adicionados ao sinal do perfil de pista.

Diante disto, o projeto do perfilômetro inercial tem como interesse desenvolver uma suspensão que consiga isolar ao máximo a carroceria dos deslocamentos referentes à passagem pelas irregularidades do pavimento e, conseqüentemente, minimizar o erro decorrente do uso do acelerômetro no resultado final.

### **3 SUSPENSÃO DO PERFILÔMETRO INERCIAL REBOCÁVEL E DINÂMICA VERTICAL**

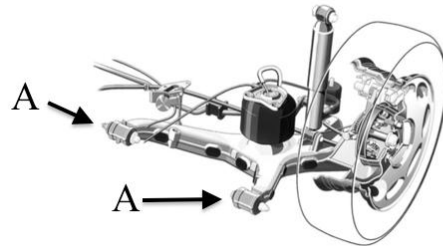
Como visto na seção 1, este trabalho apresentará as etapas de modelagem de um sistema de suspensão *Trailing Arms* com mola pneumática em ambiente multicorpos. O modelo virtual terá a suspensão representada na forma de  $\frac{1}{4}$  de veículo, sendo avaliada a dinâmica vertical com foco na transmissibilidade das irregularidades do pavimento para a carroceria.

Tendo em vista o exposto na seção 2, é desejável que a suspensão isole a carroceria do veículo de testes, visando minimizar as interferências decorrentes do uso do acelerômetro.

Esta montagem de suspensão foi inspirada na solução vista em *trailers* utilizados em trilhas *off road*. Considerando que o foco do perfilômetro inercial reboçável é a obtenção de dados sobre a malha viária nacional, a utilização desse sistema de suspensão em pistas *off road* atraiu pela robustez oferecida, que será necessária para o dispositivo trafegar nas degradadas estradas brasileiras.

Outro ponto interessante visto nesse modelo da Fig. 7, foi a possibilidade de variação da rigidez da mola pneumática já que, segundo Gillespie (1992a), sua rigidez influencia na resposta dinâmica final do veículo, conforme será apresentado a seguir na subseção 3.1.

Sugiura *et al* (2000) destacam que as suspensões *Trailing Arms* são comumente utilizadas no eixo traseiro e caracterizam-se pela montagem dos braços de controle articulados no chassi e orientados no sentido longitudinal do veículo, apresentados na Fig. 7. Os pontos de fixação no chassi estão indicados pela letra (A) na Fig. 7 abaixo. Reimpell (2002) destaca a leveza, simplicidade da montagem e a dinâmica do braço que permite a movimentação da roda apenas no sentido vertical.



**Figura 7. Vista superior de braço de controle de suspensão *trailing arm*. Fonte: Reimpell (2002).**

Reimpell (2002) destaca que em virtude de o braço de controle permitir movimento apenas no eixo vertical, a carroceria não sofre efeitos de rolagem e, conseqüentemente, o centro de rolagem está na altura do solo, conforme citado por Milliken e Milliken (1995). Outra consequência do modo de fixação do braço de controle, segundo Reimpell (2002) e Kazemi *et al* (2012), é que o braço está sujeito a diversos esforços resultantes das forças laterais e verticais que atuam na suspensão durante o tráfego.

Informações sobre estes esforços podem ser obtidos dentro do próprio modelo multicorpos e inseridos em um *software* de análise, em elementos finitos, para verificação dos níveis de tensão.

Outro ponto observado no projeto da suspensão é que a geometria *Trailing Arms* é independente. Neste tipo de suspensão, a passagem de uma das rodas por um obstáculo não interfere nas rodas opostas, ao passo que nas suspensões dependentes, a passagem da roda por um obstáculo repercute nas rodas do lado oposto, podendo inclusive criar um momento de rolagem na carroceria dependendo da amplitude do obstáculo.

Um momento de rolagem muito acentuado, decorrente deste tipo de situação, fará com que *laser* perca o contato com o pavimento.

A mola pneumática selecionada para compor esta suspensão foi o modelo *Sleever 7012* da Firestone®. Esta mola será melhor apresentada na subseção 4.4. A mola pneumática possui um amortecimento intrínseco, citado por Shiotsuki (2009), e a princípio um amortecedor não foi adicionado ao projeto da suspensão.

A verificação sobre o funcionamento da suspensão será feita com auxílio do modelo virtual apresentado na seção 4.

### **3.1 Dinâmica vertical veicular e modelo de $\frac{1}{4}$ de veículo**

Nesta seção serão apresentados os conceitos de dinâmica vertical, discutidos brevemente na seção 1, transmissibilidade, apresentado inicialmente na seção 2 e o modelo de  $\frac{1}{4}$  de veículo.



Um veículo locomovendo-se em um pavimento é excitado por uma ampla faixa de vibrações que podem ser externas ou internas. Gillespie (1992a) descreve que fontes internas são: vibração do motor, conjunto roda/pneu e transmissão, enquanto as externas referem-se às irregularidades do pavimento.

Estas vibrações são filtradas pelo sistema de suspensão e chegam aos passageiros na forma de sensações táteis, visuais e audíveis.

Gillespie (1992a) divide as vibrações em duas faixas: *ride* e *noise*. *Ride* são as vibrações na faixa de 0 à 25Hz e tem uma percepção mais tátil e visual pelos ocupantes. *Noise* corresponde a faixa de vibrações entre 25 Hz e 25000 Hz e corresponde a estímulos sonoros. Embora ambas influenciem no conforto dos ocupantes, Gillespie (1992a) aponta o *ride* como a faixa vibrações que mais interfere na percepção de conforto.

Freitas (2009) cita que o estudo da dinâmica vertical pode ser dividido em 3 etapas: determinação das fontes de excitação, resposta dinâmica do veículo e percepção das vibrações pelos ocupantes. Segundo Gillespie (1992a) a resposta dinâmica de um veículo é caracterizada pela relação entre as entradas, que no caso deste trabalho são as irregularidades da pista, e as saídas, que são as vibrações sofridas na carroceria.

A razão das amplitudes das saídas pelas entradas constitui o ganho do sistema, também denominado transmissibilidade. Gillespie (1992a) define a transmissibilidade como a razão adimensional que define as amplitudes de resposta para uma certa excitação de entrada. No presente estudo, para o modelo de 1/4 de suspensão, será analisada a transmissibilidade da pista para a carroceria, considerando 3 níveis de pressão da mola pneumática.

Segundo Gillespie (1992a), o modelo de 1/4 de veículo é uma forma simplificada de representar o sistema de suspensão com suas propriedades, módulo de rigidez e coeficiente de amortecimento e obter as equações de movimento que descrevem as respostas do veículo para 2 graus de liberdade. Na Fig.8 (a), “M” corresponde à massa suspensa, que são a massa da carroceria do veículo e seus ocupantes; e “m” a massa não suspensa, referente à massa do pneu, eixos e demais elementos não suspensos pela suspensão. As características da mola e do amortecedor são representadas no modelo pela letra  $K_s$  (rigidez da mola),  $C_s$  (coeficiente de amortecimento) e  $K_t$  (referente à rigidez do pneu). Os deslocamentos da massa suspensa e não suspensa são apresentados pelas letras  $Z$  e  $Z_u$ .  $Z_r$  representa o *input* das irregularidades do pavimento.

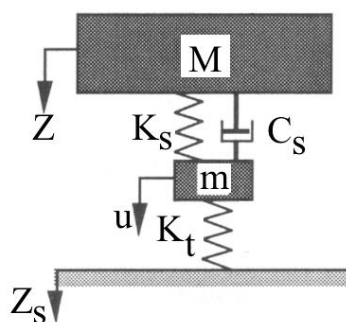


Figura 8. (a) Modelo de 1/4 de veículo. Fonte Adaptado de Gillespie (1992a).

Aplicando a segunda Lei de Newton neste sistema e resolvendo o diagrama de corpo livre para as massas suspensa e não suspensa, Freitas (2009) apresenta as Eq.(1) e Eq.(2) como as

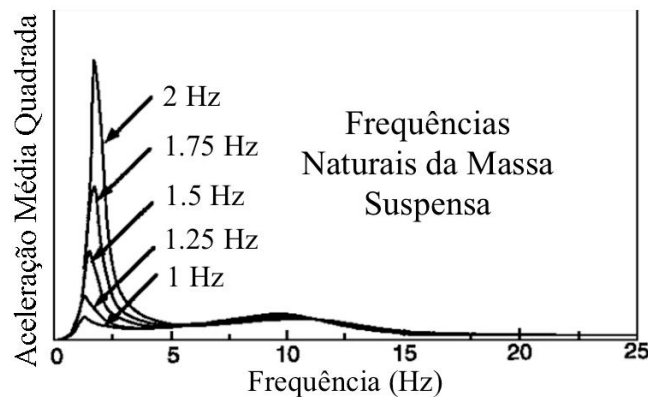
equações de movimento para tais massas, respectivamente; onde  $\ddot{Z}$  é a aceleração na massa suspensa e  $\dot{Z}$  é a velocidade da massa suspensa.

$$M\ddot{Z} = -K_s(Z-Z_u)-C_s(\dot{Z}-\dot{Z}_u) \quad (1)$$

e

$$m\ddot{Z}_u = -K_t(Z_u-Z_r)-C_s(\dot{Z}_u-\dot{Z}) \quad (2)$$

A razão entre a aceleração das massas suspensas pela aceleração promovida pelas irregularidades do pavimento tem como resultado a transmissibilidade entre a pista e a massa suspensa. Freitas (2009) utiliza a transformada de Laplace para obter a transmissibilidade, que é uma função de transferência, no domínio da frequência. Essa transformação permite analisar a influência da frequência natural da suspensão na transmissibilidade, conforme apresentado na Fig. 9.



**Figura 9. Transmissibilidade para diferentes frequências naturais de massa suspensa. Fonte: Freitas (2009).**

Segundo Rao (2009) a primeira frequência natural não amortecida ( $f_n$ ) para um sistema massa mola linear com dois graus de liberdade é dado pela Eq. (3).

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{RR}{M}} \quad (3)$$

onde:

$$RR = \frac{K_s K_t}{K_s + K_t} \quad (4)$$

Como observado acima, a frequência natural é função das rigidezes e da massa suspensa  $M$ . Considerando que a rigidez do pneu ( $K_t$ ) não pode ser alterada, a seleção da rigidez da mola é feita tendo em vista da obtenção de uma frequência natural não amortecida menor e consequentemente uma menor transmissibilidade. Essa observação justifica a flexibilidade da mola pneumática que pode ter seu coeficiente de rigidez alterado conforme a necessidade.

#### 4 MODELAGEM DO SISTEMA DE SUSPENSÃO EM AMBIENTE MULTICORPOS

Esta seção apresentará as etapas de modelagem dividida em 5 subseções: importação dos dados do CAD e construção das *parts* do modelo multicorpos, juntas, mola e modelagem do pneu e pista. Ao fim da apresentação das etapas de criação, o modelo será submetido a um teste onde será avaliado os deslocamentos da carroceria para 3 configurações da mola pneumática (2, 3 e 4 bar de pressão), quando submetido a dois tipos de terreno diferentes. A Fig. 10 a seguir apresenta o modelo pronto em ambiente multicorpos.

O elemento indicado pelo número (1) é o pneu, (2) é o braço de controle, (3) é a massa suspensa, (4) é o ponto de fixação do braço no chassi e (5) a mola. As seções seguintes tratarão dos procedimentos para o desenvolvimento das etapas deste modelo.

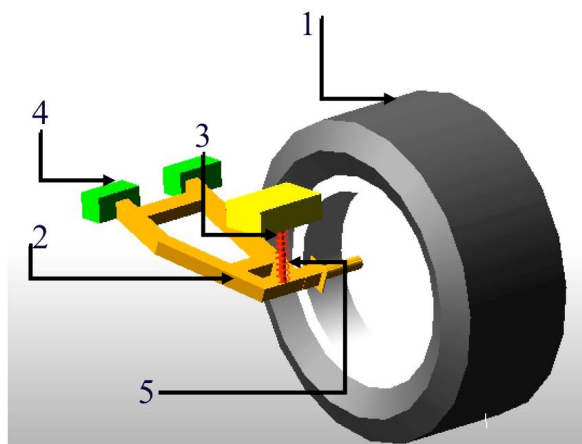


Figura 10. Elementos do modelo de 1/4 de veículo em ambiente multicorpos.

##### 4.1 Importação dos dados do CAD e construção das *parts* do modelo multicorpos

A primeira etapa do desenvolvimento da suspensão do perfilômetro foi o dimensionamento preliminar do braço de controle da suspensão em *software* CAD. Neste ambiente é possível detalhar a seção transversal da barra utilizada na construção do braço da suspensão, o material do perfil e a topologia da peça. A definição destas características foi tomada tendo em vista os modelos vistos no mercado, segundo apresentado na seção 3. Conforme exposto na seção 3, posteriormente o braço de controle será verificado em elementos finitos quanto aos esforços atuantes.

A Fig. 11 apresenta o braço de suspensão em ambiente CAD. Deste modelo foram retirados os dados da massa, momento de inércia e as coordenadas dos *keypoints*.

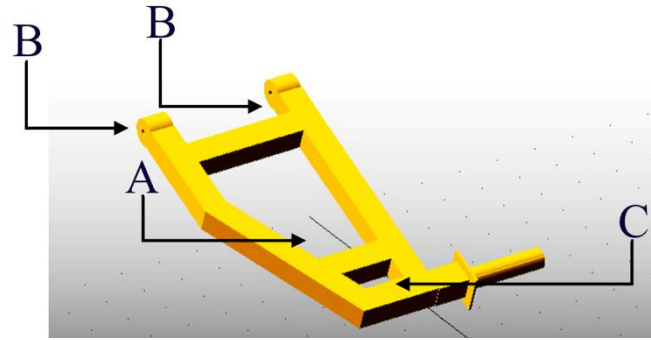


Figura 11. Vista isométrica braço em ambiente CAD.

Os *keypoints* são os pontos de interesse para modelagem do braço no sistema multicorpos, que são: o centro de massa, indicado pela letra (A), os pontos de fixação do braço no chassi, indicados pela letra (B), e o ponto onde a mola pneumática será instalada, indicado pela letra (C) na Fig.11.

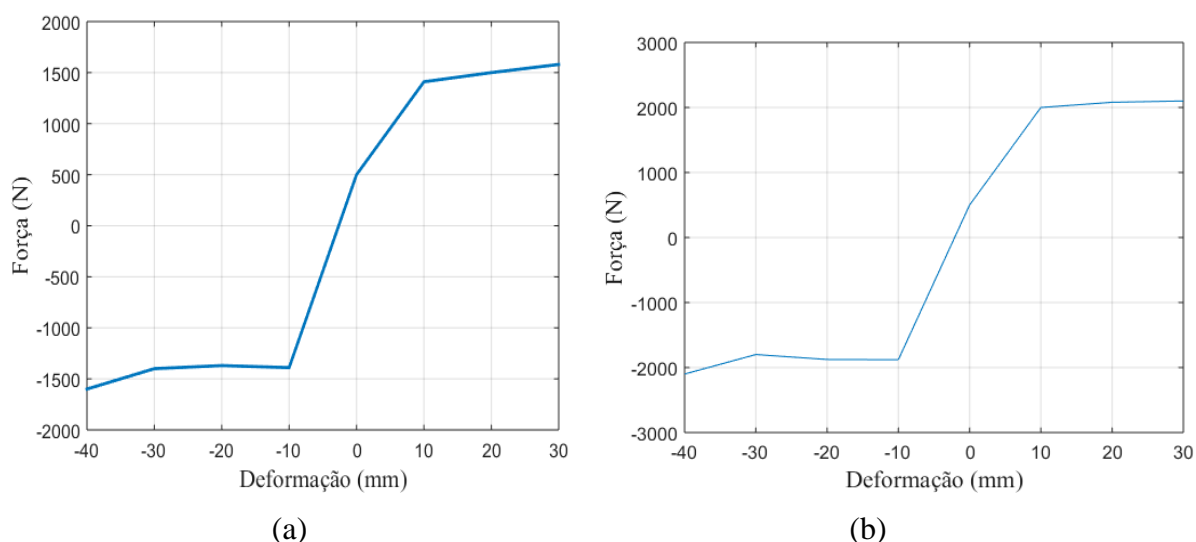
As coordenadas dos *Keypoints* foram inseridas no ADAMS/View® utilizando a ferramenta *points*. Com esta ferramenta é possível criar um ponto no espaço a partir de coordenadas fornecidas pelo usuário. Em seguida utiliza-se a ferramenta *polyline* para conectar os pontos que formam o contorno da peça. Essa função irá transformar os pontos, até então desconexos, em um *part* com a massa, momento de inércia e características do braço de controle. Os outros *parts* que compõem a suspensão são o ponto de fixação do braço no chassi e a massa suspensa. A ferramenta *box* foi utilizada para representar estes elementos. Para a massa da massa suspensa, foi utilizado 50kg, que corresponde à  $\frac{1}{4}$  da massa total do dispositivo, 200kg.

## 4.2 Mola pneumática

Como apresentado nas seções anteriores, a suspensão do perfilômetro utilizará apenas uma mola pneumática que permite uma flexibilidade na seleção da rigidez do conjunto e como visto na subseção 3.1, a variação da rigidez da mola influencia na transmissibilidade da pista para a massa suspensa.

Conforme citado por Shiotsuki (2009) ao contrário das molas helicoidais que tem um coeficiente de rigidez constante, as molas pneumáticas possuem um comportamento não-linear, o que requer um tratamento diferente na inserção dos dados no *software*.

Para modelar este elemento é necessário inserir a curva de força  $x$  deslocamento para cada bar de pressão segundo as informações fornecidas pelo fabricante no catálogo. O modelo Firestone Sleever 7012 pode ser inflado na faixa de 1 bar até 7 bar de pressão. Para este trabalho será analisado a influência da mola para quando esta for inflada a 2, 3 e 4 bar de pressão. A Fig.12 (a) e Fig.12 (b) apresentam as curvas coletadas para 3 bar e 4 bar de pressão na mola.



**Figura 12. Curva força  $\times$  deformação para (a) 3 bar de pressão (b) 4 bar de pressão.**

Estes pontos são inseridos no modelo através da ferramenta *Spring-Damper*. Como a rigidez da mola pneumática é variável, as curvas apresentadas na Fig. 12 acima precisam ser inseridas no *software* como uma *Spline*. Os pontos de fixação da mola são o *keypoints* do braço de controle extraído do modelo CAD e o centro de massa do bloco, que representa a massa suspensa.

### 4.3 Modelagem do pneu e pista

Em modelos de suspensão no ADAMS/View®, é comum simplificar o pneu como: um elemento de mola simples, Freitas (2009), como um elemento de força, Rezende (2006) ou como um corpo rígido, em Santos (2012)

No entanto, Stallman e Els (2014) apresentam que em análises sobre dinâmica vertical de um veículo e sobre a durabilidade de um veículo transitando em um terreno irregular, as forças verticais geradas pelo pneu se tornam relevantes para se obter uma melhor aproximação com a realidade. Já as aproximações de Freitas (2009), Rezende(2006) e Santos (2012) não descrevem estas forças.

Visto que as análises apontadas por Stallman e Els (2014) ressaltam a importância de se considerar o pneu e suas características, decidiu-se buscar um método que representasse com maior fidelidade o pneu e suas características.

Segundo a MSC ADAMS (2014), ADAMS/Tire® é um módulo que pode ser adicionado ao ambiente do ADAMS/View® que possibilita ao usuário adicionar pneu ao modelo mecânico, permitindo simulação mais fidedigna de manobras como rolagem livre, frenagem e aceleração; além de modelar as forças, torques atuantes e resultantes do pneu em um terreno irregular.

Este módulo oferece diversos modelos de pneus. Para a criação do modelo virtual de  $\frac{1}{4}$  de veículo foi selecionado o modelo PAC 2002. Este modelo foi desenvolvido de acordo com as definições de Pacejka (2002). Segundo MSC ADAMS (2014) este modelo de pneu descreve o comportamento de um pneu em pistas suaves com irregularidades, até 8 Hz de frequência.

Além da definição do tipo de pneu, o módulo ADAMS/Tire® permite a criação de uma pista para o modelo. Esta pista pode apresentar diversas configurações diferentes, podendo ser modelada como uma função específica, excitação aleatória ou um perfil de pista experimental. O tipo de pavimento utilizado para o modelo virtual será apresentado na seção 4.5

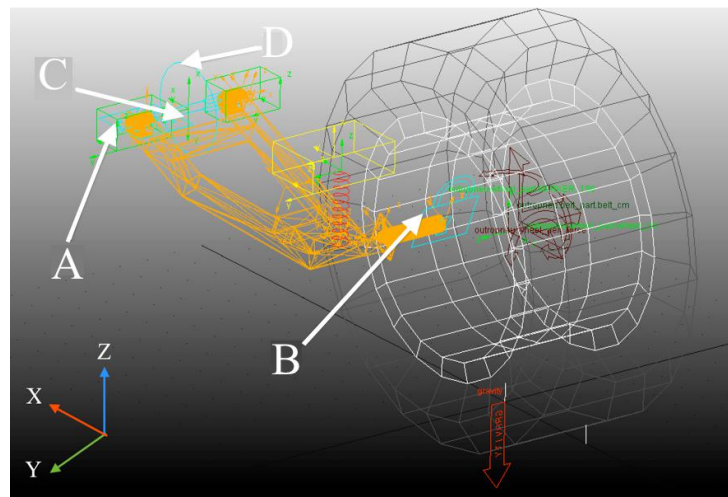
#### 4.4 Juntas

Rezende (2007) define as juntas como as ferramentas que determinam a conexão entre os corpos rígidos e o movimento relativo entre os corpos ao restringir graus de liberdade de cada corpo. As juntas disponibilizadas se dividem em primitivas e ideais.

Rezende (2007) apresenta que as juntas ideais são utilizadas para reproduzir o movimento de mecanismos ao restringir graus de liberdade e possibilitar o movimento relativo entre dois corpos rígidos. Essas juntas também permitem aplicação de movimentos como velocidade, deslocamento e aceleração.

Já as juntas primitivas têm como função primordial restringir graus de liberdade para restrições de natureza geométrica, não podendo ter movimentos aplicados a elas.

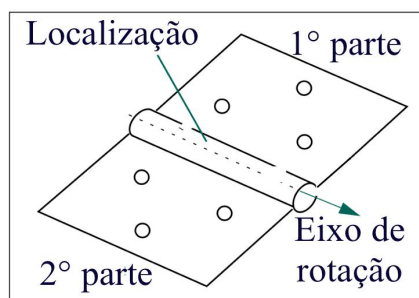
A Fig. 13 a seguir apresenta as juntas utilizadas no modelo.



**Figura 13. (a) Posição das juntas revoluta e primitivas. (b) Posição da junta fixa**

Para fazer a união entre o braço de suspensão, indicado pelo número (2) na Fig. 10, e o ponto de fixação do chassi, indicado pelo número (4) na Fig. 10, foi utilizada uma junta revoluta, indicada pela letra (A) na Fig. 13.

De acordo com MSC ADAMS (2014), essa junta, ilustrada na Fig. 14, permite que haja rotação de uma parte em relação à outra sobre um eixo de rotação comum aos dois elementos. Esta junta representará o movimento esperado do braço em relação ao ponto de fixação no chassi ao permitir que o braço gire em torno de um eixo. Conforme citado por Rezende (2006), esta junta limita 3 graus de liberdade para translação e 2 graus de liberdade para rotação.



**Figura 14. Configuração de montagem da junta revolvente. Fonte: Adaptado de MSC ADAMS (2014).**

A união entre o braço de suspensão (2) e a roda (1), Fig. 10, é feita através de uma junta fixa, indicada pela letra (B), na Fig. 13. Como o nome sugere, esta junta une dois corpos restringindo qualquer tipo de movimento de um em relação ao outro. A aplicação desta junta simula a rigidez entre o braço da suspensão e o cubo da roda. Ao todo, essa junta restringe todos os 6 graus de liberdade.

A última conexão do modelo é feita entre o ponto de fixação do chassi, indicado pelo número (4) na Fig. 10, e o *ground*. Para esta união foram utilizadas duas juntas primitivas: Em plano (*inplane*), indicado pela letra (C) na Fig.13, e Eixos paralelos (*parallel axis*), indicado pela letra (D) na Fig.13. De acordo com MSC ADAMS (2014) a junta *inplane* atua de modo que uma parte se mova apenas em um plano definido por uma segunda *part*. Essa junta restringe 1 grau de liberdade de translação e 2 graus de liberdade de rotação.

Já para a junta *Parallel Axis*, o usuário seleciona um eixo que compõe o primeiro *part* e outro eixo do segundo *part*. A junta atua ao estabelecer que o eixo do primeiro *part* deve permanecer paralelo ao eixo do segundo *part*. Essa junta restringe 2 graus de liberdade de rotação.

Ao aplicar a junta *inplane* foi estabelecido que o modelo se mantivesse no plano XZ, conforme o eixo do ADAMS/View® da Fig.13. Ao adicionar a junta *Parallel Axis*, esta restringe o grau de liberdade de rotação restante, mantendo assim o modelo com dois graus de liberdade de translação ao longo do eixo X e eixo Z. Ficando, portanto, igual ao número de graus de liberdade permitido no modelo de ¼ de veículo.

## 4.5 Resultados e análises preliminares

Esta subseção apresenta uma aplicação do modelo virtual, desenvolvido nas subseções anteriores, para a etapa de desenvolvimento da suspensão do perfilômetro inercial rebocável. Será verificado a influência da pressão da mola pneumática do deslocamento vertical da massa suspensa do modelo virtual

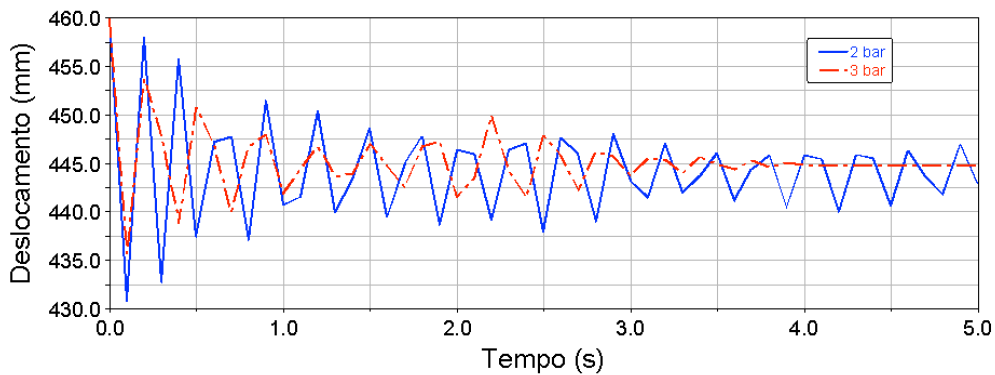
Para este trabalho serão utilizados dois perfis de pista. O primeiro tipo corresponde a um plano perfeito, o pavimento ideal, sem nenhum tipo de irregularidade denominado *flat*. No segundo pavimento, o modelo irá passar por um degrau (*step*) com 30mm de altura e 80 mm de comprimento, apresentada na Fig. 14. Como dito na subseção 4.2 o teste foi realizado para 3 níveis de pressão da mola: 2, 3 e 4 bar.



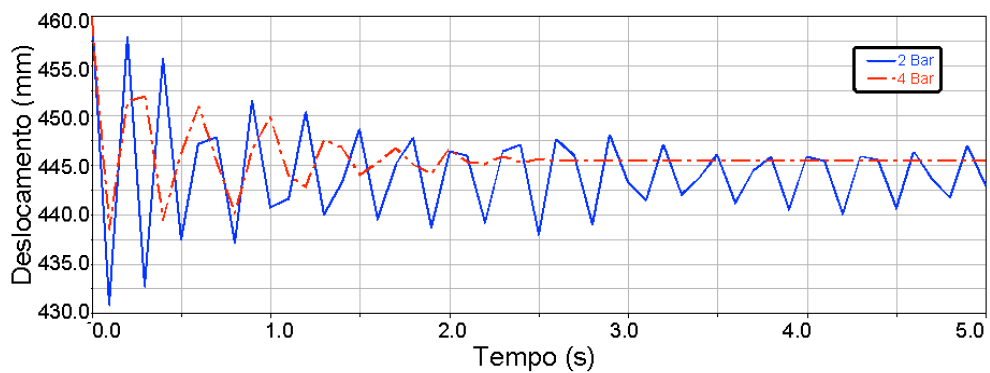
Figura 14. Representação da função que define o pavimento.

Embora a velocidade de testes do perfilômetro seja entre 60 e 80 km/h, segundo Hu (2006), o teste foi realizado a uma velocidade de 15 km/h. Selecionar essa velocidade com valor abaixo do recomendado, nessa fase do trabalho, facilita na análise visual do funcionamento do mecanismo.

No primeiro teste, verificou-se o deslocamento da massa suspensa para as três configurações de pressão (2, 3 e 4 bar) com o modelo trafegando na pista *flat*. A Fig 15 (a) apresenta os resultados para as pressões de 2 e 3 bar e a Fig.15 (b), para as pressões de 2 e 4 bar.



(a)



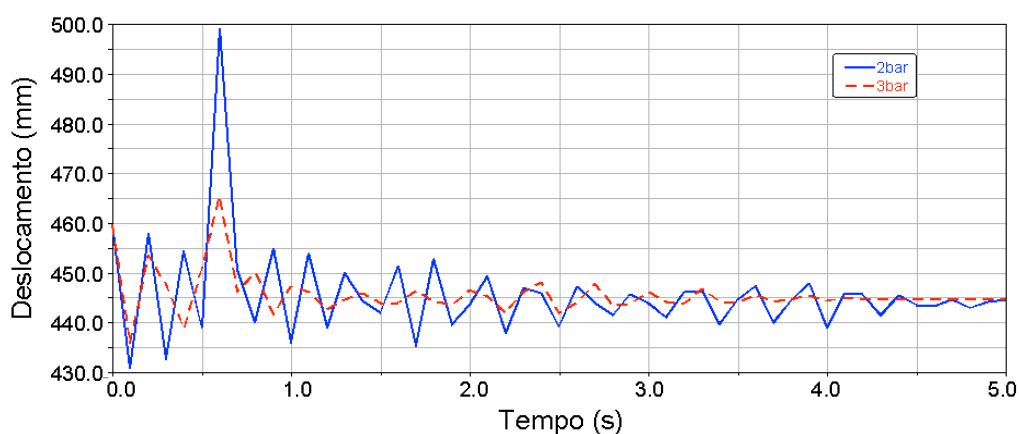
(b)



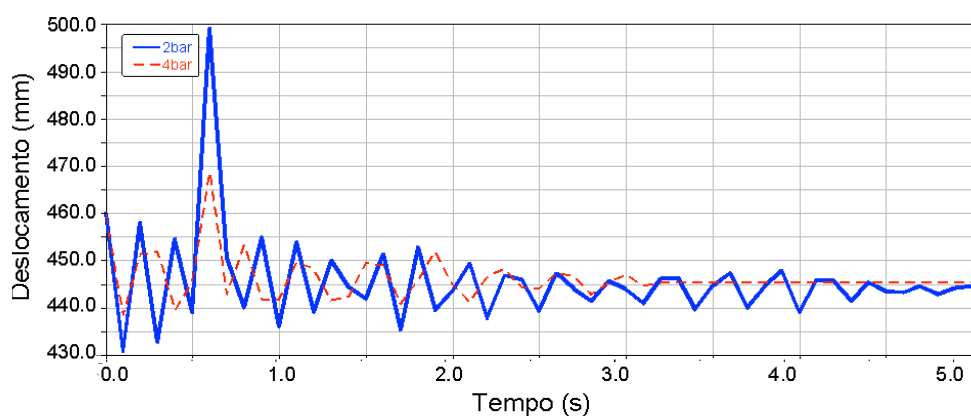
**Figura 15.(a) Deslocamentos verticais da carroceria para a mola com 2 e 3 bar de pressão trafegando na pista flat; 15.(b) Deslocamentos verticais da carroceria para a mola com 2 e 4 bar de pressão trafegando na pista flat.**

Ao iniciar a simulação, o sistema é liberado da posição de repouso e a mola é comprimida devido à força exercida pela massa suspensa, começando a oscilar. Para a pressão de 2 bar a massa suspensa continua oscilando sem amortecimento aparente. Já para as molas de 3 e 4 bar, que são mais rígidas, a oscilação foi se atenuando até o final do tempo de simulação. Como pode ser observado nas curvas da mola, apresentadas na subseção 4.2, quando se aumenta a pressão de um nível para outro, é necessário mais força para deformar a mola.

No segundo teste realizado, o pavimento foi modificado para um degrau (*step*). Ao contrário do pavimento anterior, este oferece um obstáculo para suspensão. Seguiu-se a mesma metodologia do teste anterior, avaliando os deslocamentos verticais da massa suspensa para 3 variações de pressão da mola pneumática. As Fig. 16 (a) e 16 (b) apresentam os deslocamentos da massa suspensa para 2, 3 e 4 bar de pressão.



(a)



(b)

**Figura 16. (a) Deslocamentos verticais da carroceria para a mola com 2 e 3 bar de pressão trafegando na pista com degrau (b) Deslocamentos verticais da carroceria para a mola com 2 e 4 bar de pressão trafegando na pista com degrau.**

Nas Fig. 16(a) e Fig. 16(b) é possível observar a diferença do comportamento da carroceria, para cada pressão de mola, quando o modelo virtual alcança o degrau de amplitude 30mm. A configuração de mola com 2 bar de pressão, inicia o teste com deslocamento máximo na faixa dos 460 mm.

Ao atingir o degrau, no instante 0,5 s, a massa suspensa apresenta um pico de deslocamento de aproximadamente 40 mm acima dos 460 mm observados no início. Já para as pressões de 3 e 4 bar, há uma absorção maior da mola, que pode ser verificada pela diferença entre os picos da mola com 2 bar para o pico das molas com 3 e 4 bar.

Ao atingir o degrau, no instante 0,5 s, a carroceria apresenta um pico de deslocamento de aproximadamente 40 mm acima dos 460 mm observados no início. Já para as pressões de 3 e 4 bar há uma absorção maior da mola; que pode ser verificada pela diferença entre os picos da mola com 2 bar, para o pico das molas com 3 e 4 bar.

Cabe ressaltar que para a mola com pressão de 2 bar verifica-se que pela rigidez insuficiente é de se esperar um comportamento mais instável no início e uma estabilização mais lenta do sinal. Outro fator a se considerar é o amortecimento, que nesse estudo preliminar não foi considerado, e pelos resultados infere-se a necessidade de sua inserção.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para trabalhos futuros, o modelo multicorpos apresentado no presente estudo irá explorar melhor a transmissibilidade da massa suspensa ao considerar um sinal de pista aleatório, apresentado por Rodrigues (2015).

No entanto, nos estudos iniciais para verificação da variação de amplitude sofrida pela massa suspensa, conforme se altera a pressão da mola pneumática (2, 3 ou 4 bar), há uma variação de transmissibilidade para os dois pavimentos utilizados: *flat* e *step*.

Sabendo que a pista utilizada neste primeiro teste foi perfeitamente plana, o pavimento não apresenta um perfil de acelerações decorrente das irregularidades do pavimento. Logo, a partir da teoria apresentada na seção 3.2, a carroceria não deveria apresentar nenhum tipo de deslocamento.

No entanto, chama-se a atenção à oscilação que a massa suspensa sofre, mais evidente e constante para a pressão de 2 bar, sendo que o comportamento oscilatório também foi observado no teste em pista com degrau; em especial, após a passagem pelo obstáculo. Este comportamento pode ser visualizado na etapa anterior à construção do perfilômetro graças ao modelo virtual.

Identificada esta situação, o projeto da suspensão deverá ser atualizado de modo a eliminar esse comportamento oscilatório e manter a carroceria estável.

Conforme apresentado na seção 1, o uso de ferramentas computacionais permite uma economia de recursos e tempo na fase de desenvolvimento de um produto. No caso deste trabalho, o produto em foco foi a suspensão do perfilômetro inercial rebocável, apresentado na seção 1.

O modelo virtual desenvolvido permitirá que uma gama de testes seja efetuada, a fim de auxiliar no projeto da suspensão, além da verificação acerca da mola pneumática como foi apresentado. O ambiente multicorpos do ADAMS/View® também permitirá obter a magnitude dos esforços atuantes no braço de suspensão, conforme apresentado na seção 2 e verificação dos esforços atuantes no ponto de fixação do braço no chassi. O ambiente também permite que vários sinais de pista sejam introduzidos na simulação, além dos dois já apresentados.

Outro ponto a ser aprimorado nos trabalhos seguintes, é o tipo de pavimento utilizado. Os pavimentos inseridos não apresentam grandes variações de amplitude, sendo uma simplificação para esta etapa inicial de modelagem. Para desenvolver um perfil de pista teórico será aplicada a metodologia apresentada por Rodrigues (2015).

Esta ferramenta computacional irá auxiliar no aprimoramento do projeto do perfilômetro inercial rebocável, proporcionando melhores resultados aos trabalhos resultantes da medição do perfilômetro.

## 6 PERMISSÃO

“O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(is) pelo conteúdo deste trabalho”.

## 7 REFERÊNCIAS

Barella. R.M., 2008 . Contribuição para avaliação da irregularidade longitudinal de pavimento com perfilômetros inerciais”. Tese de doutorado – Escola politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo.

DNER 164/1994, Calibração e controle de sistemas medidores de irregularidades de pavimento (Sistemas Integradores IPR-USP e Maysmeter). Norma Rodoviária. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.

Duarte, M.D.R., 2010 Simulação de ride primário e secundário através do uso de carregamento de pista. Dissertação de mestrado – Escola de engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Paulo.

Emmendorfer, G. 2008. Desenvolvimento e aplicação de um Sistema de medição inercial de trajetória de dutos. Dissertação de mestrado. Universidade tecnológica Federal do Paraná-Campus Curitiba.

Freitas Jr., L.M.P.2006, Estudo da dinâmica vertical de uma suspensão veicular do tipo Macpherson. Dissertação de mestrado – Escola de engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

Gillespie, T.D., 1992a. Fundamentals of vehicle dynamics. Society of Automotive Engineers, Inc.

Gillespie, T. D., 1992b. Everything You Always Wanted to Know about the IRI, but Were Afraid to Ask! In: Road Profiler User Group Meeting. Lincoln, 1992.

Hu, F., 2006. Development and evaluation of an inertial based pavement roughness measuring system. Graduate Thesis. University of South Florida

Kazemi M., Ghanbarzadeh, A., Shirazi, K., 2012. Optimization of semi-trailing arm

suspension for improving handling and stability for a passenger car. Proceedings of the institution of mechanical engineers part k journal of multi-body dynamics

Miliken, W. F., & Miliken, D.,1995. Race Car Vehicle Dynamics. SAE International.

MSC ADAMS 2014. *DOC 10023- Help Document for Adams/Tire*.

Pacejka, H. B., 2002. Tire and Vehicle Dynamics. Butterworth Heinemann.

Rao, S. S. 2009 , Vibrações Mecânicas, 4 ed, Pearson Education.

Reimpell, J. S.,2001. The Automotive Chassis: Engineering Principals, Society of Automotive Engineers.

Rezende, J.C.C.,2007. Projeto e implementação de um modelo de suspensão automotiva em bancada de laboratório. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia

Rodrigues, L. de P. 2015. Proposição de perfis de pista baseado no efeito de fadiga de suspensão. Projeto de graduação. Universidade de Brasília. Faculdade UnB Gama.

Santos, M. A. A.,2012. Simulação numérica dos efeitos de cargas dinâmicas na vida de fadiga de pavimentos. Tese de doutorado. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Sayers, M.W.; Karamihas, S.M.,1998 The little book of profiling: Basic information about measuring and interpreting road profiles. University of Michigan.

Shiotsuki, R. D. 2009 Análise do efeito da suspensão traseira de veículo rodoviário de carga no desempenho de pavimentos flexíveis . Dissertação de mestrado. São Bernardo do Campo.

SSI-Surface Systems and Instruments. Disponível em :<[www.smoothroad.com](http://www.smoothroad.com)>. Acessado em : 07/04/16.

Stallmann M. J., Els, P. S., 2014. Parameterization and modelling of large off-road tyres for ride analyses: Part 2 – Parameterization and validation of tyre models. Journal of Terramechanics. Volume 55, Pages 85–94.

Sugiura,H. Kojima Y.,Nishigaki H., Arima M. ,2000. Trailing Twist Axle Suspension Design Using ADAMS. FISITA World Automotive Congress. Seoul