

Gerson Luiz Brand

INFLUÊNCIA DE CARREGAMENTOS
AERODINÂMICOS NA ESTABILIDADE
DIRECIONAL DE VEÍCULOS
RODOVIÁRIOS

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Álvaro Costa Neto

São Carlos
2010

“In my opinion, mastering freedom means mastering simplicity. Then, at most, a line, a colour, are enough to make the picture.”

Joan Miró

Agradecimentos

Aos professores Alvaro Costa Neto e Fernando Martini Catalano pela amizade, apoio e orientação na realização deste trabalho.

Aos funcionários da EESC-USP pelo fundamental apoio prestado. Agradecimento especial aos funcionários da Secretaria de Pós-Graduação, à Cristina, Gisele, José Cláudio e Osnan.

Aos meus pais, por todo apoio ao longo da minha vida e por terem me dado as oportunidades que me permitiram chegar até aqui.

À Thaís, pela compreensão, apoio e paciência ao longo destes anos.

Aos amigos André Bisordi, Fernando Gonzalez e Murilo Duarte pelo auxílio na obtenção de bibliografia. E ao amigo Murilo Junqueira pela estadia durante os ensaios experimentais.

À Rosie, pela companhia em diversas madrugadas frias de estudos em Londres.

Aos colegas e ex-colegas da Multicorpos Engenharia, CD-adapco e Lotus Racing pelo apoio e incentivo a este trabalho.

A todos aqueles não citados aqui que de uma maneira ou de outra tiveram uma participação ao longo desta jornada.

Resumo

BRAND, G. L., (2010). *Influência de Carregamentos Aerodinâmicos na Estabilidade Direcional de Veículos Rodoviários*. São Carlos, 2010. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A busca por formas mais eficientes quanto ao arrasto aerodinâmico de veículos rodoviários resultou recentemente em uma maior quantidade de pesquisas para compreensão do escoamento sobre o veículo quando este apresenta um ângulo de escorregamento aerodinâmico diferente de zero. O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia para análise linear de estabilidade do modelo dinâmico do veículo sob manobras de baixa severidade e considerando carregamentos aerodinâmicos. Um modelo dinâmico não-linear simplificado foi também desenvolvido utilizando dados de um veículo típico visando à comparação entre as metodologias. Ensaio experimentais em túnel de vento e simulações de fluidodinâmica computacional foram realizados utilizando-se uma geometria simplificada de um veículo visando à obtenção de valores dos carregamentos aerodinâmicos de força lateral e momento de guinada e à compreensão dos mecanismos de formação dos carregamentos aerodinâmicos. Os resultados obtidos mostram uma boa correlação entre os modelos linear e não-linear e relevante influência dos carregamentos aerodinâmicos de força lateral e momento de guinada na estabilidade estática do sistema.

Palavras Chave: aerodinâmica veicular, dinâmica veicular, estabilidade estática.

Abstract

BRAND, G. L., (2010). *Influence of Aerodynamic Loads on Road Vehicle Directional Stability*. São Carlos, 2010. Doctoral Thesis – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The research for more efficient shapes regarding road vehicles aerodynamic drag resulted recently in an improved number of researches aiming at the understanding of the flow field over the vehicle when it has an aerodynamic slip angle different of zero. This work presents the development of a methodology for linear stability analysis of a vehicle dynamic model under low severity maneuvers and considering aerodynamic loads. A non-linear dynamic model has also been developed with information from a typical vehicle for comparison between the methodologies. Wind tunnel testing and computational fluid dynamics simulation have been carried out with simplified vehicle geometry in order to measure the aerodynamic side force and yawing moment and provide information for the understanding of the mechanisms generating the aerodynamic loads. The results show a good correlation between the linear and non-linear models and a relevant influence of the aerodynamic side force and yawing moment on the static stability of the system.

Keywords: vehicle aerodynamics, vehicle dynamics, static stability.

Sumário

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------|
| Agradecimentos | i |
| Resumo | ii |
| Abstract | iii |
| Sumário | iv |
| Lista de Figuras | vii |
| Lista de Tabelas | xiii |
| Lista de Símbolos | xiv |
| Capítulo 1 Introdução | 1 |
| 1.1. Caracterização Histórica..... | 3 |
| 1.2. Objetivos..... | 13 |
| 1.3. Contribuições..... | 15 |
| 1.4. Divisão dos Capítulos | 15 |
| Capítulo 2 Revisão da Literatura | 17 |
| 2.1. Introdução..... | 17 |
| 2.2. Dinâmica Lateral..... | 17 |
| 2.3. Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD)..... | 20 |
| 2.4. Simulação de Sistemas Multicorpos (MBS)..... | 25 |
| 2.5. Estabilidade Direcional acoplada com Aerodinâmica Veicular | 28 |
| Capítulo 3 Desenvolvimento Teórico | 31 |
| 3.1. Introdução..... | 31 |
| 3.2. Aspectos Fundamentais de Dinâmica Veicular | 31 |
| 3.3. Aspectos Fundamentais de Aerodinâmica Veicular | 38 |
| 3.4. Medidas Aerodinâmicas em Túnel de Vento | 41 |
| 3.5. Estabilidade Estática | 46 |

| | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.6. | Forças e Momentos Atuantes no Veículo | 47 |
| 3.7. | Equações de Movimento | 60 |
| Capítulo 4 Modelo Multicorpos Não-Linear do Veículo | | 63 |
| 4.1. | Introdução..... | 63 |
| 4.2. | Representação Topológica..... | 63 |
| 4.3. | Representação das Forças de Suspensão e Pneus..... | 66 |
| 4.4. | Representação das Forças e Momentos Aerodinâmicos | 67 |
| 4.5. | Controle de Velocidade do Veículo | 68 |
| 4.6. | Correlação do Modelo Multicorpos | 69 |
| 4.6.1. | Análise Modal a 20m/s..... | 70 |
| 4.6.2. | Steering Input a 20m/s | 71 |
| 4.7. | Conclusões..... | 74 |
| Capítulo 5 Análise Aerodinâmica de um Veículo Simplificado..... | | 76 |
| 5.1. | Introdução..... | 76 |
| 5.2. | Parâmetros Geométricos do Veículo Analisado | 76 |
| 5.3. | Método Experimental para Medidas Aerodinâmicas | 78 |
| 5.4. | Método Computacional para Medidas Aerodinâmicas..... | 85 |
| 5.5. | Resultados..... | 89 |
| 5.6. | Mecanismos de Formação dos Carregamentos Aerodinâmicos | 92 |
| 5.7. | Conclusões..... | 94 |
| Capítulo 6 Análise Linear da Influência de Carregamentos Aerodinâmicos na Dinâmica Veicular | | 95 |
| 6.1. | Introdução..... | 95 |
| 6.2. | Transformação dos Carregamentos Aerodinâmicos Medidos para o Sistema de Coordenadas Aerodinâmico | 95 |
| 6.3. | Linearização dos Carregamentos Aerodinâmicos | 97 |
| 6.4. | Análise de Estabilidade Estática..... | 98 |
| 6.5. | Conclusões..... | 108 |
| Capítulo 7 Análise Não-Linear da Influência de Carregamentos Aerodinâmicos na Dinâmica Veicular | | 110 |
| 7.1. | Introdução..... | 110 |
| 7.2. | Método de Avaliação da Estabilidade Lateral do Veículo | 110 |
| 7.3. | Resultados..... | 114 |
| 7.4. | Conclusões..... | 119 |
| Capítulo 8 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros | | 121 |
| 8.1. | Sugestões para Trabalhos Futuros | 122 |
| Referências Bibliográficas | | 126 |
| APÊNDICE A PARÂMETROS DO SISTEMA DINÂMICO MODELADO | | 135 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| APÊNDICE B MODELO AERODINÂMICO EXPERIMENTAL..... | 140 |
| APÊNDICE C CALIBRAÇÃO DA BALANÇA AERODINÂMICA..... | 148 |
| APÊNDICE D MODELO AERODINÂMICO COMPUTACIONAL | 152 |
| APÊNDICE E RESULTADOS DAS MEDIDAS EXPERIMENTAIS E COMPUTACIONAIS DE AERODINÂMICA..... | 154 |
| APÊNDICE F MECANISMO DE GERAÇÃO DOS CARREGAMENTOS AERODINÂMICOS | 163 |

Lista de Figuras

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: (a) veículo projetado por Camille Jenatzy que atingiu 105.85km/h e quebrou o recorde de velocidade em 1899; (b) Alfa Romeo projetado por Count Ricotti em 1914. _____ | 4 |
| Figura 2: Veículo projetado por Edmund Rumpler em 1921 sendo avaliado no túnel de vento em escala real da Volkswagen em 1979 ($C_d=0.28$). _____ | 5 |
| Figura 3: BMW 328 vencedora da prova 24 horas de Le Mans de 1939, possui formas fortemente influenciadas por Jaray. _____ | 6 |
| Figura 4: (a) Volkswagen Fusca, veículo cujo projeto remete à década de 1930 e (b) o protótipo Kamm K3, de 1938, que estabeleceu o conceito utilizado até os dias de hoje. _____ | 6 |
| Figura 5: Auto Union de Bernd Rosemeyer momentos antes do seu acidente fatal quando tentava quebrar o recorde de velocidade em terra em 28 de janeiro de 1938. _____ | 7 |
| Figura 6: (a) Veículo Pontiac Type K wagon de 1978 e (b) Citroën CX 2000 de 1974 – diferenças no compromisso entre espaço interno e aerodinâmica dos projetos nos Estados Unidos e na Europa. _____ | 8 |
| Figura 7: Porsche 911 Turbo – linhas projetadas na década de 1950 e utilizadas até hoje. _____ | 9 |
| Figura 8: (a) Veículo Opel GT de 1969 ($C_d = 0.41$; $A = 1.51m^2$) e (b) VW-Scirocco de 1974 ($C_d = 0.41$; $A = 1.73m^2$). _____ | 10 |
| Figura 9: Otimização de forma de um modelo de pesquisa Volkswagen (retirado de HUCHO, 1998). _____ | 12 |
| Figura 10: (a) Ford Focus Hatch ($C_d = 0.32$) e (b) Toyota Camry ($C_d = 0.27$) – formas aerodinâmicas concebidas na década de 2000. _____ | 13 |
| Figura 11: Sistema de coordenadas do veículo definido pela SAE em “Vehicle Dynamic Terminology” (1976) (retirado de Milliken 1995). _____ | 33 |
| Figura 12: Representação do modelo Single Track em curva. _____ | 34 |
| Figura 13: Definição dos parâmetros fundamentais em um modelo de dois graus de liberdade (COSTA, 2002). _____ | 36 |
| Figura 14: Sistema de coordenadas aerodinâmico do veículo definido pela SAE em “Vehicle Aerodynamic Terminology” (1987). _____ | 39 |
| Figura 15: Medição de carregamentos aerodinâmicos atuantes em uma aeronave em túnel de vento utilizando suporte central. _____ | 42 |
| Figura 16: Esquema de medição de carregamentos em túnel de vento no plano longitudinal utilizando suporte central. _____ | 43 |
| Figura 17: Modelo Lotus Cosworth T127 no túnel de vento da Fondtech (2009). _____ | 44 |
| Figura 18: Veículo Ferrari 612 P4/5 no túnel de vento de escala real do Pininfarina Aerodynamic and Aeroacoustic Research Center. _____ | 45 |
| Figura 19: Esquema de medição de carregamentos em túnel de vento no plano longitudinal utilizando balanças individuais nas rodas. _____ | 45 |
| Figura 20: Trajetórias de um veículo neutro (NS), sub-esterçante (US) e sobre-esterçante (OS), respectivamente, após um distúrbio em seu ângulo de escorregamento (retirado de Milliken, 1995). _____ | 47 |
| Figura 21: Descrição dos vetores velocidade e ângulo de escorregamento do eixo dianteiro do veículo no plano x-y. _____ | 49 |
| Figura 22: Descrição dos vetores velocidade e ângulo de escorregamento do eixo traseiro do veículo no plano x-y. _____ | 49 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 23: Orientação dos vetores velocidade e dos carregamentos aerodinâmicos atuando no plano x-y. _____ | 53 |
| Figura 24: Erro relativo da velocidade aerodinâmica equivalente V_{Aeq} linear em relação à não-linear em função do ângulo de incidência ψ para diferentes velocidades de vento incidente e ângulo de escorregamento do veículo $\beta = 5^\circ$. _____ | 57 |
| Figura 25: Erro relativo do ângulo de escorregamento aerodinâmico equivalente β_{Aeq} linear em relação ao não-linear em função do ângulo de incidência ψ para diferentes velocidades de vento incidente e ângulo de escorregamento do veículo $\beta = 5^\circ$. _____ | 57 |
| Figura 26: Layout do modelo multicorpos do veículo (COSTA, 1992). _____ | 64 |
| Figura 27: Modelo construído no ambiente multicorpos. _____ | 66 |
| Figura 28: Velocidade longitudinal da massa suspensa do veículo durante o processo de aceleração visando à obtenção de uma condição de equilíbrio a 20m/s para linearização e análise modal. _____ | 70 |
| Figura 29: Ângulo das rodas dianteiras do modelo durante steering input a partir do início da manobra. _____ | 73 |
| Figura 30: Comparação do yaw rate ao longo da manobra com os valores obtidos por COSTA (1992). _____ | 73 |
| Figura 31: Comparação da velocidade lateral ao longo da manobra com os valores obtidos por COSTA (1992). _____ | 74 |
| Figura 32: Comparação do ângulo de rolagem ao longo da manobra com os valores obtidos por COSTA (1992). _____ | 74 |
| Figura 33: Valores de coeficiente de arrasto obtidos por AHMED et al. (1984) em seu modelo simplificado como função do ângulo de inclinação de traseira Alpha. _____ | 82 |
| Figura 34: Esquema de AHMED et al. (1984) do sistema de vórtices na esteira do modelo simplificado. _____ | 83 |
| Figura 35: Plano longitudinal do domínio do modelo em CFD com diferenciação das duas regiões nas cores azul e cinza. _____ | 86 |
| Figura 36: Valores de y^+ na parede do modelo obtidos na configuração Alpha 30° Gama 00° . _____ | 88 |
| Figura 37: Valores do coeficiente aerodinâmico de força lateral medidos em CFD como função do ângulo de escorregamento lateral Beta e escritos de acordo com o sistema de coordenadas aerodinâmico. _____ | 96 |
| Figura 38: Valores do coeficiente aerodinâmico de momento de guinada medidos em CFD como função do ângulo de escorregamento lateral Beta e escritos de acordo com o sistema de coordenadas aerodinâmico. _____ | 97 |
| Figura 39: Comparação dos autovalores da matriz A para diferentes configurações de traseira no ponto de operação $V_\infty^* = 0 / \psi = 0^\circ$. _____ | 100 |
| Figura 40: Freqüência natural obtida a partir do lugar das raízes da matriz A para diferentes configurações de traseira no ponto de operação $V_\infty^* = 0 / \psi = 0^\circ$. _____ | 100 |
| Figura 41: Fator de amortecimento obtido a partir do lugar das raízes da matriz A para diferentes configurações de traseira no ponto de operação $V_\infty^* = 0 / \psi = 0^\circ$. _____ | 101 |
| Figura 42: Comparação do parâmetro N_β / I_z do veículo em função da velocidade longitudinal para diferentes configurações de traseira no ponto de operação $V_\infty^* = 0 / \psi = 0^\circ$. _____ | 101 |
| Figura 43: Comparação dos autovalores da matriz A para diferentes configurações de traseira no ponto de operação $V_\infty^* = 0.3 / \psi = 0^\circ$. _____ | 102 |
| Figura 44: Freqüência natural obtida a partir do lugar das raízes da matriz A para diferentes configurações de traseira no ponto de operação $V_\infty^* = 0.3 / \psi = 0^\circ$. _____ | 102 |

Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

