

ADAPTAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO COMPUTACIONAL PARA A SIMULAÇÃO DA FRENAGEM DE UM VEÍCULO PESSOAL EQUIPADO COM CDC

André Lopes dos Santos

andre.lopes.dos.santos@gmail.com

Resumo. Este trabalho tem como objetivo a adaptação, desenvolvimento e validação de um modelo computacional em Matlab/Simulink de um automóvel em processo de frenagem, cuja suspensão é equipada com o sistema de amortecimento CDC (Continuous Damping Control). Este modelo deve ser apto a auxiliar o desenvolvimento de estratégias de controle da suspensão para fins de diminuição da distância de frenagem do veículo. O foco do processo de adaptação foi a melhora do comportamento longitudinal da simulação, através de mudanças no modelo de atrito dos pneus, nos efeitos de inclinação da pista e no detalhamento da dinâmica da suspensão. De acordo com os resultados do processo de validação, realizado com o auxílio de dados extraídos de ensaios com um veículo de testes real, o modelo desenvolvido representa com boa precisão a dinâmica vertical do veículo e consegue fornecer informações genéricas sobre sua dinâmica longitudinal. Por último, são apontadas algumas alternativas para o refinamento do modelo.

Palavras chave: Engenharia automobilística, Matlab, Simulink, Pneus, Frenagem (Simulação)

1. Introdução

A segurança é, desde os anos setenta, um dos principais focos nos grandes centros de desenvolvimento do setor automotivo mundial. As exigências dos legisladores e a preferência de consumidores por veículos mais seguros nos países de vanguarda criaram um esforço na Indústria Automotiva responsável pela grande quantidade de inovações técnicas para a proteção de passageiros e pedestres desde então.

Também o nascimento e desenvolvimento da Indústria Eletrônica nesse período e sua contribuição para indústria automotiva melhorou consideravelmente funções veiculares antes puramente mecânicas e estendeu as fronteiras da pesquisa no setor.

Recentemente, parcerias entre centros universitários de pesquisa e grandes indústrias de automóveis vêm sendo firmadas, visando a criação e desenvolvimento de novos sistemas de segurança para veículos em série. Em uma dessas parcerias, constituída pela Universidade Técnica de Darmstadt (Alemanha) e as firmas ZF-Sachs e Bosch, foi identificado um potencial de redução de distância de frenagem de um veículo automotor através do controle de sua suspensão, feita pelo sistema CDC (Continuous Damping Control). A partir daí foi idealizada e desenvolvida uma estratégia de controle desse sistema que possibilitou uma redução na distância de frenagem de, em média, 1,3% (Niemz, 2006).

A meta no momento é o avanço dessa estratégia para a integração desse sistema a outros sistemas de segurança ativa presentes no veículo, como ABS ou ESP, para que interferências destrutivas sejam evitadas e interferências construtivas sejam aproveitadas, tornando o trabalho conjunto entre eles o melhor e mais eficiente possível.

2. Objetivo

Inserido nesse contexto, o objetivo deste trabalho é a adaptação e validação de um modelo computacional em plataforma Matlab/Simulink para um Opel Astra em processo de frenagem em linha reta e equipado com sistemas embarcados de proteção ativa (ABS, ESP) e com o sistema de suspensão semi-ativa CDC, para que ele auxilie na concepção de estratégias de controle combinadas entre esses sistemas, reduzindo a necessidade de ensaios com protótipos reais e os custos e aumentando a velocidade de desenvolvimento e o rendimento do projeto.

3. Estudo preliminar

O modelo disponível conta com sete graus de liberdade em duas dimensões e simula em Matlab/Simulink a dinâmica vertical e longitudinal de meio-veículo em frenagem.

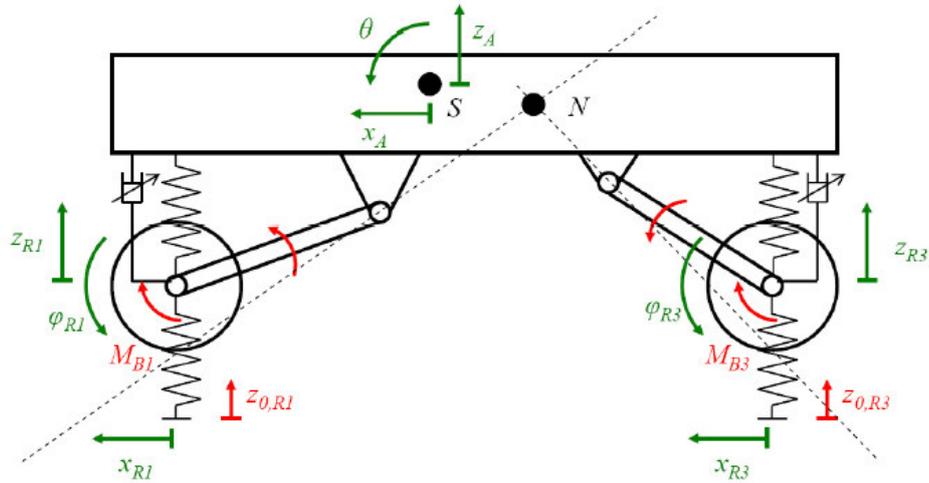


Figura 1: Desenho esquemático do modelo de meio-veículo (Breitenbücher, 2006)

A simplificação da simulação a duas dimensões e meio-carro apresenta-se, neste caso, como a mais vantajosa no sistema Matlab/Simulink. Como constatado por Breitenbücher (2006), um modelo mais simples, como o de um quarto de carro seria suficiente para uma boa descrição do comportamento vertical do veículo, mas deixaria muito a desejar na dinâmica longitudinal. Já um modelo tridimensional, mais completo, acarretaria uma complexidade de cálculos e parâmetros muito maior do que o ganho de precisão nos resultados. Vale ressaltar-se que grandezas x_{R1} e x_{R3} mostradas na figura (Figura 1) não são graus de liberdade neste modelo, pois estão fixas ao movimento longitudinal da carroceria.

3.1. Suspensão CDC

O controle do sistema CDC é inserido no modelo pelas forças de amortecimento dadas pelo diagrama da figura (2). No automóvel real, o sistema CDC é um amortecedor equipado com válvulas do tipo Bypass ativadas eletronicamente, que controlam o fluxo do líquido no em seu interior, regulando suas forças de resistência.

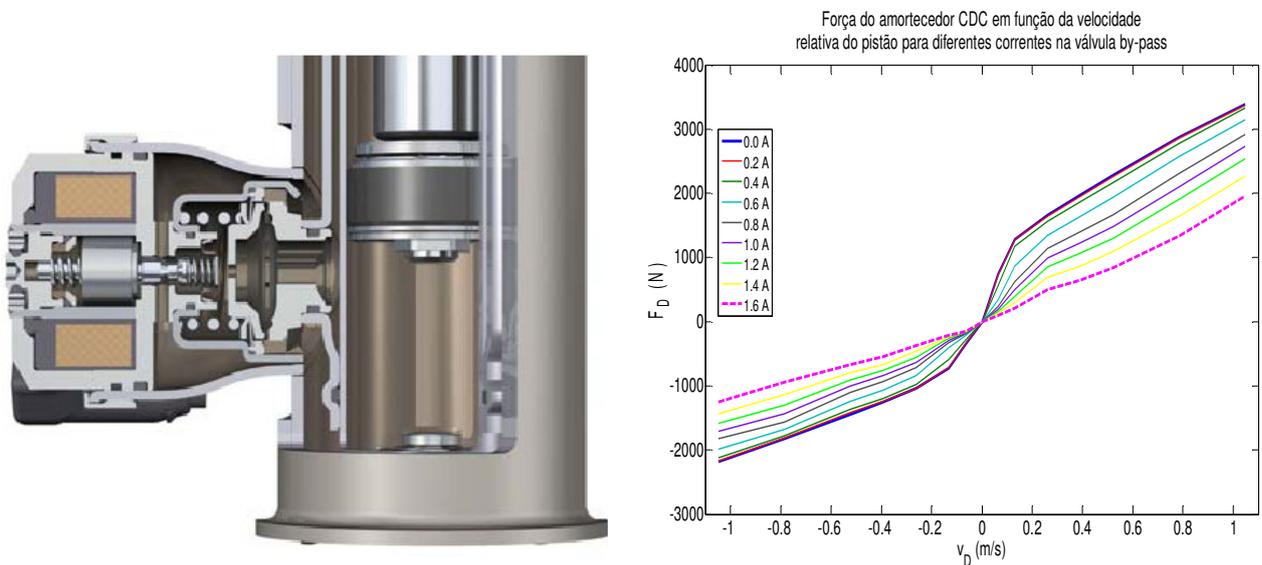


Figura 2: Esquema de construção (ZF Sachs, 2008) e diagrama de forças do amortecedor CDC em função da velocidade relativa e corrente na válvula Bypass

3.2. Atrito dos pneus

O coeficiente de atrito entre o pneu e a pista utilizado para o cálculo das forças de frenagem do veículo modelado é obtido de um único diagrama constante durante toda a simulação de coeficiente de atrito versus escorregamento (μXS), como visto na figura (3).

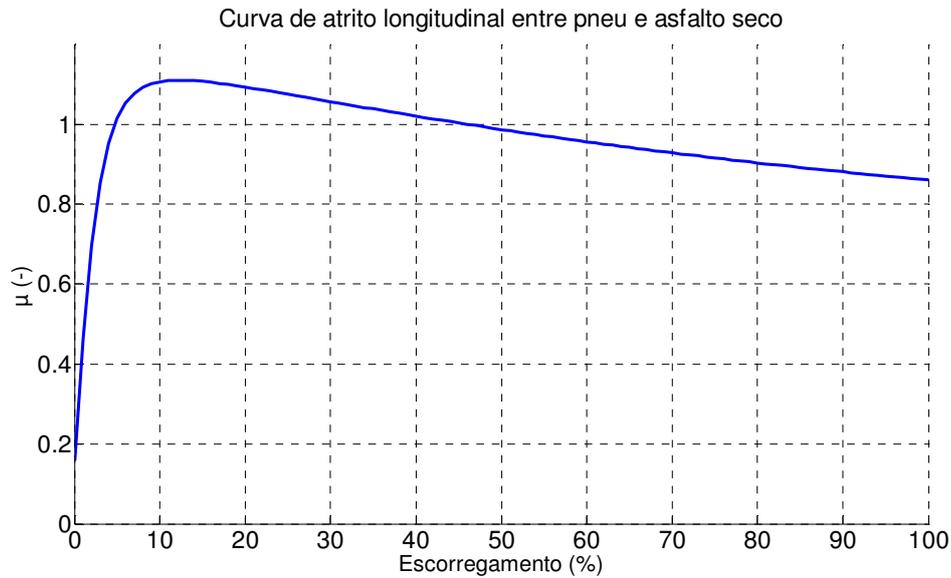


Figura 3: Curva única para o cálculo do atrito entre o pneu e a pista

O escorregamento é uma relação entre velocidade de rotação da roda φ_R e velocidade longitudinal do veículo v_F , definida pela Eq(1). A grandeza r_{dyn} é o raio efetivo da roda.

$$S = \frac{v_F - \varphi_R \cdot r_{dyn}}{v_F} \quad (1)$$

A força de frenagem é então calculada a partir do valor de μ encontrado no diagrama e da força normal F_Z em cada pneu pela Eq.(2).

$$F_x = F_Z \cdot \mu \quad (1)$$

3.3. Desempenho e limitações deste modelo

Em testes realizados em trabalhos anteriores (Breitenbücher, 2006), o modelo apresentou resultados bem próximos à realidade na dinâmica vertical, com valores de correlação da ordem de 0,9. Por outro lado, a dinâmica longitudinal do modelo não repetiu o bom desempenho. Apesar de comportamentos muitas vezes semelhantes, as correlações entre modelo e veículo para grandezas como força de frenagem ou escorregamento dos pneus não passam de 0,7. Deste modo, conclui-se que os esforços para a melhora e desenvolvimento deste modelo devem estar concentrados no aprimoramento de sua dinâmica longitudinal.

4. Desenvolvimento do modelo

Neste trabalho, o desenvolvimento do modelo foi dividido em três vertentes: inclusão dos efeitos de inclinação da pista na direção longitudinal do veículo, a simulação de coxins elásticos nos braços da suspensão e o refinamento do modelo de atrito nos pneus.

4.1 Efeitos de inclinação da pista

A simulação dos efeitos das irregularidades da pista sobre a dinâmica longitudinal das rodas foi implementada no modelo pelas forças $F_{x,v}$ e $F_{x,h}$ nos eixos dianteiro e traseiro, respectivamente, segundo as equações:

$$F_{x,v} = F_{BV} + F_{Z,v} \frac{dz_{0,R1}}{dx_{R1}} \quad (3)$$

$$F_{x,h} = F_{BH} + F_{Z,h} \frac{dz_{0,R3}}{dx_{R3}} \quad (4)$$

Sendo F_{BV} e F_{BH} as forças de atrito entre pneu e pista, $F_{Z,v}$ e $F_{Z,h}$ as forças normais nas rodas e $z_{0,R1}$ e $z_{0,R3}$ as alturas da pista nos pontos de contato desta com os pneus.

4.2. Dinâmica da suspensão

À procura de uma simulação mais realista da dinâmica da suspensão, foram implementados no modelo braços e coxins elásticos ligando as massas não suspensas do veículo à carroceria. Estes elementos permitem o movimento livre de rotação das rodas em torno dos pontos de fixação na carroceria enquanto restringem elasticamente o deslocamento translacional relativo desses elementos. Para implementação no modelo 2D foram feitas as seguintes simplificações.

- Cada eixo do modelo 2D de veículo em frenagem é fixado à carroceria por um único coxim deformável acoplado a um braço rígido e parametrizado de acordo com as medições feitas em Fujara (2004).
- O centro de arfagem do veículo permanece imóvel em relação à carroceria durante toda a simulação.
- Os coxins elásticos dos eixos são ligados à carroceria no centro de arfagem, o que significa que as forças por eles transmitidas são funções lineares da posição e velocidade relativas entre a carroceria e as massas não-suspensas.

4.3. Modelo de atrito entre pneus e pista

Para o aprimoramento da simulação do atrito entre os pneus e a pista foi realizado um processo de seleção, em que se escolheu, dentre as várias opções encontradas na literatura, o modelo matemático com melhor relação custo/desempenho. A figura (4) mostra a dispersão dos modelos possíveis em um diagrama custoXdesempenho. Neste diagrama, a melhor nota em todos os quesitos é 1 e a pior nota é 0, sendo o ponto (1,1) a solução ideal e o ponto (0,0) a pior solução possível.

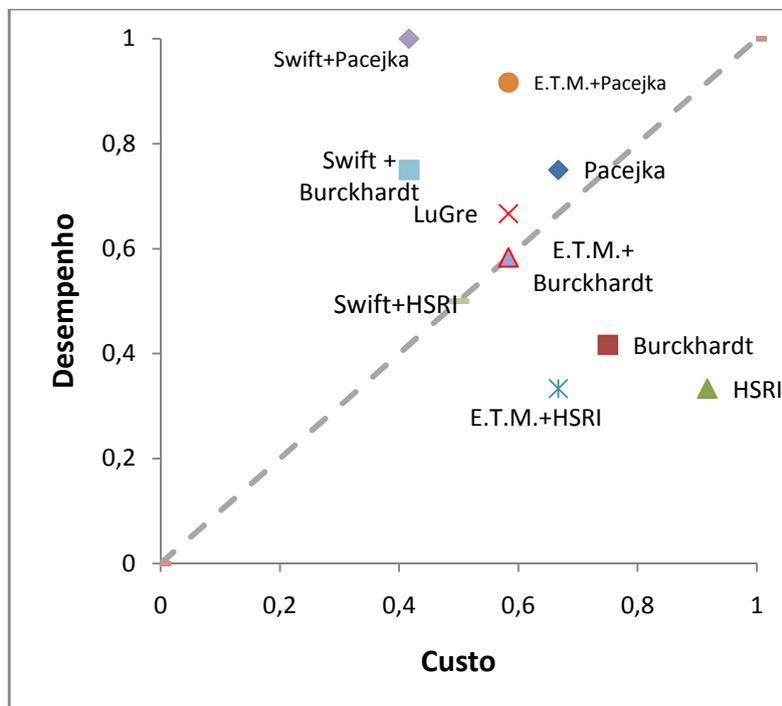


Figura 4: Posições dos diferentes modelos de pneu no diagrama de custo/desempenho

O modelo escolhido foi o “Pacejka Magic Formula” (Pacejka, 2002), por ter a menor distância à solução ideal no diagrama. Regido pela eq.(5), o modelo gera curvas diferentes dependentes da velocidade e força normal no ponto de contato, modificando os parâmetros B, C, D e E.

$$F_B = F_Z \cdot \mu = D \cdot \sin(C \cdot \operatorname{atan}(B \cdot s - E \cdot (B \cdot s - \operatorname{atan}(B \cdot s)))) \quad (5)$$

Para a parametrização deste modelo foram utilizados diagramas gerados pela máquina de medições PETRA da Universidade Técnica de Darmstadt durante o trabalho de Niemz(2006), complementados com informações do software de modelamento automotivo Adams/Car. A figura (5) exhibe as curvas geradas pelo modelo para diversos valores de força normal, comparadas com dados da literatura.

Forças de atrito em função do escorregamento e da força normal

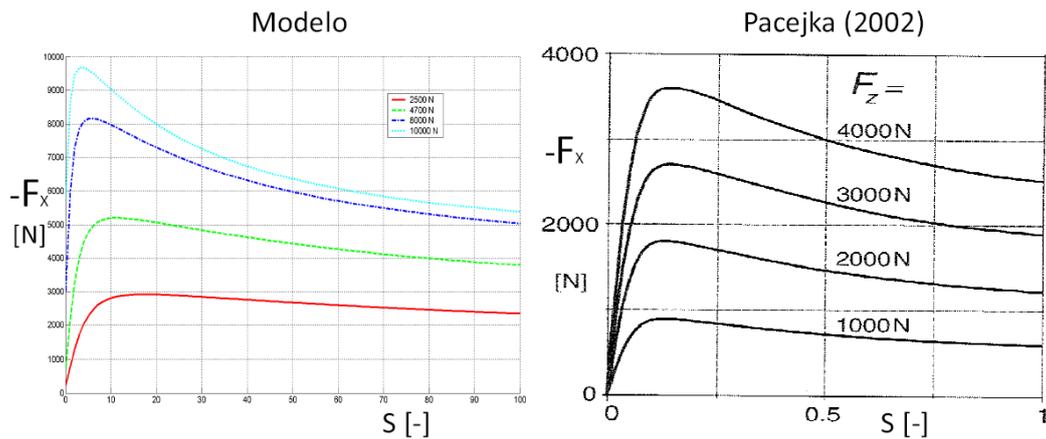


Figura 5: Curvas de atrito dos pneus para diversos valores de força normal

5. Verificação e validação

O objetivo da verificação, segundo a norma ISO/IEC 15504, que regulamenta o desenvolvimento de softwares, é “confirmar que cada produto de trabalho ou serviço resultado de um processo reflete corretamente às especificações de entrada do processo”. No âmbito deste trabalho, o termo verificação é interpretado como a confirmação de que todo módulo, sistema ou o modelo inteiro funciona de acordo com o planejado. Este processo foi realizado para cada novo elemento implantado no modelo e para todos os sistemas, em ordem de complexidade, afetados por ele. As figuras (6), (7) e (8) mostram etapas da verificação em diferentes níveis de complexidade.

Teste do modelo de atrito dos pneus a condições extremas de funcionamento

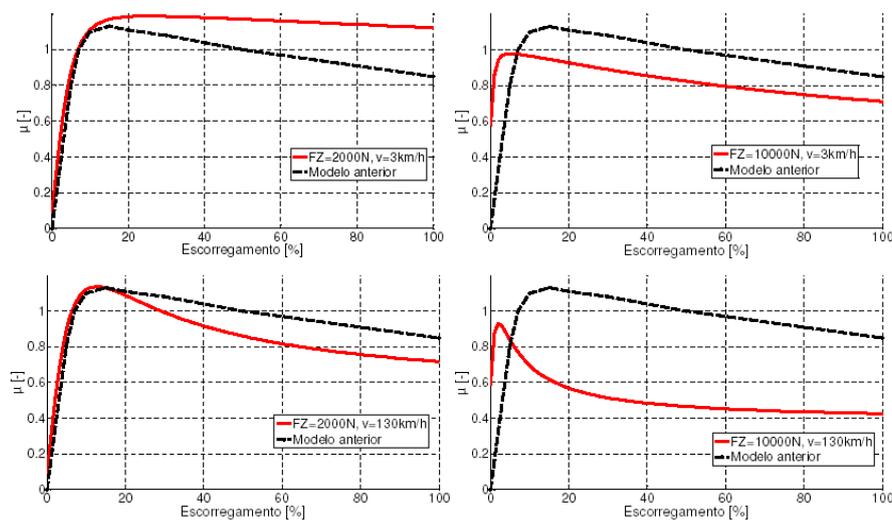


Figura 6: Verificação do modelo de atrito dos pneus

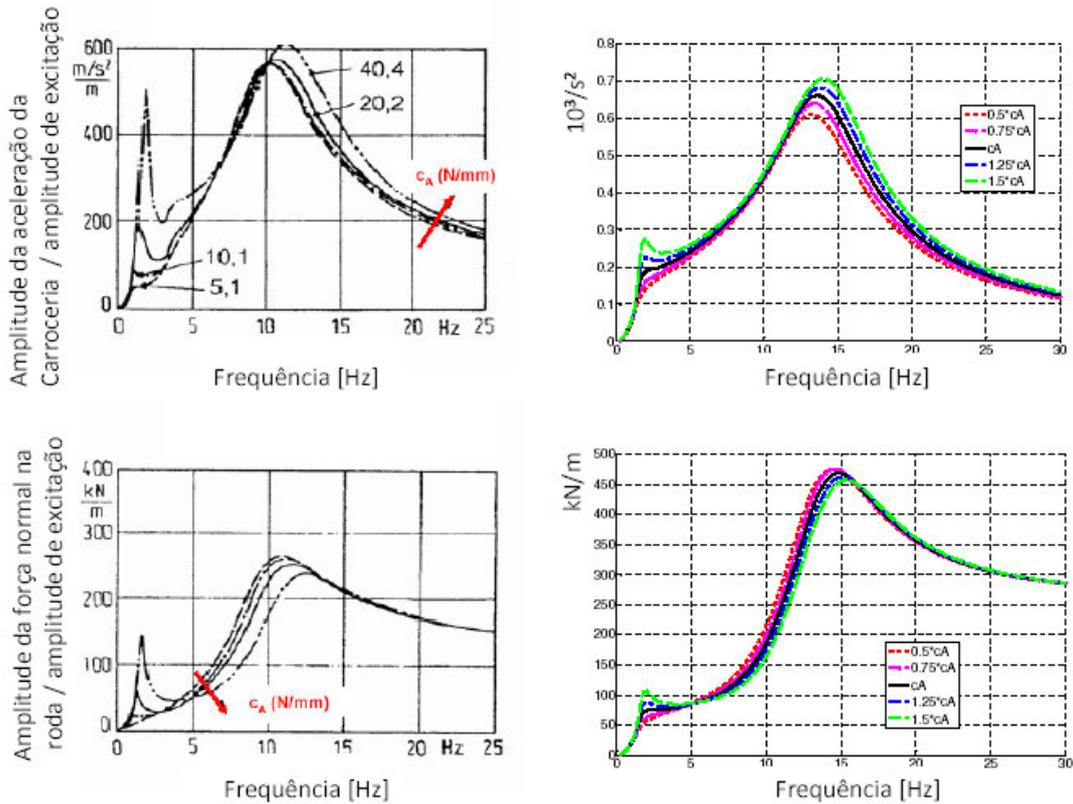


Figura 7: Respostas da carroceria do modelo a excitações na base da roda variando-se a rigidez da mola em comparação com dados da literatura (Winner et al., 2005)

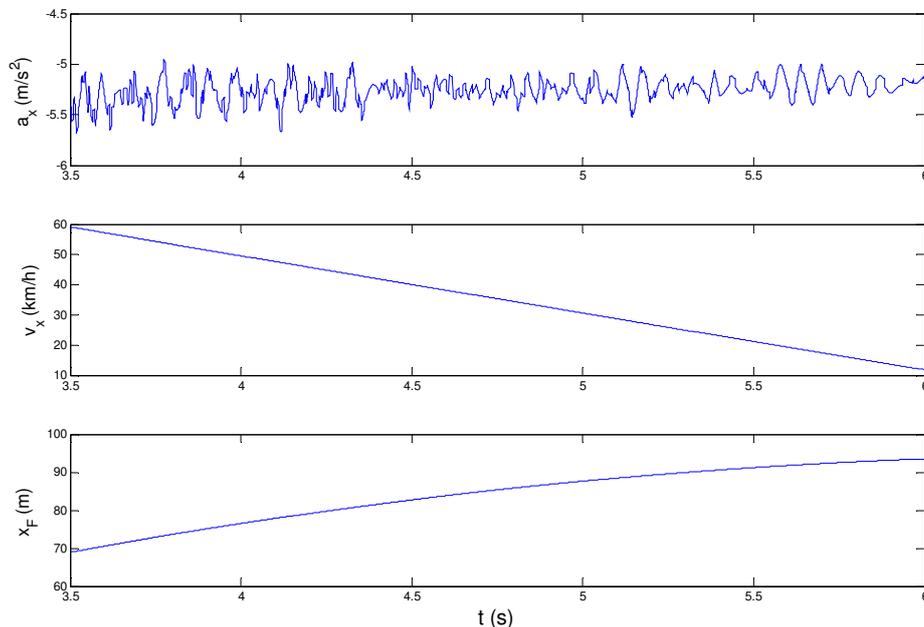


Figura 8: Comportamento cinemático da simulação do veículo em frenagem retilínea sobre pista plana

Passados todos os testes da verificação, concluiu-se que não há erros matemáticos, de lógica ou nas relações entre seus componentes que comprometessem seu funcionamento em todos os níveis de complexidade.

O último teste feito no modelo foi a validação, ou como descrito na norma ISO/IEC 15504, a confirmação de que “estão satisfeitos os requisitos para o uso pretendido de cada produto de trabalho ou serviço resultado de um processo”. Para esta etapa foram executados ensaios de frenagem (representados nas figuras 9 e 10) em um veículo real instrumentado e seus resultados comparados aos gerados pelo modelo computacional. Devido à restrição de tempo disponível para estes testes e, principalmente, pela época do ano e local em que eles foram realizados (inverno alemão), não foi possível uma coleta de dados suficiente para que se fizesse uma abordagem estatística e quantitativa à validação.

A alternativa encontrada foi uma comparação qualitativa entre comportamentos de alguns ensaios, considerados mais representativos, com os resultados da simulação.

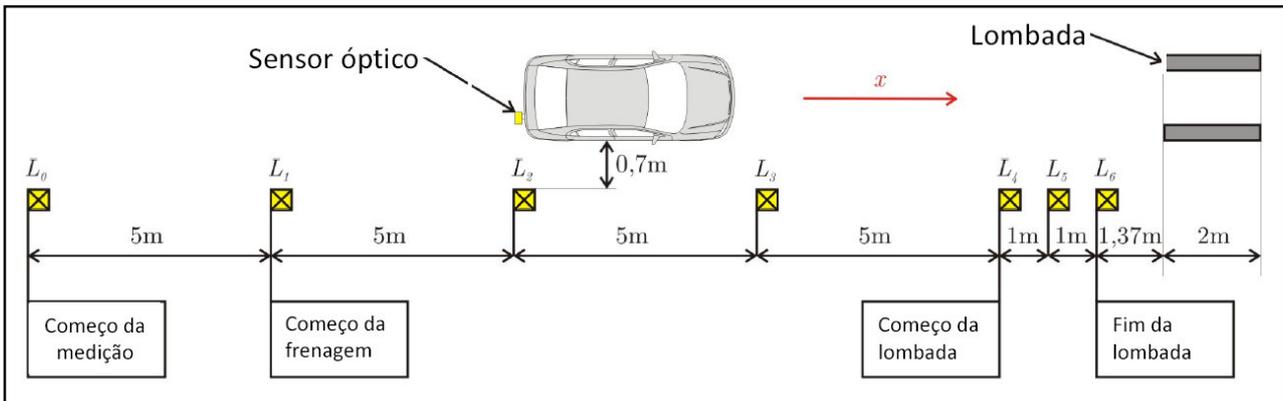


Figura 9: Desenho esquemático da montagem do experimento "Frenagem em pista asfaltada com obstáculo senoidal"

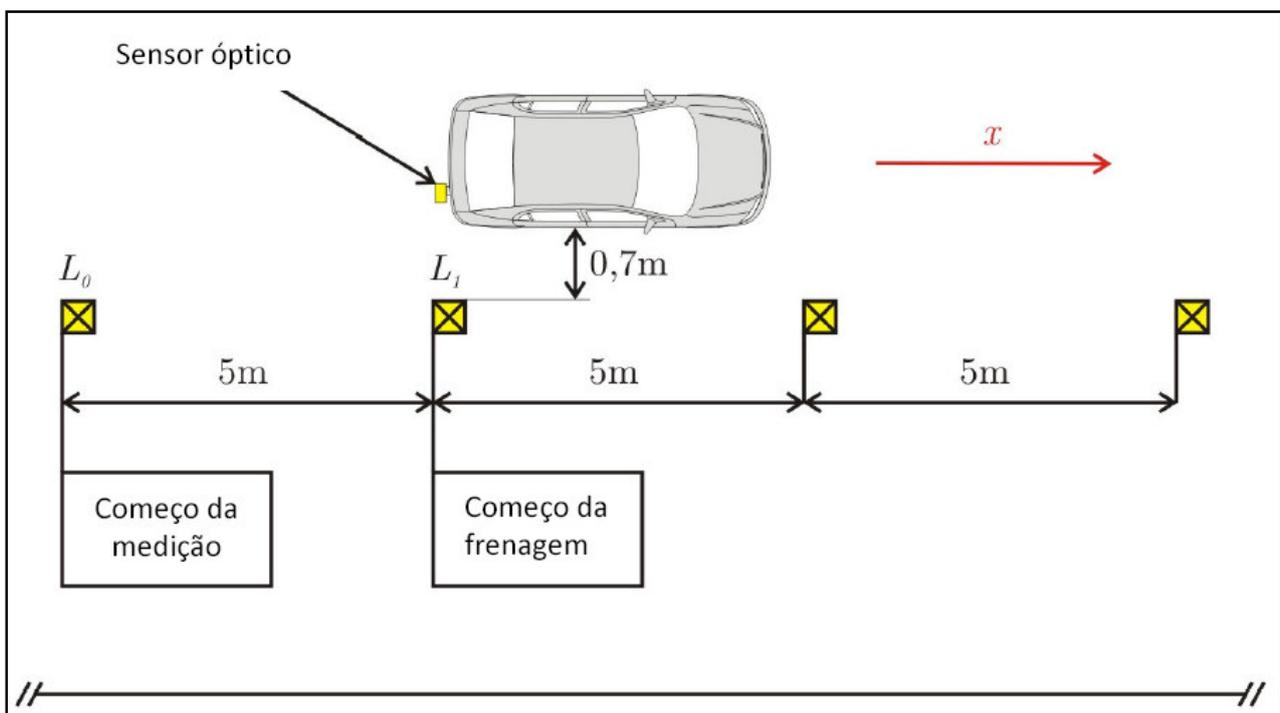


Figura 10: Desenho esquemático da montagem do experimento "Frenagem retilínea em pista plana asfaltada"

5. Resultados e conclusões

Na validação, dentro das limitações de tempo e equipamento disponíveis para ensaios com o veículo de testes, constatou-se um alto nível de detalhamento da simulação da dinâmica vertical do automóvel, principalmente no trânsito sobre obstáculos na pista. Grandezas como a velocidade relativa no amortecedor (figura 11), força normal e a integral no tempo de sua componente dinâmica podem servir como parâmetros e referência para a implementação e testes de estratégias de controle do sistema CDC, objetivo primário deste modelo. Para melhorar ainda mais o desempenho do modelo neste quesito, foi percebido que seria desejável uma revisão em sua dinâmica de arfagem.

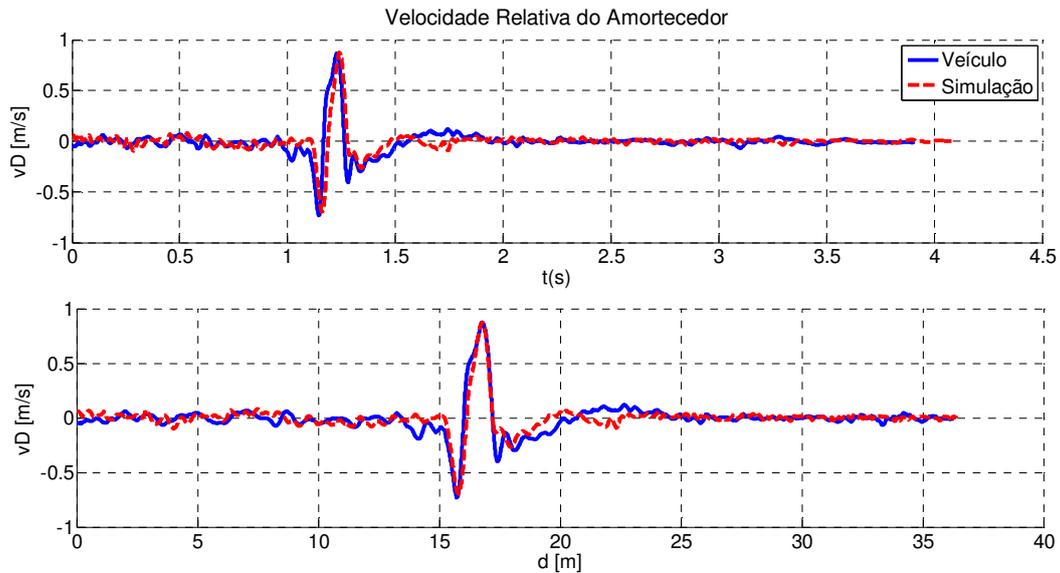


Figura 11: Velocidade relativa entre pistão e carcaça do amortecedor dianteiro esquerdo durante frenagem sobre obstáculo senoidal

Por outro lado, os resultados da dinâmica longitudinal do modelo durante a validação mostram algumas incorreções provenientes de parametrização deficitária ou incompatibilidade entre suposições feitas no desenvolvimento do modelo e a realidade. A falta do módulo de ABS na simulação e a impossibilidade de desligamento deste módulo no veículo real dificultou a análise do modelo de atrito implementado. Porém, na validação ficou visível que, apesar de sua flexibilidade e variedade de fenômenos representados, a simulação de atrito não correspondeu à realidade, devido a sua parametrização deficiente.

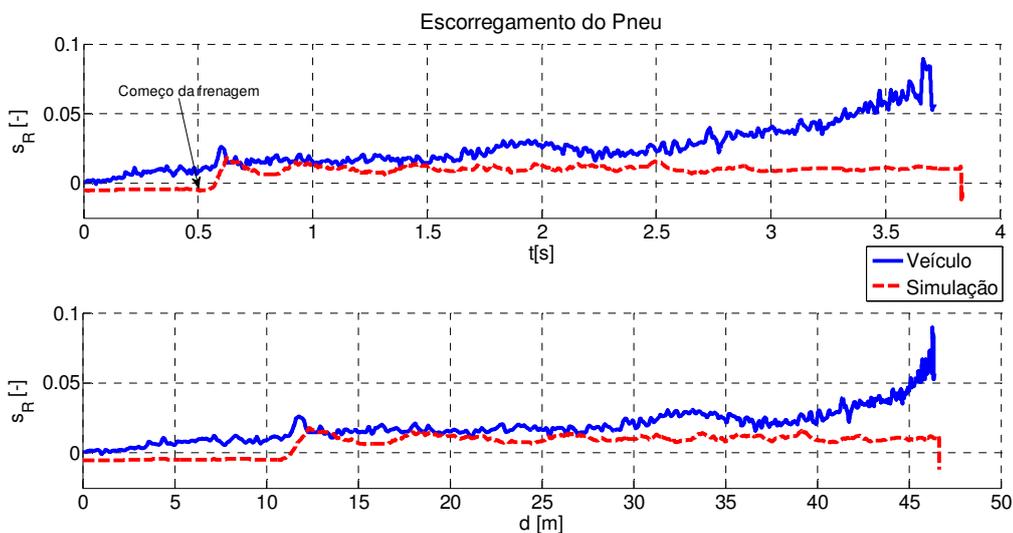


Figura 12: Escorregamento entre pneu dianteiro esquerdo e pista durante frenagem retilínea sobre pista plana asfaltada

As simplificações feitas na geometria da suspensão não se mostraram muito eficientes e a dinâmica das massas não-suspensas na direção longitudinal receberam o impacto deste problema. Por outro lado, o modelo de automóvel demonstrou pouca sensibilidade a este comportamento, o que garantiu que as imprecisões geradas nesta falha não comprometessem tanto seus resultados.

De modo geral, a simulação da dinâmica longitudinal do veículo é capaz de reproduzir qualitativamente as características globais do automóvel, porém carece de uma precisão mais detalhada necessária para a análise dos efeitos do controle semi-ativo da suspensão CDC.

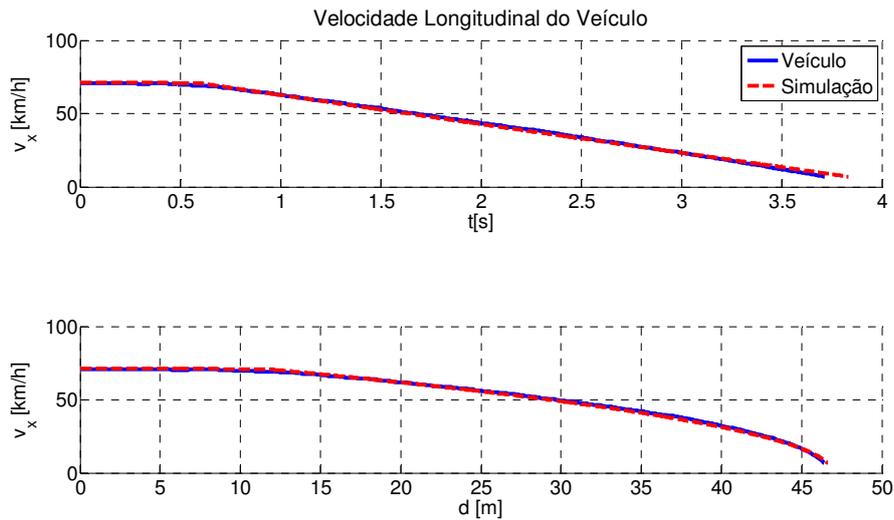


Figura 13: Velocidade longitudinal do veículo durante frenagem retilínea em pista plana

Visando o futuro desenvolvimento deste modelo, foram identificadas as principais melhorias necessárias para que a sua participação no projeto de redução da distância de frenagem em automóveis equipados com CDC seja mais positiva.

- **Aperfeiçoamento dos instrumentos de medição de atrito em pneus:**

O entendimento do comportamento dos pneus mostrou-se uma das mais tarefas mais difíceis na simulação de um veículo. Em um trabalho que depende tanto de suas forças de atrito, os instrumentos de medição deste comportamento, como o sistema PETRA, devem ser continuamente melhorados e desenvolvidos, para que as informações geradas por eles possibilitem uma modelagem cada vez mais precisa e abrangente.

- **Desenvolvimento de um modelo de atrito entre disco e pastilhas de freio:**

No processo de validação identificou-se uma limitação no sistema de frenagem do veículo que gerou discrepâncias em sua dinâmica longitudinal. Para corrigir essa imperfeição, um modelo mais complexo baseado em estudos de tribologia poderia ser útil.

- **Realização de mais ensaios com o veículo de testes:**

Com uma maior quantidade de dados gerados por testes, é possível fazer uma análise estatística da frenagem do automóvel, ao invés de se limitar a casos isolados. Uma grande quantidade de dados disponíveis também gera informação útil para a parametrização e refinamento do modelo computacional.

- **Modelagem tridimensional dos elementos de suspensão:**

A reconstrução da suspensão do veículo em um programa de modelamento tridimensional e de “Digital Mock-Up” poderia prover informações valiosas sobre seu comportamento durante a frenagem, possibilitando uma simulação muito mais precisa da mecânica da suspensão.

6. Referências Bibliográficas

- BREITENBÜCHER, J. “Optimierung eines 2D-Nickmodells zur Abbildung eines ABS-geregelten Bremsvorgangs bei gleichzeitigem Einsatz einer Verstelldämpferregelung”. 2006, 127 p., Trabalho de Curso (Graduação) – FZD, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2006
- FUJARA, M. “Aufbau und Parametrisierung eines Modells eines Mittelklasse-Pkw in veDYNA“. 2004. Trabalho de Curso (Graduação) - Fachhochschule Dortmund, Mühltal, 2004.
- NIEMZ, T. “Reducing Braking Distance by Control of Semi-Active Suspension”. 2006/2007. Tese (Doutorado) – FZD, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt 2006/ 2007.
- PACEJKA, H. B. “Tire and Vehicle Dynamics”. Warrendale: SAE International. 2002.
- WINNER, H. et al. “Kraftfahrzeuge I”. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik. Wintersemester 2005.
- ZF-SACHS web-site. <www.zf.com>. 2007, 2008.

6. Direitos autorais

O autor é o único responsável pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

ADAPTATION AND DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL MODEL TO SIMULATE THE BREAKING PROCESS OF A PERSONAL VEHICLE EQUIPED WITH CDC SUSPENSION

André Lopes dos Santos

andre.lopes.dos.santos@gmail.com

Abstract: This work is destined to adapt, develop and validate a computational model in Matlab/Simulink platform for a personal vehicle in breaking process equipped with a CDC suspension (Continuous Damping Control). This model must be suitable to help in the development of control strategies for the suspension, aiming the reduction of breaking distance. The adaptation process focuses on the improvement of the simulation's longitudinal dynamics through changes in tire's friction model, in the effects of a slope in car dynamics and in suspension's better detailing. According to validation results, performed with data from tests with a real instrumented car, the developed model represents with fair precision the phenomena in the vertical axis of the vehicle, while provides generic information about the longitudinal dynamics. Finally, some alternatives are pointed for a later circumstantial improvement of the model.

Keywords: *Automotive engineering, Matlab, Simulink, Tires, Breaking (Simulation)*