Campus de São Carlos

ANÁLISE DE VEÍCULOS RODOVIÁRIOS
ARTICULADOS PESADOS NA FREAGEM
ATRAVÉS DA TÉCNICA DOS MAPAS DE
DESEMPENHO

DIRCEU LAVOSIER GRACI FERNANDES

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Cànale

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP
EXEMPLAR REVISADO
Data de entrada no Serviço: 27/09/00
Ass.: AB

**ANÁLISE DE VEÍCULOS RODOVIÁRIOS
ARTICULADOS PESADOS NA FREAGEM ATRAVÉS
DA TÉCNICA DOS MAPAS DE DESEMPENHO**

Dirceu Lavoisier Graci Fernandes

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. Antônio Carlos Canale

DEDALUS - Acervo - EESC

31100016772

São Carlos

2000

Class.	EESC-EESC
Cutt.	2088
Tomo	T0202/00

NT: 1121379

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

F363a Fernandes, Dirceu Lavoisier Graci
Análise de veículos rodoviários articulados pesados
na freagem através da técnica dos mapas de desempenho/
Dirceu Lavoisier Graci Fernandes. -- São Carlos, 2000.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 2000.

Área: Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Canale.

1. Desempenho. 2. Freio. 3. Segurança veicular.
4. Veículo articulado pesado. Título.

À minha esposa Valnice,
pelo amor e compreensão.

À minha filha Thaís,
pela ternura e inspiração.

À meus pais, Dirceu e Carmen Célia,
pela solidariedade e apoio.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Antônio Carlos Canale, pela amizade, pela excelente orientação e colaboração neste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa - CNPq, pela bolsa de estudo concedida.

Ao amigo Prof. Dr. Hélio Aparecido Navarro, pela colaboração neste trabalho.

Aos colegas e professores do Laboratório de Aeronaves, pelo incentivo.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos, pela contribuição na realização deste trabalho.

À Camilo A. Adas, Fernando C. Dusi, Oswaldir Torres, Edimilson da Silva Costa, Francisco Magrini Filho, Fernando A. P. Andrade, Marcelo Mugnaini, Anderson Luiz da Silva, Júlio D. R. Beluzo e demais colegas da Mercedes-Benz do Brasil, pela amizade e colaboração neste trabalho.

À Mercedes-Benz do Brasil, pelo auxílio na aquisição dos dados experimentais, pelo incentivo à pesquisa e pela oportunidade de realizar este trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	iv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	vi
RESUMO.....	xi
<i>ABSTRACT</i>	xii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 Introdução.....	9
2.2 Aspectos humanos, ambientais e legais	11
2.2.1 Aspectos humanos	11
2.2.2 Aspectos ambientais	24
2.2.3 Aspectos legais.....	25
2.3 Aspectos veiculares e operacionais	38
3 SISTEMA COMPUTACIONAL	86
4 METODOLOGIA.....	96
4.1 Principais hipóteses adotadas no modelo matemático desenvolvido	96
4.2 Definição do veículo e das configurações veiculares de estudo.....	101
4.3 Instrumentos de medição utilizados	109
4.4 Definição dos testes de campo de freagem a serem realizados	110
5 RESULTADOS	113
5.1 Resultados teóricos e experimentais	113

5.2 Verificação dos requisitos de compatibilidade da ECE-R13	145
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS	149
7 CONCLUSÕES	152
8 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	157
ANEXO A - Equações	159
ANEXO B - Diagrama de corpo livre do veículo-trator-semi-reboque	162
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	163
<hr/>	
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	188
APÊNDICE 1 - Figuras da obtenção do CG das configurações veiculares de estudo	195
APÊNDICE 2 - Figuras dos instrumentos de medição e dos testes de campo	200
GLOSSÁRIO	213

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 - Diagrama de blocos do sistema computacional	87
FIGURA 02 - Diagrama das possibilidades de estudo do veículo-trator sem o SR.....	91
FIGURA 03 - Diagrama das possibilidades de estudo do veículo-trator com SR	92
FIGURA 04 - Distribuição das cargas nas configurações veiculares 1, 2 e 3.	104
FIGURA 05 - Mapa de desempenho com a distância de freagem, [m].	115
FIGURA 06 - Mapa de desempenho com a eficiência da freagem, [%].	116
FIGURA 07 - Mapa de desempenho com a desaceleração máxima, [m/s ²].	117
FIGURA 08 - Mapa de desempenho com a desaceleração média, [m/s ²].	117
FIGURA 09 - Mapa de desempenho com a pressão nos freios, [bar].	120
FIGURA 10 - Mapa de desempenho com os eixos com travamento na freagem.....	120
FIGURA 11 - Mapa de desempenho com o CG longitudinal do SR, [mm].	123
FIGURA 12 - Mapa de desempenho com o CG vertical do SR, [mm].	123
FIGURA 13 - Mapa de desempenho com as forças de freagem no ED do VT, [N].	125
FIGURA 14 - Mapa de desempenho com as forças de freagem no ED do VT, [%].	126
FIGURA 15 - Mapa de desempenho com as forças de freagem no ET do VT, [N].	126
FIGURA 16 - Mapa de desempenho com as forças de freagem no ET do VT, [%].	127
FIGURA 17 - Mapa de desempenho com as forças de freagem nos eixos do SR, [N].	127
FIGURA 18 - Mapa de desempenho com as forças de freagem nos eixos do SR, [%]	128
FIGURA 19 - Mapa de desempenho com as forças normais no ED do VT, [N].	129
FIGURA 20 - Mapa de desempenho com as forças normais no ED do VT, [%].	129
FIGURA 21 - Mapa de desempenho com as forças normais no ET do VT, [N].	131
FIGURA 22 - Mapa de desempenho com as forças normais no ET do VT, [%].	131
FIGURA 23 - Mapa de desempenho com as forças normais nos eixos do SR, [N].	132
FIGURA 24 - Mapa de desempenho com as forças normais nos eixos do SR, [%].	132
FIGURA 25 - Mapa de desempenho com as forças tangenciais na QR (eixo X), [N].....	133
FIGURA 26 - Mapa de desempenho com as forças normais na QR, [N].	134
FIGURA 27 - Pressão no sistema de freios versus desaceleração para Estudo 1.	141
FIGURA 28 - Pressão no sistema de freios versus desaceleração para Estudo 2.	142
FIGURA 29 - Pressão no sistema de freios versus desaceleração para Estudo 3.	143
FIGURA 30 - Pressão no sistema de freios versus desaceleração para Estudo 4.	144
FIGURA 31 - Diagrama 3 do Anexo 10 da ECE-R13 para o LS 1935.	146

FIGURA 32 - Diagrama 4A do Anexo 10 da ECE-R13 para o semi-reboque FNV.....	147
FIGURA 33 - Esquema da forma de um guia de orientação ao usuário do veículo.....	154
FIGURA 34 - Forças no veículo-trator-semi-reboque.....	162
FIGURA 35 - Instrumento para obtenção dos pesos das cargas (célula de carga).....	196
FIGURA 36 - Detalhe da medição dos pesos das cargas.....	196
FIGURA 37 - Medição dos pesos nos eixos do veículo-trator LS 1935.....	197
FIGURA 38 - Balança para medição de pesos nos eixos veiculares e rampa de acesso.....	198
FIGURA 39 - Preparação da medição dos pesos nos eixos do semi-reboque FNV.....	199
FIGURA 40 - Medição dos pesos nos eixos do semi-reboque FNV.....	199
FIGURA 41 - Conexões entre veículo-trator e semi-reboque	201
FIGURA 42 - Suportes e calços para fixação das cargas no semi-reboque.....	201
FIGURA 43 - Instrumentos para testes (CORREVIT, YOKOGAWA e conversor)	202
FIGURA 44 - Instrumento para medição da temperatura nos freios (YOKOGAWA).....	202
FIGURA 45 - Verificação da altura do sensor do CORREVIT (canhão)	203
FIGURA 46 - Detalhe de instalação do sensor do CORREVIT (canhão)	204
FIGURA 47 - Captador para calibração do CORREVIT	205
FIGURA 48 - Manômetro e <i>display</i> do CORREVIT para acompanhar medições.....	205
FIGURA 49 - Dispositivo para regulação de pressão na aplicação do pedal de freio	206
FIGURA 50 - Válvula pedal, transdutor de pressão e conexões pneumáticas do freio	206
FIGURA 51 - Cilindros combinados do freio das rodas traseiras do veículo-trator.....	207
FIGURA 52 - Alavanca ajustadora de folga do freio do eixo traseiro do veículo-trator	207
FIGURA 53 - Freio a tambor da roda direita do eixo dianteiro do veículo-trator.....	208
FIGURA 54 - Detalhe do freio da roda direita do eixo dianteiro do veículo-trator	208
FIGURA 55 - Sensor de temperatura na lona do freio do eixo dianteiro do VT	209
FIGURA 56 - Cilindros do freio das rodas de um dos eixos do semi-reboque.....	209
FIGURA 57 - Marca da ocorrência de travamento nas rodas do primeiro eixo do SR	210
FIGURA 58 - Borracha impregnada nas rodas do segundo eixo do SR.....	210
FIGURA 59 - Rodas do terceiro eixo do semi-reboque.....	211
FIGURA 60 - Marcas no pavimento do travamento do primeiro eixo do semi-reboque.....	211
FIGURA 61 - Marcas no pavimento típicas de travamento de rodas durante a freagem.....	212
FIGURA 62 - Marcas no pavimento típicas de iminência de escorregamento das rodas.....	212

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 - Características da distribuição das cargas nas configurações veiculares.....	103
TABELA 02 - Valores dos mapas de desempenho e experimentais para Estudo 1.....	135
TABELA 03 - Valores do programa e experimentais para Estudo 1.....	136
TABELA 04 - Valores dos mapas de desempenho e experimentais para Estudo 2.....	136
TABELA 05 - Valores do programa e experimentais para Estudo 2.....	137
TABELA 06 - Valores dos mapas de desempenho e experimentais para Estudo 3.....	138
TABELA 07 - Valores do programa e experimentais para Estudo 3.....	138
TABELA 08 - Valores do programa e experimentais para Estudo 4.....	139
TABELA 09 - Pressão no sistema de freios e desaceleração para Estudo 1.....	141
TABELA 10 - Pressão no sistema de freios e desaceleração para Estudo 2.....	142
TABELA 11 - Pressão no sistema de freios e desaceleração para Estudo 3.....	143
TABELA 12 - Pressão no sistema de freios e desaceleração para Estudo 4.....	144

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	- American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	- Antilock Brake System
ASR	- Anti-wheel Spin Regulation
ATC	- Automatic Traction Control
ACcav	- Área dos cilindros de roda dos freios dos eixos do cavalo
ACsr	- Área dos cilindros de roda dos freios dos eixos do semi-reboque
BAC	- Blood Alcohol Concentration
CET	- Companhia de Engenharia de Tráfego
c.g.	- Centro de gravidade
CG	- Centro de gravidade
CMT	- Capacidade Máxima de Tração
CNH	- Carteira Nacional de Habilitação
CONTRAM	- Conselho Nacional de Trânsito
C-SR	- Cavalo-semi-reboque
DENATRAN	- Departamento Nacional de Trânsito
DER	- Departamento de Estradas de Rodagem
EBS	- Eletronic Brake System
ECE	- Economic Commission for Europe
ECE-R13	- Economic Commission for Europe - Regulation 13
ED	- Eixo dianteiro do veículo-trator
EEC	- European Economic Community
ELB	- Eletronically Limited Braking
EPB	- Eletronically Proportioned Braking
ESR	- Eixos do semi-reboque
ET	- Eixo traseiro do veículo-trator
FEM	- Finite Element Method
FMVSS	- Federal Motor Vehicle Safety Standards
GRRF	- Groupe de Rapporteurs en Matière de Roulement et de Freinage

INST	- Instituto Nacional de Segurança no Trânsito
IVHS	- Intelligent Vehicle Highway Systems
JASO	- Japan Automobile Standard Organization
ld	- Lado direito
le	- Lado esquerdo
LED	- Light Emitting Diode
MFDD	- Mean Fully Developed Deceleration
NHTSA	- National Highway Traffic Safety Administration
NTC	- Associação Nacional das Empresas de Transporte Rodoviário de Carga
<hr/>	
NZHVBC	- New Zealand Heavy Vehicle Brake Code
QR	- Quinta-roda
SAE	- Society of Automotive Engineers
SD	- Stopping Distance
SEPLATEC	- Empresa de Serviços de Planejamento e Assessoria Técnica
SNT	- Secretaria Nacional de Tráfego
SR	- Semi-reboque
VT	- Veículo-trator
WP 29	- Working Party 29

LISTA DE SÍMBOLOS

ACcav	- área dos cilindros de freio das rodas do veículo-trator,
ACED	- área dos cilindros de freio das rodas do ED do veículo-trator,
ACET	- área dos cilindros de freio das rodas do ET do veículo-trator,
ACsr	- área dos cilindros de freio das rodas do semi-reboque,
AC _i	- área dos cilindros dos freios das rodas do eixo i, pol ² ou m ²
b	- desaceleração, m/s ²
b%	- desaceleração, %
bideal	- desaceleração ideal, m/s ²
B _i	- força de freagem produzida pelos freios das rodas do eixo i, N
Bf ₁	- força de freagem nas rodas do eixo dianteiro do veículo-trator, N
B% _{f1}	- força de freagem nas rodas do eixo dianteiro do veículo-trator, %
BF _i	- fator de freio dos freios das rodas do eixo i
bmax	- desaceleração máxima
bméd	- desaceleração média
Br ₁	- força de freagem nas rodas do eixo traseiro do veículo-trator, N
B% _{r1}	- força de freagem nas rodas do eixo traseiro do veículo-trator, %
Br ₂	- força de freagem nas rodas dos eixos do semi-reboque, N
B% _{r2}	- força de freagem nas rodas dos eixos do semi-reboque, %
Bt	- força de freagem total nas rodas do veículo, N
B% _t	- força de freagem total nas rodas do veículo, %
c	- termo independente da equação da reta
CASO	- caso de freagem do veículo estudado
CGZQ	- altura do c.g. da carga no semi-reboque em relação ao pavimento
CG X - SR	- centro de gravidade longitudinal do semi-reboque
CG Z - SR	- centro de gravidade vertical do semi-reboque
Dcs _i	- diâmetro efetivo dos came "S" dos freios das rodas do eixo i, m
Dt _i	- diâmetro interno dos tambores dos freios das rodas do eixo i, m
g	- aceleração da gravidade local, m/s ²
h _{IED}	- altura de levantamento do eixo dianteiro do veículo-trator, m

h_{2QR}	- altura de levantamento da quinta-roda do semi-reboque, m
H_1	- altura do c.g. do veículo-trator em relação ao pavimento, m
H_2	- altura do c.g. do semi-reboque em relação ao pavimento, m
H_2^*	- altura do c.g. do semi-reboque em relação ao pavimento com o semi-reboque sem as rodas do primeiro e segundo eixos, m
H_5	- altura da QR em relação ao pavimento, m
L_{ajf_i}	- comprimento das alavancas de ajuste de folga dos freios instalados nas rodas do eixo i , m
L_1	- distância entre eixos do veículo-trator, m
L_2	- distância entre a QR e o segundo eixo do semi-reboque, m
Lf_1	- distância do c.g. do veículo-trator ao eixo dianteiro em X, m
Lf_2	- distância do c.g. do semi-reboque à quinta-roda em X, m
Lf_2^*	- distância do c.g. do semi-reboque a quinta-roda em X com o semi-reboque sem as rodas do primeiro e segundo eixos, m
Lf_{2QR}	- distância do c.g. do semi-reboque a quinta-roda em X, considerando o limite de peso estático sobre a quinta-roda do veículo-trator, m
Lf_{2r}	- distância do c.g. do semi-reboque a quinta-roda em X, considerando o limite de peso estático sobre os eixos do semi-reboque, m
Lf_5	- distância da quinta-roda ao eixo dianteiro do veículo-trator em X, m
Lp_2	- distância da QR ao primeiro eixo do semi-reboque em X, m
Lr_1	- distância do c.g. do veículo-trator ao eixo traseiro em X, m
Lr_2	- distância do c.g. do semi-reboque ao segundo eixo deste em X, m
Lr_5	- distância da QR ao eixo traseiro do veículo-trator em X, m
Ls_2	- distância da QR ao segundo eixo do semi-reboque em X, m
Lt_2	- distância da QR ao terceiro eixo do semi-reboque em X, m
m	- coeficiente angular da equação da reta
$MI0$	- coeficiente de aderência disponível entre pneumático e pavimento
ne_2	- número de eixos do semi-reboque
$nrod_2$	- número de rodas por eixo do semi-reboque
$Oxyz$	- sistema de coordenadas
p	- pressão no sistema de freios, bar ou kPa

r	- coeficiente de correlação
$Rdin_i$	- raio dinâmico das rodas do eixo i , m
$Rdin_1$	- raio dinâmico das rodas dos eixos do veículo-trator, m
$Rdin_2$	- raio dinâmico das rodas dos eixos do semi-reboque, m
$Rd5_{1X}$	- força na quinta-roda do veículo-trator em X, N
$Rd5_{1Z}$	- força na quinta-roda do veículo-trator em Z, N
$Rd5_{2X}$	- força na quinta-roda do semi-reboque em X, N
$Rd5_{2Z}$	- força na quinta-roda do semi-reboque em Z, N
Ri_1	- força de inércia do veículo-trator, N
Ri_2	- força de inércia do semi-reboque, N
S	- espaço de freagem
S_1	- bitola do eixo dianteiro do veículo-trator, m
S_2	- bitola dos eixos do semi-reboque, m
Sle_1	- distância do c.g. do veículo-trator ao lado esquerdo deste em Y, m
Sle_2	- distância do c.g. do semi-reboque ao lado esquerdo deste em Y, m
$Smax$	- espaço máximo de freagem
Ta	- tempo de resposta do sistema de freios instalado no veículo, s
Tb	- tempo para o sistema de freios proporcionar a desaceleração máxima, s
V	- velocidade do veículo, km/h ou m/s
W_1	- peso do veículo-trator, N
W_2	- peso do semi-reboque, N
W_2^*	- peso do SR sem as rodas do primeiro e segundo eixos deste, N
Wdf_1	- peso dinâmico no eixo dianteiro do veículo-trator, N
$Wd\%f_1$	- peso dinâmico no eixo dianteiro do veículo-trator, %
Wdr_1	- peso dinâmico no eixo traseiro do veículo-trator, N
$Wd\%r_1$	- peso dinâmico no eixo traseiro do veículo-trator, %
Wdr_2	- peso dinâmico nos eixos do semi-reboque, N
$Wd\%r_2$	- peso dinâmico nos eixos do semi-reboque, %
Wdt	- peso dinâmico total nos eixos do veículo-trator-semi-reboque, N
$Wd\%t$	- peso dinâmico total nos eixos do veículo-trator-semi-reboque, %

Wld_1	- peso estático nas rodas do lado direito do veículo-trator, N
Wld_2	- peso estático nas rodas do lado direito do semi-reboque, N
Wlr_2	- limite de peso estático nos eixos do semi-reboque, N
$Wl5_1$	- limite de peso estático na quinta-roda do veículo-trator, N
Wq	- peso da carga colocada no veículo, N
Wr_1	- peso estático no ET do veículo-trator, N
Wr_{1ED}	- peso estático no ET do veículo-trator com o levantamento do ED deste, N
Wr_2^*	- peso estático no terceiro eixo do SR sem as rodas do primeiro e segundo eixos, N
Wr_{2QR}	- peso estático no terceiro eixo do SR com o levantamento da QR deste, N
$Wrod_2$	- peso de cada roda do semi-reboque, N
Wt	- peso total do veículo, N
X	- eixo X do sistema de coordenadas Oxyz
XZ	- plano que contém os eixos X e Z do sistema de coordenadas Oxyz
Y	- eixo Y do sistema de coordenadas Oxyz
Z	- eixo Z do sistema de coordenadas Oxyz
Δp_i	- diferencial de pressão no sistema de freios, bar ou kPa
η_b	- eficiência da freagem, %
η_{bs_i}	- eficiência do sistema de freios instalado no eixo i do veículo, %
λ	- escorregamento percentual na freagem, %
μ_0	- coeficiente de adesão máximo entre pneumáticos e pavimento
μ_{f1}	- coeficiente de adesão utilizado pelas rodas do eixo dianteiro do veículo-trator na freagem
μ_{r1}	- coeficiente de adesão utilizado pelas rodas do eixo traseiro do veículo-trator na freagem
μ_{r2}	- coeficiente de adesão utilizado pelas rodas dos eixos do semi-reboque na freagem
ΣF_x	- somatório de forças em X
ΣF_z	- somatório de forças em Z

ΣM_A	- somatório de momento no ponto A
ΣM_B	- somatório de momento no ponto B
ΣM_C	- somatório de momento no ponto C
ΣM_D	- somatório de momento no ponto D

RESUMO

FERNANDES, D. L. G. (2000). *Análise de veículos rodoviários articulados pesados na freagem através da técnica dos mapas de desempenho*. São Carlos, 2000. 214p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este trabalho traz um estudo de veículos rodoviários articulados pesados durante o processo de freagem incluindo uma revisão bibliográfica sobre aspectos humanos, ambientais, legais, veiculares e operacionais relacionados com o desempenho, a estabilidade e a segurança veicular e uma descrição da técnica dos mapas de desempenho. Tal técnica é original e inovadora e foi desenvolvida através de modelo matemático e respectivo programa computacional para analisar o desempenho e a estabilidade de veículo-trator-semi-reboque durante a freagem em trecho retilíneo.

Com esta técnica é possível obter o desempenho e a estabilidade direcional de veículos articulados pesados na freagem, obedecendo as restrições geométricas do veículo-trator-semi-reboque e de peso estabelecidas pelo fabricante e pela legislação, para todas as condições de carregamento e qualquer condição operacional. Os resultados teórico-experimentais que validaram o modelo matemático adotado também são mostrados neste trabalho.

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio da Mercedes-Benz do Brasil, resultando numa integração entre Empresa e Universidade que trouxe uma contribuição efetiva para o uso do veículo-trator-semi-reboque com maior eficiência, e segurança, unindo esforços da Empresa e da Universidade em prol da segurança veicular e do desenvolvimento tecnológico do Brasil.

Palavras-chave: desempenho, freio, segurança veicular, veículo articulado pesado.

ABSTRACT

FERNANDES, D. L. G. (2000). *Articulated heavy vehicles braking analysis by performance chart technique*. São Carlos, 2000. 214p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

This work describes a study of articulated heavy vehicles during braking process including the state-of-the-art of human, enviromental, legal, vehicular and operational aspects related with performance, stability and vehicular safety and a description of performance charts technique. This technique is original and innovative and was developed with mathematical model and related computer program to analize the tractor-semi-trailer performance and stability during the braking process in a straight line path.

With this technique is possible to obtain the performance and directional stability of articulated heavy vehicles during braking process, obeying the geometrical restrictions of the tractor-semi-trailer and the legal and maker's weight restrictions, for all states of loading and any operational conditions. The theoretical-experimental results that validated the mathematical model adopted are also shown in this work.

This work was developed with the support of Mercedes-Benz of Brazil, resulting in a Company and University integration that brought an effective contribution for the more efficient and safe use of tractor-semi-trailer, enlarging the Company and University efforts to the benefit of vehicular safety and technological development in Brazil.

Keywords: performance, brake, vehicular safety, articulated heavy vehicles.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o transporte de cargas por meio rodoviário tem destacada importância, conforme mostra BRASIL (1993) e FERNANDES (1994).

A seguir, serão mostradas informações sobre o perfil da frota brasileira de caminhões quanto à capacidade de carga e configurações mais utilizadas dos mesmos.

Um estudo realizado pela EMPRESA DE SERVIÇOS, PLANEJAMENTO E ASSESSORIA TÉCNICA (SEPLATEC) em 1997, revela que os caminhões representam cerca de 6,2 % da frota brasileira de veículos e que os mesmos possuem uma idade média de 12,6 anos. SEPLATEC (1997) ainda mostra que a frota de caminhões brasileira é composta por 24,35 % de caminhões leves, que possuem a capacidade máxima de tração (CMT) de até 10 toneladas, por 23,17 % de caminhões médios, que possuem CMT entre 10 e 20 toneladas e por 52,48 % de caminhões pesados, que possuem CMT maior que 20 toneladas.

Segundo estudos técnicos da ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGA (NTC) em 1997, a frota brasileira de caminhões das empresas de transporte de cargas por meio rodoviário é constituída por 39,8 % de veículo-trator de dois eixos acoplado à semi-reboque de três eixos em tandem (configuração 2-S3, conforme SAE J687 (1988)), por 28,2 % de caminhões com três eixos sendo que os dois eixos traseiros estão em tandem (configuração 3), por 15,7 % de veículo-trator de três eixos com semi-reboque de três eixos em tandem (configuração 3-S3), 15,7 % de veículo-trator de dois eixos com semi-reboque de dois eixos em tandem (configuração 2-S2) e 0,6 % para as outras configurações veiculares.

Considerando estas informações, pode-se dizer que o tipo de veículo articulado pesado escolhido para ser analisado durante a freagem neste trabalho,

representado por uma configuração 2-S3 conforme SAE J687 (1988), tem importância significativa no transporte de carga por meio rodoviário no Brasil.

A seguir, serão mostradas informações sobre o estado de conservação da frota de caminhões, o perfil de seus motoristas e algumas estatísticas sobre acidentes rodoviários no Brasil.

MORENO (1995) mostra um levantamento sobre o estado de conservação dos caminhões brasileiros, obtido através de inspeções técnicas nos caminhões realizadas pelo Instituto Nacional de Segurança no Trânsito (INST).

Este estudo realizado pelo INST revelou resultados estatísticos importantes sobre o estado de conservação da frota brasileira de caminhões, sendo que 97 % dos caminhões inspecionados apresentaram algum problema no sistema de freios (como danificação na tubulação do sistema de freios, curso do pedal de freio inadequado, contaminação dos reservatórios de ar comprimido por óleo ou água e outros).

Como informação complementar fornecida por este estudo estatístico do INST, tem-se ainda que entre os caminhões inspecionados, 91 % apresentavam os espelhos retrovisores sem condição de uso normal, 63 % tinham pelo menos uma lanterna traseira queimada, 69 % estavam com os faróis sem regulagem, 93 % exibiam folga excessiva na direção, 86 % apresentavam algum defeito na suspensão, 29 % trafegavam com amortecedores quebrados, 35 % tinham o feixe de molas comprometido, 56 % possuíam pneus recauchutados, 69 % estavam com os pneus fora da calibragem correta e 25 % tinham algum problema nas rodas.

Um estudo estatístico realizado pela Volvo do Brasil S.A. sobre o perfil do motorista de caminhão brasileiro, também contido em MORENO (1995), revela que entre os motoristas entrevistados, 80 % são casados, 49 % passam menos de cinco dias por mês com a família, 61 % tem idade entre 20 e 40 anos, 29 % trabalham na profissão de motorista há pelo menos 20 anos, 61 % não completaram o primeiro grau escolar, 80 % recebem entre um e dez salários mínimos por mês, 33 % ingerem bebida alcoólica enquanto dirigem, 38 % fumam cigarros, 65 % dirigem calçando chinelos, 75 % preferem dirigir durante o período diurno, 100 % dormem no caminhão à noite, 71 % ficam mais de quatorze horas diárias dirigindo, 6 % tomam algum tipo de estimulante para ficarem acordados enquanto dirigem, 16 % dirigem

sem parar durante o dia, 48 % trafegam de 10 a 15 mil quilômetros por mês, 19 % usam o cinto de segurança, 36 % já se envolveram em pelo menos um acidente, 48 % são fiscalizados por tacógrafo, 81 % já subornaram os guardas rodoviários para não serem multados, 90 % não respeitam os limites legais de peso por eixo veicular, 36 % já foram assaltados nas rodovias e 55 % mudariam de profissão se pudessem.

Existem várias publicações contendo estatísticas sobre os acidentes de trânsito e a segurança veicular no Brasil. A seguir são apontadas algumas das fontes destas estatísticas e uma breve descrição do conteúdo das mesmas.

COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRÁFEGO (CET) em 1997, publicou informações gerais sobre o município de São Paulo e estatísticas de acidentes de trânsito considerando os seguintes parâmetros de análise: os locais do município de São Paulo (os bairros e as vias públicas), o período do dia, a distribuição semanal e as condições climáticas em que ocorreram os acidentes; a natureza sexual e a faixa etária dos motoristas, bem como se houve ingestão de bebidas alcoólicas pelos mesmos; o tipo e o ano de fabricação dos veículos envolvidos nos acidentes; a natureza do acidente (colisão, atropelamento e outras) e a evolução anual dos acidentes de trânsito sem vítimas e com vítimas (os feridos e os mortos). Além disso, estas fontes sobre acidentes de trânsito destacam os benefícios do uso de capacete pelos motociclistas, do tráfego de motos com o farol aceso, do transporte de crianças no banco traseiro dos veículos, do uso do cinto de segurança, da prática da direção defensiva e da educação para o trânsito. Desta fonte ainda foram obtidas as estatísticas sobre acidentes de trânsito em 1992, sendo que as mesmas tratam basicamente dos mesmos parâmetros de CET (1997).

POLÍCIA RODOVIÁRIA (1996) descreve as estatísticas sobre acidentes de trânsito no Estado de São Paulo contemplando os seguintes parâmetros: os locais do Estado de São Paulo (somente as rodovias estaduais asfaltadas), o período do dia, a distribuição semanal e as condições climáticas em que ocorreram os acidentes; a natureza sexual e a faixa etária dos motoristas, bem como se houve ingestão de bebidas alcoólicas pelos mesmos; o tipo dos veículos envolvidos nos acidentes; a natureza do acidente (colisão, atropelamento e outras) e a evolução anual dos acidentes sem vítimas e com vítimas (os feridos e os mortos) e as ocorrências de

resgate de vítimas dos acidentes. Além disso, são apontadas as principais infrações de trânsito cometidas pelos motoristas (como excesso de velocidade, ultrapassagem em local proibido e outras) e a quantidade de autuações. Desta fonte ainda foram obtidas as estatísticas sobre acidentes de trânsito entre 1985 e 1995, sendo que estas abordam basicamente os mesmos parâmetros de POLÍCIA RODOVIÁRIA (1996).

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM (DER) em 1997, descreve as estatísticas sobre acidentes de trânsito no Estado de São Paulo contemplando os seguintes parâmetros: os locais do Estado de São Paulo (somente as rodovias estaduais asfaltadas), o período do dia, a distribuição semanal, as condições do pavimento (seco ou molhado) e as condições climáticas em que ocorreram os acidentes; o tipo dos veículos envolvidos nos acidentes; a natureza do acidente de trânsito (tombamento, colisão, atropelamento e outras) e a evolução anual dos acidentes sem vítimas e com vítimas (os feridos e os mortos) e a participação dos veículos de transporte de carga nos acidentes. Desta fonte ainda foram obtidas as estatísticas sobre acidentes de trânsito de 1985 a 1990 e em 1991, sendo que estas tratam basicamente dos mesmos parâmetros de DER (1997).

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO (DENATRAN) em 1995 contém as estatísticas sobre acidentes de trânsito no Brasil considerando os seguintes parâmetros de análise: o tipo de área (urbana ou rural), os locais do Brasil (Estados e Capitais), o período do dia, a distribuição semanal e as condições climáticas em que ocorreram os acidentes; a natureza sexual, a categoria da habilitação e a faixa etária dos motoristas, o tipo dos veículos envolvidos nos acidentes; a natureza do acidente de trânsito (colisão, atropelamento e outras) e a evolução anual dos acidentes sem vítimas e com vítimas (os feridos e os mortos) e informações sobre a frota nacional de veículos. Desta fonte ainda foram obtidas as estatísticas sobre acidentes de trânsito entre 1990 e 1994, sendo que estas contemplam os mesmos parâmetros de DENATRAN (1995).

MORENO (1995) mostra que apesar dos caminhões representarem apenas 6,2 % da frota brasileira de veículos, os mesmos possuem elevados índices de envolvimento em acidentes nas rodovias brasileiras. MORENO (1995) também exhibe alguns estudos estatísticos da Secretaria Nacional de Tráfego (SNT), que mostram

uma participação dos caminhões nos acidentes ocorridos nas rodovias federais brasileiras em torno de 46 %. Segundo estatísticas do DER do Estado de São Paulo, citadas anteriormente, os caminhões possuem uma participação anual média nos acidentes nas rodovias estaduais paulistas em torno de 30 %.

Neste trabalho não são mostrados todos os valores numéricos destas estatísticas por ocuparem extenso espaço, mas as mesmas revelam uma elevada quantidade de ocorrência de acidentes de trânsito no Brasil.

Entretanto, estas estatísticas sobre acidentes de trânsito não mostram informações como as condições dos sistemas do veículo e as circunstâncias técnicas dos acidentes, que poderiam ser obtidas por perícia técnica dos mesmos e que poderiam permitir a reconstituição dos mesmos com detalhes e uma melhor avaliação das causas dos acidentes de trânsito.

A análise técnica dos acidentes de trânsito com maior profundidade poderia auxiliar no fornecimento de informações importantes sobre os acidentes (como a influência do sistema de freios dos veículos nos mesmos) e na identificação clara dos fatores que levaram a ocorrência do acidente (humanos, ambientais, legais, veiculares e operacionais), que são informações fundamentais para a elaboração de programas educativos e de campanhas para a redução de acidentes no trânsito.

Considerando as informações mostradas até o momento, pode-se dizer que a situação da segurança veicular brasileira é preocupante e que o desenvolvimento de trabalhos para contribuir na melhoria de tal quadro é oportuno.

FERNANDES (1994) mostra que o envolvimento de veículos articulados pesados em acidentes rodoviários pode trazer perdas humanas e materiais proporcionalmente maiores que nos acidentes que envolvem veículos menores, devido à algumas de suas características, como o grande porte, a elevada capacidade de carga e a considerável diversidade de condições operacionais.

Além disso, os veículos rodoviários articulados pesados (formados por um veículo-trator acoplado à um semi-reboque) possuem uma grande variedade de condições operacionais, que podem estar relacionadas com as condições do pavimento, com as condições veiculares, com a forma de carregar o veículo entre outras.

Por exemplo, com relação às condições do pavimento, o veículo-trator-semi-reboque pode trafegar em estradas de asfalto, de concreto, de terra, etc. As mesmas ainda podem estar molhadas ou secas, em bom ou ruim estado de conservação entre outras condições de uso. Desta forma, tem-se uma grande diversidade de valores de coeficientes de aderência possíveis para o contato entre o pneumático do veículo e o pavimento.

Com relação ao veículo, o veículo-trator pode trafegar sem o semi-reboque ou com o semi-reboque (formando um veículo combinado pesado). Cada veículo combinado pesado pode ainda ser constituído por várias combinações de veículo-trator e semi-reboque. Assim, podem ser formados conjuntos de veículo-trator e semi-reboque com diferentes características técnicas, como dimensões, pesos, número de eixos, configuração do sistema de freios entre outras.

Com relação à forma de carregar o veículo, cada veículo combinado pesado pode receber diversas quantidades de carga, que ainda podem ser distribuídas de inúmeras formas sobre a plataforma de carga do semi-reboque, mas sempre observando-se as restrições geométricas do veículo e os limites de peso por eixo veicular estabelecidos pelo fabricante e pela legislação.

Portanto, considerando que o semi-reboque pode ser carregado com várias quantidades de carga e que estas ainda podem ser distribuídas de diversas formas, pode-se ter uma grande variação nas possíveis posições do centro de gravidade longitudinal, vertical e transversal do semi-reboque.

Além disso, o veículo combinado pesado pode realizar o processo de freagem com várias formas de atuação dos freios das rodas, como por exemplo, com a atuação dos freios das rodas de todos os seus eixos veiculares, com a atuação dos freios das rodas dos eixos do semi-reboque apenas e outras. A freagem do veículo ainda pode ser efetuada a partir de várias velocidades e outras condições iniciais. Assim, são possíveis inúmeras condições operacionais durante o processo de freagem.

Logo, pode-se dizer que as tarefas de análise do desempenho e da estabilidade do mesmo na freagem e de definição do sistema de freios a ser instalado neste veículo, podem se tornar complexas e dispendiosas em tempo e recursos envolvidos em

cálculos matemáticos e testes de campo, quando se considera este extenso universo de condições operacionais do veículo combinado pesado.

No sentido de viabilizar a realização das tarefas mencionadas anteriormente, considerando todas as condições operacionais possíveis e admissíveis para o veículo rodoviário articulado pesado (veículo-trator-semi-reboque), foi elaborada a técnica dos mapas de desempenho, que se mostra original e inovadora em relação à bibliografia levantada sobre o assunto.

Portanto, o objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento da técnica dos mapas de desempenho, que pode ser capaz de proporcionar uma ampla análise do desempenho, da estabilidade direcional e da segurança de veículos rodoviários articulados pesados na freagem, em qualquer condição operacional, respeitando-se os seus limites geométricos e os limites de peso por eixo estabelecidos pelo fabricante e pela legislação em vigor, por meio computacional e de forma rápida e confiável.

Neste trabalho, são apresentados diversos mapas de desempenho para um veículo rodoviário articulado pesado utilizado como exemplo de aplicação e são discutidos os resultados teóricos e experimentais apresentados, que incluem valores de parâmetros como distância, desaceleração máxima e média, eficiência e outros obtidos durante a freagem deste veículo.

Como objetivos complementares foram desenvolvidos estudos sobre aspectos humanos, ambientais, legais, veiculares e operacionais relevantes para o desempenho, a estabilidade e a segurança de veículos rodoviários pesados na freagem.

A seguir, tem-se uma descrição resumida dos capítulos que compõem este trabalho, que foi inserida com o propósito de proporcionar uma visão geral da organização do mesmo.

No Capítulo 2 tem-se uma revisão da literatura sobre o assunto, abordando os trabalhos desenvolvidos sobre o desempenho, a estabilidade e a segurança de veículos articulados pesados na freagem considerando os aspectos humanos, ambientais, legais, veiculares e operacionais envolvidos.

No Capítulo 3 tem-se uma descrição do sistema computacional elaborado para facilitar a obtenção dos resultados teóricos provenientes do modelo matemático desenvolvido.

O Capítulo 4 contém a metodologia do trabalho, incluindo as principais hipóteses adotadas para a elaboração do modelo matemático desenvolvido.

O Capítulo 5 mostra os resultados teóricos e experimentais obtidos para um veículo articulado pesado utilizado como exemplo de aplicação. Este Capítulo também mostra a verificação de alguns dos requisitos legais da legislação elaborada pela *Economic Commission for Europe* (ECE) que fazem parte da regulamentação europeia ECE-R13 para sistemas de freios de veículos, na qual se baseia a legislação brasileira sobre o assunto.

No Capítulo 6 realiza-se a análise dos resultados obtidos e da comparação realizada entre os mesmos, incluindo os estudos estatísticos elaborados.

O Capítulo 7 contém as principais conclusões sobre este trabalho e no Capítulo 8 são sugeridas propostas para o desenvolvimento de trabalhos futuros no assunto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é apresentar uma revisão dos estudos que abrangem os aspectos humanos, ambientais, legais, veiculares e operacionais relacionados com o desempenho, a estabilidade e a segurança de veículos comerciais durante o processo de freagem e posicionar o desenvolvimento deste trabalho neste universo de estudos.

O processo de freagem pode ser considerado um fenômeno onde os sistemas motorista e veículo conduzido pelo mesmo interagem entre si e com outros vários sistemas, como o pavimento, os outros veículos e obstáculos, o meio ambiente e outros, numa sucessão de eventos no tempo.

Este fenômeno pode ser considerado complexo porque envolve relações entre sistemas complexos cuja modelagem física e matemática nem sempre pode ser desenvolvida facilmente. Por exemplo, tem-se as reações do motorista, do veículo e do sistema de freios, o contato entre pneumático e pavimento e a transformação de energia cinética e potencial em energia acústica e térmica durante a freagem.

Portanto, de forma simplificada, o processo de freagem de um veículo pode ser composto por uma sucessão das seguintes fases no tempo:

Fase 1 - Sensibilização do motorista para a freagem, esta fase tem início na percepção de estímulos visuais, sonoros e outros pelo motorista, que são capazes de sensibilizar o mesmo para a necessidade de aplicar os freios do veículo que conduz e vai até o instante que o motorista toma esta atitude.

Fase 2 - Atitude do motorista de iniciar a freagem, esta fase tem início na tomada de decisão cerebral do motorista de aplicar os freios do veículo e vai até o

instante de efetivar tal decisão, através da atitude de movimentar um de seus membros (mão ou pé) de forma coordenada e no sentido de iniciar o contato dos mesmos com a superfície de controle do sistema de freios responsável pela ativação do mesmo pelo motorista (por exemplo, o pedal de freio).

Fase 3 - Ativação do sistema de freios, esta fase compreende o início da aplicação do sistema de freios do veículo pelo motorista até começo da produção de esforço de freagem pelo mesmo.

Fase 4 - Atuação efetiva do sistema de freios, esta fase inicia-se com a produção de esforço de freagem pelo sistema de freios do veículo e vai até o instante em que se atinja a redução da velocidade do veículo desejada pelo motorista, podendo ou não ser uma parada total do veículo.

Nas Fases 3 e 4 do processo de freagem pode-se dizer, conforme FERNANDES (1994), que o sistema de freios de um veículo tem por finalidade proporcionar ao motorista uma ação segura de desaceleração, com ou sem a redução da velocidade a zero, conforme as condições de tráfego o requerem e obedecendo aos requisitos preestabelecidos pelo fabricante e pela legislação vigente.

Ainda na Fase 4 é que se realiza do ponto de vista físico a transformação da energia cinética e potencial do veículo em movimento em energia térmica (na forma de calor) e acústica (na forma de ruído) no sistema de freios.

Existem diversos aspectos que podem estar relacionados com o desempenho e a segurança de veículos rodoviários pesados no processo de freagem, com importância relativa em cada uma das suas fases descritas anteriormente. Tal fato, faz com que o estudo destes aspectos possa englobar diferentes áreas do conhecimento humano e ser considerado multidisciplinar.

No sentido de ampliar o conhecimento e ao mesmo tempo proporcionar uma visão global sobre o processo de freagem, foram incluídos na revisão bibliográfica deste trabalho apenas alguns estudos sobre os aspectos humanos, ambientais e legais que podem estar relacionados com o desempenho, a estabilidade e a segurança veicular durante o processo de freagem.

Nesta revisão bibliográfica foi dada prioridade para os estudos sobre os aspectos veiculares e operacionais que possam estar relacionados com o desempenho,

a estabilidade e a segurança de veículos rodoviários articulados pesados durante a freagem.

A segurança veicular também foi incluída como parte deste trabalho porque o estudo do processo de freagem de veículos comerciais pesados pode ser considerado um assunto de segurança, uma vez que a ocorrência de vários acidentes envolvendo tais veículos pode estar relacionada com o processo de freagem dos mesmos. Desta forma, os trabalhos relacionados com a segurança veicular estão distribuídos pela revisão bibliográfica sobre aspectos humanos, ambientais, legais, veiculares e operacionais.

2.2 Aspectos humanos, ambientais e legais

2.2.1 Aspectos humanos

Os aspectos humanos são importantes durante todas as fases do processo de freagem, mas é nas Fases 1 e 2 que tais aspectos exercem sensível influência, pois a duração das mesmas depende do tempo de reação do motorista.

O tempo de reação do motorista depende de aspectos humanos que são inerentes ao motorista (ser humano que conduz o veículo), como as características físicas e de comportamento dos motoristas, que por sua vez, relacionam-se com a capacidade físico-motora e com os estados psicológico e emocional do motorista, que podem ser influenciados e alterados por diversos fatores.

Entre estes fatores tem-se: a idade, a natureza sexual, a experiência, o treinamento, a quantidade e a qualidade do sono, a fadiga física e mental e a capacidade visual do motorista, além da ingestão de bebidas alcoólicas e de drogas pelo motorista entre outras.

O tempo de resposta do motorista também pode ser influenciado por fatores como as condições ambientais (as condições climáticas, o período do dia e outras), as condições de tráfego (a intensidade, a velocidade e outras) e as condições de

trabalho (a duração da jornada, o nível de responsabilidade, a cobrança de resultados e outras) que podem modificar o estado emocional e físico do motorista, elevando ou reduzindo a sua disposição para a condução do veículo.

Neste trabalho serão citados apenas alguns dos vários estudos sobre estes fatores no sentido de mostrar a importância dos aspectos humanos no processo de freagem e na segurança veicular.

Os fatores idade, natureza sexual, nacionalidade, capacidade visual, fadiga, ingestão de álcool e drogas e outros são a temática de vários estudos sobre o tempo de resposta de motoristas, o tempo para a tomada de decisão diante de diversas situações de trânsito, a visibilidade, a participação em acidentes de trânsito e outros.

Em vários estudos mais de um destes fatores aparecem simultaneamente, portanto os mesmos serão descritos a seguir de forma resumida e em ordem cronológica, procurando-se agrupar os estudos de um mesmo tema na medida do possível.

McLEAN et al. (1976) mostrou como o motorista controla a desaceleração, a velocidade e a posição do veículo durante a freagem a partir de resultados experimentais. Propôs ainda um modelo matemático para o comportamento do motorista durante a freagem, utilizando um programa computacional para a simulação desse comportamento, aferido por comparações entre os resultados teóricos e experimentais.

MORTIMER (1976) estudou a influência de características dos motoristas como o comprimento das pernas, a natureza sexual, o peso, a idade e outras no desempenho do veículo durante a freagem, incluindo a apresentação de resultados experimentais. Mostrou também, as vantagens de treinar o motorista para as situações de emergência e as vantagens do uso de sistemas automáticos de controle dos freios.

A fadiga e a ingestão de bebidas alcoólicas são fatores importantes nas Fases 1 e 2 do processo de freagem. STORIE (1984) desenvolveu estudos sobre as características dos acidentes envolvendo veículos comerciais nas rodovias inglesas, destacando que a fadiga do motorista, a ingestão de álcool pelo mesmo e a inexperiência foram fatores que influenciaram significativamente a ocorrência dos acidentes com estes veículos. STORIE (1984) revelou também que o *jackknife* de

veículos articulados pesados trafegando em pista molhada foi causa considerável na ocorrência de acidentes com tais veículos.

A sinalização das rodovias pode ser considerada como uma fonte de estímulo visual para a Fase 1 do processo de freagem. EVANS & GINSBURG (1985) descreveram estudos sobre a capacidade de visualização da sinalização vertical e superior das rodovias por motoristas jovens e idosos. Nos resultados do estudo de EVANS & GINSBURG (1985) observou-se que os motoristas jovens possuem maior capacidade de visualização da sinalização das rodovias e que para melhorar a visibilidade da sinalização das rodovias por motoristas idosos seria necessário elevar o contraste e as dimensões dos caracteres e alterar o posicionamento da mesma.

ALLEN (1986) mostrou que a atividade de dirigir é complexa e envolve fatores associados com o motorista, o veículo, a pista e as condições de trânsito e operacionais. Neste sentido, ALLEN (1986) desenvolveu estudos para a redução da ocorrência de acidentes através da elevação das possibilidades de evitá-los nas manobras de frear e direcionar o veículo, incluindo os fatores citados anteriormente.

Os resultados do trabalho de ALLEN (1986) mostraram que para a tomada de decisão entre a realização das manobras de mudança de direção e freagem, em separado ou em conjunto, para evitar uma colisão devem ser considerados a velocidade do veículo, a distância até o obstáculo, o tempo de resposta do motorista, o tempo de resposta do sistema de freio do veículo, a desaceleração que pode ser alcançada pelo veículo na freagem, a aceleração lateral que pode ser introduzida no veículo durante a mudança de direção e o deslocamento lateral necessário para o veículo ser desviado do obstáculo e evitar a colisão. Este trabalho mostrou que em função destas variáveis o motorista pode evitar a colisão com a freagem do veículo apenas, com a mudança direcional veículo somente ou com ambas as manobras ao mesmo tempo, sendo que existem situações onde a colisão é inevitável para qualquer atitude tomada pelo motorista.

MALECK & HUMMER (1986) realizaram estudos estatísticos sobre a relação entre a idade dos motoristas e o envolvimento em acidentes, observando que os motoristas na faixa etária entre 25 e 55 anos são os que menos se envolveram em acidentes e que os motoristas com idade inferior à 25 anos ou superior à 55 anos são

os que mais se envolveram em acidentes. Destacando-se ainda que os motoristas com participação mais elevada na ocorrência de acidentes tinham idade inferior à 20 anos ou superior à 65 anos, ambos com participação equivalente nos acidentes.

OLSON & SIVAK (1986) desenvolveram estudos experimentais sobre a influência da idade dos motoristas no tempo de percepção e reação dos mesmos diante da mesma situação de trânsito (percorrer um trecho com obstáculos inesperados que exigiam as manobras de freagem e de mudança de direção). Os resultados mostraram que os tempos de resposta dos motoristas com idade entre 18 e 40 anos foram menores que os tempos de resposta dos motoristas com idade entre 50 e 80 anos e que 95 % dos motoristas de ambas as faixas etárias possuem tempo de resposta inferior à 1,6 segundos.

O julgamento e a tomada de decisão do motorista diante de situações diversas de trânsito e a complexidade das mesmas é importante fator na Fase 2 do processo de freagem.

SCIALFA et al. (1987) desenvolveram estudos sobre a capacidade de motoristas jovens e idosos, de ambos os sexos, de julgar corretamente a distância e a velocidade de aproximação de veículos, sendo que para tal os motoristas eram colocados dentro de um veículo posicionado diante de uma interseção. Os resultados destes estudos mostraram que os motoristas do sexo masculino e com idade entre 45 e 54 anos fizeram os melhores julgamentos de distância e velocidade dos veículos em aproximação da interseção e que julgamentos equivocados nesta situação de trânsito podem colocar os motoristas envolvidos em elevado risco de acidente, principalmente quando o motorista do veículo em aproximação da interseção é colocado em uma situação de freagem de emergência.

O estímulo visual é um agente importante para iniciar a Fase 1 do processo de freagem. SIVAK et al. (1987) avaliaram o tempo de resposta de motoristas jovens e idosos de ambos os sexos para a percepção da freagem do veículo que vai à frente através de simulações, com diferentes disposições e graus de luminosidade das lanternas de freio do mesmo. Os resultados indicaram que os motoristas idosos tiveram tempos de resposta maiores e precisaram de maior luminosidade nas lanternas de freio do veículo trafegando à frente para tomarem a decisão de frear.

EVANS (1988) revelou em seus estudos que os motoristas jovens com idade inferior à 20 anos envolvem-se mais em acidentes graves e fatais que os motoristas com idade superior à 40 anos e até 65 anos, de ambos os sexos. Este trabalho mostrou ainda que os homens se envolvem em mais acidentes que as mulheres, com exceção para a faixa etária acima dos 65 anos.

PONDS et al. (1988) desenvolveram estudos sobre a capacidade de motoristas de várias faixas etárias realizarem outras tarefas enquanto dirigem. Os resultados deste trabalho mostraram que os motoristas jovens possuem melhor habilidade para dividir a atenção e realizar outra tarefa enquanto dirigem, apesar de que tal prática se mostrou prejudicial à segurança no trânsito.

WILSON et al. (1989) avaliaram os tempos de percepção e de reação de motoristas divididos em dois grupos (com idade superior e com idade inferior à 35 anos) já alertados sobre as situações de emergência que enfrentariam para realizar as manobras de freagem e de mudança de direção diante de um obstáculo na pista. Na manobra de freagem de emergência foi obtido para todos os motoristas um valor médio de tempo de percepção do obstáculo de 0,56 segundos, um valor médio de tempo de reação do motorista de 0,28 segundos e um valor médio do tempo gasto desde a aplicação dos freios até ocorrer o travamento total das rodas de 0,12 segundos. Sendo que 99 % dos motoristas não levaram mais que 1,6 segundos para frear.

TAOKA (1989) descreveu um modelo analítico estatístico para a representação do tempo de resposta de motoristas diante de situações de tráfego que exigem a antecipação da ação de freagem do veículo pelo motorista ao perceber a necessidade de realizá-la.

RAFFLE (1989) realizou extensos estudos sobre a influência da ingestão de bebidas alcoólicas pelos motoristas na ocorrência de acidentes de trânsito, incluindo as estatísticas de mortos e feridos nos acidentes ocorridos com motoristas embriagados e os custos sociais destes acidentes; os efeitos do álcool no sistema nervoso central, na coordenação motora, na visibilidade e no comportamento do motorista; os efeitos do álcool conforme a idade, a experiência e a natureza sexual dos motoristas; a eficiência dos testes de identificação de dosagem de álcool no

sangue; as considerações médicas sobre a elevação dos riscos de ocorrência de acidentes veiculares devido à ingestão de álcool pelos motoristas e as propostas para coibir a ingestão de bebidas com álcool pelos motoristas e reeducar os infratores da lei.

STAPLIN et al. (1990) realizaram estudos sobre o tempo de resposta de motoristas das faixas etárias entre 19 e 49 anos e entre 65 e 80 anos submetidos à condições de trânsito com diferentes graus de complexidade. Os resultados mostraram que os tempos de resposta dos motoristas da faixa etária entre 65 e 80 anos foram maiores que os mesmos tempos dos motoristas da outra faixa etária. Além disso, observou-se que para a faixa etária de 65 a 80 anos estes tempos elevavam-se mais quando eram exigidas manobras mais complexas.

A nacionalidade, a idade e a natureza sexual dos motoristas são as variáveis analisadas nos estudos conduzidos por SIVAK et al. (1989) para avaliar a percepção de risco de acidente em diversas condições de tráfego. Neste trabalho observou-se um melhor desempenho dos motoristas jovens e não foram observadas diferenças entre o desempenho dos homens e das mulheres. Quanto à nacionalidade, os motoristas norte-americanos mostraram o melhor desempenho, seguidos dos brasileiros e alemães empatados e dos espanhóis por último.

KLINE et al. (1990) estudaram a visibilidade de sinalização vertical das rodovias por motoristas jovens e idosos, ambos com mesma escolaridade. Os resultados mostraram um melhor desempenho dos motoristas jovens e que a sinalização com placas contendo ícones proporcionaram a melhor visibilidade para todos os motoristas.

NILSON & HAKAN (1991) estudaram o efeito do uso de telefone celular pelos motoristas de várias faixas etárias enquanto dirigem. Os resultados deste estudo mostraram que os tempos de resposta dos motoristas de todas as idades nas manobras de freagem, de mudança de direção e de aceleração e nas tomadas de decisão elevaram-se em 0,5 segundos quando dirigiam e usavam o telefone celular ao mesmo tempo. Além disso, observou-se também que os motoristas que faziam uso do telefone celular realizavam maior número de correções na trajetória e velocidade do veículo, elevando o risco de ocorrência de acidentes.

NILSON & HAKAN (1991) indicaram ainda que as tarefas de dirigir e usar o telefone celular simultaneamente são incompatíveis e elevam o risco de acidentes, por isso sugeriram, por motivos de segurança, que seja restringido o uso de telefone celular pelos motoristas enquanto dirigem.

DeWAARD & BROOHUIS (1991) analisaram a influência da fadiga e da ingestão de bebidas alcoólicas no desempenho dos motoristas durante a tarefa de seguir o veículo que trafega à frente. Os estudos mostraram que a fadiga ou a presença de teor de álcool no sangue igual ou superior à 0,04 % influenciam significativamente os tempos de resposta e o desempenho dos motoristas no teste, sendo que estes dois efeitos são prejudiciais à segurança no trânsito.

RANNEY & SIMMONS (1992) avaliaram o tempo de reação de motoristas jovens e idosos para realizarem manobras indicadas por sinalização das rodovias, sendo que os motoristas jovens mostraram um melhor desempenho.

LERNER (1993) estudou os tempos de percepção e reação de motoristas de várias faixas etárias. Os resultados deste trabalho mostraram que os tempos de resposta dos motoristas são maiores com a elevação da faixa etária, mas sem comprometer o tempo de percepção e reação de 2,5 segundos utilizados em projetos de rodovias, conforme a *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), pois em nenhum caso o tempo de resposta dos motoristas foi superior à 1,9 segundos.

HIRANO (1993) mostrou o desenvolvimento de sistema de alerta para motoristas e de controle automático dos freios de veículos comerciais no Japão, no sentido de evitar a colisão dos mesmos com a traseira do veículo que segue à frente.

SIVAK et al. (1994) realizaram estudo comparativo sobre a influência do tipo de luz de freio (incandescente, catódica e *light emitting diode* (LED)) no tempo de resposta dos motoristas de veículos. Os resultados deste trabalho mostraram que o uso das luzes de freio dos tipos catódica e LED reduziram o tempo de resposta dos motoristas em 166 milissegundos em relação à luz de freio por incandescência convencional (que demoram cerca de 0,25 segundos para atingirem 90 por cento da sua capacidade luminosa).

MORTIMER (1993) desenvolveu estudos sobre a influência da instalação de *brake light* (uma luz de freio adicional colocada na traseira do veículo em posição central e mais elevada que as luzes de freio convencionais) nos veículos para a segurança veicular. Os resultados deste estudo mostraram que a instalação de tal dispositivo pode reduzir a ocorrência de colisão traseira em torno de 22 %.

BALL et al. (1994) mostraram que existe uma estreita relação entre o campo de visão útil do motorista e o seu envolvimento em acidentes e que os motoristas idosos geralmente apresentam redução do campo de visão útil, o que eleva a chance destes motoristas se envolverem em acidentes de trânsito.

Outros aspectos humanos que podem influenciar o desempenho dos motoristas durante a condução de um veículo são a sua experiência e o seu treinamento. TETARD et al. (1993) estudaram a conduta dos motoristas de veículos pesados franceses durante a descida de declives montanhosos.

Os resultados do trabalho de TETARD et al. (1993) revelaram a prática de duas condutas perigosas pelos motoristas. A primeira, onde os motoristas inexperientes utilizavam as marchas inadequadas para percorrer o trecho em declive com o veículo pesado, fazendo com que o freio de serviço fosse solicitado em demasia, o que poderia levar tal sistema à fadiga térmica antecipadamente. A segunda, onde motoristas experientes utilizavam marchas adequadas para trafegar no declive, mas procuravam percorrê-lo no menor tempo possível, muitas vezes fazendo com que o veículo pesado excedesse a velocidade adequada ao tráfego, o que novamente poderia levar o sistema de freio de serviço à fadiga térmica rapidamente e a maior chance de ocorrência de acidentes. TETARD et al. (1993) sugeriram que os motoristas deveriam ser orientados, treinados e fiscalizados para que fossem levados à prática de uma condução mais segura dos veículos pesados nos trechos em declive.

LIN et al. (1993) estudaram a relação entre a segurança do motorista de veículos comerciais e a quantidade de horas do mesmo em serviço, mostrando que as longas jornadas de trabalho para o motorista se traduzem em maior risco de acidentes.

KANEKO & JOVANIS (1992) descreveram o desenvolvimento de método para estimar a possibilidade de ocorrência de acidentes com motoristas de veículos comerciais em função da jornada de trabalho destes. Este método considera a idade

do motorista, a experiência na função e na condução de veículos articulados pesados, a quantidade de tempo sem dirigir antes da próxima jornada de trabalho e a duração da última jornada de trabalho. Os resultados deste trabalho mostraram uma elevação considerável do risco de ocorrer acidentes, principalmente nas seguintes situações, a partir do oitavo dia de trabalho consecutivo do motorista, durante a condução do veículo entre meia-noite e dez horas da manhã e a partir da quarta hora ininterrupta de trabalho do motorista. A idade e a quantidade de tempo sem dirigir antes da próxima jornada de trabalho não afetaram significativamente o risco de ocorrer acidentes.

FRITH (1994) estudou a influência da jornada de trabalho de motoristas de veículos pesados na ocorrência de acidentes envolvendo os mesmos na Austrália. Tal estudo evidencia que o risco de ocorrência de acidentes com veículos pesados torna-se consideravelmente maior quando os seus motoristas possuem jornadas de trabalho muito longas (acima de 10 horas por dia).

HARTLEY et al. (1994) mostraram que a prática de utilizar dois motoristas em revezamento nas longas jornadas de trabalho (viagens de 4 a 5 dias) pode reduzir a fadiga dos motoristas e elevar a segurança na utilização de veículos comerciais pesados na Austrália.

SUMMALA & MIKKOLA (1994) realizaram estudo estatístico sobre a influência da fadiga, da idade e da ingestão de bebidas alcoólicas na ocorrência de acidentes com vítimas fatais em acidentes envolvendo automóveis e veículos comerciais. Os resultados revelaram que os motoristas jovens de veículos pesados estão mais envolvidos em acidentes que os motoristas idosos dos mesmos veículos, principalmente nos acidentes causados por fadiga dos motoristas de veículos pesados. A ingestão de bebidas com álcool mostrou ter a mesma fatalidade nos acidentes com motoristas jovens ou idosos de veículos pesados e de automóveis.

SWEENEY et al. (1995) indicaram que a fadiga dos motoristas de veículos comerciais é um importante fator na ocorrência de acidentes envolvendo tais veículos nos Estados Unidos da América. Este estudo revelou que 31 % dos acidentes com veículos pesados norte-americanos tiveram como principal causa a fadiga dos motoristas destes veículos. Neste estudo conclui-se que o período e a qualidade do sono das últimas vinte e quatro horas dos motoristas de veículos pesados, antes do

acidente, podem ter significativa influência na ocorrência de acidentes com veículos pesados tendo como uma das causas a fadiga de seus motoristas.

SIEGMUND et al. (1996) avaliaram o comportamento de motoristas de veículos pesados, através do acompanhamento destes por um circuito de vídeo-câmera fechado, para determinar a relação entre a fadiga do motorista e de seus movimentos de mudança de direção do veículo. Os resultados do estudo mostraram que os motoristas com fadiga apresentam movimentos de mudança de direção do veículo típicos e que estas informações podem ser utilizadas para desenvolver sistemas de alerta ao motorista quando for detectado o estado de fadiga do motorista durante a condução de veículos pesados.

YOUNG et al. (1996) estudaram a ocorrência de acidentes envolvendo veículos comerciais tendo como causa a fadiga do motorista. Este estudo destaca que a quantidade e a qualidade do período de sono, a experiência e a jornada de trabalho do motorista são fatores que influenciam no processo de fadiga do mesmo.

ALLEN et al. (1996) realizaram estudos sobre o comportamento e o desempenho dos motoristas de veículos comerciais pesados com baixa concentração de álcool no sangue, indicada pelo índice *Blood Alcohol Concentration* (BAC) com valor inferior à 0,055 %, através da simulação da condução de um veículo pesado em uma pista simples (com duplo sentido de direção). Os resultados mostraram que mesmo em baixa concentração a presença do álcool no sangue prejudicou de forma sensível o nível de atenção e o desempenho dos motoristas durante a simulação.

HOWARD (1996) indicou que a melhoria da estabilidade direcional de veículos comerciais pesados pode reduzir a fadiga dos motoristas durante a sua condução, por reduzir a necessidade de intervenção do motorista no controle do veículo através das manobras de mudança de direção e freagem.

LLANERAS et al. (1996) realizaram estudos por simulações que mostraram existir uma relação entre a idade dos motoristas de veículos comerciais, as suas habilidades e o seu desempenho na condução dos mesmos com segurança nas manobras de freagem e mudança de direção.

KOPPA (1996) descreveu estudo empírico para obter os tempos de resposta para a aplicação dos freios de vários motoristas diante de situações de emergência

representadas em testes de campo. Foi observado que 95 % dos motoristas apresentaram tempos de resposta inferiores à 2,5 segundos, tempo este estabelecido pela AASHTO por questões de segurança no projeto de rodovias.

ROGERS et al. (1996) estudaram o desempenho de motoristas idosos de veículos comerciais e sugeriram que é possível melhorar as deficiências apresentadas por estes motoristas durante a condução do veículo através de treinamento adequado e de desenvolvimento de sistemas de alerta para os mesmos.

LUOMA et al. (1997) realizaram estudo experimental sobre o tempo de reação dos motoristas ao sinal de luz de freio do veículo que vai à frente quando este sinal aparece junto com a sinalização direcional do mesmo nas cores vermelha e amarela. Os resultados mostraram que os sinais de direção na cor amarelo produzem sensível diminuição no tempo de reação dos motoristas à sinalização da luz de freio quando comparado com a indicação de direção com os sinais na cor vermelha.

LEE et al. (1997a) conduziram estudos para avaliar o benefício da instalação de dispositivos de alerta sonoros e visuais para os motoristas quanto à presença de um veículo à frente, no sentido de estimular a antecipação da freagem pelos mesmos. Os resultados mostraram que tais dispositivos reduziram a ocorrência de colisões traseiras e a gravidade das mesmas, contribuindo significativamente para a segurança veicular.

HIDA (1997) estudou a relação entre a capacidade visual dos motoristas e a ocorrência de acidentes rodoviários. Os resultados deste estudo mostraram que os exames de acuidade visual exigidos para a obtenção da Carteira Nacional de Habilitação (CNH) no Brasil não garantem que o motorista possui capacidade suficiente para dirigir. HIDA (1997) ainda sugeriu a adoção de outros testes de acuidade visual, como a leitura de uma placa de sinalização a uma distância de 25 metros, pois as indicações das rodovias exigem uma acuidade visual maior que a verificada nos exames de consultório atualmente realizados para este fim.

HIDA (1997) também mostrou que a visibilidade nas rodovias incorpora fatores que se relacionam entre si de forma complexa, como o período do dia; a presença de chuva ou neblina; o ofuscamento por faróis de outros veículos; a velocidade do veículo; a fadiga e a ansiedade do motorista; a ingestão de bebidas

alcoólicas ou de drogas pela pessoa que dirige; a idade e a natureza sexual do motorista; a forma, a localização e a luminosidade das lanternas traseiras do veículo que trafega à frente; a forma construtiva, a sinalização e o estado de conservação das rodovias entre outros.

ARNOLD et al. (1997) pesquisaram a relação entre a carga horária de trabalho dos motoristas de veículos comerciais pesados e a fadiga dos mesmos. Neste estudo estatístico verificou-se que 40 % dos acidentes com veículos pesados ocorreram com motoristas que realizaram longas jornadas de trabalho acompanhadas de poucas horas de sono. Este trabalho sugere a elaboração de regulamentos para a duração da jornada de trabalho destes motoristas acompanhada de uma fiscalização adequada, para reduzir significativamente a quantidade de acidentes com veículos comerciais pesados conduzidos por motoristas com fadiga e sono.

FEYER et al. (1997) realizaram estudos sobre a fadiga nos motoristas de veículos pesados durante viagens longas (com mais de 4.500 km percorridos) na Austrália. Os resultados deste trabalho mostraram que a prática de colocar dois motoristas em revezamento e de realizar paradas noturnas para proporcionar uma quantidade de sono adequada aos motoristas é uma estratégia que reduz a fadiga dos motoristas e eleva a segurança durante a viagem.

MILOSEVIC (1997) descreveu estudos sobre a fadiga em motoristas de veículos comerciais com jornadas de trabalho em trecho urbano e rodoviário, incluindo a realização de testes psicológicos, fisiológicos e de exames médicos antes e após a jornada de trabalho dos motoristas. Os resultados apresentados mostraram que através de avaliação física e psicológica do motorista antes e após a jornada de trabalho é possível identificar a fadiga nos mesmos, o que pode auxiliar as empresas a planejar melhor as jornadas de trabalho para evitar a fadiga de seus motoristas.

THAKUR & WHITE (1997) descreveram uma forma de modelagem do comportamento de motoristas de veículos comerciais e as simulações computacionais para realizar a análise das quatro fases que ocorrem durante a freagem, que são a percepção, a decisão, a execução do processo de freagem pelo motorista e a resposta do sistema de freios, cada uma com tempo próprio de duração. Este trabalho mostra que além das características da situação de trânsito apresentada ao motorista, a sua

habilidade e o seu estado físico influenciam no seu desempenho durante a freagem. Uma das conclusões deste trabalho é que quanto maior a jornada de trabalho do motorista (maior a quantidade de tempo do motorista dirigindo) maiores são os riscos de ocorrerem acidentes devido à fadiga do mesmo.

PETERS (1997) realçou a necessidade de treinamento dos motoristas para se adaptarem ao comportamento de veículos equipados com sistema *Antilock Brake System* (ABS) durante a freagem e para conduzirem manobras evasivas em situações de emergência no sentido de elevar a segurança veicular.

YANG et al. (1997a) estudaram as características de controle de motoristas de veículos articulados pesados através do desenvolvimento de modelo matemático para simular e minimizar os erros de orientação do motorista numa trajetória, durante as manobras de freagem, mudança de direção e aceleração do veículo. Os resultados da simulação mostraram que o modelo desenvolvido (validado por comparações teórico-experimentais) pode auxiliar o motorista nas suas ações e melhorar o controle direcional do veículo, minimizando as acelerações laterais do mesmo durante tais manobras realizadas pelo motorista.

YANG et al. (1997b) estudaram o comportamento direcional de motoristas de veículos articulados pesados através de modelo matemático que incorpora as características do veículo e do motorista, incluindo os atrasos cometidos por este nas manobras de controle direcional do veículo, como a freagem e a mudança de direção.

GRUENING et al. (1998) revelaram que os avanços recentes na capacidade dos computadores, na computação gráfica e nos sistemas de realidade virtual podem proporcionar uma sensível melhoria no desenvolvimento dos simuladores para o sistema motorista-veículo. GRUENING et al. (1998) ainda avaliaram o futuro da simulação computacional como um meio para pesquisar em laboratório os fatores humanos envolvidos na condução de um veículo pelo motorista.

2.2.2 Aspectos ambientais

Os aspectos ambientais estão relacionados com os estados climáticos e temporais durante a utilização do veículo, por exemplo, a presença de chuva ou de neblina, o período no qual o veículo trafega (diurno ou noturno) e outros.

Estes aspectos podem influenciar os aspectos humanos, como a visibilidade e o estado de alerta do motorista (relacionados com o período do dia, a presença de chuva ou neblina entre outros).

JOHNSON (1973) realizou estudos estatísticos sobre a ocorrência de acidentes no período noturno ou na presença de neblina. Os resultados deste estudo mostraram que os acidentes no período noturno podem ocorrer em quantidade até dez vezes maior que os acidentes durante a neblina e que em ambos os casos a condição de tráfego intenso pode elevar a probabilidade de ocorrer acidentes.

SCOTT (1980) estudou a relação entre a iluminação das rodovias e a ocorrência de acidentes, que está também relacionada com a visibilidade dos motoristas. Este estudo mostra que a iluminação adequada das rodovias pode reduzir a ocorrência de acidentes em até 35 %.

JOVANIS & CHANG (1986) estudaram a relação entre a ocorrência de acidentes e a distância percorrida pelos veículos em condições ambientais favoráveis e desfavoráveis. Os resultados do estudo estatístico de JOVANIS & CHANG (1986) mostraram que as condições ambientais exerceram maior influência nos acidentes com automóveis que com veículos comerciais. Mas que tanto para automóveis quanto para veículos comerciais quanto maior é a distância percorrida em uma mesma jornada maior é a probabilidade de ocorrer acidentes. LOCOCO et al. (1990) desenvolveram estudos sobre a visibilidade da sinalização longitudinal das rodovias por motoristas jovens e idosos no período noturno. Os resultados deste estudo mostraram que os motoristas jovens possuem maior capacidade de visualização da sinalização das rodovias e que para melhorar esta capacidade para os motoristas idosos seria necessário elevar o contraste e as dimensões dos caracteres nestas sinalizações.

OLSON (1992) estudou a redução da capacidade visual de motoristas idosos no período noturno e sugeriu formas de melhorar a segurança dos mesmos nas

rodovias, como elevar a visibilidade da sinalização nas rodovias e dos veículos articulados pesados, no sentido de reduzir a ocorrência de acidentes relacionados com estes fatores.

BOTTO (1995) realizou estudos sobre acidentes envolvendo veículos comerciais pesados na França que revelaram que o tombamento é o tipo de acidente mais freqüente com estes veículos e que 70 % dos acidentes envolvendo veículos comerciais pesados ocorreram durante a madrugada, sendo que o motorista estar dormindo ao volante foi apontada como a causa mais provável destes acidentes.

GRAHAM et al. (1997) estudaram as características de luminosidade e capacidade reflexiva da sinalização vertical de rodovias que são necessárias para melhorar a visualização desta por motoristas idosos durante o período noturno.

2.2.3 Aspectos legais

Os aspectos legais referem-se aos requisitos técnicos legais para o sistema de freios do veículo, quanto às suas características construtivas, quanto ao seu desempenho e a sua segurança na freagem, quanto à preservação ambiental relacionada com os materiais e processos de fabricação dos freios e outros.

Os requisitos técnicos legais dependem da regulamentação adotada pelo país onde o veículo é produzido ou comercializado. Além disso, esta regulamentação pode ser modificada com o tempo, adquirindo novas exigências ambientais, de segurança, de construção e de desempenho dos freios entre outras.

No Brasil, a legislação para sistema de freios de veículos é elaborada pelo Comitê Brasileiro de Automóveis, Caminhões, Tratores, Veículos Similares e Autopeças (CB-5), ligado à Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Atualmente, a aplicação da legislação sobre sistemas de freios de veículos é definida pela resolução do CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (CONTRAM) de número 777, de 17 de dezembro de 1993, sendo que o CONTRAM está vinculado ao Ministério da Justiça do Brasil.

Basicamente, a resolução CONTRAM n.777 (1993) estabelece que as normas NB1253, NB1254, NB1255, MB3160 e MB3161 elaboradas pela ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) devem ser adotadas como métodos de ensaio e requisitos mínimos para a avaliação do sistema de freios dos veículos automotores no Brasil.

A ABNT (1990a) trata do desempenho de sistemas de freio para veículos rodoviários, a ABNT (1990b) descreve as prescrições relativas às fontes e aos reservatórios de energia, a ABNT (1990c) determina as prescrições relativas às condições específicas para o freio de mola acumuladora de energia (câmara combinada de freio), a ABNT (1990d) descreve o método de ensaio de desempenho do sistema de freio para veículos rodoviários e a ABNT (1990e) trata sobre a medição do tempo de resposta para veículos equipados com freio pneumático.

Estas normas brasileiras estão baseadas na regulamentação europeia ECE-R13 (1990) contemplando os requisitos contidos nos seus Anexos 1 a 9 inclusive.

Existem diversas regulamentações sobre sistemas de freios de veículos no mundo, entre as principais estão as normas elaboradas pela Comissão Econômica para a Europa que são a ECE-R13 (1990) e a ECE-R13 *Harmonized* (ECE-R13H) de 1996 para veículos de passeio, a norma da *European Economic Community* (EEC) na forma da diretiva EEC 71/320 (1993), as normas norte-americanas *Federal Motor Vehicle Safety Standards* (FMVSS) sobre freios hidráulicos FMVSS105 (1998), sobre freios pneumáticos FMVSS 121 (1995) e sobre veículos de passeio FMVSS135 (1997) entre outras.

É claro que a existência de várias regulamentações sobre freios de veículos somente poderia levar as mais diversas considerações, que foram colocadas em inúmeros estudos contendo comparações entre as regulamentações, análises do impacto da adoção destas regulamentações e outros assuntos. Neste trabalho serão apresentados apenas alguns destes estudos, com ênfase naqueles relacionados com veículos comerciais.

Pode-se dizer que o trabalho de BODE & MERZ (1955) é uma das primeiras tentativas de se definir regulamentação para o sistema de freios dos veículos comerciais. BODE & MERZ (1955) desenvolveram estudos sobre a elaboração de

procedimentos para a realização de testes de campo de freagem com veículos articulados pesados. O estudo de BODE & MERZ (1955) tinha interesse predominante na definição da instrumentação necessária e adequada para a condução de tais testes e na metodologia a ser adotada para os mesmos, com atenção especial na prevenção da ocorrência de bloqueio total ou travamento das rodas de qualquer eixo veicular no processo de freagem.

Nos meados dos anos 60, surgem os procedimentos da *Society of Automotive Engineers* (SAE) para testes de sistemas de freio de veículos comerciais, que se tornam tema de vários trabalhos, como ROBBINS (1962) que fez uma ampla descrição do procedimento de teste dos freios de veículos comerciais SAE J786.

BIRGE (1968) também fez uma revisão dos procedimentos estabelecidos pela SAE sobre a aprovação de guarnições de freio, o desempenho dos freios com e sem falha dos mesmos, a durabilidade e a integridade estrutural dos componentes do sistema de freio e os testes de avaliação do desempenho dos veículos comerciais pesados na freagem.

TUEGEL (1968) comparou os procedimentos SAE J992 (1968) e SAE J786 (1962) quanto à instrumentação dos testes de freio, checagem de pré-assentamento e realização de assentamento dos freios, recuperação dos freios após contaminação por água e requisitos de eficiência dos freios. Ressaltando que a regulamentação SAE J992 (1968) já estabelecia o desempenho do freio de serviço na freagem, com requisitos de espaço percorrido e de estabilidade do veículo na freagem e de força de aplicação dos freios.

ALDEN (1973) relatou sobre o impacto da adoção das regulamentações da Comunidade Econômica Européia sobre veículos comerciais no Reino Unido, especialmente as relacionadas com iluminação, sinalização, pesos e dimensões veiculares e com o desempenho destes veículos na freagem. Este trabalho sugeriu que a adoção de somente uma regulamentação internacional seria uma tendência no futuro e uma importante forma de eliminar barreiras comerciais entre os países.

TURVILL (1973) expôs o ponto de vista dos fabricantes de veículos comerciais pesados norte-americanos com relação à introdução de sistemas ABS nos freios destes veículos, incluindo uma análise comparativa entre os sistemas ABS

disponíveis no mercado e uma avaliação sobre a aplicação dos requisitos da regulamentação FMVSS 121.

BUELER & FALK (1973) descreveram um método prático para selecionar os freios a serem instalados em veículos comerciais pesados norte-americanos de vários modelos e dimensões, com a quantidade mínima de opções de sistemas de freios e levando em conta os requisitos da regulamentação FMVSS 121. Tal método era baseado nos princípios newtonianos para fazer a seleção dos freios dos veículos comerciais pesados, que pode ser realizado por ensaios em dinamômetro.

OPPENHEIMER (1974) realizou estudos sobre as regulamentações mundiais, incluindo uma extensa e detalhada análise de seus requisitos e ainda descreve sobre a elaboração da regulamentação ECE R13 européia.

LEWIS (1974) descreveu sobre vários problemas enfrentados pelos fabricantes de veículos comerciais com a introdução da legislação norte-americana FMVSS 121, entre os quais destacam-se os problemas com componentes dos freios, com compatibilidade de veículos pesados articulados e com sistemas de anti-bloqueio, sendo apresentadas algumas soluções possíveis para tais problemas.

Como fato relevante e histórico, pode-se destacar que os fabricantes de veículos comerciais norte-americanos conseguiram impedir a aplicação dos requisitos de desempenho na freagem e outros previstos na FMVSS 121 através de ação legal em 1975, sendo que somente em 1996 a regulamentação FMVSS 121 voltou a conter os requisitos de desempenho na freagem e passou a incluir requisitos sobre sistemas de anti-bloqueio automáticos como o ABS.

GILLESPIE (1976a) indicou a necessidade da elevação da capacidade dos freios das rodas do eixo dianteiro de veículos comerciais pesados norte-americanos, devido às exigências de desempenho na freagem estabelecidas pela regulamentação FMVSS 121 para os veículos comerciais com freio pneumático norte-americanos. GILLESPIE (1976a) estudou ainda a influência das características dos pneumáticos, do sistema de direção e do balanceamento dos freios dos veículos comerciais pesados no desempenho e na estabilidade dos mesmos na freagem, destacando a importância da freagem do eixo dianteiro dos veículos.

GILLESPIE (1976a) também mostrou através de simulação computacional que a dirigibilidade de veículos pesados na freagem é influenciada pelas características dos pneumáticos, pela transferência de peso dinâmico entre os eixos veiculares, pelo balanceamento inadequado dos freios entre outros fatores.

AOKI (1978) descreveu sobre conceitos e tópicos contemplados pela regulamentação japonesa elaborada pela *Japan Automobile Standard Organization* (JASO) para o sistema de freios dos veículos comerciais no Japão.

UFFELMANN (1989) mostrou que a regulamentação europeia EEC 71/320 sobre sistemas de freios de veículos pode influenciar o projeto de tais sistemas para veículos comerciais, através do estabelecimento de requisitos sobre o balanceamento dos freios, sobre o desempenho e a compatibilidade dos veículos na freagem e sobre as características técnicas dos sistemas de freios. Para ilustrar este fato, UFFELMANN (1989) mostrou o comportamento direcional e o desempenho de veículos comerciais pesados europeus na freagem em trecho retilíneo e curvilíneo.

JARVIS (1989) descreveu sobre um estudo realizado para avaliar o desempenho na freagem e a compatibilidade de veículos articulados pesados na Austrália, no sentido de fornecer subsídios para o aperfeiçoamento da regulamentação australiana sobre sistemas de freios de veículos pesados.

RADLINSKI (1989) expôs que as diferenças de conceito e de requisitos entre as legislações europeia ECE-R13 e norte-americana FMVSS 121 podem levar a diferenças significativas no desenvolvimento de veículos comerciais pesados europeu e norte-americano, com impacto ainda na segurança e no desempenho destes veículos na freagem. Este fato é mostrado através de uma comparação de desempenho na freagem entre os veículos combinados de cinco eixos tipicamente norte-americano e europeu, com características de dimensão e peso similares.

RYUKO & KUBOTA (1989) discorreram sobre a regulamentação japonesa para sistemas de freios de veículos pesados e sobre a tendência da internacionalização e harmonização das regulamentações de sistemas de freios de veículos comerciais.

LEE-GOSSELIN et al. (1990) estudaram a influência da obrigatoriedade legal de instalação de freios nas rodas do eixo dianteiro dos veículos pesados norte-americanos na quantidade de acidentes envolvendo tais veículos através de

simulações. Os resultados deste trabalho indicaram que esta exigência legal pode contribuir significativamente na redução da quantidade de acidentes envolvendo veículos pesados nas rodovias norte-americanas.

MEIERKORT & THOMS (1990) analisaram a influência da instalação de freios a disco nos eixos do veículo-trator ou apenas no eixo dianteiro de veículos pesados no desempenho dos mesmos na freagem. Este trabalho mostrou ainda que os veículos articulados pesados com veículo-trator equipado com freios a disco podem satisfazer os requisitos de compatibilidade da legislação européia ECE-R13 com maior facilidade.

MALCOLM (1991) revelou a grande variedade de veículos comerciais utilizados na Nova Zelândia e a conseqüente existência de diferenças consideráveis de desempenho destes veículos na freagem. Tal fato levou a elaboração de uma regulamentação sobre sistemas de freios de veículos comerciais com a finalidade de uniformizar os critérios de desempenho na freagem para os veículos que trafegam naquele país. O *New Zealand Heavy Vehicle Brake Code* (NZHVBC) introduziu vários requisitos sem precedentes para os sistemas de freio dos veículos combinados pesados, como a redução dos tempos de resposta dos freios dos mesmos, no sentido de elevar a compatibilidade entre tais veículos.

STRAUB (1992) sugeriu a necessidade de expandir a regulamentação ECE-R13 para que a mesma pudesse acompanhar os avanços na tecnologia do freio eletrônico, nos seus diversos graus de complexidade. STRAUB (1992) também indicou a necessidade de garantir a compatibilidade entre veículo-trator e semi-reboque equipado com sistema de freio eletrônico.

TRANSPORT ENGINEER (1994a) destacou a importância de equilibrar os esforços de freagem no veículo articulado pesado durante a aplicação dos seus freios pneumáticos em baixas pressões de trabalho. Este trabalho considerou que em cerca de 90 % das vezes a freagem é realizada com pressão no sistema de freios inferior à 2 bar (200 kPa) e que em cerca de 60 % dos casos a freagem é realizada com pressão nos freios inferior à 1 bar (100 kPa).

Além disso, este trabalho mostrou que na aplicação dos freios do veículo-trator o contato entre as superfícies de atrito dos freios geralmente inicia-se com a

pressão no sistema de freios em torno de 1 bar (100 kPa), enquanto que freqüentemente nos semi-reboques observa-se o mesmo contato começa com pressão nos freios em torno de 0,5 bar (50 kPa).

Portanto, nas aplicações dos freios pneumáticos a baixas pressões de trabalho o freio do semi-reboque pode ser o mais solicitado, o que pode resultar em maiores temperaturas e desgastes no mesmo com a repetição deste processo durante o ciclo de trabalho deste freio.

Desta forma, com o tempo pode-se ter diferenças consideráveis entre a atuação dos freios do veículo-trator e do semi-reboque, o que pode reduzir a compatibilidade entre os mesmos, pois pode-se ter produção de esforços de freagem diferente em cada um. Logo, para melhorar a compatibilidade devem ser minimizadas as diferenças entre os tempos de resposta do veículo combinado.

Em estudos extensos realizados sobre o desempenho e a compatibilidade de veículos pesados articulados na Nova Zelândia e Austrália observou-se razoáveis diferenças de compatibilidade entre tais veículos, o que pode ser explicado pelo fato de nestes países serem utilizados veículos de várias procedências (Japão, Europa, Estados Unidos da América e outras).

Tal situação levou a Austrália e a Nova Zelândia a elaborarem suas próprias regulamentações sobre sistemas de freios para veículos comerciais, que incluem critérios mais exigentes para o desempenho e a compatibilidade de veículos combinados pesados e para o comportamento das guarnições de freio sem precedentes.

FERNANDES (1996) descreveu as características das regulamentações ECE-R13 e FMVSS 121 sobre sistemas de freios e realizou um estudo comparativo entre os seus requisitos. A comparação entre as regulamentações ECE-R13 e FMVSS 121 mostrou várias diferenças entre as mesmas, como a forma de elaboração, a classificação veicular, os requisitos técnicos construtivos e funcionais e os requisitos de desempenho e estabilidade na freagem entre outros.

Von GLASNER et al. (1997) expôs que a segurança ativa de veículos combinados pesados pode ser otimizada através do estudo das interações entre veículo-trator e semi-reboque durante o processo de freagem. Este trabalho também

descreveu os requisitos da regulamentação ECE-R13 para a distribuição de forças de freagem em veículos combinados pesados e estuda a influência das características dos sistemas de freio no desempenho, no acoplamento e no comportamento dinâmico destes veículos no processo de freagem.

FERNANDES et al. (1997a) discorreu sobre os requisitos da regulamentação ECE R13 sobre freios e mostrou os resultados de desempenho de veículo rodoviário articulado pesado na freagem obtidos por programa computacional e em testes de campo, também verificando se este veículo satisfaz os requisitos da ECE-R13. FERNANDES et al. (1997a) destacou ainda a concepção da ECE-R13, que inclui o conceito de elevar a eficiência e a segurança dos veículos na freagem, percebido através dos requisitos de desempenho, de distribuição de forças entre os eixos veiculares e de compatibilidade de veículos combinados contidos na mesma, que promovem o balanceamento dinâmico das forças de freagem entre os eixos do veículo.

O balanceamento dinâmico das forças de freagem entre os eixos veiculares pode ser entendido como o estabelecimento de uma distribuição de forças de freagem entre os eixos do veículo, no sentido de acompanhar a distribuição de forças normais nos mesmos durante a freagem, o que melhora o aproveitamento da aderência disponível entre pneumático e pavimento para frear, ou seja, eleva a eficiência da freagem e a segurança veicular.

Como este trabalho trata da freagem de veículos articulados pesados (que são equipados com freio pneumático) e os testes de campo para a validação do modelo matemático desenvolvido para a análise da freagem destes veículos foram baseados na ECE-R13 (1990) (na qual a legislação brasileira sobre os freios destes veículos está baseada), convém ser realizado a seguir um breve resumo sobre a regulamentação européia ECE-R13 e seus requisitos.

A *Economic Commission for Europe* (ECE) é uma organização das Nações Unidas, com sede em Genebra, que desde 1958 é responsável pela elaboração de regulamentações que visam promover o livre comércio na Europa, facilitar o estabelecimento de relações comerciais e eliminar barreiras comerciais entre os países.

A ECE-R13 é uma das regulamentações elaboradas por esta organização e teve sua primeira edição em 1970 e sua mais recente atualização é de 1997. Neste trabalho esta regulamentação é referenciada como ECE-R13 (1990) por ser esta a versão na qual a legislação brasileira está baseada. Esta regulamentação estabelece requisitos para a aprovação de veículos quanto à freagem, sendo os veículos classificados em diferentes categorias.

A Categoria M contempla os veículos motorizados com pelo menos quatro rodas e que são utilizados para o transporte de passageiros (onde estão os automóveis e ônibus), a Categoria N engloba os veículos motorizados que tem pelo menos quatro rodas e que são usados para o transporte de mercadorias e a Categoria O inclui os reboques e semi-reboques.

Como informação complementar, a ECE-R13 não abrange os veículos que atingem velocidade máxima inferior a 25 km/h, os reboques que não podem ser acoplados a veículos motorizados com velocidade máxima superior a 25 km/h e os veículos equipados para motoristas inválidos.

A ECE-R13 é elaborada pelo grupo de trabalho *Working Party 29* (WP29) indicado pelos Comitês Governamentais. O WP29 delega a preparação e o desenvolvimento de propostas técnicas e emendas para diversos *Meetings of Experts*, como o *Groupe de Rapporteurs en Matière de Roulement et de Freinage* (GRRF) que trata de freios e outros sistemas veiculares. Representantes das indústrias automotivas e de organizações de normas internacionais podem colaborar na elaboração da regulamentação, mas a aprovação da regulamentação é exclusiva do WP29.

Para que um veículo ou componente esteja de acordo com a ECE-R13 é necessário fazer o procedimento de certificação, que é realizado por *Technical Services* (que são serviços técnicos autorizados a fazerem a certificação do veículo ou componente). Se o veículo ou componente é aprovado nestes testes, então o certificado de aprovação é concedido pelo governo.

O esquema descrito anteriormente, chamado *type-approval*, torna o fabricante responsável por cumprir os requisitos legais de construção e desempenho do veículo

ou componente e, ao mesmo tempo, compromete as autoridades a confirmar se a interpretação e aplicação da regulamentação no veículo ou componente está satisfeita.

Em alguns países como o Brasil admite-se um processo de certificação, onde a verificação do cumprimento das exigências legais é realizada pelo próprio fabricante, que posteriormente obtém o reconhecimento e certificação do governo.

A certificação também compele o fabricante a manter controle de qualidade adequado para verificar que todos veículos e componentes fabricados na linha de produção estejam conforme o *type-approval*, o que é chamado de Conformidade de Produção.

Quaisquer modificações introduzidas no veículo ou componente, que podem afetar o projeto, o desempenho e a confiabilidade do produto já aprovado, devem ser notificadas as autoridades de aprovação, que podem indicar uma nova verificação parcial ou total do produto segundo as exigências da regulamentação. Isto pode tornar a introdução de modificações nos veículos ou componentes mais lenta e complexa.

As autoridades tem o direito de inspecionar a produção periodicamente e checar se os veículos ou componentes estão em Conformidade de Produção, caso não estejam podem ser aplicadas penalidades por não Conformidade de Produção.

A concepção da ECE-R13 permite que a aprovação e o reconhecimento sejam recíprocos, ou seja, a aprovação de um veículo em um país que adota a ECE-R13 garante o reconhecimento em outros países que também utilizam a ECE-R13. Isto pode facilitar a existência de regulamentação internacionalmente aceita e comum a vários países, além de ajudar a eliminar as barreiras comerciais entre estes.

O veículo combinado exemplo que será utilizado neste trabalho é composto pelo veículo trator LS 1935 (da Mercedes-Benz do Brasil) acoplado ao semi-reboque FNV-CARGA SECA (da FNV do Brasil), estes veículos pertencem respectivamente as categorias N₃ e O₄ conforme a ECE-R13. Portanto, neste trabalho serão enfocados alguns requisitos gerais e principalmente os requisitos para os veículos das categorias N e O.

A categoria N₃ considera os veículos motorizados com quatro rodas ou mais, utilizados para o transporte de mercadorias e com a massa máxima maior que doze

toneladas. Na categoria O₄ estão os reboques e semi-reboques com massa máxima maior que dez toneladas.

A ECE-R13 estabelece diversos requisitos sobre os materiais dos freios e sobre aspectos construtivos e funcionais do freio de serviço, do freio secundário e do freio de estacionamento dos veículos, além de requisitos de desempenho na freagem para o veículo combinado.

Entre os requisitos para materiais dos freios destaca-se o que estabelece que os materiais das guarnições dos freios não devem conter asbesto, que é prejudicial para o meio ambiente.

Quanto aos freios de serviço, secundário e de estacionamento destacam-se os seguintes requisitos construtivos e funcionais.

O freio de serviço deve possuir ação graduada em todas as rodas que permita a freagem do veículo com segurança, rapidez e eficácia com o mesmo em qualquer velocidade, em qualquer condição de carga e percorrendo a lanteira ou declive. Este freio deve ter controle independente do freio de estacionamento, possuir ação residual de freagem (mesmo após falha) com continuidade de funcionamento indefinida, apresentar circuitos de freio duplos nos veículos com freio a ar comprimido e circuitos de freio separados para o veículo trator e reboque ou semi-reboque (que podem ter componentes em comum com o freio secundário e de estacionamento) e ser do tipo contínuo ou semi-contínuo nos veículos das categorias O₃ e O₄.

O freio secundário deve apresentar ação graduada nas rodas em que atuar, deve ter continuidade de funcionamento indefinida, deve garantir 50 % do desempenho do freio de serviço em caso de falha deste, pode ter o mesmo controle do freio de serviço e não pode coincidir com o freio de estacionamento.

O freio de estacionamento dos veículos deve possuir ação mantida mecanicamente, ser capaz de manter o veículo estacionado em a lanteira e declive dentro de certos limites de inclinação, permitir o seu acionamento com o veículo em movimento (quando os freios de serviço e secundário possuem o mesmo controle) e pode permitir o acionamento do freio de estacionamento do reboque ou semi-reboque de fora da cabina.

Com relação aos requisitos de desempenho na freagem destacam-se a seguir alguns destes descritos no Anexo 4 da ECE-R13, que trata dos testes de freagem e do desempenho dos sistemas de freio de serviço, secundário e de estacionamento.

Os critérios *Stopping Distance (SD)* e *Mean Fully Developed Deceleration (MFDD)* obtidos durante a freagem permitem avaliar o desempenho do veículo durante a freagem com a aplicação do freio de serviço ou com a aplicação do freio secundário.

A distância de freagem (SD) é o espaço percorrido pelo veículo desde a aplicação do sistema de freios pelo motorista até a parada total do veículo, com velocidade inicial no momento da aplicação dos freios não menor que 98 % da velocidade prescrita para o teste.

O parâmetro MFDD pode ser entendido como a desaceleração média atingida com relação a distância percorrida no intervalo das velocidades V_b e V_e , sendo obtido através da eq.(1):

$$MFDD = (V_b^2 - V_e^2) / (25,92 (S_e - S_b)) \quad (1)$$

Onde:

V_0 : velocidade inicial do veículo, km/h.

V_b : velocidade do veículo a 0,8 V_0 , km/h.

V_e : velocidade do veículo a 0,1 V_0 , km/h.

S_b : distância percorrida entre V_0 e V_b , m.

S_e : distância percorrida entre V_0 e V_e , m.

Na ECE-R13 existem vários requisitos para os freios de serviço, secundário e de estacionamento dos veículos das categorias N_3 e O_4 , as quais o LS 1935 da Mercedes-Benz do Brasil e o FNV.- CARGA SECA da FNV respectivamente pertencem.

Para veículos da categoria N_3 (como o veículo-trator LS 1935 da Mercedes-Benz do Brasil) a regulamentação ECE-R13 indica que durante a realização do teste *Type-O*, que é um teste de desempenho do veículo na freagem realizado com os

freios frios (com temperatura inferior à 100 graus Celsius), com o motor desengrenado e a velocidade inicial de 60 km/h (16,7 m/s) prescrita para o teste, o desempenho atingido pelo veículo com a aplicação do freio de serviço deve ser $SD \leq 36,7 \text{ m}$ e $MFDD \geq 5 \text{ m/s}^2$.

Sendo que o valor de MFDD é obtido a partir da eq.(1) e o valor de SD é definido pela eq.(2):

$$SD = 0,15 v + (v^2 / 130) \quad (2)$$

Onde:

v: velocidade inicial do veículo prescrita para o teste.

Este teste deve ser conduzido em trecho retilíneo e nivelado, em pista com boa aderência e quando a ação do vento não é capaz de afetar os resultados dos testes, além disso, os valores de desempenho deste teste devem ser alcançados sem o veículo apresentar bloqueio total das rodas, desvio de sua trajetória inicial e vibrações anormais.

A ECE-R13 estabelece que os veículos nos quais podem ser acoplados semi-reboques, o freio de estacionamento destes veículos deve ser capaz de manter o veículo combinado, na condição operacional carregado, estacionado em aclive ou declive com 12 % de inclinação.

Para os veículos da categoria O₄ equipados com freio pneumático (como é o semi-reboque FNV - CARGA SECA), a ECE-R13 determina que o freio de serviço deve proporcionar forças de freagem na periferia das rodas freadas de pelo menos 45 % da carga estática máxima nestas mesmas rodas, nas condições vazio e carregado, sem que a pressão na linha de fornecimento exceda 7 bar (700 kPa) e sem que a pressão na linha de controle exceda 6,5 bar (650 kPa) durante o teste.

A regulamentação ECE-R13 contém requisitos específicos de distribuição de forças de freagem e de compatibilidade entre veículos trator e reboques ou semi-reboques no Anexo 10. O conceito destes requisitos está baseado na dinâmica veicular durante o processo de freagem, que indica que quanto mais próximas

estiverem a distribuição de forças de freagem e a distribuição dos pesos dinâmicos ou distribuição de forças normais nos eixos, melhores serão o nível de desaceleração alcançado e o aproveitamento da adesão disponível entre pneumáticos e pista, o que colabora para obter a melhor eficiência durante a freagem.

No Anexo 10 da ECE-R13 encontram-se os requisitos para veículos com dois eixos veiculares como o LS 1935, onde em uma determinada faixa de desacelerações, para todas as condições de carregamento, as curvas de aderência utilizada pelo eixo dianteiro devem estar situadas acima das mesmas curvas para o eixo traseiro, com algumas exceções. Isto garante que o bloqueio total das rodas do eixo dianteiro ocorra antes que o bloqueio total das rodas do eixo traseiro, o que por razões de segurança e conforme mostrado por DORION et al. (1989) pode ser menos perigoso.

Para o veículo combinado existem critérios de compatibilidade que cada parte deve satisfazer. Segundo a ECE-R13 a compatibilidade para o veículo-trator e o semi-reboque está verificada se o veículo trator satisfaz o Diagrama 3 do Anexo 10 e o semi-reboque satisfaz o Diagrama 4A do mesmo Anexo. Estes diagramas estabelecem regiões nas quais a relação entre o quociente entre a força de freagem e o peso estático do veículo (Tr / Pr) e a pressão nos freios do mesmo deve estar.

Posteriormente, serão mostrados no Capítulo 5 deste trabalho a verificação de alguns destes requisitos para o veículo-trator LS 1935 acoplado ao semi-reboque FNV para o transporte de carga seca utilizado como exemplo.

2.3 Aspectos veiculares e operacionais

Os aspectos veiculares estão relacionados com as características técnicas do veículo, como as dimensões, o peso, a posição do centro de gravidade, a aplicação e outras, e com as características dos sistemas instalados nos veículos, como o sistema de freios, o sistema de direção, o motor, os pneumáticos, a suspensão e outros.

Estão incluídos entre os aspectos veiculares os estudos realizados sobre o desempenho e a estabilidade de veículos rodoviários pesados articulados.

Como aspectos operacionais entende-se a condição de operação do veículo, a condição do pavimento e o tipo de trecho rodoviário nos quais o veículo trafega, as condições de carregamento e a forma de distribuição do mesmo no veículo, as condições de manutenção veicular e outras.

Muitas vezes os aspectos veiculares estão interligados com os aspectos operacionais e ambos podem estar relacionados com a segurança veicular. Além disso, muitos estudos mesclam assuntos como o desempenho, a estabilidade e a segurança de veículos comerciais na freagem; a utilização de novos materiais, a forma construtiva e a aplicação de nova tecnologia no sistema de freio destes veículos e outros.

Neste sentido, a ordem cronológica foi escolhida para a apresentação da revisão bibliográfica realizada sobre tais aspectos. Desta forma, pode-se ter uma visão global do desenvolvimento dos estudos sobre os aspectos veiculares e operacionais, da relação destes com a segurança veicular e um breve histórico do desenvolvimento do conhecimento humano sobre tais aspectos.

Pode-se considerar que os estudos sobre os veículos começaram logo após a sua invenção. Segundo GILLESPIE (1992), a invenção do automóvel equipado com motor de combustão interna movido à gasolina ocorreu em 1886, durante trabalhos independentes dos alemães Karl Benz e Gottlieb Daimler.

Os veículos comerciais apareceriam logo após alguns anos. Em 1895, quando Karl Benz inventou o primeiro ônibus com motor movido à gasolina. Em 1896, Gottlieb Daimler inventou o primeiro caminhão também com motor movido à gasolina. Ainda no pioneirismo do desenvolvimento automotivo, Karl Benz inventou o primeiro caminhão com motor movido à diesel em 1923, sendo que esta motorização é utilizada na grande maioria dos veículos comerciais atuais.

Provavelmente, desde os primórdios da indústria automotiva devem ter sido realizados estudos sobre a freagem dos veículos comerciais, onde se incluem os veículos rodoviários pesados.

Conforme DUGOFF & MURPHY (1971), o trabalho realizado por ZIEGLER (1938) pode ser considerado o primeiro estudo teórico sobre a freagem de veículos rodoviários pesados. ZIEGLER (1938) investigou a estabilidade de um veículo-trator-

reboque durante o processo de freagem em trecho com declive, concluindo que a estabilidade e o desempenho do veículo em tal processo dependia da força total de freagem aplicada neste, sem incluir em seus estudos a importância da distribuição das forças de freagem entre os eixos do veículo rodoviário pesado.

VOTYPKA & HOWE (1941) foram os primeiros a descrever a importância do balanceamento dos freios de veículos combinados durante a freagem dos mesmos.

LORD (1942) estudou como o projeto de vários sistemas veiculares, incluindo o sistema de freios, podem afetar a segurança de veículos pesados. A preocupação com o balanceamento dos freios de veículos combinados pesados reapareceu nos estudos práticos de BODE (1951).

OETZEL (1952) realizou estudos teóricos sobre a freagem de veículo-trator-semi-reboque expondo que o balanceamento adequado dos freios e a redução no tempo de resposta do sistema de freios são fatores importantes para a redução da distância de freagem e para elevar a estabilidade do veículo combinado pesado. Neste trabalho, OETZEL (1952) concluiu que a prática comum na época de balancear os freios conforme os pesos estáticos nos eixos não era suficiente para garantir a estabilidade do conjunto, sem que a mesma fosse acompanhada de redução nos valores dos tempos de resposta dos freios e de maior proximidade entre estes mesmos valores para o veículo-trator e o semi-reboque.

MOLLER (1954) realizou estudos experimentais para avaliar várias formas de melhorar o balanceamento dos freios e o desempenho de veículos rodoviários pesados na freagem.

THOMAS et al. (1956) analisaram a instalação e o funcionamento de sistema de freio de emergência para veículos combinados pesados.

TABOREK (1957) indicou que o máximo coeficiente de adesão ocorre quando entre o pneumático e o pavimento existem simultaneamente rolamento e determinadas quantidades de escorregamento parcial entre ambos. Além disso, TABOREK (1957) mostrou através de observações do movimento das rodas deformáveis sobre o pavimento, que o coeficiente de adesão é afetado pelo tipo de pneumático, tipo de pavimento, pela velocidade da roda e pela parcela de escorregamento existente entre pneumáticos e pavimento.

LEUZZI (1957) analisou o projeto de configuração de eixos veiculares em tandem para o semi-reboque, incluindo os efeitos da transferência de peso entre o par de eixos, da rotação das rodas e da produção de forças e momentos associados com a geometria da suspensão neste tipo de configuração de eixos. LEUZZI (1957) notou que com os eixos do semi-reboque em tandem ocorria uma redução do peso dinâmico (também chamado de força normal sobre o eixo) no primeiro eixo do par e que poderia provocar o travamento precoce do mesmo durante a freagem, tal fato foi atribuído à ação do elemento balancim que é característico deste tipo de configuração de eixos.

ARD (1957) expôs que o sistema de freios de veículos rodoviários pesados para o transporte de madeira poderia possuir limitações para desenvolver o atrito suficiente para conter tais veículos na freagem.

BODE (1958) e MUELLER (1960) conduziram trabalhos experimentais para otimizar o balanceamento e o desempenho de veículos rodoviários pesados durante o processo de freagem.

FRITZSCHE (1959) e FRITZSCHE (1961) mostraram estudos que sugeriam a utilização de válvulas proporcionadoras nos freios como uma forma de elevar o desempenho e a estabilidade de veículos articulados pesados na freagem.

SUPER (1960) descreveu os aspectos econômicos relacionados com o projeto e a manutenção dos sistemas de freios de veículos comerciais pesados.

BURRIS & McLEAN (1961) estudaram as características e o desempenho dos freios de emergência que eram instalados nos veículos pesados.

BODE & GÖRGE (1961a) observaram que o comportamento dos veículos rodoviários articulados pesados durante a freagem era insatisfatório, pois os mesmos apresentavam a tendência de apresentar bloqueio total das rodas de seus eixos que poderia levar a instabilidade destes veículos na freagem, principalmente em pavimento molhado.

Ainda BODE & GÖRGE (1961a) demonstraram por meio de análise matemática que várias características de projeto e de carregamento do veículo poderiam afetar o comportamento de veículos rodoviários articulados pesados na freagem, como a distância entre os eixos e a posição do centro de gravidade de cada

parte do veículo, a posição do acoplamento entre veículo-trator e semi-reboque no primeiro (posição da quinta-roda no veículo-trator), a distribuição de peso e o balanceamento das forças de freagem entre os eixos do veículo combinado.

BODE & GÖRGE (1961b) realizaram estudos experimentais sobre a freagem de veículos rodoviários pesados incluindo a realização de testes de campo com estes veículos. Foram estudados veículos combinados com semi-reboque de um eixo e com dois eixos em tandem e analisados os tempos de resposta dos freios, a produção do esforço de freagem e a influência da proporcionalidade entre as forças de freagem do veículo combinado no desempenho do mesmo. Os resultados destes testes de campo corroboraram a análise teórica do estudo anterior descrita em BODE & GÖRGE (1961a).

STUMP (1962) e ROUSE (1963) elaboraram estudos sobre a utilização de válvulas proporcionadoras nos freios como uma maneira efetiva de aumentar o desempenho e a estabilidade de veículos articulados pesados na freagem.

HYKES (1963) considerava que a inclusão dos efeitos da suspensão dos reboques e semi-reboques na freagem dos veículos combinados trazia grandes dificuldades, pois era comum observar que tais eixos saltavam ou balançavam significativamente, impossibilitando uma análise correta do efeitos dos mesmos na freagem do veículo articulado pesado.

ELLIS (1963) realizou estudos sobre a estabilidade direcional de veículos articulados pesados com o desenvolvimento de modelo matemático que incorporava alguns efeitos não lineares no desempenho do veículo na freagem. A partir deste modelo matemático foi desenvolvido também um programa para simulação computacional de veículos articulados pesados na freagem.

HALES (1965) estudou a estabilidade lateral de veículos articulados pesados durante a freagem, mostrando que a mesma está relacionada com a segurança na utilização destes veículos.

MITSCHKE & RUNGE (1965) desenvolveram trabalhos que evidenciaram a necessidade de instalação de válvulas proporcionadoras, nos freios de veículos articulados pesados, para melhorar o desempenho e a estabilidade destes na freagem.

DEWANDRE (1965); EATON & SCHREUR (1966) e KOUTNY (1966) desenvolveram trabalhos experimentais sobre o balanceamento e o desempenho dos freios de veículos pesados, no sentido de otimizá-los ao mesmo tempo.

MORSE (1966) desenvolveu equações para analisar a transferência de peso dinâmico entre os eixos de um veículo-trator-semi-reboque na freagem. Neste estudo foram observadas as diferenças entre o comportamento deste veículo com balanceamento dos freios através da distribuição de pesos estáticos e através da distribuição de pesos dinâmicos entre os eixos veiculares para valores de desaceleração em torno de 30 por cento da aceleração da gravidade (valores escolhidos para poder representar melhor a freagem do veículo combinado em pavimento molhado, que segundo o autor, a estabilidade deste tipo de veículo pode trazer complicações).

MORSE (1966) também sugeriu algumas formas de melhorar o balanceamento e o desempenho do veículo combinado na freagem, que seriam a utilização de válvulas sensíveis ao carregamento efetuado neste veículo e a aplicação simultânea dos freios de todos os eixos deste veículo com valores de pressão mais próximos e uniformes.

HALES et al. (1966) e RUNGE (1967) indicaram que a utilização de válvulas proporcionadoras nos freios dos veículos articulados pesados poderia contribuir significativamente para a elevação do desempenho e da estabilidade dos mesmos na freagem.

Posteriormente, HALES (1967) desenvolveu estudos sobre *ride e handling* para veículos articulados pesados, com a elaboração de modelo matemático para analisar o desempenho e a estabilidade direcional de um veículo-trator-semi-reboque durante a freagem, sem considerar os efeitos não lineares no movimento do veículo.

As principais conclusões dos trabalhos de ELLIS (1963); HALES (1965) e HALES (1967) sobre a estabilidade direcional de um veículo-trator acoplado à um semi-reboque de três eixos foram:

1 - O bloqueio total das rodas do eixo traseiro do veículo-trator na freagem pode produzir uma instabilidade extremamente perigosa no veículo combinado, conhecida como *jackknife* do veículo-trator, na qual o veículo-trator gira em torno do

seu eixo dianteiro de forma rápida e sem controle, podendo causar acidentes graves com o veículo.

2 - O bloqueio total das rodas dos eixos do semi-reboque na freagem também pode produzir uma instabilidade perigosa no veículo combinado, chamada de *jackknife* do semi-reboque, sendo que o semi-reboque gira em torno da quinta-roda num movimento rápido, porém mais controlável que o *jackknife* do veículo-trator, pelo fato do giro do semi-reboque em torno da quinta-roda se desenvolver com menor velocidade angular.

3 - O bloqueio total das rodas do eixo dianteiro do veículo-trator pode levar a perda de dirigibilidade do veículo combinado pesado, pois com o travamento destas rodas os pneumáticos das mesmas não são mais capazes de suportar esforços laterais e não respondem mais à mudança de direção introduzida pelo motorista. Mas com a retirada da aplicação dos freios do veículo combinado pesado pode-se retomar o controle direcional do mesmo rapidamente.

Nos anos sessenta surgiram estudos sobre o desempenho e a estabilidade de veículos rodoviários articulados pesados que utilizavam os recursos computacionais disponíveis na época. Desta forma, o desenvolvimento do sistema de freios e de outros sistemas veiculares pôde se tornar mais rápido, sendo favorecido pelo recurso da simulação computacional que é utilizado até os dias atuais.

NOON (1966) desenvolveu modelo matemático acompanhado de respectiva simulação computacional do sistema de freios de veículos rodoviários pesados, num trabalho que incluiu ainda os efeitos térmicos na freagem. Neste trabalho, era possível a introdução de algumas variações em certos parâmetros importantes na análise da freagem dos veículos combinados, como a pressão no sistema de freios, os tempos de resposta dos freios, o coeficiente de atrito das guarnições e a taxa de transferência de calor nos freios. Assim, era possível a simulação computacional de um sistema de freios conhecido ou de um projeto para o futuro. Mas, os estudos de NOON (1966) não consideravam os efeitos da suspensão do veículo na freagem.

NORTH & OLIVER (1967) enfatizaram novamente em seus estudos a importância do tempo de resposta dos freios destacado no trabalho de OETZEL (1952). NORTH & OLIVER (1967) elaboraram um modelo matemático e decorrente

programa computacional para determinar como se procedia a transferência de peso dinâmico entre os eixos de veículos articulados pesados, nas condições de carregamento vazio e carregado, ainda com a possibilidade de introduzir a força de freagem no veículo nas formas de entrada degrau e exponencial.

No trabalho de NORTH & OLIVER (1967), o modelo matemático desenvolvido e a correspondente simulação computacional não consideravam os efeitos da suspensão e da inércia rotacional das rodas do veículo articulado pesado na freagem.

As principais conclusões dos estudos de NORTH & OLIVER (1967) foram que os atrasos no tempo de resposta dos freios poderiam elevar a possibilidade de travamento total do eixo traseiro do veículo-trator na freagem do veículo combinado, caso válvulas proporcionadoras não fossem instaladas em tal eixo; a instalação de válvulas proporcionadoras no eixo traseiro do veículo-trator poderia ser uma forma efetiva de reduzir a possibilidade de bloqueio total das rodas deste eixo; e que o travamento das rodas de qualquer um dos eixos veiculares era mais provável de ocorrer caso a força de freagem fosse introduzida como uma entrada degrau (que poderia representar uma freagem brusca do veículo).

Trabalhos experimentais sobre a redução nos tempos de resposta dos freios dos eixos veiculares e sobre a sincronização da aplicação dos mesmos foram realizados por UNDERHILL (1967) e WILSON (1967).

CLAR GUEVARA (1968) realizou testes de campo sobre a influência dos tempos de resposta dos freios na freagem de um veículo articulado pesado.

NELSON & FITCH (1968) desenvolveram estudos experimentais sobre a integridade estrutural e sobre o desempenho e a estabilidade na freagem dos veículos articulados pesados longos, constituídos por duas ou três unidades articuladas. Após serem conduzidos os testes de campo de freagem com estes veículos em pavimento seco e molhado, conclui-se que os mesmos apresentavam níveis de desempenho e de estabilidade comparáveis aos mesmos níveis obtidos por veículos articulados pesados de menor comprimento, desde que os freios dos veículos articulados pesados longos recebessem a manutenção adequada.

O programa de testes de campo de NELSON & FITCH (1968) incluíram testes de integridade estrutural, de tempo de atuação e liberação dos freios, de balanceamento do momento de freagem, de proporcionalidade nos freios, de estabilidade direcional e de desempenho na freagem (com a obtenção de parâmetros como a distância de freagem).

SCHMID (1967) analisou a estabilidade direcional de veículos articulados pesados na freagem com especial interesse na ocorrência de *jackknife* durante a freagem, destacando a importância da capacidade dos pneumáticos de suportar esforços laterais e do balanceamento do sistema de freios destes veículos na ocorrência do *jackknife*. Sugeriu ainda que a utilização de um dispositivo capaz de limitar o giro do semi-reboque em torno da quinta-roda e que o balanceamento dos freios do veículo próximo da distribuição de pesos dinâmicos entre os eixos veiculares podem melhorar significativamente o desempenho e a estabilidade do veículo-trator-semi-reboque na freagem.

NEWCOMB & SPURR (1968) destacaram a importância do balanceamento dos freios nos seus estudos experimentais de freagem de veículos rodoviários pesados.

WOLF (1968) realizou uma revisão sobre o conhecimento das causas mais prováveis dos acidentes relacionados com os veículos comerciais norte-americanos, incluindo o funcionamento do sistema de freios destes veículos.

KIBBEE (1969) realizou estudos experimentais sobre a freagem de veículos pesados num trabalho comparativo entre um veículo-trator-semi-reboque com cinco eixos no total e um veículo articulado pesado longo, constituído por um veículo-trator e dois semi-reboques acoplados em seqüência. Neste trabalho foram realizados testes de campo de freagem em trecho retilíneo, em pavimento seco e molhado e a várias velocidades iniciais.

Os resultados destes testes de campo de freagem mostraram valores de desempenho equivalentes para os dois veículos, desde que fossem observados o ajuste de folga, a manutenção e o balanceamento adequado dos freios de ambos veículos.

LUECK et al. (1969) desenvolveram estudos sobre a utilização de válvulas proporcionadoras no sistema de freios para prevenir o bloqueio total das rodas de

qualquer um dos eixos de veículos articulados pesados durante o processo de freagem.

DENHOLM et al. (1970) sugeriram a instalação de válvulas proporcionadoras sensíveis ao carregamento nos freios das rodas dos eixos do semi-reboque e do eixo traseiro do veículo-trator como forma de otimizar o desempenho do veículo articulado pesado na freagem, mantendo uma boa relação entre o custo e o benefício na definição do sistema de freios, sem aumentar de forma considerável a sua complexidade.

SVENSON (1970) realizou estudos sobre o desempenho na freagem de veículos pesados quando o sistema de freios pneumático é aplicado com valores reduzidos de pressão. Neste trabalho, foi considerado que esta condição de aplicação dos freios era importante para determinar a vida útil das guarnições dos freios, porque supunha-se que tal condição ocorria na grande maioria dos processos de freagem do veículo combinado.

NELSON (1970) também desenvolveu um trabalho de avaliação do desempenho na freagem de veículos articulados pesados, equipados somente com freios a tambor com acionamento por came “S”, somente com freios a tambor com acionamento por cunha e com uma combinação destas duas formas de acionamento em um mesmo veículo, quando o sistema de freios pneumático atua com baixos valores de pressão.

Após a realização de comparações entre os resultados do desempenho na freagem do veículo combinado e das temperaturas atingidas nos freios das rodas dos eixos veiculares, NELSON (1970) sugeriu que os freios a tambor com acionamento por came “S” seriam os mais indicados para os freios do eixo de tração do veículo-trator. NELSON (1970) também recomendou que fossem instaladas válvulas reguladoras nos eixos do semi-reboque, para aproximar os valores de pressão de atuação de todos os eixos veiculares, no sentido de melhorar o desempenho do veículo combinado na freagem.

A aplicação dos freios pode afetar a estabilidade direcional de qualquer veículo equipado com rodas com pneumáticos. Este fato pode ser entendido através da influência do escorregamento longitudinal dos pneumáticos nas forças laterais

produzidas pelos mesmos. Segundo FANCHER et al. (1970), quando ocorre o bloqueio total das rodas de um veículo na freagem, os pneumáticos perdem a capacidade de suportar esforços laterais.

Portanto, para analisar adequadamente a estabilidade direcional de um veículo freando é necessário considerar o complexo fenômeno que ocorre na produção de forças longitudinais e laterais nos pneumáticos e quais parâmetros podem modificar a relação entre estas forças.

DUGOFF et al. (1970) analisaram as propriedades dos pneumáticos e a influência das mesmas no desempenho de veículos pesados na freagem. No trabalho de DUGOFF et al. (1970) foi desenvolvida uma base teórica, confirmada experimentalmente, sobre os parâmetros que influenciam na relação entre pneumático e pavimento e que interferem na dinâmica veicular.

SHERARD (1971) destacou que as simulações computacionais nem sempre correspondiam a operação real dos veículos articulados pesados e que deveriam ser realizados esforços no sentido de melhorar a compatibilidade destes veículos na freagem.

LIMPERT (1971) estudou a distribuição de força de freagem em um veículo-trator-semi-reboque, estabelecendo o balanceamento ótimo das forças de freagem entre os eixos do veículo combinado a partir do critério de aderência utilizada pelas rodas dos eixos na freagem. Este estudo mostrou ainda que os veículos analisados alcançavam valores de eficiência na freagem em torno de 60 %, mas que estes valores poderiam ser elevados para 75 % através de balanceamento adequado dos freios, que poderia ser feito com maior participação do eixo dianteiro do veículo-trator na freagem e com menor transferência de peso entre os eixos do semi-reboque em tandem na freagem.

LIMPERT (1971) revelou também que para elevar a eficiência na freagem seria necessária a instalação de válvulas proporcionadoras sensíveis à carga no veículo. No estudo de LIMPERT (1971) percebeu-se claramente que o balanceamento dos freios tem importância fundamental no desempenho do veículo-trator-semi-reboque na freagem e que a otimização do balanceamento dos freios está relacionada com a distribuição de pesos dinâmicos entre os eixos veiculares.

LIMPERT & WARNER (1971) apresentaram um trabalho sobre a freagem de veículos pesados que incluía o estudo da aderência utilizada pelos eixos veiculares e do balanceamento ótimo dos freios do veículo na freagem, para as condições de veículo vazio e totalmente carregado. Neste trabalho concluiu-se que uma análise apropriada da distribuição dos pesos dinâmicos nos eixos veiculares e das características do sistema de freios poderia ser fundamental para elevar o aproveitamento da aderência disponível no contato entre pneumático e pavimento e o desempenho do veículo pesado na freagem.

MARKERT (1972) analisou a utilização de freios a disco para veículos pesados e observou que os veículos equipados com freios a disco poderiam ter um melhor desempenho na freagem que os veículos equipados com freios a tambor. MARKERT (1972) também destacou a vantagem dos freios a disco possuírem uma manutenção mais fácil e simples que os freios a tambor.

KRAUTER & WILSON (1972) desenvolveram um modelo para simulação computacional de um veículo-trator-semi-reboque durante o processo de freagem nos trechos retilíneo e curvilíneo. Sendo que a simulação da freagem do veículo em trecho retilíneo é realizada com o veículo-trator-semi-reboque descrevendo uma curva com um grande raio de curvatura (tentando representar uma reta).

Estudos sobre estabilidade de veículos pesados na freagem se intensificaram na medida que esta preocupação aparecia nas regulamentações sobre freios destes veículos e que a segurança veicular ganhava maior importância.

ORDORICA (1973) estudou a ocorrência de *jackknife* do veículo-trator que se caracteriza pelo bloqueio total das rodas do eixo traseiro do veículo-trator durante a freagem de um veículo articulado pesado. ORDORICA (1973) sugeriu a instalação de um sistema de amortecimento do movimento rotacional da quinta-rodinha para reduzir a ocorrência deste problema, que pode levar o veículo-trator-semi-reboque a uma situação de instabilidade extremamente perigosa.

WALSH & CICCHETTI (1973) propuseram a utilização de um dispositivo para restringir a ocorrência de *jackknife* durante a freagem de veículos articulados pesados. O dispositivo proposto por WALSH & CICCHETTI (1973) operava em conjunto com o sistema de freios do veículo e atuava no acoplamento entre veículo-

trator e semi-reboque (quinta-rodas), procurando evitar a perda de estabilidade direcional durante a freagem do veículo que poderia ser produzida pela ocorrência de *jackknife*.

KELLER (1973) introduziu um método de controle para evitar a ocorrência de *jackknife* na freagem de veículos articulados pesados. Tal método se baseava na utilização de um dispositivo para a restrição do ângulo entre as linhas de centro longitudinais do veículo-trator e do semi-reboque, que deveria ser limitado ao valor máximo de 15 graus, para qualquer um dos lados do veículo.

KELLER (1973) ainda mostrou que se o ângulo entre as linhas de centro longitudinais do veículo-trator e do semi-reboque atingisse valores maiores que 25 graus, seria inevitável a ocorrência do *jackknife* do veículo-trator-semi-reboque na freagem. Além disso, KELLER (1973) expôs que as condições de pavimento molhado, com gelo ou com neve poderiam facilitar a ocorrência do *jackknife* na freagem dos veículos articulados pesados.

EKSTROM & YOUNG (1973) desenvolveram um sistema capaz de limitar o carregamento de veículos comerciais com sobrecarga. Tal sistema operava através de uma válvula sensível à carga colocada no eixo dianteiro do veículo, que era capaz de indicar quando este eixo estava recebendo sobrecarga.

Atualmente, evitar os carregamentos com sobrecarga ainda é uma atitude importante a ser tomada para melhorar a segurança veicular, pois os veículos comerciais com sobrecarga podem deteriorar o pavimento mais rapidamente e podem colocar o veículo comercial fora das condições de utilização normais previstas pelo fabricante, podendo comprometer a integridade e a vida útil de vários sistemas veiculares, o que pode ainda elevar a possibilidade de ocorrer acidentes rodoviários.

BERNARD (1973) elaborou um programa computacional para a simulação do desempenho de veículos pesados na freagem, que considerava a dinâmica dos eixos e as características do sistema de freios e dos pneumáticos do veículo. O estudo de BERNARD (1973) ainda apresentava a obtenção de resultados satisfatórios nas comparações entre valores teóricos e experimentais da freagem de veículos articulados pesados.

VINCENT & KRAUTER (1973) descreveram a dinâmica dos eixos traseiros em tandem de um veículo-trator e adicionaram este efeito ao modelo computacional desenvolvido por KRAUTER & WILSON (1972) para a simulação de um veículo-trator-semi-reboque na freagem.

ESHLEMAN et al. (1973) apresentaram estudos sobre as manobras de freagem e de mudança de direção de veículos articulados pesados através de simulação computacional, incluindo a avaliação da influência da velocidade do veículo, do coeficiente de aderência disponível no contato entre o pneumático e o pavimento, das características geométricas do veículo, da posição da quinta-rodinha, do balanceamento inadequado dos freios e de efeitos aerodinâmicos sobre as respostas do veículo durante as manobras de mudança de direção e freagem.

INGRAM & OPPENHEIMER (1973) elaboraram abordagens sobre a necessidade de melhorar a segurança e o desempenho dos sistemas de freio dos veículos. Este trabalho também indica que pode-se fazer uso de sistemas ABS para elevar o desempenho e a segurança dos veículos na freagem, mantendo-se um compromisso entre a confiabilidade e a complexidade dos sistemas de freio com a introdução do ABS.

SUSEMIHL & KRAUTER (1974a) propuseram a utilização de um sistema automático capaz de detectar a possibilidade de ocorrer o *jackknife* em veículo-trator-semi-reboque durante a freagem. Tal sistema automático poderia monitorar o comportamento das rodas do eixo traseiro do veículo-trator e ser capaz de atuar nos freios instalados nas rodas dos eixos veiculares, procurando impedir o *jackknife* do veículo.

SUSEMIHL & KRAUTER (1974b) realizaram estudo sobre a ocorrência de *jackknife* de veículos articulados pesados, incluindo formas de detecção e ações corretivas para evitar tal fenômeno. Entre as ações corretivas sugeridas tem-se o controle automático da freagem do eixo traseiro do veículo-trator apenas, da freagem dos eixos do veículo-trator e de todos os eixos do veículo-trator-semi-reboque, sendo que esta última é considerada a mais complexa, porém é a que pode proporcionar o melhor desempenho e estabilidade dos veículos articulados pesados na freagem.

AIRHEART (1974) descreveu a importância de vários parâmetros no projeto de sistemas de freios a disco para veículos comerciais pesados e no desempenho do veículo na freagem, como a área de contato entre pastilha e disco, o curso de acionamento do êmbolo, o balanceamento dos freios entre outros.

STOKES (1974) mostrou a realização de ensaios experimentais em laboratório, com uso de dinamômetro, para avaliar o comportamento, a resistência e o desempenho de freios a disco para veículos comerciais pesados.

DAWSON (1975) realizou estudos sobre o desempenho de veículos pesados na freagem durante a descida de trechos em declive com inclinação de 6 % a 10 %, incluindo a obtenção de distâncias de freagem a partir de várias velocidades iniciais.

ANDERSON (1975) descreveu o desenvolvimento e a aplicação de freio a disco com acionamento pneumático para as rodas do eixo dianteiro de veículos comerciais pesados, incluindo ensaios de dinamômetro e testes de campo.

Apesar da simulação computacional ter se mostrado uma ferramenta poderosa para os estudos da freagem de veículos comerciais, surgiram questões de interesse prático sobre as mesmas, como a necessidade de aplicabilidade e a relação entre o custo e o benefício das mesmas.

PEPOY (1976) destacou que, do ponto de vista dos fabricantes, a simulação computacional para a obtenção do desempenho de veículos pesados na freagem deveria possuir maior facilidade de aplicação prática, sem custos adicionais. PEPOY (1976) também expôs que os fabricantes de veículos pesados tinham interesse em simulação computacional desde que a mesma tivesse aplicação prática e pouca complexidade, estas características eram conseguidas sem a inclusão de condições não lineares e de efeitos transitórios no desenvolvimento do programa para a simulação computacional dos veículos na freagem.

O estudo da freagem de veículos pesados nos trechos em declive sempre foi considerado importante. WALKER & DOIGE (1976) estudaram o comportamento de veículos pesados para o transporte de minérios durante a freagem na descida de declives. Este trabalho revelou uma situação curiosa, pois mostrou que em muitos veículos pesados da época eram instalados sistemas capazes de reduzir o esforço de freagem disponível no eixo dianteiro dos veículos pesados, com o intuito de evitar que

os mesmos perdessem a dirigibilidade durante a descida, devido à possibilidade de ocorrer o travamento total das rodas do eixo dianteiro do veículo na freagem, principalmente em pavimento molhado ou com gelo.

Mas o trabalho de WALKER & DOIGE (1976) mostrou que durante a freagem dos veículos pesados, utilizados na descida de trecho em declive, sempre ocorria primeiro o bloqueio total das rodas do eixo traseiro do veículo. Assim, WALKER & DOIGE (1976) concluíram que a utilização de sistemas capazes de reduzir o esforço de freagem do eixo dianteiro destes veículos era injustificada.

NEWCOMB (1976) estudou os principais fatores que podem influenciar o comportamento de um veículo na freagem, como a transferência de peso dinâmico entre os eixos veiculares, as forças de freagem produzidas pelo sistema de freios instalado e a utilização da aderência disponível no contato entre pneumático e pavimento.

WILLIAMS et al. (1976) mostraram a influência das características do pneumático e do tipo de pavimento no escorregamento entre ambos, durante a freagem em trecho retilíneo e curvilíneo, em pavimento seco e molhado. WILLIAMS et al. (1976) também mostraram os fatores que afetam o coeficiente de adesão máximo disponível entre pneumáticos e pavimento molhado, sendo este um parâmetro importante no desempenho e na estabilidade do veículo durante a freagem.

HALES (1976) tratou da influência da ocorrência de escorregamento das rodas dos eixos de veículos combinados, durante a freagem, na estabilidade direcional dos mesmos. ERVIN (1976) apresentou medidas da capacidade de tração longitudinal e lateral de pneumáticos de veículos comerciais, que são características importantes no desempenho destes veículos durante a freagem.

ELGESKOG & BRODD (1976) mostraram a influência da dinâmica do controle do escorregamento da roda na estabilidade do veículo durante a freagem. Apresentaram também descrição de modelo matemático da roda baseado na dinâmica do pneumático e em testes realizados com um veículo de passageiros em pista de gelo e asfalto. Diferentes princípios de sistemas anti-bloqueio foram simulados e foram formulados requisitos gerais para a estabilidade do veículo com relação ao

escorregamento das rodas, indicando para o veículo testado, que o sistema deveria controlar escorregamentos diferentes para as rodas do eixo dianteiro e traseiro.

FANCHER & MACADAM (1976) descreveram o uso de simulação por computador para analisar o desempenho de veículos comerciais equipados com sistema de anti-bloqueio. Com o delineamento de técnica para a medida da modulação da pressão desse sistema e uma descrição do programa computacional usado para a simulação da freagem de veículo-trator-semi-reboque e comparações entre os valores calculados e obtidos experimentalmente.

ADAMS & SPENCE (1976) descreveram aspectos práticos de procedimentos de testes e seus resultados para veículos comerciais equipados com sistema ABS, incluindo as indicações da ECE 13 para os testes necessários.

WILKINS (1977) desenvolveu estudo sobre a ocorrência de acidentes envolvendo veículo-trator-semi-reboque equipado ou não com sistema ABS e válvula sensível à carga no eixo traseiro do veículo-trator. Os resultados deste trabalho mostraram que os veículos articulados pesados com ABS foram os que se envolveram na menor quantidade de acidentes, seguidos pelos mesmos veículos equipados com válvula sensível à carga e sem qualquer um destes dispositivos, respectivamente. Além disso, observou-se que entre os acidentes com *jackknife* do veículo-trator-semi-reboque, 32 % ocorreram em pista molhada e 27 % com o semi-reboque vazio, que são condições operacionais onde a aplicação de sistema ABS e de válvula sensível à carga podem melhorar o desempenho e a estabilidade destes veículos de forma significativa.

RITCEY & TACIUK (1977) avaliaram o desempenho de veículos pesados na freagem em trechos em declive. Neste estudo foram realizadas comparações entre os vários tipos de sistemas de freios disponíveis no mercado na época para serem instalados em veículos pesados.

THOMAS (1977) descreveu a realização de vários testes de campo de freagem com veículos pesados de transporte de minérios, para estudar o desempenho dos mesmos na freagem, considerando a influência da condição de carga, da inclinação do pavimento e da velocidade inicial do veículo.

Os resultados do trabalho de THOMAS (1977) mostraram que o balanceamento dos freios dos veículos pesados segundo a distribuição dos pesos estáticos nos eixos não era recomendável, pois não considerava a situação dinâmica de transferência de peso entre os eixos veiculares na freagem.

RAVES (1977) desenvolveu estudos sobre sistemas de freio a disco para veículos pesados, incluindo os efeitos da temperatura, da velocidade, da pressão de contato e das características do material de atrito no desempenho destes veículos na freagem.

McDOLE (1977) realizou estudos sobre a inspeção e a detecção de defeitos em veículos comerciais, além das causas de acidentes que envolveram tais veículos. Neste trabalho concluiu-se que a execução de práticas adequadas de inspeção e manutenção, podem reduzir a ocorrência de acidentes devido à falhas mecânicas nos veículos comerciais.

McDOLE (1977) ainda ressaltou que as grandes empresas de transporte de carga usualmente realizam práticas de inspeção e manutenção adequadas, mas que o mesmo procedimento nem sempre ocorre nas empresas de transporte de carga menores ou com os transportadores individuais (donos de seu próprio veículo comercial).

MODLIN & DOUGLAS (1977) desenvolveram estudos sobre a utilização de barra estabilizadora que seja capaz de reduzir a tendência de tombamento de veículos comerciais nas manobras de freagem e de mudança de direção, podendo elevar sensivelmente a segurança dos mesmos.

MODLIN & DOUGLAS (1977) também mostraram o desenvolvimento de dispositivos utilizados para elevar o desempenho, a estabilidade e a segurança de veículos comerciais pesados na freagem, como por exemplo um dispositivo para evitar a ocorrência de *jackknife* com o veículo freando em trecho retilíneo e um dispositivo constituído por barras protetoras com a finalidade de garantir a proteção dos ocupantes do veículo na cabine.

GRIMM et al. (1977) relataram sobre a avaliação de um sistema automático de controle de bloqueio das rodas de veículos comerciais pesados na freagem por meio de simulação computacional.

SAKAI et al. (1978) realizaram estudos sobre a ocorrência de aquaplanagem em automóveis, caminhões e ônibus, considerando a influência do tipo e da pressão interna do pneumático, da carga sobre o pneumático, da espessura do filme de água e outros parâmetros. Os resultados deste trabalho mostraram que a aquaplanagem afeta as relações entre a força de freagem e a porcentagem de escorregamento do pneumático e entre a força produzida na mudança de direção e o ângulo de escorregamento dos pneumáticos dos veículos avaliados.

GUNTER et al. (1978) estudaram o desempenho e a estabilidade direcional de veículo-trator-semi-reboque durante a freagem, considerando as influências da posição da quinta-roda, da condição de carregamento e das características dos pneumáticos. Este trabalho comparou a estabilidade direcional de veículos articulados pesados durante a freagem equipados com sistema de freio com balanceamento fixo e com balanceamento ideal (com as forças de freagem proporcionais aos pesos dinâmicos nos eixos). GUNTER et al. (1978) indicaram também que o balanceamento mais próximo do ideal poderia otimizar o desempenho e a estabilidade direcional dos veículos articulados pesados.

HARRIES (1978) indicou que a sensibilidade na atuação dos freios é essencialmente a percepção do motorista da relação entre o esforço aplicado no pedal de freio e a desaceleração proporcionada ao veículo. Neste sentido, HARRIES (1978) destacou a importância da histerese e do tempo de resposta do sistema de freio, do curso e do esforço no pedal de freio, da posição deste pedal e da trajetória do pé do motorista durante a aplicação dos freios na sensibilidade do motorista durante a atuação de tal sistema.

LAM et al. (1979) expuseram um modelo matemático computadorizado para estudar o desempenho de veículos comerciais pesados articulados na freagem equipados com sistema ABS.

SOLTIS (1979) descreveu as vantagens do freio a disco para veículos comerciais, incluindo o melhoria do desempenho do veículo na freagem e a facilidade de manutenção proporcionada por tal sistema de freio. SOLTIS (1979) também indicou a tendência futura de aplicação dos freios a disco para veículos comerciais.

GERBERT (1979) mostrou o desenvolvimento de um sistema de ajuste automático integrado a alavanca de freio a tambor de veículos comerciais (tornando-a uma alavanca ajustadora de folga do freio automática), baseado no princípio de uma manivela excêntrica. GERBERT (1979) também mostrou as vantagens de controlar a folga entre lona e tambor por meio de ajuste automático, como a garantia de manter o ajuste correto desta folga em função do desgaste das lonas de freio e uma melhor resposta na aplicação dos freios, lembrando que estes fatores podem influenciar no desempenho do veículo na freagem.

RADLINSKI et al. (1982) mostraram que a manutenção adequada e o ajuste de folga correto nos freios pneumáticos de veículos pesados são um importante fator para melhorar o desempenho e a segurança destes veículos na freagem. Através da realização de inspeções nos veículos pesados, este trabalho ainda revelou que uma grande quantidade de veículos pesados norte-americanos transitavam com o sistema de freios sem o ajuste de folga adequado nos freios.

DAY & HARDING (1983) mostraram a variação do desempenho e do momento produzido para freios a tambor operados por came "S", usando a técnica dos elementos finitos para considerar a flexão da sapata e a distribuição de pressão ao longo da lona.

CROLLA & SPENCER (1984) propuseram um modelo matemático simples para se obter o coeficiente de adesão útil quando o pneumático é solicitado com esforços longitudinais e laterais em pavimento rígido, que é uma situação típica que ocorre durante o processo de freagem veicular.

PIERCE (1985) estudou a transferência de peso entre dois eixos em tandem instalados em reboques de veículos pesados durante o processo de freagem, propondo modificações nas características geométricas dos eixos em tandem como uma forma de controlar a transferência de peso entre os mesmos e de melhorar o desempenho dos veículos pesados na freagem.

SEIFF (1985) mostrou alguns dados estatísticos sobre acidentes com veículos pesados nos Estados Unidos da América. Este estudo mostrou que treze por cento da mortalidade no trânsito norte-americano estava relacionada com acidentes envolvendo veículos comerciais médios e pesados e que oitenta e dois por cento da mortalidade

em acidentes envolvendo tais veículos era de pedestres e ocupantes dos outros veículos.

SEIFF (1985) destacou ainda que a maior incidência de acidentes com veículos pesados combinados norte-americanos é em rodovias simples com duplo sentido de tráfego e que setenta por cento da fatalidade dos motoristas de veículos pesados ocorreu em acidentes envolvendo apenas um veículo pesado, sendo que o tombamento do veículo e a ejeção do motorista para fora da cabine foram responsáveis pela maior parte da mortalidade dos mesmos.

CHIRA-CHAVALA & CLEVELAND (1985) analisaram as causas que influenciam significativamente na ocorrência de acidentes envolvendo veículos pesados articulados e não articulados, como o excesso de velocidade, a falta de experiência do motorista na condução de veículos articulados, a condição de carregamento e a distribuição do mesmo no veículo, as falhas humanas, o tipo de rodovia e o tipo de veículo entre outras.

POLUS et al. (1985) mostraram que apesar da taxa de ocorrência de acidentes envolvendo veículos comerciais pesados norte-americanos ser bem menor que a mesma taxa envolvendo apenas automóveis, a taxa de fatalidade nos acidentes com veículos pesados era expressiva. Sendo que a maior parte das vítimas fatais nos acidentes relacionados com veículos comerciais eram os ocupantes dos automóveis ou os pedestres.

POLUS et al. (1985) também mostraram que a segurança dos veículos comerciais pesados é prejudicada por fatores como a fadiga do motorista, o desempenho destes veículos na freagem, a ocorrência de tombamento e de *jackknife* e a prática de colocar sobrecarga nestes veículos.

FUFAEV (1985) estudou as condições para que a freagem de um veículo possa se realizar sem que as rodas do mesmo sejam bloqueadas, o que pode causar a instabilidade direcional do veículo. Este trabalho mostrou que o momento de freagem que pode ser aplicado na roda depende da força normal sobre a mesma e do coeficiente de aderência disponível entre pneumático e pavimento.

REINECKE (1985) analisou sistemas ABS com funções ampliadas de segurança e controle, descrevendo sistemas ABS para veículos comerciais com

possibilidade de regulagem individual para as rodas do eixo dianteiro, bem como as vantagens dessa regulagem. GOEBELS et al. (1985) descreveram os diferentes tipos de sistemas ABS e a aplicação dos mesmos em veículos comerciais.

IVEY et al. (1986) descreveram e contestaram a Teoria de Horne, que estabelecia uma relação direta entre a pressão interna do pneumático e a velocidade de ocorrência de aquaplanagem. Conforme os estudos de Horne, em 1960, acreditava-se que era impossível ocorrer a aquaplanagem em caminhões por causa da velocidade máxima destes que era entre 80 km/h (22,2 m/s) e 112 km/h (31,1 m/s) e da faixa de calibração dos pneumáticos dos mesmos que era entre 60 psi (413 kPa) e 100 psi (690 kPa) dos mesmos na época. IVEY et al. (1986) realizaram amplo estudo sobre as causas para os acidentes com veículos comerciais, destacando a ocorrência de aquaplanagem e de *jackknife* em pista molhada entre outras, e propõe estratégias para reduzir os acidentes com veículos comerciais pesados.

ROLLINS & McFARLAND (1986) estudaram os custos dos acidentes de trânsito urbano e rural norte-americanos relacionados com a quantidade de vítimas fatais e incapacitadas. ROLLINS & McFARLAND (1986) indicaram que é vantajoso investir em melhorias na segurança no trânsito, pois o custo destas é menor que os custos dos acidentes.

CHIRA-CHAVALA (1986) analisou os problemas típicos dos acidentes envolvendo veículos articulados pesados em pavimento molhado. Este estudo mostrou que a quantidade de acidentes com os veículos articulados pesados vazios ou com apenas o veículo-trator em pista molhada é três vezes maior que a mesma quantidade para a condição de veículo articulado pesado carregado. Este estudo mostrou ainda que os acidentes com ocorrência de saída do veículo da rodovia, de *jackknife*, de tombamento ou de separação das unidades (veículo-trator e semi-reboque) são mais freqüentes em pavimento molhado que em pavimento seco e que exercem influência nestes acidentes alguns fatores como a condição de carga e o tipo de semi-reboque, a diminuição do coeficiente de aderência entre pneumático e pavimento, as características do sistema de freios e a velocidade do veículo, a redução da visibilidade do motorista e a ocorrência de aquaplanagem.

JACKSON (1986) examinou as características de acidentes em rodovias norte-americanas envolvendo veículos comerciais com ocorrência de tombamento, de *jackknife*, de aquaplanagem e colisões. Este estudo mostrou que as características dos locais (como interseções, aclives, declives e outros) podem exercer influência sobre a ocorrência de acidentes com veículos comerciais.

FLICK & RADLINSKI (1986) elaboraram um estudo sobre a compatibilidade entre veículo-trator e semi-reboque na freagem. Este estudo indicou que vários fatores poderiam influenciar a compatibilidade nos veículos articulados pesados, como os tipos e as características técnicas dos sistemas de freios instalados e as características geométricas destes veículos. Estes estudos ainda revelaram a existência de uma predominante falta de compatibilidade entre veículo-trator e semi-reboque nos Estados Unidos da América. FLICK & RADLINSKI (1986) sugeriram algumas formas de melhorar a compatibilidade em veículo-trator-semi-reboque, como um maior equilíbrio na distribuição do esforço de freagem entre veículo-trator e semi-reboque, que também pode elevar os níveis de durabilidade dos freios e de segurança na freagem.

MAMITI (1986a) mostrou método de cálculo simplificado de freio a tambor, obtendo os momentos de freagem nas sapatas primária e secundária. MAMITI (1986b) apresentou o cálculo de freio a tambor, obtendo o momento de freagem e a pressão específica ao longo da lona, considerando-se a rigidez da mesma.

INGRAM & THOMPSON (1986) descreveram as principais características técnicas dos freios a tambor e a disco dos veículos pesados europeus, elaborando ainda uma revisão bibliográfica dos estudos sobre os freios destes veículos.

GOHRING (1986) destacou a importância da eletrônica aplicada aos veículos comerciais e indicou que a possibilidade de integração dos vários sistemas veiculares através da eletrônica pode influenciar na tendência de desenvolvimento dos vários sistemas de veículos comerciais para a década de 90.

BRACH (1986) desenvolveu modelo matemático para analisar acidentes com colisão de veículos comerciais com barreiras rígidas e com automóveis, incluindo o processo de freagem dos veículos comerciais. BRACH (1986) ainda ressaltou a importância deste estudo no sentido de reduzir a elevada quantidade de vítimas fatais

entre os ocupantes de automóveis nos acidentes entre os mesmos e veículos comerciais.

SWEATMAN et al. (1987) descreveram a realização de programa de testes com veículos articulados pesados para investigar a estabilidade direcional e ao tombamento dos mesmos e validar modelo matemático desenvolvido para este fim. Este trabalho mostrou a importância de reduzir a quantidade de acidentes devido à ocorrência de *jackknife* e de *rollover* com veículos pesados articulados, pois estes acidentes podem causar elevados prejuízos materiais e perdas humanas, principalmente quando estes veículos são utilizados para o transporte de cargas inflamáveis.

EMORI et al. (1987) desenvolveram modelo matemático com comprovação experimental para prever a ocorrência de *rollover* e de *jackknife* de veículo-trator-semi-reboque, destacando como fatores importantes na estabilidade direcional e no tombamento destes veículos a posição do centro de gravidade da carga, o ângulo de direção, o tipo e as condições do pavimento e o processo de freagem.

Este estudo indicou ainda algumas atitudes defensivas que podem ser tomadas pelo motorista destes veículos para reduzir a perda de estabilidade do veículo na freagem e percorrendo trecho curvilíneo, como procurar a redução da altura do centro de gravidade da carga no veículo, evitar a mudança de direção e a aplicação dos freios de forma brusca e outras.

KIRKPATRICK (1987) apresentou estudos sobre as condições de operação e de utilização dos veículos pesados norte-americanos, realizados através de inspeções nos sistemas de freios destes veículos, de estudo das práticas de controle de velocidade destes veículos em trechos curvilíneos e em declives e da identificação dos dispositivos de controle dos freios e de segurança instalados nestes veículos. Neste trabalho ainda foi estudada a relação entre as condições de operação e de utilização dos veículos pesados e a ocorrência de acidentes rodoviários envolvendo tais veículos, no sentido de elaborar uma metodologia de desenvolvimento de estudos para melhorar o desempenho destes veículos na freagem e a segurança veicular.

RADLINSKI (1987) desenvolveu estudos sobre o desempenho de veículos pesados norte-americanos na freagem, mostrando o contraste que existe entre o

desempenho de automóveis e veículos pesados na freagem, principalmente quando os veículos pesados não recebem manutenção adequada. Este trabalho também revelou a dificuldade de otimizar o desempenho de veículos pesados na freagem em todas as condições operacionais, sem adicionar complexidade nos seus sistemas de freios, como a instalação de válvulas proporcionadoras nos freios ou de sistemas de freio automáticos.

RADLINSKI & FLICK (1987) realizaram estudos sobre os benefícios da instalação de freios nas rodas do eixo dianteiro de veículos pesados. Este trabalho ainda indicou que os veículos pesados sem freios nas rodas do eixo dianteiro dos mesmos possuíam pior desempenho na freagem (com maiores valores na distância de freagem) e maior facilidade de perder o controle em situações de emergência, que os veículos pesados equipados com freios nas rodas do eixo dianteiro.

RADLINSKI & FLICK (1987) mostraram também que a utilização de válvulas para a redução do esforço de freagem nas rodas do eixo dianteiro do veículo pesado pode prejudicar o desempenho de tais veículos na freagem.

LIMPERT & ANDREWS (1987) realizaram uma completa análise dos acidentes envolvendo veículos articulados pesados, cuja causa estava relacionada com a ocorrência de falha no sistema de freios dos veículos pesados ou de falha humana. Este trabalho também apresentou um método prático de realizar a reconstituição de acidentes relacionados com a freagem de veículos pesados.

BISHEL (1987) já destacava a tendência e os benefícios da integração de sistemas eletrônicos nos veículos para a década de 90, como os sistemas eletrônicos de controle dos freios, da tração, da suspensão e outros, como a redução de custos e a elevação do desempenho, do conforto e da segurança veicular.

KRAMER et al. (1987) apresentaram o desenvolvimento de um sistema de anti-bloqueio dos freios (ABS) para o eixo de tração de veículo-trator, segundo KRAMER et al. (1987) a instalação de tal sistema de anti-bloqueio pode ser considerada uma solução simples, confiável e de custo reduzido para evitar o *jackknife* de veículos articulados pesados na freagem.

OPPENHEIMER (1988) mostrou que existe uma relação entre os coeficientes de adesão longitudinal e lateral e a parcela de escorregamento entre pneumático e

pavimento. Destacando que deve-se conciliar o aproveitamento do coeficiente de adesão longitudinal, que interfere no desempenho do veículo na freagem e na tração, com o aproveitamento do coeficiente de adesão lateral, que interfere na estabilidade direcional do veículo.

BLEVINS & HUTCHINS (1988) analisaram a aplicação de sistemas ABS nos freios dos veículos comerciais norte-americanos, com uma comparação entre o custo e o benefício de alguns destes sistemas disponíveis nos Estados Unidos da América.

GOHRING (1988a) discutiu a confiabilidade de sistemas ABS de quatro e de seis canais para veículos comerciais, mostrando uma comparação entre o desempenho de veículo-trator-semi-reboque com e sem tais sistemas ABS. Para um veículo-trator-semi-reboque com três eixos (um dianteiro e dois traseiros) os sistemas ABS com seis canais apresentam vantagens no desempenho e segurança em relação ao mesmo veículo com sistema ABS de quatro canais (mais indicado para veículos com dois eixos apenas), mas possuem um custo maior. GOHRING (1988a) ainda ressaltou o fato da empresa Daimler-Benz ter sido o primeiro fabricante de veículos comerciais a oferecer sistemas ABS nos seus veículos (desde 1982).

CHURCH & CLARK (1989) desenvolveram estudos sobre a compatibilidade entre veículo-trator e semi-reboque na freagem, destacando a importância da compatibilidade na vida útil dos sistemas de freios dos veículos articulados pesados e no desempenho destes durante o processo de freagem.

NORDSTROM (1989) realizou uma ampla pesquisa sobre o desempenho e a estabilidade de veículos articulados pesados nas manobras de mudança de direção e de freagem, incluindo o estudo da influência dos pneumáticos, do sistema de freios e da instalação de sistemas automáticos de anti-bloqueio das rodas no desempenho e na estabilidade destes veículos nestas manobras.

TODOROVIC et al. (1989) revelaram que o desempenho de veículos pesados durante o processo de freagem realizado em testes de campo, pode exibir valores inferiores aos obtidos por modelos teóricos para obter o desempenho destes veículos no mesmo processo. TODOROVIC et al. (1989) sugeriram que tais diferenças entre os valores teóricos e os valores experimentais de desempenho de veículos pesados na freagem, podem ser explicadas pela ocorrência de variações no material de atrito e de

perdas mecânicas no sistema de freios que não podem ser previstas nos modelos teóricos, mas que afetam a distribuição das forças de freagem entre os eixos veiculares.

KOJIMA & TAKUBO (1989) desenvolveram estudos estatísticos para investigar as principais características técnicas dos acidentes envolvendo veículos pesados articulados nas rodovias norte-americanas, que tiveram como causa a ocorrência de *rollover* e *jackknife* destes veículos.

No trabalho de KOJIMA & TAKUBO (1989) concluiu-se que a ocorrência de acidentes com estes veículos por saída da pista de rodagem, tombamento e colisão com obstáculos fixos tem menor incidência, mas possuem elevadas taxas de fatalidade; que as taxas de fatalidade em acidentes com veículos articulados pesados são maiores que as mesmas taxas para veículos comerciais não articulados; que a instalação de sistemas de direção em mais de um eixo veicular e de sistemas de anti-bloqueio das rodas destes veículos na freagem, podem contribuir efetivamente para reduzir as ocorrências acidentes por *rollover* e *jackknife*; que existe a necessidade de treinamento dos motoristas em práticas que podem evitar a perda de controle do veículo e a ocorrência de bloqueio total das rodas dos eixos do mesmo, o que pode melhorar a segurança veicular.

DORION et al. (1989) investigaram e comprovaram por simulação computacional a eficácia de dispositivos para prevenir a ocorrência de *jackknife* em veículos articulados pesados durante a freagem. DORION et al. (1989) também definiram dois tipos de *jackknife* para veículo combinado pesado: o *jackknife* do veículo-trator e o *jackknife* do semi-reboque. O primeiro ocorre com o escorregamento do eixo traseiro do veículo-trator; neste caso, o semi-reboque permanece estável e o veículo-trator gira de forma rápida e instável em torno do seu eixo dianteiro. O segundo ocorre com o escorregamento das rodas do semi-reboque, neste caso, o veículo-trator permanece estável e o semi-reboque gira em torno da quinta-rodas, de forma mais lenta que no primeiro tipo de *jackknife*.

A aplicação da eletrônica nos sistemas de freio de veículos comerciais iniciou-se nos anos 70, principalmente com o desenvolvimento dos primeiros sistemas ABS,

mas nas décadas de 80 e 90 principalmente, esta aplicação ganhou sensível destaque com o surgimento do *Electronic Brake System* (EBS).

EMIG & DECKER (1989) fizeram uma revisão sobre a aplicação de eletrônica nos veículos comerciais no sentido de melhorar a segurança e o conforto de caminhões e ônibus, desde os primórdios da aplicação da eletrônica nestes veículos, como o uso de rádios somente para o entretenimento, até a utilização de eletrônica digital para o controle de vários sistemas veiculares, como motor, câmbio, suspensão, freios e outros.

EHLBECK et al. (1989) descreveram o desenvolvimento de sistema ABS para veículos comerciais e mostra que um sistema ABS com 6 canais é mais apropriado que o mesmo sistema com 4 canais para um veículo comercial pesado com 3 eixos.

GOHRING et al. (1989) ilustraram as diferenças entre os sistemas ABS de 2, 4 e 6 canais quanto à forma de controle da rotação das rodas e mostra o impacto da aplicação destes sistemas no controle direcional de veículos comerciais pesados através da avaliação destes veículos na freagem nos trechos retilíneo e curvilíneo, incluindo variações no coeficiente de aderência entre pneumático e pavimento.

LEASURE & WILLIAMS (1989) mostraram os benefícios da utilização de sistemas de anti-bloqueio dos freios (ABS) em veículos comerciais pesados equipados com sistema de freio pneumático, como a elevação do desempenho e da estabilidade direcional. LEASURE & WILLIAMS (1989) descreveram também a evolução tecnológica e o acréscimo de confiabilidade de sistemas ABS, além do desenvolvimento dos requisitos legais para tais sistemas.

EMIG & SCHRAMM (1989) e GOHRING (1988b) descreveram a integração entre os sistemas de anti-bloqueio das rodas do veículo na freagem (ABS) e de controle das rodas na tração o *Anti-wheel Spin Regulation* (ASR) para veículos comerciais pesados. A integração de tais sistemas é uma forma de elevar a segurança ativa dos veículos comerciais nos processos de freagem e tração.

SEIFF (1989) relatou algumas estatísticas sobre acidentes rodoviários envolvendo veículos pesados norte-americanos, mostrando que o crescimento da taxa de utilização do cinto de segurança levava a uma sensível queda na taxa de fatalidade entre os ocupantes destes veículos. Mas que a taxa de fatalidade entre os ocupantes

de outros veículos envolvidos em acidentes com veículos pesados mantinha-se constante ao longo dos anos.

SEIFF (1989) ainda sugeriu que a elevada massa e o excesso de velocidade dos veículos pesados são fatores de grande risco para os ocupantes dos outros veículos, quando os mesmos se envolvem em acidentes com os veículos pesados. Este trabalho também mostrou que o risco dos veículos pesados sofrerem acidentes no período noturno chegava a ser três vezes maior que o mesmo risco para o período diurno.

RANGANATHAN (1989) estudou a estabilidade ao tombamento de veículos articulados pesados para o transporte de cargas líquidas, em função do tipo de carga, da forma geométrica do tanque e da quantidade de carga transportada. Os resultados deste estudo mostraram que no transporte de carga líquida pode-se ter a redução da estabilidade ao tombamento do veículo articulado pesado, pois a movimentação da carga durante o seu transporte modifica a posição do centro de gravidade da mesma, que pode ocupar posições desfavoráveis à estabilidade do veículo percorrendo um trecho curvilíneo ou realizando a freagem em qualquer trecho.

HARWOOD et al. (1989) apresentaram análise das características de acidentes com veículos de transporte de cargas perigosas, em função dos tipos de veículo, de acidente, de carga, de pista e outras condições relevantes à ocorrência do acidente. Os resultados deste estudo mostraram que 99 % das mortes e 96 % dos ferimentos nos acidentes não estavam relacionados com a liberação da carga perigosa, que ocorreu em apenas 15 % dos acidentes. Sendo que a ocorrência de *jackknife* de veículos pesados articulados originou 8 % dos acidentes com liberação da carga e ocorrência de tombamento dos veículos comerciais causou 38 % destes acidentes.

FANCHER (1989) estudou a estabilidade direcional e ao tombamento de veículos articulados pesados considerando a influência da quantidade de eixos, dos tipos de suspensão e de pneumáticos e das características das manobras de mudança de direção e freagem.

VEIT & WALGRAVE (1989) desenvolveram estudos sobre a dinâmica e a estabilidade de veículos articulados pesados através de simulação computacional. Este trabalho expôs que a análise da estabilidade de veículos pesados articulados pode se

tornar complexa quando se considera a variação da quantidade de carga e da posição da mesma no veículo (que influencia as posições longitudinal e vertical do centro de gravidade e as transferências de pesos dinâmicos entre os eixos) e quando se inclui a influência dos acoplamentos do veículo articulado pesado no seu comportamento dinâmico.

FANCHER & MATHEW (1989) mostraram fatores que afetam o desempenho de veículos comerciais pesados, como o veículo-trator-semi-reboque e apresentam ainda sugestões para melhorar a segurança desse tipo de veículo, durante a freagem em trecho retilíneo e curvilíneo, mostrando que o tombamento está associado as características da suspensão, da quinta-rodas e da altura do centro de gravidade do veículo.

FANCHER & MATHEW (1989) indicaram também que a tecnologia futura no transporte de cargas envolve o desenvolvimento de veículos pesados articulados com níveis de desempenho mensuráveis e previsíveis, durante manobras seguras, incluindo a freagem.

BIRCH (1989) apresentaram estudos sobre veículo-trator-semi-reboque movendo-se em trecho curvilíneo, com um dispositivo que permite que as rodas do eixo traseiro acompanhem a mudança de direção das rodas do eixo dianteiro. Este dispositivo procurava melhorar o desempenho deste veículo em trecho curvilíneo, mesmo durante a freagem, e facilitar as manobras no tráfego urbano.

SCHUBERT et al. (1989) mostraram que os veículos comerciais pesados têm percorrido maiores distâncias sem sofrerem acidentes na Alemanha. Este trabalho também sugeriu formas de elevar ainda mais a segurança ativa destes veículos (que tem o conceito de prevenir os acidentes), como o uso de ABS, de freio retardador e de suspensões que melhorem o contato entre o pneumático e o pavimento, bem como de incrementar a segurança passiva destes veículos (que tem o conceito de minimizar as conseqüências dos acidentes), como o uso de cinto de segurança, a instalação de protetores nas laterais e na traseira destes veículos e a melhoria da integridade da cabine.

RAKHEJA & PICHE (1990) indicaram que a elevação dos pesos e dimensões dos veículos articulados pesados podem afetar os limites de estabilidade e

desempenho dos mesmos na freagem. Expuseram também que a altura do centro de gravidade do semi-reboque carregado tem influência importante na possibilidade de ocorrência de *rollover* e de *jackknife* do veículo articulado pesado.

RAKHEJA & PICHE (1990) também descreveram o desenvolvimento de um sistema eletrônico capaz de detectar e alertar o motorista de veículos articulados pesados sobre a possibilidade de ocorrer situações de instabilidade com estes veículos, como o *rollover* e o *jackknife*, auxiliando o motorista a identificar tais situações perigosas a tempo de evitar a ocorrência de acidentes com seus veículos.

ALLEN & STEIN (1990) mostraram a possibilidade de uma simulação em tempo real do movimento de veículos pesados, incluindo o tipo de comportamento do motorista, ser utilizada no treinamento dos motoristas destes veículos, procurando contribuir para que os mesmos sejam utilizados com maior segurança.

A temperatura dos freios sempre foi objeto de estudo de vários trabalhos, pois a mesma influencia sensivelmente a capacidade de freagem dos freios a tambor para veículos comerciais. TANAKA et al. (1990) analisaram o comportamento na freagem de veículos articulados pesados, sendo o veículo-trator equipado com freios a disco e o semi-reboque equipado com freios a tambor com came "S". TANAKA et al. (1990) também indicaram algumas formas de melhorar a compatibilidade destes veículos na freagem e concluíram que a instalação de freios a disco apenas no veículo-trator, pode elevar a resistência à fadiga dos freios do veículo combinado quanto à temperatura e velocidade, o que melhora significativamente o desempenho destes veículos na freagem.

DOE et al. (1990) relataram sobre um estudo estatístico da frota norte-americana de veículos comerciais equipados com sistemas de anti-bloqueio dos freios automáticos, que faz parte de um processo de avaliação da confiabilidade, do desempenho e da segurança da utilização de tais sistemas em veículos comerciais.

GOHRING & Von GLASNER (1990) descreveram as vantagens dos freios a tambor e a disco para veículos comerciais, indicando que os freios a disco possuem melhor consistência no curso do pedal de freio, melhor eficiência e desempenho na freagem com relação à fadiga térmica nos freios (*brake fading*) e tendem a substituir de forma gradativa os freios a tambor.

TAKEDA et al. (1990) descreveram sobre o desenvolvimento de freio a disco para veículos comerciais pesados no Japão, incluindo os esforços que foram realizados para minimizar o peso, reduzir o desgaste das guarnições e elevar o desempenho de tais sistemas de freio.

TRAVART (1990) mostrou os parâmetros que devem ser considerados na definição de sistemas de freios para veículos comerciais e as vantagens do freio a disco, quanto à confiabilidade, custos de manutenção e segurança na freagem.

WATSON & NEWCOMB (1990) descreveram o desenvolvimento de modelo tridimensional de freio a tambor com came “S”, com arranjo de sapatas do tipo primária-secundária, para investigar como as distorções axiais e radiais no freio a tambor podem influenciar na distribuição de temperatura e de pressão na interface das superfícies de atrito do freio e por sua vez, no desempenho dos freios durante o processo de freagem.

NOVAK et al. (1990) desenvolveram modelo matemático e simulação computacional para estudar a tendência ao tombamento de veículos articulados pesados. NOVAK et al. (1990) indicaram que a posição do centro de gravidade do veículo, a inclinação lateral da pista, a presença de fortes ventos laterais e a movimentação da carga no veículo são importantes parâmetros que influenciam na ocorrência de tombamento destes veículos.

EMIG et al. (1990) realizaram uma revisão histórica sobre a aplicação de sistemas ABS em veículos comerciais e mostraram o estágio tecnológico alcançado por estes sistemas de freio automáticos e a tendência futura de aplicação dos mesmos em conjunto com sistema de freio eletrônico.

YOUNG et al. (1990) indicaram que a iniciativa da *Freightliner Corporation* de introduzir veículos comerciais equipados com sistemas de freio com ABS no mercado norte-americano em 1987, marca o início de uma tendência de crescimento de aplicação de sistemas ABS nos veículos comerciais nos Estados Unidos da América, que também poderá ser influenciada por modificações nos requisitos legais sobre freios no mesmo país.

IWASAKI et al. (1990) mostraram o desenvolvimento e o desempenho de sistema ABS para veículos comerciais equipados com sistema de freios pneumático-hidráulico, realizado pela *Hino Motors Ltd.*

EMIG et al. (1990) elaboraram um histórico sobre os sistemas ABS para veículos comerciais e indicaram as tendências no desenvolvimento de tais sistemas para a década de 90 nestes veículos.

LEIBBRAND et al. (1990) apresentaram um estudo sobre os sistemas de controle automático dos freios para veículos articulados pesados, chamados ABS, incluindo um comparativo entre tais sistemas quanto à quantidade de sensores e de moduladores presentes nos mesmos e sugestões de aplicação de ABS nos veículos articulados pesados, conforme estratégias de custo, de segurança e outras definidas pelos fabricantes destes veículos.

PETERSEN et al. (1990) descreveram o desenvolvimento de sistema ABS integrado à sistema *Anti-wheel Spin Regulation* (ASR), também chamados *Automatic Traction Control* (ATC), que são aplicados para o controle do escorregamento entre pneumático e pavimento na situação de tração de veículos comerciais.

WILSON (1991) estudou as causas de acidentes envolvendo veículos articulados pesados e os tipos mais comuns de acidentes com os mesmos, como a colisão com outros veículos ou obstáculos fixos, a ocorrência de *jackknife* durante a freagem e o tombamento, ou ainda, a ocorrência destes tipos de acidentes em conjunto. WILSON (1991) também desenvolveu modelos matemáticos para a realização dos seus estudos, onde trata o veículo-trator e o semi-reboque como corpos rígidos. Um dos resultados deste trabalho mostra que durante a ocorrência de *jackknife* do veículo-trator na freagem, o mesmo pode desenvolver uma velocidade angular maior que a desenvolvida pelo semi-reboque durante a ocorrência de *jackknife* do semi-reboque na freagem (até três vezes ou mais).

FANCHER (1991) realizou ampla abordagem sobre os aspectos da segurança e do desempenho de veículos pesados articulados, como o *rollover*, o *jackknife* e outros, considerando ainda o processo de freagem dos mesmos.

HEUSSER (1991) desenvolveu um modelo matemático e decorrente programa computacional para a obtenção da desaceleração de veículos pesados na

freagem, considerando as condições de ajuste de folga do sistema de freios a tambor, influenciadas por perdas mecânicas e por efeitos térmicos no sistema de freios do veículo.

DAY (1991) desenvolveu estudos sobre os efeitos do coeficiente de atrito nos freios, da compressibilidade das lonas, da rigidez das sapatas, da força de aplicação, do assentamento e do desgaste dos freios no desempenho dos mesmos na freagem. Os resultados deste trabalho confirmaram a importância da distribuição de pressão na interface das superfícies de atrito dos freios no seu desempenho durante o processo de freagem.

FERMER & LUNDEN (1991) desenvolveram um modelo analítico para calcular a distribuição de temperatura em cascas cilíndricas e apresenta a aplicação do mesmo para calcular a distribuição de temperatura nos freios a disco e a tambor.

DAY et al. (1991) relacionaram a distribuição de calor na superfície de contato entre o disco e a pastilha de freio ou entre o tambor e a lona de freio com a distribuição de pressão nestas interfaces. Os resultados de análises realizadas pela técnica dos elementos finitos indicaram que uma distribuição de pressão uniforme na interface das superfícies de atrito dos freios é fundamental para reduzir os problemas térmicos nos freios a tambor e a disco.

KIMBROUGH & CHIU (1991) descreveram a elaboração de um algoritmo e de simulações decorrentes para o controle do sistema de freios de veículos combinados pesados durante a freagem de emergência, onde é possível determinar a quantidade de escorregamento das rodas destes veículos necessária para proporcionar o máximo esforço de freagem, sem comprometer a estabilidade direcional do veículo combinado pesado.

GOEHRING et al. (1991) discutiram sobre os requisitos econômicos, de segurança e de conforto dos pneumáticos de veículos comerciais, enfatizando que a capacidade dos mesmos de transmitir os esforços de freagem ao pavimento está diretamente relacionada com a segurança veicular. Este trabalho apresentou estudos sobre a influência de parâmetros, como a carga sobre a roda, a velocidade, a pressão interna e a profundidade da banda de rodagem do pneumático, no coeficiente de aderência que pode ser obtido no contato entre pneumático e pavimento e no

comportamento dos pneumáticos quanto às forças laterais e de freagem que podem ser desenvolvidas nos mesmos.

CHEN (1991) sugeriu que a aplicação da tecnologia eletrônica poderia melhorar o desempenho, o conforto e a segurança dos automóveis, caminhões e ônibus durante a década de 90, com um enfoque destacado para a confiabilidade dos sistemas veiculares que utilizassem tal tecnologia.

HEUSSER (1992) realizou pesquisa sobre as condições de utilização de veículos combinados pesados norte-americanos, que revelou uma incongruência entre os resultados das inspeções técnicas oficiais e os resultados das inspeções técnicas feitas neste trabalho. Por exemplo, segundo os resultados das inspeções técnicas oficiais apenas 18 % dos veículos combinados inspecionados tinham algum defeito no sistema de freios, enquanto que neste trabalho de inspeção técnica realizado por HEUSSER (1992) foram identificados algum tipo de defeito no sistema de freios em 53 % dos veículos combinados inspecionados. Considerando os resultados deste estudo, HEUSSER (1992) sugeriu algumas modificações na forma oficial de realizar as inspeções técnicas nos veículos combinados pesados, no sentido de melhorar a identificação de qualquer tipo de defeito nos sistemas de freios destes veículos.

FANCHER & FLICK (1992) realizaram estudos sobre o desempenho térmico de sistemas de freios de veículos pesados trafegando em declives e sobre a influência do mesmo no desempenho e na segurança destes veículos na freagem.

WILLIAMS (1992) fizeram uma revisão do conhecimento prático sobre o contato entre pneumático e pavimento, considerando as características da banda de rodagem, da composição do pneumático e das condições do pavimento, resultando num extenso estudo sobre o desempenho de veículos comerciais e automóveis na tração e na freagem relacionado com o contato entre pneumático e pavimento.

KULAKOWSKI et al. (1992) realizaram estudos sobre a medição das forças de freagem e laterais nos pneumáticos de veículos comerciais em várias condições para os parâmetros de velocidade, de carga vertical, de ângulo de escorregamento sobre diferentes condições de pavimento. Os resultados destes estudos mostraram que estes parâmetros tem significativa influência no desempenho dos pneumáticos de veículos comerciais durante a mudança de direção, a tração e a freagem dos mesmos.

WILKLER et al. (1992) descreveram sobre os procedimentos de levantamento da posição do centro de gravidade vertical de veículos comerciais utilizados pelas indústrias automotivas e pelo *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) nos Estados Unidos da América. A conclusão deste trabalho é que as diferenças obtidas nas medições do centro de gravidade dos veículos comerciais realizadas pelas indústrias e pelo NHTSA podem ser explicadas pelas diferenças dos procedimentos utilizados pelos mesmos.

PILLAI & FIELDING-RUSSEL (1992) desenvolveram um modelo matemático para a obtenção da resistência ao rolamento de pneumáticos de automóveis e de veículos comerciais em função da histerese, da carga normal e das características dos pneumáticos e apresenta a validação deste modelo através de comparações entre valores teóricos e experimentais obtidos.

KARCZEWSKI (1992) mostrou que a tendência de utilizar freios a disco no futuro, não é somente devido ao melhor desempenho em relação ao freio a tambor, mas também por apresentar menor custo de manutenção.

FRIES & JONES (1992) descreveram um método para calcular a velocidade inicial de veículos pesados a partir da marca de escorregamento deixada pelo pneumático no pavimento durante a freagem, tal método baseia-se no cálculo da desaceleração de veículos pesados em função dos diferentes aspectos das marcas de escorregamento deixadas pelos pneumáticos dos mesmos no pavimento durante a freagem.

EL-GINDY (1992) sugeriram que a realização de medições do desempenho de veículos articulados pesados na freagem poderia ser uma forma de estimular melhorias contínuas neste campo e poderia servir como base para a definição de requisitos legais, que devem dar prioridade a compatibilidade entre veículo-trator e semi-reboque. Este trabalho ainda sugeriu que no veículo-trator deveria existir uma indicação de quais semi-reboques são melhores para serem acoplados ao mesmo, no sentido de formar um veículo articulado pesado com a segurança e o desempenho na freagem otimizados.

WREDE & DECKER (1992) indicaram a tendência da aplicação do sistema de freio eletrônico em veículos comerciais e descreveram algumas características dos

componentes desse sistema para veículos articulados pesados. Além disso, WREDE & DECKER (1992) enfatizaram algumas vantagens de sistemas de freio eletrônico como redução de custos operacionais do veículo, maior segurança e a possibilidade de integração do sistema de freio eletrônico com outros sistemas eletrônicos do veículo e com *Intelligent Vehicle Highway Systems* (IVHS).

LIMPERT (1992) citou a facilidade de inspeção e de manutenção como vantagens do freio a tambor com comando por came “S”, mas que o mesmo apresenta desvantagens com relação ao fator de freio limitado e a necessidade de ajuste freqüente, que pode ser solucionado com o emprego de ajuste automático neste tipo de freio.

LIMPERT (1992) mostrou as vantagens do freio a tambor com comando por cunhas que são: maior fator de freio, menor dimensão, menor peso e melhor ajuste quando comparado com o freio a tambor com comando por came “S”. O ajuste automático das cunhas garante sempre a folga adequada entre lonas e tambor.

LIMPERT (1992) mostrou o cálculo de freios a tambor com análise do momento de freagem produzido, do fator de freio e do efeito da rigidez da sapata e do tambor no momento de freagem para diferentes configurações deste tipo de freio, com acionamento hidráulico e pneumático.

LIMPERT (1992) trouxe também um breve histórico sobre o uso desses sistemas ABS em veículos rodoviários em geral e mostrou que o sistema ABS previne o escorregamento de qualquer roda do veículo durante a freagem, numa tentativa de ajustar o esforço de freagem ao coeficiente de adesão disponível entre os pneumáticos das rodas e o pavimento.

MOHAMEDSHAH et al. (1993) mostraram que algumas das características dos veículos comerciais pesados, como os maiores peso e dimensão e as menores capacidades de vencer aclives e de frear em relação aos automóveis, poderiam influenciar na forma como os mesmos são afetados pelas características geométricas das rodovias, podendo muitas vezes comprometer a segurança veicular nas mesmas.

NORDSTROM (1993) relatou sobre estudos teóricos e experimentais a respeito da estabilidade e do desempenho de veículos pesados na freagem, procurando ainda mostrar a relação entre estes e a segurança veicular.

OLIVEIRA et al. (1993) mostraram o desenvolvimento de uma técnica capaz de elevar a vida útil do material de atrito dos freios pneumáticos a tambor com came “S” em até duas vezes, sem alterar a eficiência do sistema de freios, sem aumentar os custos e proporcionando ainda uma maior vida útil aos pneumáticos do veículo. Basicamente esta técnica envolve a redução adequada do diâmetro do tambor de freio para melhorar a refrigeração dos freios e reduzir o aquecimento dos pneumáticos. Os benefícios de tal técnica foram comprovados experimentalmente em testes de campo com os veículos percorrendo uma descida de serra.

WOODS et al. (1993) realizaram o desenvolvimento de modelo matemático para analisar as características de *handling* e de freagem de veículos comerciais, considerando-os como corpo rígido e sem efeito da suspensão. Neste trabalho foram obtidos resultados satisfatórios nas comparações teórico-experimentais que validaram o modelo matemático desenvolvido.

SJAHDANULIRWAN (1993) descreveram a elaboração de um modelo analítico para obter o coeficiente de aderência entre pneumático e pavimento e as forças longitudinal e lateral que atuam no pneumático, em função da quantidade de escorregamento longitudinal e lateral do pneumático em relação ao pavimento. Neste trabalho foram mostrados resultados teóricos e experimentais que validaram o modelo desenvolvido. Ressaltando que o conhecimento das forças longitudinal, lateral e vertical que atuam nos pneumáticos dos veículos é fundamental para a análise da estabilidade e desempenho do mesmo na freagem.

FANCHER & BAREKET (1993) desenvolveram modelo matemático, capaz de considerar a influência da profundidade de banda de rodagem do pneumático e das características do pavimento (como o tipo de material e a rugosidade superficial), na capacidade de produção de forças de freagem no contato entre pavimento e pneumáticos de veículos comerciais.

TRANSPORT ENGINEER (1993a) desenvolveu estudos que mostraram que a diferença entre os tempos de resposta dos freios do veículo-trator e do semi-reboque poderiam afetar a compatibilidade entre ambos. Os resultados deste estudo mostraram ainda que o controle da freagem do eixo traseiro do veículo-trator pode

proporcionar uma melhoria significativa na estabilidade direcional e reduzir a ocorrência de tombamento do conjunto durante o processo de freagem.

POPOV et al. (1993) destacaram a importância da posição do centro de gravidade da carga colocada em veículos comerciais pesados para transporte de carga líquida na estabilidade ao tombamento e na distribuição de pesos dinâmicos nos eixos, através de estudos sobre o movimento de cargas líquidas transportadas em reservatórios cilíndricos (conhecido como *sloshing*) e que é influenciado pela quantidade de carga líquida e forma do reservatório entre outros fatores.

TRANSPORT ENGINEER (1993b) realizou estudo da compatibilidade entre veículo-trator e semi-reboque durante a freagem e mostrou que a temperatura de trabalho dos freios, o estado das guarnições e a instalação de ABS são fatores que podem influenciar o tempo de resposta dos freios e afetar a compatibilidade entre veículo-trator e semi-reboque na freagem. Este trabalho ainda sugeriu como uma das formas de elevar a compatibilidade do conjunto, que o veículo-trator e o semi-reboque possuíssem guarnições de freio com condições de uso próximas e adequadas e que trabalhassem com os freios em temperaturas próximas, o que pode ser conseguido com manutenção adequada e a aplicação dos freios de todo o conjunto na freagem, respectivamente.

CULLEN (1993) mostrou que a instalação de sistema ABS nos veículos comerciais, acompanhada de balanceamento adequado, deveria ser a tendência de projeto de freios adotada pelos fabricantes norte-americanos, para satisfazer os requisitos da legislação norte-americana para a década de 90.

SHIRAI et al. (1994) descreveram um sistema desenvolvido para permitir a repetição das condições de testes de campo com veículos pesados articulados nas manobras de mudança de direção e de freagem, composto por um sistema de controle automático programável de aplicação dos freios e de mudança de direção do veículo nas manobras e por uma câmera de vídeo para registrar os movimentos do veículo combinado nas mesmas.

DOI et al. (1994) estudaram a segurança ativa em veículos em geral no sentido de evitar a colisão traseira com o veículo que trafega à frente. O sistema de anti-colisão traseira incorporava um sensor para obter a distância e um algoritmo para

estimar a trajetória do veículo que trafega à frente e de um sistema de freio automático dos freios, capaz de controlar a velocidade do veículo e mantê-lo a uma distância adequada do veículo que vai à frente.

YANG (1994) mostrou que a manutenção de distância adequada entre os veículos comerciais que compõem um comboio é fundamental para evitar a ocorrência de acidentes entre os mesmos e sugeriu que esta distância seja proporcional à velocidade dos veículos comerciais do comboio, às condições de tráfego e do pavimento e a capacidade de frear dos veículos.

KIMBROUGH et al. (1994) descreveram o desenvolvimento de sistemas de controle de freagem e de direção de veículos combinados pesados, baseados no modelo do pneumático onde as forças são funções lineares do escorregamento das rodas, produzindo equações de movimento do veículo lineares.

WILLIAMS et al. (1994) expuseram que em estudos estatísticos realizados nos Estados Unidos da América observou-se que cerca de 40 % dos motoristas entrevistados não souberam indicar como frear um veículo em uma situação de emergência em pavimento molhado ou escorregadio. Este fato mostrou a importância da utilização de ABS nos freios dos veículos, pois na condição de pavimento molhado ou escorregadio o ABS pode garantir a estabilidade direcional do veículo, além de poder reduzir o espaço de freagem do mesmo.

DUFFIN (1994) estudou a confiabilidade e a proteção contra falhas de sistemas ABS disponíveis para automóveis e veículos comerciais, expondo que a instalação de sistema ABS pode elevar a quantidade de falhas relacionadas com os freios durante a utilização do veículo (devido à maior complexidade do sistema e a maior quantidade de componentes) mas em contrapartida pode reduzir sensivelmente a quantidade de acidentes e as consequências dos mesmos caso ocorram, quando comparado com veículos sem sistema ABS.

Considerando que, segundo a ECE-R13, uma falha no sistema ABS não pode prejudicar o desempenho do sistema de freios, a instalação de sistema ABS mostra-se mais vantajosa que a sua ausência, principalmente no enfoque da segurança veicular.

MATHUES (1994) discorreu sobre o desenvolvimento de sistemas ABS em quatro fronteiras, que são a redução de custo, a ampliação do campo de aplicação, a

integração com outros sistemas veiculares e a melhoria da interface entre a capacidade de desempenho do veículo na freagem e a habilidade do motorista em utilizá-la plenamente, através de aplicação das técnicas de Lógica Fuzzy (que proporciona sistemas de interface que podem mapear funções que não tem modelo matemático equivalente ou que são muito complexas) e de Redes Neurais (que permitem representar a solução de diferentes classes de equações algébricas não lineares e funções de transferência diferenciais).

TRANSPORT ENGINEER (1994b) mostrou algumas das vantagens da utilização de sistemas EBS em veículo articulado pesado, como a redução dos tempos de resposta dos freios, o balanceamento dos freios otimizado, a conjugação com sistema ASR, a eliminação da instalação de válvulas proporcionadoras sensíveis à carga e a sensível melhoria do desempenho, da estabilidade e da segurança durante a freagem.

SEIFF (1995) revelou que durante a inspeção de 1.520 veículos combinados norte-americanos realizada em 1995 observou-se que 56 % dos mesmos possuíam defeitos no sistema de freios que poderiam retirá-los de circulação. Este estudo conduzido pelo NHTSA indicou ainda que o desempenho insatisfatório na freagem pode ter sido responsável por um terço dos acidentes envolvendo veículos combinados norte-americanos.

FANCHER et al. (1995) mostrou que a aprovação dos veículos comerciais pesados na inspeção do sistema de freios depende dos critérios adotados para avaliar o ajuste dos freios destes veículos.

ROMARO et al. (1995) realizaram análise sobre os acidentes com veículos comerciais no Brasil e destacaram a necessidade de aperfeiçoar a segurança ativa e passiva dos mesmos para melhorar a segurança veicular no Brasil.

HUANG & SHYR (1995) apresentaram modelo matemático para estudar os efeitos do atrito na interface entre guarnição e tambor na distribuição de pressão ao longo da mesma, que está relacionado com o fator de freio de sistemas de freio a tambor e com o desempenho do veículo comercial na freagem.

GANGOPADHYAY et al. (1995) analisaram o desempenho de veículos combinados pesados na freagem e mostra que existe uma considerável variação nos

coeficientes de aderência utilizados por eixo na freagem devido à condição de carga do veículo-trator-semi-reboque. Os resultados deste trabalho mostraram que a condição de veículo carregado apresentou melhores valores de eficiência na freagem.

POTTINGER et al. (1995) propuseram um procedimento prático para determinação experimental das propriedades dos pneumáticos de veículos pesados durante a freagem e a mudança de direção, como os coeficientes de aderência longitudinal e lateral utilizados pelos mesmos, que são importantes informações para a representação dos pneumáticos em modelos de dinâmica veicular de veículos pesados.

CHEN et al. (1995) apresentaram estudo sobre sistema de controle automático para a mudança de direção e freagem de veículo-trator-semi-reboque para a aplicação em IVHS. Com tal sistema automático é possível estabilizar os movimentos de guinada e prevenir a ocorrência de *jackknife* do veículo combinado durante o processo de freagem.

BILLING et al. (1995) descreveram a avaliação de sistemas ABS e da eficiência da freagem de veículos pesados combinados através de testes de campo com estes veículos em várias condições de carga.

HARDY & CEBON (1995) descreveram estudo de estratégias de controle de sistemas ABS para veículo-trator acoplado à semi-reboque com suspensão por feixe de molas e com suspensão pneumática. Os resultados do trabalho indicaram que o veículo combinado com semi-reboque com suspensão pneumática teve o melhor desempenho na freagem, fato que pode ser explicado pela excessiva transferência de peso entre os eixos em tandem para o semi-reboque com suspensão por feixe de molas.

NAKAZAWA et al. (1995) realizaram estudos sobre sistemas de freio eletrônico no sentido de otimizar a força de freagem em função do peso dinâmico sobre as rodas do veículo comercial pesado. Os resultados deste trabalho mostraram que os sistemas EBS são capazes de elevar significativamente o desempenho e estabilidade dos veículos comerciais pesados na freagem em qualquer condição de carga.

FERNANDES et al. (1995a) descreveram um programa computacional criado para obter o desempenho de veículos articulados pesados na freagem com a aplicação

da técnica do passeio do centro de gravidade, que permite representar qualquer posição que o centro de gravidade do veículo pode ocupar para qualquer condição operacional possível e admissível pelo fabricante e pela legislação.

RANGANATHAN & YANG (1996) estudaram a influência do movimento longitudinal de carga líquida dentro de semi-reboque tanque na distribuição de forças normais e na aderência utilizada entre os eixos veiculares e no desempenho do veículo-trator-semi-reboque na freagem. Neste estudo foi analisado o efeito do deslocamento da carga líquida e por consequência da posição longitudinal do centro de gravidade do semi-reboque, considerando vários parâmetros do veículo e da forma do tanque de carga, através de modelo matemático e de simulação computacional. Os resultados mostraram que a variação da posição longitudinal do centro de gravidade longitudinal da carga pode influenciar significativamente no desempenho e na segurança do veículo combinado durante a freagem.

GOLDSTEIN (1996) utilizou o *Finite Element Method* (FEM), que é o Método dos Elementos Finitos, para simular o movimento de pneumático radial de veículos pesados nas condições de rolamento livre, mudança de direção e freagem. Neste estudo foram obtidos os escorregamentos lateral e longitudinal dos pneumáticos e as forças produzidos pelos mesmos no contato com o pavimento na freagem.

POTTINGER et al. (1996) realizaram estudos sobre as propriedades dos pneumáticos de veículos pesados na freagem considerando a influência de várias características, como a pressão interna e a carga no pneumático, o desgaste da banda de rodagem entre outros. Posteriormente, estas propriedades seriam utilizadas em programas de simulação da dinâmica veicular na freagem.

Von GLASNER et al. (1996) mostraram através de simulação computacional que a distribuição instantânea das forças de freagem entre os eixos dos veículos comerciais influencia a estabilidade e o desempenho destes na freagem. Os resultados deste estudo revelaram que o balanceamento dos freios não adequado poderia levar o veículo a situações perigosas e incontroláveis pelo motorista durante a freagem.

Von GLASNER et al. (1996) ainda sugeriram que sistemas automáticos ABS podem melhorar a segurança dos veículos comerciais na freagem, mas que o

desempenho de tais sistemas automáticos é influenciado pela distribuição das forças de freagem entre os eixos veiculares estabelecida.

BLAKEMORE (1996) mostrou a importância da aplicação de sistemas para prevenir o tombamento, a ocorrência de *jackknife* e para alertar os motoristas de veículos comerciais pesados sobre a possibilidade de ocorrer acidentes na segurança veicular. Este trabalho também enfatizou a importância de investir no treinamento dos motoristas destes veículos para levá-los a praticar a direção defensiva. BLAKEMORE (1996) destacou ainda que os custos destes investimentos na segurança veicular são inferiores aos custos das perdas humanas e materiais dos acidentes com tais veículos.

PALKOVICS et al. (1996) descreveram o desenvolvimento de um sistema computadorizado a bordo de veículos pesados capaz de identificar situações críticas de *rollover* e de *jackknife* e de alertar o motorista do veículo, tal sistema utilizava o levantamento de parâmetros da condição dinâmica do veículo realizado através de sensores instalados no veículo combinado.

PALKOVICS & EL-GINDY (1996) estudaram quatro estratégias de controle da estabilidade de veículos pesados articulados, que eram o controle da direção das rodas do eixo traseiro do veículo-trator, o controle da direção das rodas do semi-reboque, o controle do momento aplicado na quinta-roda e o controle do momento de guinada do veículo-trator, para elevar a estabilidade direcional e ao tombamento destes veículos nas manobras de mudança de direção e de freagem.

A estratégia de controle do momento de guinada no veículo-trator parte do princípio de controlar o escorregamento das rodas do eixo traseiro do mesmo durante a freagem, procurando manter a aderência utilizada pelas rodas de tal eixo abaixo da aderência disponível no contato entre pneumático e pavimento. Esta estratégia se mostrou eficiente para garantir a estabilidade direcional, evitando a ocorrência do *jackknife* do veículo articulado pesado durante a freagem.

ESMAILZADEH (1996) realizou estudo do desempenho e da estabilidade de veículos articulados pesados nas manobras de mudança de direção e freagem através de modelo matemático e simulação computacional que permitia considerar a utilização de sistema de direção nas rodas do semi-reboque.

SCHEIBE et al. (1996) mostraram o desenvolvimento de sistemas inteligentes para o acompanhamento das condições do sistema de freios pneumáticos de veículos comerciais. Tais sistemas poderiam proporcionar ao motorista informações sobre as condições dos freios em tempo real, como a existência de folgas excessivas e de desgastes dos componentes, que podem auxiliá-lo na manutenção preventiva e na condução do veículo com maior segurança.

BUNTING (1996a) indicou a tendência de utilização de freios a disco e de sistemas eletrônicos EBS nos veículos comerciais pesados no mercado europeu e que os sistemas eletrônicos poderiam melhorar a compatibilidade entre veículo-trator e semi-reboque na freagem.

KENNETT (1996) relatou sobre a crescente aplicação de sistemas EBS em veículos comerciais pesados articulados e destacou algumas das principais vantagens dos mesmos, como a redução do tempo de resposta dos freios, a diminuição do espaço de freagem, a redução do desgaste dos freios e da manutenção destes, o melhor equilíbrio dos freios de cada lado do veículo e a possibilidade de elevar a compatibilidade entre o veículo-trator e o semi-reboque.

KENNETT (1996) ainda mostrou que o acoplamento entre veículo-trator com sistema EBS e semi-reboque sem o mesmo sistema poderia afetar as vantagens proporcionadas por tais sistemas.

BUNTING (1996b) mostrou a tendência da instalação de sistemas EBS nos veículos comerciais pesados e algumas vantagens de tal sistema, como a redução do tempo de resposta dos freios de veículos pesados articulados, que poderia melhorar o desempenho dos mesmos na freagem e maior facilidade de integração com outros sistemas veiculares.

BRAVER et al. (1997) mostrou resultados estatísticos sobre a ocorrência de colisões entre veículos comerciais pesados e automóveis e revelaram que existem elevadas taxas de fatalidade entre os motoristas de automóveis em relação as mesmas taxas para os motoristas dos veículos comerciais pesados. Este trabalho também destacou a importância de reduzir os acidentes com veículos comerciais com ocorrência de tombamento e de perda de estabilidade na freagem.

HILDEBRAND & WILSON (1997) realizaram estudo detalhado sobre os acidentes com veículos comerciais pesados no Canadá, destacando que existe uma predominância do tombamento destes veículos nos acidentes, que tem como principais causas o excesso de velocidade, a forma de carregamento e a realização das manobras de mudança de direção e de freagem de forma inadequada. Este estudo apontou os principais fatores que contribuem para a ocorrência destes acidentes, como as condições do motorista (relacionada com o período do dia, a natureza do transporte, o ambiente da cabine, a quantidade de horas de serviço, a quantidade e qualidade do sono, os problemas de saúde e fadiga, a inexperiência e a ingestão de drogas e álcool pelos motoristas), as condições de visibilidade, as condições mecânicas dos sistemas veiculares (freios, direção e outros) e as formas de carregamento do veículo. Este trabalho ainda fez recomendações para a elevação da segurança veicular contemplando vários aspectos.

JOHN (1997) desenvolveu um método matemático simplificado para a análise de freios a tambor considerando os vários arranjos de sapatas possíveis e as variações no material de atrito dos freios. Tal método permitiu obter as forças produzidas pelos freios e identificar as condições indesejáveis que poderiam levar ao bloqueio total das rodas do veículo comercial na freagem.

LEBER et al. (1997) desenvolveram um mecanismo controlado eletronicamente capaz de controlar e de manter estável o fator de freio de sistemas de freio a tambor.

LEE (1997b) desenvolveram uma técnica de controle veicular para IVHS no sentido de controlar os sistemas de direção e de freios do veículo-trator-semi-reboque e evitar a ocorrência de *jackknife* do mesmo.

JACOBSON (1997) fizeram uma revisão sobre as técnicas de freio eletrônico disponíveis para veículos comerciais, freqüentemente chamadas de *Electronic Brake System* (EBS), de *Electronically Limited Braking* (ELB) e de *Electronically Proportioned Braking* (EPB) e expuseram algumas das vantagens dos freios eletrônicos, como a redução do espaço de freagem e do desgaste dos freios e a melhoria na estabilidade dos veículos pesados na freagem.

LINDEMANN et al. (1997) descreveram o desenvolvimento de sistemas de freio eletrônico EBS para veículo-trator e destacaram como principais vantagens destes sistemas a redução do espaço de freagem e a elevação da estabilidade de veículos combinados pesados na freagem, a redução da quantidade de componentes e a maior facilidade de instalação e manutenção dos freios e a melhoria da compatibilidade entre veículo-trator e semi-reboque.

HECKER et al. (1997) apresentaram o desenvolvimento de sistema de simulação computacional para veículos comerciais em várias manobras, incluindo a freagem, com a finalidade de incrementar a segurança de tais veículos.

KAWABE et al. (1997) descreveram um sistema automático de controle de bloqueio total das rodas de veículos comerciais na freagem que era capaz de elevar a estabilidade destes veículos em pavimento molhado, conforme comprovações por simulação computacional e testes de campo.

KOBE (1997) relatou a tendência de substituição dos sistemas de freio convencionais hidráulicos e pneumáticos por sistemas de freio totalmente eletrônico, passando antes por uma fase intermediária de desenvolvimento de freios mistos constituídos por sistemas hidráulico-eletrônicos ou pneumático-eletrônicos que podem ser utilizados para a aquisição de experiência em sistemas de freio eletrônico.

GLADYSHEV et al. (1998) mostraram o desenvolvimento de modelo matemático para avaliar os sistemas de freio pneumáticos e eletro-pneumáticos, considerando a dinâmica dos gases e a aplicação de dispositivos eletro-pneumáticos em tal sistema, o processo de freagem, a utilização de sensores e de sistemas de controle eletrônico dos freios.

SCHWARZ et al. (1998) trataram sobre o desenvolvimento de sistema de freio eletrônico EBS de baixo custo para freios a disco. WEIBLEN et al. (1998) desenvolveram um sensor para a medição do momento produzido no freio que pode fornecer informações para a otimização do sistema de freios, no sentido de melhorar o balanceamento dos freios e elevar o desempenho do veículo na freagem.

IWASAKI et al. (1998) elaboraram um algoritmo para monitorar a pressão nos pneumáticos de veículos e que poderia ser incorporado em sistemas ABS, sem produzir custos adicionais nos mesmos.

ASANO (1998) destacaram os requisitos básicos de desempenho para unidades eletrônicas de controle serem aplicadas nos veículos e nos sistemas ABS, tais como a capacidade de processamento, o baixo consumo de energia, a adequada eficiência, a larga faixa de temperatura de trabalho e a confiabilidade.

Von GLASNER et al. (1998) descreveram a aplicação de sistemas eletrônicos no motor, na transmissão, na direção, na suspensão e nos freios e de sistemas de comunicação e informação para reduzir a tensão dos motoristas e elevar o conforto e a segurança destes no trabalho.

Vários trabalhos da pesquisa bibliográfica realizada revelam a importância de alguns conceitos comuns nos trabalhos sobre a freagem de veículos articulados pesados, como a intrínseca relação entre o balanceamento dos freios e o desempenho e a estabilidade no processo de freagem, como a compatibilidade está relacionada intimamente com o balanceamento e os tempos de resposta dos freios e como a manutenção adequada dos freios é fundamental para se obter dos mesmos o melhor desempenho na freagem.

Ainda em relação à pesquisa bibliográfica levantada, pode-se dizer que este trabalho traz uma contribuição original para a análise do processo de freagem de veículos pesados articulados e da segurança veicular através da técnica dos mapas de desempenho, que proporciona uma forma de obter uma visualização ampla do desempenho e da estabilidade destes veículos na freagem não encontrada na pesquisa bibliográfica realizada.

A pesquisa bibliográfica deste trabalho também procurou mostrar uma visão geral das áreas de interesse de estudo sobre a freagem de veículos pesados, de forma cronológica para mostrar como o conhecimento humano sobre o assunto vem sendo adquirido e de forma que o leitor perceba a existência da pluralidade de áreas de pesquisa envolvidas sobre o assunto e faça a correlação entre as mesmas durante a leitura deste trabalho.

3. SISTEMA COMPUTACIONAL

Este Capítulo contém uma descrição do sistema computacional desenvolvido abordando a estrutura, o funcionamento, as possibilidades de estudo, as características computacionais, as aplicações e benefícios do mesmo.

O sistema computacional desenvolvido pode ser descrito pelo diagrama de blocos da Figura 1 mostrada a seguir. Neste diagrama destacam-se cinco seções que são: Arquivo, Trabalho, Condições Iniciais e Gráficos e Tabelas.

1 . Arquivo:

O sistema possui um banco de dados que permite ao usuário trabalhar com os arquivos. Pode-se iniciar um arquivo novo, abrir um arquivo existente, trocar de diretório e imprimir todos os registros de qualquer arquivo. Nesta seção o usuário do sistema pode arquivar os seus estudos e ter acesso aos mesmos quando necessário na forma de um banco de dados.

O sistema permite ao usuário trabalhar também com os registros de cada arquivo aberto. Pode-se exibir todos os registros de um arquivo, exibir apenas os registros de um usuário do arquivo, gravar um registro no arquivo para estudos posteriores, gravar um registro no arquivo alterando o seu nome caso seja necessário, apagar e imprimir qualquer registro do arquivo.

Na seção Arquivo são exibidas mensagens que orientam o usuário no trabalho com o arquivo e os registros. Cada registro é identificado por três campos que são o nome do usuário, o nome do veículo e o número da versão de trabalho. Esta identificação permite que estudos do mesmo usuário, feitos para um único veículo, mas com características diferentes, sejam individualizados.

FIGURA 1 - Diagrama de blocos do sistema computacional

O sistema define inicialmente o estudo que será realizado e assume valores iniciais para as variáveis do programa (oferecendo um *default* ao usuário). Este recurso facilita a entrada de dados pelo usuário, que pode alterar ou apenas confirmar os valores iniciais das variáveis do programa.

2 . Trabalho:

Esta seção permite ao usuário obter informações a respeito do seu estudo e definir os dados necessários para o cálculo desejado, através dos itens: *Informativo*, *Veículo*, *Centro de Gravidade*, *Estudo*, *Movimento/Rampa*, *Opções*, *ECE-R13* e *Mapa de Desempenho*.

No item *Informativo* tem-se um resumo das possibilidades de estudo escolhidas pelo projetista e uma identificação do estudo através do nome do usuário, do veículo e da versão.

No item *Veículo* o projetista escolhe se vai realizar estudos com um veículo comercial de dois eixos ou de um veículo articulado pesado, como um veículo-trator-semi-reboque ou um ônibus articulado. Para tanto, basta o projetista fornecer neste item as características geométricas, construtivas e funcionais do veículo a ser estudado.

No item *Centro de Gravidade* o usuário pode fornecer o centro de gravidade do veículo ou os dados necessários para que o sistema o calcule (caso o mesmo não seja conhecido).

Através do item *Estudo* define-se o estudo da freagem do veículo, fornecendo-se as características do sistema de freios instalado nos eixos do veículo, que pode ser a tambor, a disco ou uma combinação de ambos

No item *Movimento/Rampa* o projetista escolhe se o veículo será analisado durante a freagem em trecho retilíneo, em trecho curvilíneo ou estacionado em aclave e em declive.

Para o trecho retilíneo são fornecidas as condições do movimento como velocidade, tempos de resposta e outras. Para o trecho curvilíneo escolhe-se a velocidade, o raio de curva, a inclinação lateral da pista e se a curva será para a direita ou para a esquerda. Para o veículo estacionado em aclave e em declive o projetista define as características do freio de estacionamento instalado no veículo.

Na freagem em trecho retilíneo, o sistema obtém as forças envolvidas no movimento, as forças na quinta-rodas, as forças normais e a distribuição das mesmas nos eixos, as forças de freagem ideais e reais e a distribuição das mesmas nos eixos. Obtém também o coeficiente de adesão utilizado para cada eixo, a relação entre o coeficiente de adesão e a desaceleração, a relação entre a pressão de atuação do sistema de freios e a desaceleração, o desempenho e a estabilidade do veículo.

Para a freagem em trecho curvilíneo, o sistema obtém as forças envolvidas no movimento, as forças na quinta-rodas, as forças laterais, as forças normais e a distribuição das mesmas nos eixos, as forças de freagem ideais e reais e a distribuição

das mesmas nos eixos. Obtém ainda a relação entre a pressão de atuação e a desaceleração e a estabilidade do veículo quanto à velocidade de tombamento.

O estudo do estacionamento em aclave e em declive fornece a inclinação máxima da pista que o veículo consegue estacionar, considerando os limites de aderência do pavimento e os limites do sistema de freios do veículo.

Em *Opções* o projetista pode escolher os itens *Desaceleração*, *Casos* e *Passeio do centro de gravidade*.

Em *Desaceleração* o projetista escolhe se a freagem do veículo será com uma desaceleração fornecida pelo projetista ou proporcionada pelo sistema de freios instalado, sendo que neste caso, pode-se definir ainda a forma de atuação dos freios, de válvulas proporcionadoras instaladas no veículo (como a válvula de controle de pressão no eixo traseiro do veículo e a válvula de controle de pressão para o semi-reboque) e pode-se introduzir dados da relação entre a pressão e a desaceleração do veículo obtidos em testes de campo, para a realização de comparações com os valores teóricos desta relação fornecidos pelo programa computacional.

No item *Casos* pode-se escolher qual o caso que se deseja estudar, ou seja, qual a forma de freagem dos eixos do veículo (em separado ou em conjunto com várias combinações), sendo que os casos disponíveis para o estudo seguem as possibilidades escolhidas pelo projetista em *Veículo*, *Estudo*, *Movimento/Rampa* e *Desaceleração*.

Para o veículo de dois eixos são disponíveis para estudo os seguintes casos durante a freagem do veículo nos trechos retilíneo e curvilíneo e estacionado em aclave ou em declive:

- freagem do eixo dianteiro,
- freagem do eixo traseiro,
- freagem dos dois eixos em conjunto.

Para o veículo articulado pesado são possíveis os seguintes casos durante a freagem no trecho retilíneo e no trecho curvilíneo:

- freagem do veículo-trator,
- freagem do semi-reboque,
- freagem do conjunto.

Para o veículo articulado pesado estacionado em aclive ou em declive, o projetista obterá a inclinação máxima da pista suportada pelo veículo, freando nas formas de atuação do freio de estacionamento a seguir:

- apenas o eixo dianteiro do veículo-trator,
- apenas o eixo traseiro do veículo-trator,
- eixos dianteiro e traseiro do veículo-trator,
- eixo dianteiro do veículo-trator e eixos do semi-reboque,
- eixo traseiro do veículo-trator e eixos do semi-reboque,
- apenas os eixos do semi-reboque,
- todos os eixos do veículo combinado.

No item *Passeio do c.g.* o usuário fornece os dados necessários para a obtenção do “passeio do centro de gravidade” do veículo nas direções longitudinal, transversal e vertical.

No item *ECE-R13* o usuário fornece os dados necessários para a elaboração dos Diagramas 1B, 3 e 4A definidos no Anexo 10 da regulamentação ECE-R13, que trata da distribuição das forças de freagem entre os eixos veiculares e da compatibilidade entre veículo-trator e semi-reboque.

No item *Mapa de Desempenho* são introduzidos os dados para o cálculo da freagem do veículo através da Técnica dos Mapas de Desempenho, que podem ser construídos para veículos de dois eixos e para veículos combinados.

3 . Condições Iniciais:

Nesta seção o projetista de sistemas de freio estabelecerá as condições iniciais da análise da freagem, fornecendo os seguintes dados: a aceleração da gravidade local, o coeficiente de adesão máximo disponível entre pneumático e pavimento e outros. Isto permite a representação das condições normais de utilização do veículo ou das condições dos testes de campo.

4 . Gráficos e Tabelas:

Esta seção proporciona ao projetista a escolha de quais resultados do estudo definido anteriormente deseja visualizar na forma de gráficos e tabelas, através do monitor do computador ou da impressão dos mesmos.

O diagrama da Figura 2 permite visualizar as possibilidades de estudo através do sistema para o veículo-trator sem o semi-reboque.

FIGURA 2 - Diagrama das possibilidades de estudo do veículo-trator sem o SR

São possíveis de serem realizados 38 estudos diferentes da freagem do veículo-trator sem o semi-reboque, incluindo a análise de 3 formas de atuação do freio de estacionamento, conforme o diagrama de blocos da Figura 2.

O diagrama da Figura 3 permite visualizar as possibilidades de estudo através do sistema para o veículo-trator com o semi-reboque.

FIGURA 3 - Diagrama das possibilidades de estudo do veículo-trator com SR.

Podem ser realizados 40 estudos diferentes da freagem do veículo-trator com o semi-reboque, incluindo a análise de 7 formas de atuação do freio de estacionamento, conforme o diagrama de blocos da Figura 3.

Para os diagramas de blocos apresentados nas Figuras 2 e 3 o conteúdo dos blocos apresenta o seguinte significado:

CG CONHECIDO: estudos desenvolvidos com a posição do CG conhecida.

CG DESCONHECIDO: estudos realizados quando o CG do veículo é desconhecido, para obtê-lo o usuário pode introduzir os dados necessários para o seu cálculo pelo programa.

COM PASSEIO CG: estudos desenvolvidos com a técnica do passeio do CG.

SEM PASSEIO CG: estudos realizados sem a técnica do passeio do CG.

MAPA: estudos desenvolvidos através da técnica dos mapas de desempenho.

R: estudo da freagem do veículo em trecho retilíneo plano.

C: estudo da freagem do veículo em trecho curvilíneo.

A/D: estudo do veículo estacionado em aclive ou declive.

F: estudo da freagem do veículo com a desaceleração obtida com a aplicação dos freios instalados no mesmo.

G: estudo da freagem do veículo com a desaceleração introduzida em função de valores escolhidos da aceleração da gravidade em porcentagem.

1 a 7: escolha da forma de atuação do sistema de freios do veículo.

VERIFICAÇÃO ECE-R13: estudos da freagem do veículo com a verificação dos requisitos de distribuição das forças de freagem e de compatibilidade da ECE-R13.

O sistema computacional que foi desenvolvido pode ser utilizado em microcomputadores e *laptops*, o que auxilia o projetista em testes de campo.

O sistema pode ser utilizado em microcomputadores servidos de monitores monocromáticos ou coloridos; de impressora matricial, a laser ou por jato de tinta. No desenvolvimento do sistema, visando a sua utilização em microcomputadores, teve-se o objetivo de permitir que o projetista o utilize dispondo de diversos tipos de periféricos.

O sistema possui boa interface e recurso de ajuda ao projetista, com o objetivo de orientá-lo durante a sua utilização. Possui saídas gráficas coloridas ou não, conforme o monitor e a impressora disponíveis.

O sistema desenvolvido pode ser aplicado nas diferentes etapas de definição do sistema de freios pelo projetista, desde o seu projeto até os testes de campo com o veículo, permitindo o desenvolvimento de novos sistemas e a avaliação dos existentes nos veículos.

O modelo matemático e o sistema elaborados fornecem uma ampla visualização do processo de freagem do veículo-trator com ou sem o semi-reboque, podendo-se obter:

1. O levantamento do centro de gravidade e de todas as suas posições possíveis e admissíveis, obedecendo às restrições do fabricante e da legislação, através da técnica do “balanceamento estático” ou “passeio do centro de gravidade”.

2. As forças de freagem ideais e reais e as distribuições das mesmas nos eixos, com freagem nos trechos retilíneo e curvilíneo.

3. As forças normais de reação do contato dos pneumáticos com o pavimento e a distribuição das mesmas nos eixos, com freagem em trecho retilíneo e curvilíneo.

4. As forças longitudinal, lateral e vertical na quinta-roda, para o veículo freando nos trechos retilíneo e curvilíneo.

5. A força de inércia do veículo na freagem em movimento retilíneo e curvilíneo.

6. A força centrífuga do veículo em trecho curvilíneo.

7. As forças laterais de reação do contato dos pneumáticos com o pavimento no movimento curvilíneo.

8. O desempenho do veículo em trecho retilíneo através da desaceleração atingida, da eficiência obtida e do espaço percorrido durante a freagem, para qualquer condição operacional.

9. A estabilidade do veículo em trecho retilíneo através da obtenção dos coeficientes de adesão utilizados por eixo e de qual eixo escorrega primeiro. Obtém também a sequência de escorregamento dos eixos durante a freagem em qualquer condição operacional do veículo.

10. A estabilidade em trecho curvilíneo com a obtenção da velocidade de tombamento do veículo.
11. A inclinação máxima do aclave e declive que o veículo consegue estacionar.
12. A influência de válvulas proporcionadoras instaladas no sistema de freios do veículo no desempenho e estabilidade deste na freagem.
13. A verificação de requisitos da regulamentação ECE-R13.
14. Uma ampla visualização do desempenho, da estabilidade e da segurança durante o processo de freagem do veículo, através da técnica dos mapas de desempenho.

Todos os itens acima podem ser obtidos para diversos veículos. Estes itens permitem que o projetista possa avaliar o veículo durante a freagem, em qualquer pavimento e em qualquer condição operacional, nos trechos retilíneo, curvilíneo e estacionado em aclave e declive. Permite ainda o estudo da influência de cada característica do veículo e do sistema de freios durante a freagem.

Desta forma, o sistema computacional desenvolvido é uma ferramenta de trabalho útil ao projetista de freios e de outros sistemas do veículo, desde a fase de projeto até a fase de testes de campo.

Cada estudo escolhido possui vários gráficos e tabelas. Se o projetista fizer alterações nos dados iniciais de cada estudo, pode-se ter centenas de gráficos e tabelas. Portanto, neste trabalho serão apresentados apenas alguns estudos e algumas comparações entre valores teóricos e experimentais, obtidos apenas para um tipo de veículo entre os vários que podem ser estudados durante o processo de freagem através da utilização deste sistema computacional.

As outras possibilidades já desenvolvidas e não apresentadas neste trabalho podem fazer parte de propostas de estudo a serem desenvolvidas futuramente, com a necessária comprovação teórico-experimental.

4. METODOLOGIA

A seguir tem-se uma descrição da metodologia utilizada neste trabalho que contempla, além da revisão bibliográfica realizada, a definição das principais hipóteses adotadas para o desenvolvimento do modelo matemático deste trabalho, a escolha do veículo e das configurações do mesmo envolvidas neste estudo, a descrição dos instrumentos de medição a serem utilizados e a definição dos testes de campo de freagem a serem realizados com o veículo escolhido para exemplo de aplicação.

4.1 Principais hipóteses adotadas no modelo matemático desenvolvido

Para o desenvolvimento da parte teórica foram feitas algumas hipóteses iniciais, no sentido de tornar possível a elaboração de um modelo matemático capaz de representar o fenômeno da freagem de veículos rodoviários articulados pesados de forma adequada.

As principais hipóteses adotadas para o desenvolvimento do modelo matemático, para a obtenção do desempenho e da estabilidade direcional do veículo articulado pesado na freagem através dos mapas de desempenho, foram:

- Sobre o veículo:

O veículo é considerado como um corpo rígido com toda a sua massa concentrada no seu centro de gravidade. A massa da suspensão do veículo também está concentrada no centro de gravidade do veículo. Estas considerações são usadas por CANALE (1991), GILLESPIE (1992) e FERNANDES (1994).

- Sobre a suspensão:

A suspensão do veículo é considerada rígida. Os efeitos da flexibilidade da suspensão não interferem significativamente no estudo do desempenho da freagem com o veículo em regime permanente. O mesmo não se pode dizer quando se estudam os efeitos dos transitórios durante a freagem, conforme CANALE (1991).

- Sobre o sistema de freios:

Foram considerados neste estudo os tempos de resposta do sistema de freios e a possibilidade de utilização de válvulas que definem a ordem de atuação dos freios instalados nas rodas dos eixos do veículo, de válvulas proporcionadoras para o eixo traseiro do veículo-trator e de válvulas distribuidoras para o semi-reboque.

Os efeitos transitórios durante a atuação dos freios não foram considerados no estudo de desempenho e de estabilidade, atitude adotada também por LIMPERT (1992) e GILLESPIE (1992). Os resultados deste estudo foram obtidos sem a utilização de válvulas proporcionadoras para o eixo traseiro do veículo-trator, pois as mesmas não estavam instaladas no veículo exemplo testado.

O trabalho desenvolvido permite que no veículo combinado pesado sejam instalados vários tipos de sistemas de freios de serviço e de estacionamento, permitindo um estudo comparativo entre estes tipos de sistemas de freios, como o freio a tambor e a disco.

Para o veículo com freio a disco pode-se ter freios com uma ou duas pastilhas; com acionamento mecânico, hidráulico, pneumático ou misto.

Para o veículo com freio a tambor pode-se ter freios com duas sapatas, com diversas formas de arranjo das mesmas e de acionamento das sapatas, que pode ser de forma mecânica, hidráulica, pneumática ou mista.

Um parâmetro importante no desempenho do sistema de freios na freagem é o fator de freio. Neste trabalho considerou-se que o fator de freio permanece constante durante a freagem, sem considerar os efeitos térmicos nos freios e a velocidade do veículo que podem afetar o fator de freio.

O fator de freio é a razão entre a força de freagem produzida no contato entre lonas e tambor ou pastilhas e disco e a força aplicada para comprimir as lonas contra o tambor ou as pastilhas contra o disco, respectivamente.

Quando esta razão é maior que a unidade, as características construtivas do freio trazem uma vantagem mecânica na produção do esforço de freagem. Assim, o fator de freio indica a capacidade de um tipo de freio de produzir esforço de freagem, consideradas as suas diversas características construtivas e os diferentes coeficientes de atrito entre os materiais usados nos freios a disco e a tambor. LIMPET (1992) e FERNANDES (1994) mostram a relação entre o coeficiente de atrito dos freios e o fator de freio para várias configurações de freio a tambor e para freio a disco.

A variação no coeficiente de atrito entre lona e tambor ou pastilha e disco pode ser proveniente do aumento de temperatura dos freios, da contaminação das superfícies de atrito por óleo, graxa, poeira e outros agentes, da presença de água nas guarnições e outras causas.

Cada tipo de freio tem características próprias que devem ser consideradas na escolha dos mesmos. Para a definição do sistema de freios deve-se avaliar quais características são importantes e que vantagens oferece um tipo de freio, quando comparado a outro para determinada aplicação.

- Sobre a resistência ao movimento:

A resistência ao rolamento e a resistência do ar não foram consideradas no estudo do desempenho na freagem do veículo combinado exemplo, pois esta foi realizada em pista com coeficiente de adesão máximo disponível, estimado em 0,7, que pode oferecer bom nível de desaceleração para o veículo. Para este caso, a influência desses termos é muito pequena, como demonstra CANALE (1991). Além disso, desprezar estas forças de resistência ao movimento do veículo na freagem significa estar indo a favor da segurança no estudo de tal processo, conforme FERNANDES (1994). Além disso, deve ser observado que os testes de campo mostrados neste trabalho foram realizados sem a influência de fortes ventos laterais, conforme exigência da regulamentação ECE-R13 (1990).

Cálculos e informações complementares sobre a força de resistência ao rolamento podem ser obtidos em GILLESPIE (1992) e sobre a força de resistência do ar podem ser obtidos em GILLESPIE (1992) e GÖTZ (1987).

O estudo do desempenho na freagem é feito com o veículo desengrenado. Portanto, o efeito de inércia dos elementos em rotação no veículo não foram considerados, conforme CANALE (1991) e LIMPET (1992).

Os testes de campo de freagem do veículo são realizados em pista considerada plana. Assim, no modelo matemático desenvolvido não foi considerado o efeito da inclinação da pista na direção de movimento do veículo.

- Sobre as forças no veículo:

A força de inércia e a força do peso próprio do veículo são aplicadas no centro de gravidade do veículo.

As forças normais e de freagem nos pneumáticos estão concentradas em um ponto dentro da região de contato entre pneumático e pavimento.

As forças normais e de freagem representam a resultante das forças nas rodas de cada eixo do veículo.

Considera-se que as forças na quinta-roda estão concentradas no ponto de acoplamento entre o veículo-trator e o semi-reboque, sendo representadas por uma componente vertical e uma longitudinal neste ponto.

O semi-reboque possui apenas uma força normal e uma de freagem para todos os seus eixos. Estas forças estão concentradas no ponto de contato entre os pneumáticos do eixo central do semi-reboque e o pavimento, o que pode ser adotado quando a distância entre os eixos do semi-reboque é menor que dois metros, conforme FERNANDES (1994) e PERSEGUIM et al. (1995). Esta hipótese também é adotada por LIMPET (1992) quando não se considera os efeitos da suspensão.

- Sobre as rodas:

As rodas do veículo possuem raio dinâmico constante, o modelo matemático não considera deformação dos pneumáticos na freagem.

- Sobre o movimento:

O veículo em movimento retilíneo é considerado em regime permanente ou em *steady state*¹.

Tais considerações, simplificam o modelo matemático adotado para o estudo desse tipo de veículo durante a freagem. A partir desse modelo simplificado, podem

¹ Definido por SAE J670e (1976).

ser acrescentadas outras considerações que o tornem mais complexo, permitindo a avaliação de cada uma separadamente.

Considerando estas hipóteses principais, foi desenvolvido um modelo matemático e decorrente programa computacional para:

- Obter os parâmetros de desempenho do veículo rodoviário articulado pesado na freagem, como a distância percorrida, as desacelerações máxima e média atingidas e a eficiência alcançada durante a freagem do veículo.

- Avaliar a atuação do sistema de freios pneumático do veículo dos tipos a tambor ou a disco instalados no veículo, através da relação entre pressão do sistema de freios e desaceleração obtida na freagem do mesmo.

- Simular a utilização de válvulas proporcionadoras no sistema de freios do veículo.

- Analisar a estabilidade direcional do veículo na freagem, identificando os eixos veiculares em que ocorre o bloqueio total das rodas e qual o coeficiente de aderência utilizado pelas rodas de cada eixo veicular neste processo.

- Obter as forças envolvidas na freagem e no acoplamento entre o veículo-trator e o semi-reboque (quinta-rodas).

- Obter o balanceamento das forças de freagem e das forças normais nos eixos do veículo durante a freagem.

- Identificar a posição do centro de gravidade do semi-reboque.

- Verificar os requisitos técnicos da regulamentação européia ECE-R13 para o desempenho, a estabilidade, o balanceamento dos freios e a compatibilidade entre veículo-trator e semi-reboque na freagem.

- Obter os mapas de desempenho para o veículo-trator com semi-reboque, em função do carregamento e da distribuição do mesmo no semi-reboque e para qualquer condição operacional possível e admissível pelo fabricante e pela legislação em vigor.

Para o estudo da freagem em trecho retilíneo, o modelo matemático elaborado utiliza as Leis de Newton, que são aplicadas através do equilíbrio de forças nos eixos longitudinal (X) e vertical (Z) de referência e do equilíbrio de momentos de forças no plano XZ. Para o veículo-trator com o semi-reboque também foi utilizado o

equilíbrio de momentos de forças em relação ao ponto de acoplamento definido como quinta-roda.

Os cálculos desenvolvidos neste trabalho, para a obtenção do desempenho do veículo durante o processo de freagem, usam basicamente os conceitos apresentados por ADAS et al. (1998); CANALE (1991); FERNANDES (1994); FERNANDES et al. (1995b); FERNANDES et al. (1995c); FERNANDES et al. (1997b); GILLESPIE (1992) e LIMPET (1992).

4.2 Definição do veículo e das configurações veiculares de estudo

Neste trabalho foi utilizado o veículo-trator de dois eixos LS 1935, fabricado pela Mercedes-Benz do Brasil, e o semi-reboque FNV de três eixos, para o transporte de carga seca, fabricado pela FNV-FRUEHALF do Brasil.

Foram realizados os seguintes estudos de freagem com as respectivas configurações veiculares:

Estudo 1:

Veículo-trator-semi-reboque na condição vazio (configuração 1).

Estudo 2:

Veículo-trator-semi-reboque na condição de carga parcial (configuração 2).

Estudo 3:

Veículo-trator-semi-reboque na condição de carga total* (configuração 3).

Estudo 4:

Veículo-trator na condição vazio (configuração 4).

*Obs.: Não foi possível obter a condição de carga total do veículo combinado permitida pela legislação, que é de 41.500 kgf (415.000 N) de peso total, em função de restrições técnicas para o posicionamento e fixação dos blocos de carga utilizados. Desta forma, na condição de carga total deve ser considerado que o veículo combinado está com peso total de 39.956 kgf (399.560 N).

Estas configurações foram escolhidas de forma que fosse possível realizar comparações entre os valores teóricos (representados em pontos discretos nos mapas

de desempenho mostrados neste trabalho, em função do carregamento do veículo e da posição do centro de gravidade do mesmo) fornecidos pelo modelo matemático e decorrente programa computacional desenvolvidos e os valores experimentais, obtidos a partir de testes de campo de freagem com o veículo exemplo.

Para a definição das configurações 2 e 3 foi necessário realizar um trabalho de pesagem dos blocos de carga e de definição estratégica da posição dos mesmos na plataforma de carga do semi-reboque, procurando fazer com que o carregamento e a posição do centro de gravidade longitudinal do mesmo, em relação à quinta-roda, coincidisse com os relativos pontos discretos exibidos no mapa de desempenho para tais configurações veiculares estudadas.

Antes da realização dos estudos da freagem das configurações veiculares escolhidas, teve-se que conhecer as principais características geométricas e dimensionais do veículo exemplo, que ter o conhecimento dos limites legais de peso por eixo estabelecidos pela legislação brasileira em vigor (6 toneladas para o eixo dianteiro do veículo-trator, 10 toneladas para o eixo traseiro do veículo-trator e 8,5 toneladas para cada eixo do semi-reboque, podendo o veículo-trator-semi-reboque atingir 41,5 toneladas de peso bruto total combinado) e que ter o conhecimento das características técnicas dos instrumentos utilizados nas medições estáticas (balanças e célula de carga).

Além disso, foi obtida a posição do centro de gravidade longitudinal e vertical de cada configuração veicular, segundo método mostrado em FERNANDES (1994) e CANALE (1989). Este método de levantamento do centro de gravidade possui sistema de coordenadas Oxyz mostrado em CANALE (1989), onde o eixo X define a direção longitudinal, o eixo Y define a direção transversal e o eixo Z a direção vertical, todos com origem no centro de gravidade do veículo (c.g.). Este sistema de coordenadas está de acordo com a norma SAE J670e (1976).

A Tabela 1 mostra quais as cargas presentes em cada configuração veicular, os valores de peso das cargas (peso), as distâncias do centro de gravidade longitudinal de cada carga até a referência 0 mostrada na Figura 4 (CGX) e as distâncias do centro de gravidade vertical de cada carga ao pavimento (CGZ), para as configurações veiculares 1, 2 e 3, descritas anteriormente.

TABELA 1 - Características da distribuição das cargas nas configurações veiculares.

carga	configuração	configuração	configuração	peso	CGX	CGZ
	1	2	3	[N]	[m]	[m]
A		X	X	34.413	0,595	1,931
B			X	31.157	1,767	1,791
C		X	X	9.908	2,605	1,641
D		X	X	19.738	5,797	1,831
E			X	20.680	6,773	1,811
F		X	X	41.398	7,928	1,954
G		X	X	39.534	9,128	2,086
H			X	36.689	10,388	2,081
I		X		5.886	10,388	2,080

A Figura 4 mostra a distribuição dos blocos de carga para as configurações de veículo combinado. Nesta Figura 4, a configuração 1 não apresenta blocos de carga no semi-reboque, por se tratar da configuração para veículo combinado vazio.

Na Figura 4, o bloco de carga I aparece em cor diferente dos demais blocos de carga (blocos metálicos) por se tratar de reservatórios de plástico cheios de água.

A Tabela 1 e a Figura 4 mostram apenas as configurações veiculares que envolvem o veículo-trator acoplado ao semi-reboque, a configuração 4 não está descrita neste caso por envolver apenas o veículo-trator sem o semi-reboque acoplado ao mesmo.

No levantamento do centro de gravidade do veículo-trator e do semi-reboque aproveitou-se da experiência adquirida e descrita em FERNANDES (1994). No Apêndice 1 são mostradas algumas figuras ilustrativas do procedimento de obtenção do centro de gravidade das configurações veiculares de estudo, realizados na Mercedes-Benz do Brasil em São Bernardo do Campo (SP) e Limeira (SP), incluindo os instrumentos de medição utilizados e a obtenção dos pesos estáticos nos eixos do veículo-trator e do semi-reboque utilizados como exemplo de aplicação deste estudo.

CONFIGURAÇÃO 1

CONFIGURAÇÃO 2

CONFIGURAÇÃO 3

FIGURA 4 - Distribuição das cargas nas configurações veiculares 1, 2 e 3.

Para o centro de gravidade do veículo-trator considerar-se-á:

- c.g. longitudinal (Lf_1) : distância do c.g. ao eixo dianteiro (direção X), obtida através da eq.(3), Anexo A.
- c.g. transversal (S_1) : distância do c.g. ao lado esquerdo (direção Y), obtida através da eq.(4), Anexo A.
- c.g. vertical (H_1) : altura do c.g. em relação ao pavimento (direção Z), obtida através da eq.(5), Anexo A.
- lado esquerdo (le) : lado do veículo-trator correspondente ao lado esquerdo numa vista frontal deste.
- lado direito (ld) : lado do veículo-trator correspondente ao lado direito numa vista frontal deste (lado do banco do motorista).

Para o centro de gravidade do semi-reboque considerar-se-á:

- c.g. longitudinal (Lf_2) : distância do c.g. à quinta-roda (direção X), obtida através das equações (6) e (7), Anexo A.
- c.g. transversal (S_2) : distância do c.g. ao lado esquerdo (direção Y), obtida através da eq.(8), Anexo A.
- c.g. vertical (H_2) : altura do c.g. em relação ao pavimento (direção Z), obtida através das equações (9) e (10), Anexo A.
- lado esquerdo (le) : lado do semi-reboque correspondente ao lado esquerdo do veículo-trator numa vista frontal deste.
- lado direito (ld) : lado do semi-reboque correspondente ao lado direito do veículo-trator numa vista frontal deste.

A seguir são mostradas as posições do centro de gravidade e o peso total de cada configuração veicular:

Configuração 1:

Peso total: 16.323 kgf (163.230 N)

Centro de gravidade do veículo-trator:

Centro de gravidade longitudinal (Lf_1) : 1.956 mm (1,956 m)

Centro de gravidade transversal (Sle_1) : 1.002 mm (1,002 m)

Centro de gravidade vertical (H_1) : 950 mm (0,950 m)

Centro de gravidade do semi-reboque:

Centro de gravidade longitudinal (Lf_2) : 5.893 mm (5,893 m)

Centro de gravidade transversal (Sle_2) : 985 mm (0,985 m)

Centro de gravidade vertical (H_2) : 1.400 mm (1,400 m)

Configuração 2:

Peso total: 31.563 kgf (315.630 N)

Centro de gravidade do veículo-trator:

Centro de gravidade longitudinal (Lf_1) : 1.956 mm (1,956 m)

Centro de gravidade transversal (Sle_1) : 1.002 mm (1,002 m)

Centro de gravidade vertical (H_1) : 950 mm (0,950 m)

Centro de gravidade do semi-reboque:

Centro de gravidade longitudinal (Lf_2) : 5.212 mm (5,212 m)

Centro de gravidade transversal (Sle_2) : 1.014 mm (1,014 m)

Centro de gravidade vertical (H_2) : 1.761 mm (1,761 m)

Configuração 3:

Peso total: 39.956 kgf (399.560 N)

Centro de gravidade do veículo-trator:

Centro de gravidade longitudinal (Lf_1) : 1.956 mm (1,956 m)

Centro de gravidade transversal (Sle_1) : 1.002 mm (1,002 m)

Centro de gravidade vertical (H_1) : 950 mm (0,950 m)

Centro de gravidade do semi-reboque:

Centro de gravidade longitudinal (Lf_2) : 5.131 mm (5,131 m)

Centro de gravidade transversal (Sle_2) : 1.001 mm (1,001 m)

Centro de gravidade vertical (H_2) : 1.800 mm (1,800 m)

Configuração 4:

Peso total: 7.513 kgf (75.130 N)

Centro de gravidade do veículo-trator:

Centro de gravidade longitudinal (Lf_1) : 1.956 mm (1,956 m)

Centro de gravidade transversal (Sle_1) : 1.002 mm (1,002 m)

Centro de gravidade vertical (H_1) : 950 mm (0,950 m)

Antes da realização dos testes de campo e do levantamento dos valores teóricos de desempenho na freagem para cada configuração veicular, foi necessária a obtenção das características técnicas construtivas e funcionais do sistema de freio do veículo combinado exemplo.

As principais características do veículo-trator e do semi-reboque são mostradas a seguir, segundo informações fornecidas pelos fabricantes destes veículos:

Características do veículo-trator:

Modelo	LS 1935
Ano	1997
Fabricante	Mercedes-Benz do Brasil
Aplicação	Rodoviário
Distância entre-eixos	4.600 mm (4,600 m)
Bitola dianteira	1.993 mm (1,993 m)
Bitola traseira	1.800 mm (1,800 m)
Comprimento	7.060 mm (7,060 m)
Largura	2.443 mm (2,443 m)
Balanço dianteiro	1.375 mm (1,375 m)
Balanço traseiro	1.085 mm (1,085 m)
Raio de viragem	8.500 mm (8,500 m)
Raio dinâmico das rodas do ED	550 mm (0,550 m)
Raio dinâmico das rodas do ET	550 mm (0,550 m)
Peso vazio em ordem de marcha	7.513 kgf (75.130 N)

Limite de peso estabelecido pela legislação brasileira:

Peso bruto no eixo dianteiro	6.000 kgf (60.000 N)
Peso bruto no eixo traseiro	10.000 kgf (100.000 N)
Peso bruto total	16.000 kgf (160.000 N)

Limite de peso estabelecido pelo fabricante:

Peso bruto no eixo dianteiro	6.000 kgf (60.000 N)
Peso bruto no eixo traseiro	13.000 kgf (130.000 N)
Peso bruto total	19.000 kgf (190.000 N)

Distância da QR ao ET	410 mm (0,410 m)
-----------------------	--------------------

Altura da QR ao pavimento	1.330 mm (1,330 m)
---------------------------	----------------------

Peso bruto admissível na QR	8.487 kgf (84.870 N)
-----------------------------	------------------------

Freio instalado nos eixos do veículo-trator:

Tipo de freio	tambor
Fonte de energia	pneumática
Tipo de circuito	duplo
Comando do freio	came "S".
Diâmetro do tambor	410 mm (0,410 m)
Área do cilindro de roda	24 pol ² (0,015 m ²)
Lonas	AF 557/ Fras-Le

Características do semi-reboque

Modelo	FNV - CARGA SECA
Ano	1993
Fabricante	FNV
Aplicação	Rodoviário
Número de eixos	3
Número de rodas por eixo	4
Distância entre QR e primeiro ET	5.760 mm (5,760 m)
Distância entre QR e segundo ET	7.000 mm (7,000 m)
Distância entre QR e terceiro ET	8.240 mm (8,240 m)

Bitola de cada eixo traseiro	2.000 mm (2,000 m)
Comprimento	12.570 mm (12,570 m)
Largura	2.600 mm (2,600 m)
Balanço dianteiro	1.230 mm (1,230 m)
Raio dinâmico das rodas do ET	550 mm (0,550 m)
Peso vazio em ordem de marcha	8.810 kgf (88.100 N)
Limite de peso na quinta-roda	8.467 kgf (84.670 N)
Limite de peso estabelecido pela legislação brasileira:	
Peso bruto por eixo	8.500 kgf (85.000 N)
Peso total bruto	25.500 kgf (255.000 N)

Freio instalado nos eixos do semi-reboque:

Tipo de freio	tambor
Fonte de energia	pneumática
Tipo de circuito	duplo
Comando do freio	came "S".
Diâmetro do tambor	381 mm (0,381 m)
Área do cilindro de roda	30 pol ² (0,019 m ²)
Lonas	Jurid

Características do veículo combinado:

Limite de peso estabelecido pela legislação:

Peso bruto total combinado	41.500 kgf (415.000 N)
----------------------------	--------------------------

4.3 Instrumentos de medição utilizados

Os resultados experimentais de desempenho na freagem foram obtidos com o uso de instrumento adequado para o levantamento destas medidas (CORREVIT), calibrado pela Mercedes-Benz do Brasil.

Este instrumento obtém o espaço total de freagem, o tempo total de freagem e a desaceleração média durante a freagem, a partir de uma velocidade inicial do veículo. Neste instrumento, pode-se obter também o espaço de freagem, o tempo de freagem e a desaceleração durante a aplicação dos freios, em intervalos regulares de velocidade, a partir da velocidade inicial do veículo.

Os testes de campo foram realizados para várias pressões de atuação, com acompanhamento desta através de transdutores de pressão e manômetro calibrados pela Mercedes-Benz do Brasil.

Para o acompanhamento da temperatura dos freios foram utilizados termopares instalados nos freios das rodas do lado direito dos eixos dianteiro e traseiro do veículo-trator e nos freios das rodas do lado direito do primeiro e terceiro eixos do semi-reboque, com acompanhamento da temperatura através de instrumento de decodificação e leitura da temperatura medida (YOKOGAWA).

Os resultados globais dos testes de campo não serão mostrados em detalhes neste trabalho para garantir o sigilo das informações fornecidas pela Mercedes-Benz do Brasil. No Apêndice 2 são mostradas figuras descritivas dos instrumentos de medição utilizados e dos testes de campo.

4.4 Definição dos testes de campo de freagem a serem realizados

A realização dos testes de campo de freagem foi baseada no procedimento padronizado pela ECE-R13 chamado Teste Tipo-0, descrito no Anexo 4 da ECE-R13, que basicamente indica os requisitos de desempenho na freagem para o veículo e as condições iniciais dos testes de campo, conforme a categoria na qual o veículo pertence.

Para o veículo-trator LS 1935 (pertencente à categoria N3), a ECE-R13 recomenda a realização dos testes de freagem com o veículo na velocidade inicial de 60 km/h (16,7 m/s).

Os testes de campo foram realizados para o veículo exemplo na velocidade inicial de 60 km/h (16,67 m/s) para todas as configurações veiculares de estudo,

conforme prescreve o teste Tipo-0 da ECE-R13. Testes de campo para velocidades superiores à esta poderiam ser realizados, mas foram evitados por questões de segurança e para seguir as recomendações para a realização do teste Tipo-0 da ECE-R13.

Para o Teste Tipo-0, a regulamentação ECE-R13 ainda indica que os freios das rodas do veículo devem estar frios antes da freagem (temperatura inferior à 100 graus Celsius), por isso foi realizado o acompanhamento da temperatura dos freios dos eixos veiculares através da instalação de termopares nas lonas de freio e do instrumento adequado (YOKOGAWA).

A regulamentação ECE-R13 também prescreve que o teste Tipo-0 deve ser realizado em pavimento que ofereça boa aderência, plano e seco, sem a influência de ventos laterais, com o motor do veículo desengrenado, sem o veículo desviar de sua trajetória retilínea e sem ocorrer vibrações anormais no veículo durante a freagem.

O procedimento adotado para a realização dos testes de campo relativos aos Estudos 1, 2, 3 e 4, realizados com as configurações 1, 2, 3 e 4 respectivamente, constituiu-se basicamente da obtenção do melhor desempenho possível durante a freagem do veículo com as rodas deste na iminência de escorregamento. Tal condição foi encontrada após a realização do processo de freagem do veículo por sucessivas vezes, com o acréscimo discreto da pressão dos freios a cada nova freagem, com o intuito de indentificar a pressão capaz de proporcionar a situação de iminência de travamento total das rodas do veículo.

Durante o procedimento descrito, cada freagem foi realizada com a temperatura dos freios inferior à 100 graus Celsius, conforme recomendação da ECE-R13 para teste com freios frios, para que não houvesse alteração de temperatura dos freios que fosse capaz de influenciar no fator de freio do sistema de freios do veículo e causar alguma influência significativa nos resultados dos testes de campo de desempenho do veículo na freagem.

Após encontrada a condição de iminência de escorregamento total das rodas de qualquer eixo veicular durante a freagem do veículo repetiu-se a realização do processo de freagem nesta condição por mais cinco vezes, no sentido de obter uma média aritmética dos valores experimentais de desempenho do veículo na freagem

para se garantir a representatividade destes valores, incluindo-se a obtenção do desvio padrão “s” dos valores experimentais de cada procedimento de teste de campo realizado com as configurações veiculares de estudo para verificar a coerência entre os mesmos valores.

Através do procedimento de teste de campo descrito anteriormente também obteve-se os valores de pressão no sistema de freios e respectivos valores de desaceleração do veículo durante a freagem, tais valores permitem realizar a avaliação do modelo matemático para o sistema de freios do veículo elaborado neste trabalho.

No Anexo 2 deste trabalho tem-se algumas figuras ilustrativas dos instrumentos de medição utilizados e do procedimento de teste de campo descrito.

Por se tratar de um veículo articulado pesado, neste trabalho também foi incluída a verificação da compatibilidade entre veículo-trator e semi-reboque utilizados como exemplo de aplicação, conforme os requisitos previstos no Anexo 10 da ECE-R13 para tal. A compatibilidade entre veículo-trator e semi-reboque é fundamental na segurança durante a utilização do veículo combinado.

No Capítulo 5 serão mostrados os valores teóricos e experimentais obtidos nos Estudos 1 a 4 e a comparação entre os mesmos, além da verificação da compatibilidade do veículo-trator-semi-reboque conforme ECE-R13.

5. RESULTADOS

5.1 Resultados teóricos e experimentais

Os resultados teóricos de estudo do desempenho das configurações veiculares na freagem e do comportamento do sistema de freios foram obtidos através do modelo matemático e do programa computacional desenvolvidos. A obtenção dos resultados experimentais do desempenho das configurações veiculares na freagem e do comportamento do sistema de freios é proveniente dos testes de campo.

Os resultados teóricos e experimentais dos Estudos 1 a 4 de desempenho na freagem, realizados com as configurações veiculares descritas no capítulo anterior, foram obtidos utilizando-se o veículo-trator de dois eixos LS 1935, da Mercedes-Benz do Brasil, e o semi-reboque de três eixos FNV para o transporte de carga seca, da FNV-FRUEHALF do Brasil.

Foram adotadas as seguintes condições iniciais para o estudo da freagem das configurações veiculares: freagem à velocidade inicial de 60 km/h (16,7 m/s), em pista de asfalto seca, plana, com coeficiente de aderência entre o pneumático e o pavimento estimado em 0,7 , com atuação dos freios de todas as rodas dos eixos do veículo, com as condições dos testes de campo baseadas no Teste Tipo-0 definido no Anexo 4 da ECE-R13 e a aceleração da gravidade de 10 m/s^2 .

Como resultados teóricos são mostrados os mapas de desempenho do veículo exemplo na freagem, com os seguintes parâmetros: a distância de freagem, a eficiência da freagem, as desacelerações máxima e média, a pressão no sistema de freios, a sequência de travamento dos eixos veiculares, as posições longitudinal e vertical do centro de gravidade do semi-reboque, as forças de freagem e a distribuição

das mesmas nos eixos, as forças normais e a distribuição das mesmas entre os eixos e as forças longitudinal e vertical no acoplamento entre veículo-trator e semi-reboque.

Posteriormente, também é mostrada a avaliação do comportamento do sistema de freio para os mesmos Estudos 1 a 4, através da comparação entre os valores teóricos e experimentais de pressão no sistema de freios e de desaceleração atingidos durante o processo de freagem com as configurações veiculares estudadas.

Desde a Figura 5 até a Figura 26 mostradas a seguir tem-se os mapas de desempenho obtidos para o veículo-trator LS 1935 com o semi-reboque FNV para o transporte de carga seca, contendo os parâmetros que podem ser obtidos pela técnica dos mapas de desempenho na freagem.

Para os resultados mostrados desde a Figura 5 até a Figura 26, tem-se as seguintes condições iniciais, o veículo combinado exemplo tem sistema de freios de série e a freagem ocorre com atuação dos freios das rodas de todos os eixos (CASO 3), a altura do centro de gravidade da carga (CGZQ) é de 2.000 mm (2 m) em relação ao pavimento, a freagem do veículo rodoviário articulado pesado exemplo é realizada com a velocidade inicial (V) de 60 km/h (16,7 m/s) e com coeficiente de aderência disponível no contato entre pneumático e pavimento (MIO) de 0,7.

Os gráficos provenientes do sistema computacional desenvolvido e que serão mostrados neste trabalho possuem uma legenda de identificação do estudo no canto superior esquerdo, que mostra o nome do usuário, a versão do estudo da freagem e a data em que o mesmo foi realizado.

Os gráficos podem ter uma legenda de informações no canto inferior esquerdo, que mostra alguns dados do veículo e outros dados importantes do estudo.

Nos gráficos de mapa de desempenho a legenda do canto inferior esquerdo mostra:

CASO: caso de freagem do veículo estudado (o caso 3 significa a freagem de todos os eixos do veículo-trator-semi-reboque).

ACcav: área dos cilindros de freio instalados nas rodas dos eixos dianteiro e traseiro do veículo-trator sucessivamente, em polegadas quadradas.

ACsr: área dos cilindros de freio instalados nas rodas dos eixos do semi-reboque sucessivamente (primeiro, segundo e terceiro eixos).

V: velocidade inicial de veículo na freagem, em quilômetros por hora.

MIO: coeficiente de aderência disponível no contato entre pneumático e pavimento para frear.

CGZQ: altura do centro de gravidade da carga colocada no semi-reboque, em milímetros.

No canto superior direito tem-se a legenda das curvas do gráfico exibido, com os símbolos diferenciados para cada curva:

Limite ET: curva que representa o limite de peso admitido nos eixos do semi-reboque pela legislação.

Limite QR: curva que representa o limite de peso na quinta-roda.

Carga Máxima: curva que representa o limite de carga máxima

QR-ET: limite geométrico do semi-reboque (distância entre quinta-roda e segundo eixo traseiro do mesmo (eixo central), que é de 7.000 mm (7 m).

A Figura 5 mostra o mapa de desempenho com valores de distância de freagem para o veículo rodoviário articulado pesado LS 1935 / FNV - CARGA SECA.

FIGURA 5 - Mapa de desempenho com a distância de freagem, [m].

A Figura 6 mostra o mapa de desempenho com valores de eficiência da freagem para o veículo rodoviário articulado pesado LS 1935 / FNV - CARGA SECA.

FIGURA 6 - Mapa de desempenho com a eficiência da freagem, [%].

A Figura 7 mostra o mapa de desempenho com valores de desaceleração máxima na freagem do veículo rodoviário articulado pesado LS 1935 / FNV - CARGA SECA.

A Figura 8 mostra o mapa de desempenho com valores de desaceleração média na freagem do veículo rodoviário articulado pesado LS 1935 / FNV - CARGA SECA.

Os Mapas de desempenho das Figuras 5, 6, 7 e 8 são importantes para a avaliação do desempenho do veículo durante o processo de freagem para quaisquer condições operacionais.

FIGURA 7 - Mapa de desempenho com a desaceleração máxima, [m/s²].

FIGURA 8 - Mapa de desempenho com a desaceleração média, [m/s²].

O espaço ou a distância de freagem, a eficiência e as desacelerações máxima e média são parâmetros fundamentais para a análise do desempenho do veículo na freagem pelo projetista do sistema de freios. Entre estes parâmetros a eficiência da freagem merece ser destacada pela sua estreita relação com o desempenho e a segurança da freagem.

A eficiência da freagem é definida em LIMPET (1992) como a razão entre a máxima desaceleração obtida durante o processo de freagem (por unidade da aceleração da gravidade) e o coeficiente de adesão máximo disponível no contato entre pneumáticos e pavimento, sem que ocorra o escorregamento de qualquer eixo.

Em geral, as rodas de cada eixo do veículo utilizam coeficientes de adesão diferentes durante o processo de freagem, com qualquer sistema de freios instalado, produzindo no veículo uma desaceleração real.

Quando todas as rodas utilizam todo o coeficiente de adesão disponível entre pneumáticos e pavimento para frear, todas as rodas estão na iminência do escorregamento, proporcionando a máxima desaceleração ou a desaceleração ideal na freagem, que coincide com a máxima adesão disponível entre pneumáticos e pavimento.

A razão entre a desaceleração real e a desaceleração ideal é a eficiência do processo de freagem. A eficiência indica quanto da adesão disponível se transforma em desaceleração na freagem do veículo.

Quando a eficiência é de 100 % (cem por cento), o freio instalado permite que todas as rodas do veículo usem toda a adesão disponível, sem que ocorra o escorregamento de qualquer roda. Portanto, o veículo tem a desaceleração ideal e o melhor desempenho.

GILLESPIE (1992) mostra que a eficiência é um método útil de avaliar o desempenho de sistemas de freio, especialmente em veículos pesados onde múltiplos eixos estão envolvidos. GILLESPIE (1992) mostra ainda que a frequência de escorregamento das rodas dos eixos durante a freagem, em superfície molhada, está relacionada com a eficiência da freagem, ou seja, existe uma relação entre a possibilidade de ocorrer escorregamento dos eixos veiculares na freagem e a eficiência de tal processo em percentagem.

A eficiência está relacionada com o aproveitamento da adesão disponível por cada eixo e, portanto, com o balanceamento de forças de freagem nos eixos.

Duas situações podem ocorrer com o eixo que estiver mais distante do balanceamento adequado:

Primeiro, as forças de freagem que exigem adesão superior à disponível são aplicadas nas rodas do eixo. Portanto, as rodas deste eixo escorregam na freagem prejudicando o desempenho e a estabilidade.

Segundo, as forças de freagem que exigem adesão bem inferior à disponível são aplicadas nas rodas do eixo. Tal fato leva a uma baixa utilização da adesão e a baixa eficiência, o que afeta o desempenho.

GILLESPIE (1992) mostra que quanto maior for a eficiência do processo de freagem, menor será a possibilidade de ocorrer escorregamento total das rodas dos eixos do veículo, o que eleva a estabilidade e a segurança veicular.

A ocorrência de escorregamento de qualquer eixo afeta a dirigibilidade¹ do veículo, definida em CANALE (1991), podendo produzir acidentes que o envolvem.

Portanto, melhorar a eficiência da freagem é elevar o desempenho e proporcionar melhor estabilidade. Evitar o escorregamento das rodas dos eixos é reduzir o número de acidentes, o que contribui efetivamente para a segurança veicular.

A Figura 9 mostra o mapa de desempenho com valores de pressão nos freios na freagem do veículo rodoviário articulado pesado LS 1935 / FNV - CARGA SECA.

Os mapas de desempenho das Figuras 7 e 9 podem fornecer uma ampla visualização da sensibilidade na aplicação dos freios do veículo para quaisquer condições operacionais, que é obtida pela relação entre pressão nos freios e desaceleração atingida pelo veículo.

A Figura 10 mostra o mapa de desempenho com os eixos que tem a possibilidade de em primeiro lugar ocorrer o travamento das rodas na freagem do veículo rodoviário articulado pesado LS 1935 / FNV - CARGA SECA.

¹Ver GLOSSÁRIO.

FIGURA 9 - Mapa de desempenho com a pressão nos freios, [bar].

FIGURA 10 - Mapa de desempenho com os eixos com travamento na freagem.

A estabilidade¹ do processo de freagem está associada ao escorregamento das rodas de algum eixo do veículo durante a freagem. Em trecho curvilíneo, a estabilidade também está associada à ocorrência de tombamento do veículo.

O escorregamento das rodas do veículo ocorre quando a força de freagem transmitida para o contato entre pneumático e pavimento é maior que o produto entre a força normal nesse eixo e o coeficiente de adesão máximo disponível durante a freagem.

Quando escorregam, as rodas não suportam esforços laterais. Este fato produz efeitos diferentes dependendo das rodas de qual eixo escorregam.

O escorregamento do eixo dianteiro produz a perda de dirigibilidade do veículo pelo motorista, segundo a dirigibilidade, definida em CANALE (1991). O veículo não responde mais à mudança de direção solicitada pelo motorista, através do sistema de direção, porque os pneumáticos não produzem forças laterais.

Com o escorregamento das rodas do eixo dianteiro, o veículo tende a desenvolver uma trajetória retilínea.

Em trajetória retilínea, o veículo continua nela sem dirigibilidade. No caso de trajetória curvilínea, o veículo tende a percorrer uma trajetória retilínea tangente à curva, no instante do escorregamento.

Para retomar o controle direcional do veículo, o motorista deve retirar a aplicação dos freios. Esta atitude leva a liberação das rodas e permite a retomada do controle do veículo.

O escorregamento das rodas do eixo traseiro faz com que elas não suportem esforços laterais. Portanto, qualquer perturbação pode produzir momento com relação ao eixo dianteiro do veículo, fazendo-o girar sobre o pavimento de forma rápida e praticamente incontrolável pelo motorista.

Esta instabilidade pode ter consequências mais perigosas que o escorregamento do eixo dianteiro. Portanto, o projetista do sistema de freios prefere geralmente que as rodas do eixo dianteiro escorreguem primeiro e a regulamentação ECE-R13, em seu Anexo 10, estabelece que as rodas do eixo dianteiro escorreguem primeiro durante a freagem por se tratar de uma situação mais segura.

¹Ver GLOSSÁRIO.

Para o veículo-trator-semi-reboque o escorregamento do eixo dianteiro do cavalo produz o mesmo efeito já descrito. Para o veículo combinado, o escorregamento do eixo traseiro do cavalo pode levar ao *jackknife* do veículo.

O escorregamento dos eixos do semi-reboque também produz o *jackknife*, mas este pode ser controlado por um motorista habilidoso, através do alívio do esforço aplicado nos freios.

Os conceitos descritos anteriormente mostram a importância do mapa de desempenho da Figura 10. Pois através do mesmo, pode-se avaliar a estabilidade quanto ao escorregamento dos eixos do veículo e a sequência de escorregamento para diferentes coeficientes de adesão disponíveis entre pneumáticos e pavimento.

Neste mapa pode-se avaliar a influência da condição operacional, dos parâmetros do sistema de freios e do veículo, na aderência utilizada por eixo e na sequência de escorregamento destes.

A Figura 10 ainda fornece informações para otimizar a estabilidade do veículo durante a freagem e permite avaliar a influência da utilização de válvulas proporcionadoras, sensíveis à carga ou à desaceleração, no comportamento do veículo.

O conhecimento da sequência de escorregamento total em várias condições operacionais é informação importante para a introdução de sistemas automáticos de controle da freagem, como o ABS.

Até o momento pode-se dizer que os mapas de desempenho das Figuras 5 a 10 contém informações essenciais para uma análise ampla do processo de freagem do veículo, para quaisquer condições operacionais. Pois, os parâmetros distância, eficiência, desaceleração máxima, desaceleração média e pressão dos freios durante a freagem, bem como a identificação dos eixos veiculares em que ocorre escorregamento total das rodas são importantes para avaliar o desempenho, a estabilidade direcional e a segurança veicular na freagem.

A Figura 11 mostra o mapa de desempenho na freagem com valores do centro de gravidade longitudinal do semi-reboque FNV - CARGA SECA.

A Figura 12 mostra o mapa de desempenho na freagem com valores do centro de gravidade vertical do semi-reboque FNV - CARGA SECA.

FIGURA 11 - Mapa de desempenho com o CG longitudinal do SR, [mm].

FIGURA 12 - Mapa de desempenho com o CG vertical do SR, [mm].

A posição do centro de gravidade é uma informação fundamental para o projetista de veículos no dimensionamento do sistema de freios. O centro de gravidade influencia na distribuição dinâmica de pesos sobre os eixos do veículo durante a freagem e, por consequência, o desempenho e a estabilidade nesse processo.

A técnica dos mapas de desempenho foi desenvolvida a partir da técnica do passeio do centro de gravidade, que é largamente utilizada na Engenharia Aeronáutica, segundo ROSKAN (1982). CANALE (1991) e FERNANDES (1994) mostram a aplicação desta técnica para a Engenharia Automotiva.

A técnica do passeio do centro de gravidade permite a obtenção de todas as posições que o centro de gravidade do veículo pode ocupar, respeitando os limites de carregamento impostos pelo fabricante do veículo e pela legislação em vigor.

Para o veículo freando em trajetória retilínea, a posição do c.g. longitudinal e vertical afeta a distribuição dos pesos dinâmicos nos eixos, interferindo no desempenho e na estabilidade do veículo na freagem.

Para o veículo em trajetória curvilínea, a posição do c.g. influencia na distribuição dos pesos dinâmicos nos eixos, interferindo na estabilidade com relação ao escorregamento das rodas dos eixos e ao tombamento do veículo.

Os mapas de desempenho das Figuras 11 e 12 permitem obter todas as posições que o centro de gravidade do veículo pode ocupar, respeitando-se os limites do fabricante e da legislação vigente, para quaisquer condições operacionais do veículo e ao mesmo tempo estabelecem o relacionamento entre estas posições de centro de gravidade e o desempenho, a estabilidade e as forças envolvidas na freagem do veículo.

A forma dos mapas de desempenho depende de fatores como os limites geométricos e de peso admitidos nos eixos do veículo, que são determinados pelo fabricante e pela legislação, das posições discretas de centro de gravidade que norteiam a visualização dos parâmetros dos mapas de desempenho e das condições operacionais estabelecidas para o estudo da freagem do veículo. Modificações introduzidas nestes fatores e o reflexo das mesmas no processo de freagem do veículo podem ser avaliadas nos mapas de desempenho de forma clara e ampla.

A seguir são mostrados os mapas de desempenho de forças de freagem e distribuição das mesmas entre os eixos veiculares.

A Figura 13 mostra o mapa de desempenho com valores de forças de freagem no eixo dianteiro do veículo-trator LS 1935 na freagem, em N. A Figura 14 mostra o mapa de desempenho com valores de distribuição de forças de freagem no eixo dianteiro do veículo-trator LS 1935 na freagem, em porcentagem.

A Figura 15 mostra o mapa de desempenho com valores de forças de freagem no eixo traseiro do veículo-trator LS 1935 na freagem, em N.

A Figura 16 mostra o mapa de desempenho com valores de distribuição de forças de freagem no eixo traseiro do veículo-trator LS 1935 na freagem, em porcentagem.

A Figura 17 mostra o mapa de desempenho com valores de forças de freagem nos eixos do semi-reboque FNV / CARGA SECA na freagem, em N. A Figura 18 mostra o mapa de desempenho com valores de distribuição das forças de freagem nos eixos do semi-reboque FNV / CARGA SECA na freagem, em porcentagem.

FIGURA 13 - Mapa de desempenho com as forças de freagem no ED do VT, [N].

FIGURA 14 - Mapa de desempenho com as forças de freagem no ED do VT, [%].

FIGURA 15 - Mapa de desempenho com as forças de freagem no ET do VT, [N].

FIGURA 16 - Mapa de desempenho com as forças de freagem no ET do VT, [%].

FIGURA 17 - Mapa de desempenho com as forças de freagem nos eixos do SR, [N].

FIGURA 18 - Mapa de desempenho com as forças de freagem nos eixos do SR, [%]

Com os mapas de desempenho das Figuras 9, 13, 14, 15, 16, 17 e 18 pode-se conhecer qual sistema de freios instalado proporciona a melhor relação entre força de freagem e pressão e como modificações nas características desse sistema de freios afetam esta relação.

Estes mapas contém informação importante para o projetista no dimensionamento do próprio sistema de freios e componentes, das suspensões, dos pneumáticos, do chassi, do sistema de direção e outros. As forças de freagem e as suas respectivas distribuições entre os eixos veiculares são ainda informações fundamentais para o projetista do pavimento.

Estes mapas também auxiliam na definição do balanceamento do sistema de freios do veículo, que influi sensivelmente no desempenho do veículo-trator-semi-reboque na freagem.

As Figuras 19 e 20 mostram respectivamente os mapas de desempenho com valores de forças e distribuição de normais no eixo dianteiro do veículo-trator LS 1935 na freagem.

FIGURA 19 - Mapa de desempenho com as forças normais no ED do VT, [N].

FIGURA 20 - Mapa de desempenho com as forças normais no ED do VT, [%].

A Figura 21 mostra o mapa de desempenho com valores de forças normais no eixo traseiro do veículo-trator LS 1935 na freagem, em N.

A Figura 22 mostra o mapa de desempenho com valores de distribuição das forças normais no eixo traseiro do veículo-trator LS 1935 na freagem, em porcentagem.

A Figura 23 mostra o mapa de desempenho com valores de forças normais nos eixos do semi-reboque FNV / CARGA SECA na freagem, em N.

A Figura 24 mostra o mapa de desempenho com valores de distribuição de forças normais nos eixos do semi-reboque FNV / CARGA SECA na freagem, em porcentagem.

Nestes mapas é possível observar a transferência de carga entre o semi-reboque e o veículo-trator durante a freagem e a importância da condição operacional neste fenômeno, que também depende das posições do centro de gravidade nestas condições operacionais mostradas nos mapas das Figuras 11 e 12.

As forças de reação normal e respectivas distribuições das mesmas são informações importantes para o projetista no dimensionamento do próprio sistema de freios e componentes, das suspensões, dos pneumáticos, do chassi, do sistema de direção, etc. Além disso, estas são informações importantes também para o projetista do pavimento.

Com as normais, as forças de freagem e as características do movimento, dos pneumáticos, do sistema de freios e da suspensão têm-se condições para elaborar a simulação do veículo durante a freagem em tempo real.

Os mapas de desempenho das Figuras 20, 22 e 24 ainda podem auxiliar o projetista na busca do balanceamento ideal dos freios durante a freagem. Que ocorre quando o balanceamento dos freios é igual à distribuição das forças normais em cada eixo, sendo que nesta situação os pneumáticos utilizam a máxima adesão longitudinal disponível no contato com o pavimento para frear.

FIGURA 21 - Mapa de desempenho com as forças normais no ET do VT, [N].

FIGURA 22 - Mapa de desempenho com as forças normais no ET do VT, [%].

FIGURA 23 - Mapa de desempenho com as forças normais nos eixos do SR, [N].

FIGURA 24 - Mapa de desempenho com as forças normais nos eixos do SR, [%].

A Figura 25 mostra o mapa de desempenho na freagem com valores de forças tangenciais na quinta-roda (na direção longitudinal e no plano XZ), em N. Sendo que os valores de forças tangenciais na quinta-roda com sinal negativo indicam que o semi-reboque está puxando o veículo-trator para trás durante a freagem.

A Figura 26 mostra o mapa de desempenho na freagem com valores de forças normais na quinta-roda, em N. Sendo que os valores positivos destas forças indicam que o semi-reboque está aplicando uma força vertical para baixo sobre a quinta-roda do veículo-trator.

As forças na quinta-roda obtidas podem ser utilizadas pelo projetista no dimensionamento desta e no cálculo estrutural do veículo combinado. A obtenção das forças na quinta-roda auxilia o projetista na definição da posição da quinta-roda no veículo-trator e no semi-reboque, que afeta a distribuição de peso estático nos eixos do veículo e o seu desempenho. A realização de estudos consecutivos, onde apenas a posição da quinta-roda é alterada, permite ao projetista encontrar a posição desta que proporcione a melhor distribuição de peso estático nos eixos, o melhor desempenho e a melhor estabilidade direcional do veículo combinado na freagem.

FIGURA 25 - Mapa de desempenho com as forças tangenciais na QR (eixo X), [N]

FIGURA 26 - Mapa de desempenho com as forças normais na QR, [N].

As figuras anteriores que contém os mapas de desempenho apresentam ainda no eixo longitudinal *C.G.Carga* a posição do centro de gravidade do carregamento colocado sobre a plataforma de carga do semi-reboque (sendo considerado que o centro de gravidade do carregamento sobre o semi-reboque pode estar entre a quinta-rodas e o eixo central do mesmo) e no eixo vertical *Peso total* a condição de carregamento do veículo combinado, partindo-se sempre da condição de veículo combinado vazio com 16.323 kgf (163.230 N).

As tabelas a seguir mostram os resultados teóricos e experimentais do desempenho na freagem dos veículos nos Estudos 1, 2, 3 e 4, que representam respectivamente as configurações veiculares 1, 2, 3 e 4.

São mostrados nestas tabelas os parâmetros obtidos durante o processo de freagem de cada configuração veicular, como a distância de freagem, a eficiência da freagem, a desaceleração máxima, a desaceleração média e quais os eixos com possibilidade de ocorrer o travamento das rodas primeiro. Além disso, são mostrados também o peso total de cada configuração, a posição longitudinal do centro de

gravidade do semi-reboque em relação à quinta-roda (CGX - SR) e a altura do centro de gravidade do semi-reboque em relação ao pavimento (CGZ - SR).

A Tabela 2 mostra os valores teóricos de desempenho na freagem fornecidos pelos mapas de desempenho (mapa), os valores experimentais de desempenho na freagem obtidos nos testes de campo (teste), o desvio padrão dos valores experimentais (s) e o desvio percentual entre os valores de desempenho do mapa e experimentais (desvio %) para o Estudo 1 (veículo-trator-semi-reboque vazio).

TABELA 2 - Valores dos mapas de desempenho e experimentais para Estudo 1.

parâmetros	unidade	mapa	teste	s	desvio %
distância de freagem	[m]	40,86	40,80	0,82	0,15
eficiência da freagem	[%]	59,15	59,71	0,08	0,94
desaceleração máxima	[m/s ²]	4,06	4,10	0,08	0,98
desaceleração média	[m/s ²]	3,40	3,47	0,04	2,02
eixo com travamento		SR - todos	SR - eixo 1	-	-
peso total	[N]	163.230	163.230	-	0
CG X - SR	[m]	5,893	5,893	-	0
CG Z - SR	[m]	1,400	1,400	-	0

A Tabela 3 mostra os valores teóricos de desempenho na freagem fornecidos pelo programa computacional na configuração 1 (programa), os valores experimentais de desempenho na freagem obtidos nos testes de campo (teste), o desvio padrão dos valores experimentais (s) e o desvio percentual entre os valores de desempenho do mapa e experimentais (desvio %) para o Estudo 1 (veículo-trator-semi-reboque vazio).

TABELA 3 - Valores do programa e experimentais para Estudo 1.

parâmetros	unidade	programa	teste	s	desvio %
distância de freagem	[m]	40,86	40,80	0,82	0,15
eficiência da freagem	[%]	59,15	59,71	0,08	0,94
desaceleração máxima	[m/s ²]	4,06	4,10	0,08	0,98
desaceleração média	[m/s ²]	3,40	3,47	0,04	2,02
eixo com travamento		SR - todos	SR - eixo I	-	-
peso total	[N]	163.230	163.230	-	0
CG X - SR	[m]	5,893	5,893	-	0
CG Z - SR	[m]	1,400	1,400	-	0

A Tabela 4 mostra os valores teóricos de desempenho na freagem fornecidos pelos mapas de desempenho (mapa), os valores experimentais de desempenho na freagem obtidos nos testes de campo (teste), o desvio padrão dos valores experimentais (s) e o desvio percentual entre os valores de desempenho do mapa e experimentais (desvio %) para o Estudo 2 (veículo-trator-semi-reboque com carga parcial).

TABELA 4 - Valores dos mapas de desempenho e experimentais para Estudo 2.

parâmetros	unidade	mapa	teste	s	desvio %
distância de freagem	[m]	33,69	35,50	0,97	5,10
eficiência da freagem	[%]	74,85	69,90	0,15	6,61
desaceleração máxima	[m/s ²]	5,14	4,80	0,15	6,61
desaceleração média	[m/s ²]	4,12	3,98	0,08	3,40
eixo com travamento		SR - todos	SR - eixo I	-	-
peso total	[N]	314.190	315.630	-	0,46
CG X - SR	[m]	5,329	5,212	-	2,20
CG Z - SR	[m]	1,779	1,761	-	1,01
CG X - carga	[m]	5,000	5,087	-	1,71
CG Z - carga	[m]	2,000	1,952	-	2,40

A Tabela 5 mostra os valores teóricos de desempenho na freagem fornecidos pelo programa computacional na configuração 2 (programa), os valores experimentais de desempenho na freagem obtidos nos testes de campo (teste), o desvio padrão dos valores experimentais (s) e o desvio percentual entre os valores de desempenho do mapa e experimentais (desvio %) para o Estudo 2 (veículo-trator-semi-reboque com carga parcial).

TABELA 5 - Valores do programa e experimentais para Estudo 2.

parâmetros	unidade	programa	teste	s	desvio %
distância de freagem	[m]	34,49	35,50	0,97	2,85
eficiência da freagem	[%]	72,68	69,90	0,15	3,82
desaceleração máxima	[m/s ²]	4,99	4,80	0,15	3,81
desaceleração média	[m/s ²]	4,03	3,98	0,08	1,24
eixo com travamento		SR - todos	SR - eixo 1	-	-
peso total	[N]	315.630	315.630	-	0
CG X - SR	[m]	5,212	5,212	-	0
CG Z - SR	[m]	1,761	1,761	-	0
CG X - carga	[m]	5,087	5,087	-	0
CG Z - carga	[m]	1,952	1,952	-	0

A Tabela 6 mostra os valores teóricos de desempenho na freagem fornecidos pelos mapas de desempenho (mapa), os valores experimentais de desempenho na freagem obtidos nos testes de campo (teste), o desvio padrão dos valores experimentais (s) e o desvio percentual entre os valores de desempenho do mapa e experimentais (desvio %) para o Estudo 3 (veículo-trator-semi-reboque com carga total).

TABELA 6 - Valores dos mapas de desempenho e experimentais para Estudo 3.

parâmetros	unidade	mapa	teste	s	desvio %
distância de freagem	[m]	33,57	36,94	0,71	9,12
eficiência da freagem	[%]	75,18	69,03	0,11	8,18
desaceleração máxima	[m/s ²]	5,16	4,74	0,11	8,14
desaceleração média	[m/s ²]	4,14	3,82	0,07	7,73
eixo com travamento		SR - todos	SR - eixo 1	-	-
peso total	[N]	389.670	399.560	-	2,48
CG X - SR	[m]	5,250	5,131	-	2,27
CG Z - SR	[m]	1,832	1,800	-	1,75
CG X - carga	[m]	5,000	5,167	-	3,23
CG Z - carga	[m]	2,000	1,935	-	3,25

TABELA 7 - Valores do programa e experimentais para Estudo 3.

parâmetros	unidade	programa	teste	s	desvio %
distância de freagem	[m]	35,36	36,94	0,71	4,28
eficiência da freagem	[%]	72,59	69,03	0,11	4,90
desaceleração máxima	[m/s ²]	4,99	4,74	0,11	5,01
desaceleração média	[m/s ²]	3,93	3,82	0,07	2,80
eixo com travamento		SR - todos	SR - eixo 1	-	-
peso total	[N]	399.560	399.560	-	0
CG X - SR	[m]	5,131	5,131	-	0
CG Z - SR	[m]	1,800	1,800	-	0
CG X - carga	[m]	5,167	5,167	-	0
CG Z - carga	[m]	1,935	1,935	-	0

A Tabela 7 acima mostra os valores teóricos de desempenho na freagem fornecidos pelo programa computacional na configuração 3 (programa), os valores experimentais de desempenho na freagem obtidos nos testes de campo (teste), o desvio padrão dos valores experimentais (s) e o desvio percentual entre os valores

de desempenho do mapa e experimentais (desvio %) para o Estudo 3 (veículo-trator-semi-reboque com carga total).

A Tabela 8 mostra os valores teóricos de desempenho na freagem fornecidos pelo programa computacional na configuração 4 (programa), os valores experimentais de desempenho na freagem obtidos nos testes de campo (teste), o desvio padrão dos valores experimentais (s) e o desvio percentual entre os valores de desempenho do mapa e experimentais (desvio %) para o Estudo 4 (veículo-trator vazio).

TABELA 8 - Valores do programa e experimentais para Estudo 4.

parâmetros	unidade	programa	teste	s	desvio %
distância de freagem	[m]	31,25	31,80	0,43	1,73
eficiência da freagem	[%]	70,34	68,44	0,22	2,70
desaceleração máxima	[m/s ²]	4,83	4,70	0,22	2,69
desaceleração média	[m/s ²]	4,44	4,40	0,05	0,90
eixo com travamento		ET	ET	-	-
peso total	[N]	75.130	75.130	-	0
CG X	[m]	1,956	1,956	-	0
CG Z	[m]	0,950	0,950	-	0

Nas Tabelas 2 a 8 existe uma coluna que indica o desvio percentual entre os valores de desempenho na freagem teóricos (fornecidos pelo mapa de desempenho ou programa computacional nas configurações veiculares) e os valores de desempenho obtidos nos testes de campo de freagem das mesmas configurações veiculares.

Nas Tabelas 2 a 8 existe uma coluna que representa os valores de desvio padrão (s) para os valores experimentais de desempenho na freagem obtidos nos testes de campo de freagem com as configurações veiculares 1, 2, 3 e 4, respectivamente. O desvio padrão pode ser entendido como uma medida estatística da dispersão dos valores experimentais em torno do valor médio obtido para cada

parâmetro nos testes de campo, sendo que valores de desvio padrão próximos de zero sugerem que resultados coerentes foram obtidos nas medições.

A seguir são mostradas as figuras e tabelas que mostram os resultados teóricos e experimentais para a avaliação do comportamento do sistema de freios na freagem dos veículos, através da relação entre pressão no sistema de freios e desaceleração atingida na freagem, para os Estudos 1, 2, 3 e 4.

Os gráficos das Figuras 30 a 33 e as respectivas Tabelas 9 a 12 a seguir mostram valores teóricos e experimentais para os Estudos 1 a 4 da relação entre a pressão no sistema de freios e a desaceleração produzida na aplicação dos freios. Os resultados destes gráficos e figuras permitem avaliar o modelo matemático desenvolvido para o sistema de freios instalado no veículo articulado pesado e para a sua forma de atuação durante a freagem.

As Tabelas 9, 10, 11 e 12 a seguir mostram ainda os coeficientes de correlação, os coeficientes angulares e o termo independente das retas obtidas pela técnica da regressão linear, que melhor representam a distribuição dos pares de valores teóricos e experimentais de pressão nos freios e desaceleração do veículo.

A regressão linear é um método estatístico para obter a reta que melhor se ajusta ao conjunto de pares de valores de pressão e desaceleração obtidos com a freagem do veículo exemplo.

O coeficiente de correlação (r) é um número que deve estar no intervalo de -1 a +1 e que indica se realmente a distribuição dos pares de valores se aproximam de uma reta. O coeficiente angular da reta (m) indica a sua inclinação angular e o coeficiente linear (c) é o termo independente da reta.

O coeficiente angular do gráfico de pressão nos freios versus desaceleração do veículo definem a inclinação angular da reta característica desta relação e fornecem a sensibilidade do sistema de freios.

Inclinações angulares muito acima de 45° fornecem sensibilidade baixa, por outro lado, inclinações angulares muito abaixo de 45° fornecem sensibilidade alta. Ambas as situações provocam dificuldades na operação do sistema de freios pelo motorista.

FIGURA 27 - Pressão no sistema de freios versus desaceleração para Estudo 1.

TABELA 9 - Pressão no sistema de freios e desaceleração para Estudo 1.

valores do programa			valores do teste		
pressão	desaceleração		pressão	desaceleração	
[bar]	[m/s ²]		[bar]	[m/s ²]	
1,00	2,33		0,90	2,00	
1,60	3,81		1,50	3,50	
2,20	5,28		1,70	4,00	
2,80	6,76		2,00	4,60	
3,40	8,24		-	-	
4,00	9,71		-	-	
coeficientes da reta por regressão linear			coeficientes da reta por regressão linear		
r	m	c	r	m	c
1,00	0,41	0,05	1,00	0,42	0,05

FIGURA 28 - Pressão no sistema de freios versus desaceleração para Estudo 2.

TABELA 10 - Pressão no sistema de freios e desaceleração para Estudo 2.

valores do programa			valores do teste		
pressão	desaceleração		pressão	desaceleração	
[bar]	[m/s ²]		[bar]	[m/s ²]	
1,00	1,19		1,00	1,40	
1,60	1,94		1,90	2,70	
2,20	2,70		2,90	3,90	
2,80	3,45		3,20	4,20	
3,40	4,21				
4,00	4,96				
coeficientes da reta por regressão linear			coeficientes da reta por regressão linear		
r	m	c	r	m	c
1,00	0,80	0,05	1,00	0,78	- 0,14

FIGURA 29 - Pressão no sistema de freios versus desaceleração para Estudo 3.

TABELA 11 - Pressão no sistema de freios e desaceleração para Estudo 3.

valores do programa			valores do teste		
pressão	desaceleração		pressão	desaceleração	
[bar]	[m/s ²]		[bar]	[m/s ²]	
1,00	0,94		0,90	0,90	
1,60	1,54		1,80	2,00	
2,20	2,13		3,00	3,10	
2,80	2,73		3,90	3,70	
3,40	3,32		4,50	4,50	
4,00	3,92				
coeficientes da reta por regressão linear			coeficientes da reta por regressão linear		
r	m	c	r	m	c
1,00	1,01	0,05	1,00	1,04	- 0,13

FIGURA 30 - Pressão no sistema de freios versus desaceleração para Estudo 4.

TABELA 12 - Pressão no sistema de freios e desaceleração para Estudo 4.

valores do programa			valores do teste		
pressão	desaceleração		pressão	desaceleração	
[bar]	[m/s ²]		[bar]	[m/s ²]	
1,00	1,55		0,70	0,70	
1,60	2,64		1,00	1,40	
2,20	3,74		1,50	2,80	
2,80	4,83		1,90	3,50	
3,40	5,92		2,40	4,60	
4,00	7,02		-	-	
coeficientes da reta por regressão linear			coeficientes da reta por regressão linear		
r	m	c	r	m	c
1,00	0,55	0,15	1,00	0,43	0,38

A sensibilidade baixa é percebida na prática quando durante a aplicação dos freios do veículo tem-se pouca desaceleração alcançada neste para elevados valores de pressão nos freios (conhecido como “freio baixo” ou com uma atuação com “pouca agressividade”). Por outro lado, a sensibilidade alta é percebida na prática quando durante a aplicação dos freios do veículo, muita desaceleração do veículo é alcançada com baixos valores de pressão nos freios (conhecido como “freio alto” ou com “alta agressividade”).

Assim como os mapas de desempenho das Figuras 7 e 9, os gráficos das Figuras 30 a 33 e as respectivas Tabelas 13 a 16 podem auxiliar o projetista na definição da sensibilidade adequada dos freios, procurando conciliar a relação entre pressão e desaceleração, para quaisquer condições operacionais.

No Apêndice 2 são mostradas várias figuras para ilustrar os resultados dos testes de campo realizados com o veículo-trator LS 1935 e o semi-reboque FNV - CARGA SECA.

5.2 Verificação dos requisitos de compatibilidade da ECE-R13

A seguir será mostrada a verificação dos requisitos da regulamentação ECE-R13 para a compatibilidade entre o veículo-trator e o semi-reboque, previstos no Anexo 10 da ECE-R13 através do Diagrama 3 para o veículo-trator e do Diagrama 4A para o semi-reboque.

A Figura 31 mostra o Diagrama 3 do Anexo 10 da ECE-R13 fornecido pelo programa computacional desenvolvido, com um eixo representando a pressão no sistema de freio do veículo-trator e o outro a razão Tm/Pm , onde Tm é a força de freagem produzida pelos freios instalados nas rodas do veículo-trator e Pm é o peso estático nestas mesmas rodas.

A regulamentação ECE-R13 exige apenas a verificação do veículo-trator acoplado ao semi-reboque vazio e ao semi-reboque na condição de carregamento total.

Para que o veículo-trator seja aprovado neste requisito de compatibilidade da ECE-R13, as curvas que representam a relação entre os valores da razão T_m/P_m e os valores de pressão nos freios devem estar dentro das relativas regiões determinadas pelas curvas de limite da ECE-R13, ou seja:

Na Figura 31, a curva de veículo-trator com semi-reboque vazio (curva *SR vazio*) deve estar dentro da região estabelecida pelas curvas de limites da ECE-R13 para a condição operacional vazio (curvas *ECE-R13 vazio*), enquanto que a curva da condição de veículo-trator com semi-reboque carregado (curva *SR carregado*) deve estar dentro da região estabelecida pelas curvas de limites da ECE-R13 para a condição operacional carregado (curvas *ECE-R13 carreg.*).

Neste trabalho, foi elaborado um modelo matemático para representar simultaneamente estas duas possíveis condições de verificação de compatibilidade do veículo-trator, através do Diagrama 3 do Anexo 10 da ECE-R13, mostrado na Figura 31 a seguir.

FIGURA 31 - Diagrama 3 do Anexo 10 da ECE-R13 para o LS 1935.

Conforme pode ser observado no Diagrama 3 do Anexo 10 da ECE-R13, mostrado através da Figura 31, o veículo-trator LS 1935 satisfaz os requisitos de compatibilidade da regulamentação ECE-R13.

O semi-reboque FNV - CARGA SECA pertence à categoria O₄ conforme a classificação de categorias veiculares da ECE-R13. O requisito de compatibilidade desta categoria veicular está contido no Diagrama 4A do Anexo 10 da ECE-R13, mostrado na Figura 32 fornecida pelo programa computacional desenvolvido.

Na Figura 32 tem-se um eixo representando a pressão no sistema de freio do semi-reboque e o outro a razão Tr/Pr , onde Tr é a força de freagem produzida pelos freios instalados nas rodas do semi-reboque e Pr é o peso estático nestas mesmas rodas.

Ainda na Figura 32 tem-se as curvas que limitam a região de compatibilidade para o semi-reboque nas condições vazio e carregado (curvas *ECE-R13 superior* e *ECE-R13 inferior*), já corrigidas conforme as características técnicas do semi-reboque FNV.

FIGURA 32 - Diagrama 4A do Anexo 10 da ECE-R13 para o semi-reboque FNV.

Para que um semi-reboque satisfaça os requisitos de compatibilidade da ECE-R13, as curvas que representam a relação entre os valores da razão Tr/Pr e os valores de pressão nos freios das suas rodas, para as condições de semi-reboque vazio e carregado, devem estar simultaneamente dentro da região de compatibilidade mostrada na Figura 32 a seguir.

Conforme pode ser observado pelo Diagrama 4A da ECE-R13, mostrado na Figura 32, o semi-reboque FNV - CARGA SECA não satisfaz os requisitos de compatibilidade da ECE-R13.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

No Estudo 1 realizado com a configuração veicular 1 (veículo-trator-semi-reboque vazio), conforme as condições operacionais de peso e centro de gravidade mostradas nas Tabelas 2 e 3 no Capítulo 5, foram obtidos resultados satisfatórios na comparação entre os valores teóricos (provenientes dos mapas de desempenho e programa computacional) e os valores experimentais (obtidos nos testes de campo) de desempenho do veículo combinado durante a freagem, confirmados pelos desvios percentuais entre tais valores mostrados nas Tabelas 2 e 3 no Capítulo 5.

Nos Estudos 2 e 3 existem diferenças entre as condições operacionais iniciais dos mapas de desempenho e dos testes de campo que se devem às restrições técnicas para a colocação dos blocos de carga no semi-reboque (como o posicionamento e a fixação dos mesmos sobre a plataforma de carga do semi-reboque).

Tal fato, fez com que as comparações teórico-experimentais de desempenho do veículo-trator-semi-reboque na freagem entre os resultados dos mapas de desempenho e dos testes de campo nos Estudos 2 e 3 fossem realizadas em condições operacionais diferentes, como o peso do veículo e a posição do centro de gravidade do mesmo, mostrados nas Tabelas 4 e 6 no Capítulo 5.

Mesmo assim, nos Estudos 2 e 3 realizados respectivamente com as configurações 2 (veículo-trator-semi-reboque com carga parcial) e 3 (veículo-trator-semi-reboque com carga total) foram obtidos resultados razoavelmente satisfatórios na comparação entre os valores teóricos e experimentais de desempenho do veículo combinado durante a freagem, conforme indicam os desvios percentuais entre os mesmos valores mostrados nas Tabelas 4, 5, 6 e 7 no Capítulo 5.

No Estudo 4 realizado com a configuração 4 (veículo-trator vazio), conforme as condições operacionais de peso e centro de gravidade do veículo

indicada na Tabela 8 no Capítulo 5, também foram obtidos resultados satisfatórios nas comparações teórico-experimentais de desempenho do veículo-trator na freagem, confirmados pelos desvios percentuais entre estes valores mostrados na Tabela 8 no Capítulo 5.

Quanto à estabilidade direcional, também houve concordância entre a sequência de travamento das rodas dos eixos veiculares prevista pelo programa computacional e obtida nos testes de campo para os Estudos 1 a 4, conforme mostram os resultados para eixo com possibilidade de travamento na freagem nas Tabelas 2 a 8. Mesmo que para os Estudos 1 a 3 tenha sido prevista a possibilidade de travamento total das rodas dos três eixos do semi-reboque ao mesmo tempo e que nos testes de campo obteve-se apenas o travamento total das rodas do primeiro eixo do semi-reboque.

A ocorrência de tal fato pode também ser explicada pela influência da suspensão dos eixos do semi-reboque em tandem, de pequenas variações na regulagem dos freios destes eixos e da variação das forças normais nestes eixos na freagem (com a transferência de peso entre os mesmos) entre outros fatores.

Além disso, foi estabelecido no procedimento de realização de testes de campo por questões de segurança, que os freios do veículo deveriam ser imediatamente liberados caso fosse observado o travamento total das rodas de qualquer um dos eixos veiculares durante a freagem do veículo. Por este motivo, não foi possível observar a ocorrência rápida da sequência de travamento total das rodas do primeiro, segundo e terceiro eixos do semi-reboque nesta ordem durante a freagem, prevista no modelo matemático desenvolvido por PERSEGUIM et al. (1995).

Além disso, foram obtidos resultados satisfatórios nas comparações entre os valores teóricos e experimentais do comportamento do sistema de freios, como mostram os estudos realizados com a aplicação da técnica da regressão linear para avaliar a relação entre a pressão nos freios e a desaceleração atingida na freagem para as configurações veiculares estudadas, conforme mostram os gráficos das Figuras 27, 28, 29 e 30 e as respectivas Tabelas 9, 10, 11 e 12 no Capítulo 5.

Portanto, pode-se dizer que os resultados obtidos nas comparações entre os valores teóricos e experimentais de desempenho na freagem das configurações veiculares analisadas validaram os modelos matemáticos desenvolvidos para a obtenção do desempenho de veículos rodoviários articulados pesados na freagem e para a avaliação do comportamento do sistema de freios dos mesmos.

Na verificação dos requisitos legais da ECE-R13 foi observado que o veículo-trator satisfaz os requisitos de compatibilidade desta regulamentação, mas que o semi-reboque não atende a tais requisitos. O que indica que a distribuição dos esforços de freagem entre o veículo-trator e o semi-reboque está inadequada, ou seja, o sistema de freios do semi-reboque utilizado como exemplo de aplicação possui um excesso de força de freagem instalada em relação ao veículo-trator ao qual está acoplado.

FERNANDES et al (1997a) e FERNANDES (1996) mostram que um dos fatores que trazem dificuldades para que os semi-reboques com três eixos em tandem satisfaçam os requisitos de compatibilidade da ECE-R13 é a instalação de freios nestes eixos que são capazes de produzir uma excessiva força de freagem, o que pode prejudicar o balanceamento dinâmico e térmico dos freios do conjunto durante a utilização do veículo combinado e o desempenho e a estabilidade direcional do mesmo na freagem, podendo ainda colocá-lo em situações de risco de acidente.

Uma solução para a situação apresentada na Figura 32 no Capítulo 5, pode ser a instalação de válvulas proporcionadoras nos freios das rodas do semi-reboque, sensíveis à condição de carregamento efetuada no mesmo. Tais válvulas poderiam controlar as forças de freagem produzidas pelos freios instalados nas rodas do semi-reboque, no sentido de conseguir colocar ao mesmo tempo as curvas da relação entre Tr/Pr e pressão nos freios, das condições de semi-reboque vazio e carregado, dentro da região de compatibilidade do Diagrama 4A da ECE-R13, mostrado na Figura 32 no Capítulo 5, sendo que os mapas de distribuição de normais nos eixos veiculares também podem auxiliar na escolha de tais válvulas.

Para elevar a compatibilidade entre os veículos-trator e os semi-reboques no Brasil, se faz necessário o desenvolvimento de estudos mais detalhados sobre os sistemas de freio a serem instalados nos mesmos, que preferencialmente devem ser realizados com a integração entre os seus fabricantes.

7. CONCLUSÕES

Considerando os resultados teóricos e experimentais obtidos e a posterior análise dos mesmos, pode-se dizer que o objetivo principal deste trabalho foi alcançado. A técnica dos mapas de desempenho pode ser considerada como uma ferramenta útil, ágil e confiável, capaz de proporcionar uma ampla visualização do processo de freagem de veículos rodoviários articulados pesados.

Através da técnica dos mapas de desempenho pode-se melhorar o processo de definição do sistema de freios dos veículos combinados pesados, com a redução de tempo e de custos de desenvolvimento, com a verificação do desempenho na freagem não restrita apenas as condições vazio e carregado, com a análise da tendência de desempenho do veículo combinado na freagem em função do carregamento, com a identificação de condições operacionais críticas para o desempenho e a estabilidade do veículo na freagem, com a otimização do balanceamento dos freios do veículo, com a possibilidade de auxiliar na instalação de sistemas automáticos e na escolha de válvulas proporcionadoras para os freios e com a verificação dos requisitos de desempenho e de compatibilidade na freagem da regulamentação ECE-R13.

Através de uma pesquisa informal, realizada entre os fabricantes de veículos-trator e os fabricantes de semi-reboques no Brasil, foi comprovado que existe uma falta de interação entre ambos. Desta forma, este trabalho mostra que esta interação se faz necessária, pois além do desempenho do veículo combinado ser afetado por sistemas, subsistemas e dispositivos instalados no veículo-trator e no semi-reboque, estes podem levar a redução da eficiência quando juntos (formando um veículo combinado), o que pode afetar a segurança veicular.

Portanto, uma maior integração entre os fabricantes de veículos-trator e de semi-reboques pode permitir a otimização dos sistemas de freio de veículos

articulados pesados e exigir um esforço menor de ambas as partes para oferecerem um melhor produto para a sociedade no aspecto da segurança veicular e para cumprirem os requisitos de regulamentações internacionais, como os da ECE-R13 que foram abordados neste trabalho, que contemplam importantes conceitos técnicos, como a elevação da eficiência da freagem e da compatibilidade entre veículo-trator e semi-reboque.

Este trabalho ainda pode permitir um melhor entendimento do complexo fenômeno envolvido na obtenção do desempenho, da estabilidade direcional e do balanceamento adequado dos freios de veículos articulados pesados na freagem, através dos mapas de desempenho oferecidos pelo modelo matemático e programa computacional desenvolvidos.

Além disso, os mapas de desempenho na freagem podem ser utilizados para a orientação dos usuários de veículos rodoviários articulados pesados sobre como carregá-los para obter a otimização do carregamento do veículo e como identificar os carregamentos que não atendem os limites legais de peso por eixo. Estas informações podem auxiliar no planejamento estratégico do transporte das cargas, na redução de custos operacionais, na elevação do desempenho e da segurança durante a utilização do veículo pelo usuário e na integração fundamental do usuário do veículo no processo de melhorar o desempenho do mesmo na freagem e a segurança na sua utilização.

Uma forma de facilitar a aplicação dos mapas de desempenho na orientação dos usuários de veículos articulados pesados seria a elaboração de guias que contenham de forma clara e objetiva a informação que o usuário necessita.

Tal guia de orientação poderia conter um esquema de representação simplificado e direto de onde o usuário deveria procurar posicionar a carga a ser colocada no semi-reboque, no sentido de simultaneamente otimizar o carregamento do veículo (obedecendo os limites legais de peso por eixo) e alcançar o melhor desempenho na freagem.

A Figura 33 mostrada a seguir contém um esboço simples de como poderia ser a forma de um guia de orientação aos usuários destes veículos, considerando que

a finalidade deste guia de orientação é indicar com rapidez e simplicidade a região favorável onde poderia ser concentrado o carregamento do semi-reboque.

FIGURA 33 - Esquema da forma de um guia de orientação ao usuário do veículo.

Assim, a informação dos mapas de desempenho poderia auxiliar na elaboração de guias de orientação ao usuário, que poderiam colaborar de forma efetiva para que o veículo articulado pesado possa ser utilizado de forma mais racional e segura pelo seu usuário, sendo que esta é uma forma de contribuir com a nossa sociedade no sentido de procurar combater a grave situação da segurança veicular no Brasil.

Neste trabalho são mostrados apenas alguns mapas de desempenho possíveis para estudar a freagem de veículos rodoviários articulados pesados. A visualização do processo de freagem destes veículos pode ser ampliada ainda mais, com a elaboração de mapas de desempenho em inúmeras condições operacionais possíveis e admissíveis para o veículo, a partir da introdução de novas condições iniciais para a realização dos estudos, como a modificação das características técnicas e construtivas do veículo e do seu sistema de freios, da aderência disponível no contato entre pneumático e pavimento e outras escolhidas conforme as necessidades de estudo para cada veículo.

A aplicação dessa técnica, proveniente da Engenharia Aeronáutica, na Engenharia Automotiva, coloca este trabalho dentro da tendência de transferência de tecnologia aeronáutica para o setor automotivo, observada por HENDERSON & SCHILKE (1992).

Neste trabalho de doutorado foi desenvolvida uma metodologia de análise do desempenho de veículos pesados na freagem não encontrada na literatura técnica sobre o assunto e com aplicação prática no ambiente industrial de desenvolvimento de sistemas de freios para veículos pesados articulados, procurando levar o conhecimento teórico acadêmico sobre o assunto para o projetista de sistemas de freios destes veículos de forma prática.

Este trabalho teve a participação do pessoal técnico da Mercedes-Benz do Brasil e o apoio dessa empresa para a realização de testes de campo, visando a obtenção dos valores experimentais. Este fato contribui, definitivamente, para uma melhor integração entre Empresa e Universidade e para o desenvolvimento tecnológico do país.

Contando com a participação de projetistas de sistemas de freios com larga experiência, esse trabalho adquiriu características que permitem a sua aplicação com facilidade no cotidiano da empresa.

O programa computacional desenvolvido resulta de um relacionamento intenso com a área de Engenharia Experimental da Mercedes-Benz do Brasil, fato que influenciou na sua estrutura e interface com o usuário, onde procurou-se oferecer a rapidez, a precisão e a forma de apresentação dos resultados adequadas para o projetista de sistemas de freios dentro do ambiente industrial.

Neste trabalho foi mostrada apenas uma aplicação para o programa computacional desenvolvido, através da análise do desempenho e estabilidade de veículos articulados pesados na freagem através da técnica dos mapas de desempenho, mas o mesmo programa pode ser utilizado para outras famílias de veículos comerciais e permitir outras análises sobre o processo de freagem destes veículos.

Com este trabalho pode-se ter maior agilidade e segurança no desenvolvimento de sistemas de freios e de outros sistemas do veículo, o que pode proporcionar uma redução de custos e aumento da segurança em testes experimentais, além de contribuir para elevar ainda mais a segurança dos veículos produzidos.

Atualmente a Mercedes-Benz do Brasil utiliza o sistema computacional para dimensionar e definir o sistema de freios de seus veículos pesados, fato que mostra

uma aplicação do sistema desenvolvido no aperfeiçoamento dos veículos utilizados no Brasil.

Alguns benefícios do trabalho e do sistema desenvolvido são citados a seguir:

- melhor compreensão do processo de freagem,
- maior rapidez na definição do sistema de freios,
- redução do tempo de testes de campo,
- redução de custos,
- fornecimento de informações importantes para o projeto de outros sistemas e subsistemas do veículo, como chassi, suspensão, direção e outros,
- permitir a simulação da freagem do veículo em qualquer condição operacional, o que coloca este trabalho segundo a tendência de crescimento da realização de simulações para o estudo do desempenho de veículos, apresentada por FANCHER & MATHEW (1989),
- possibilitar a otimização do carregamento desses veículos permitindo melhor desempenho e estabilidade, menor consumo de combustível, menor desgaste dos freios e maior segurança.

Portanto, o desenvolvimento da técnica dos mapas de desempenho pode ser considerada uma contribuição efetiva para a segurança veicular no Brasil, através de um esforço conjunto da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo e da Mercedes-Benz do Brasil neste sentido.

8. PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Durante e após a realização deste trabalho surgiram algumas idéias que podem ser transformadas em propostas de trabalhos futuros, no âmbito de ampliar os conhecimentos sobre o desempenho e a estabilidade de veículos rodoviários articulados pesados no processo de freagem e sobre a segurança veicular, lembrando ainda que os estudos nesta área podem apresentar um perfil multidisciplinar.

Como algumas das propostas de trabalhos futuros, tem-se a realização de estudos do desempenho e da estabilidade na freagem com outras configurações de veículos rodoviários articulados pesados e com veículos de outras categorias, através da técnica dos mapas de desempenho.

Tem-se ainda, a realização de estudos para a identificação do panorama nacional sobre o desempenho e a segurança de veículos rodoviários articulados pesados na freagem, para a elaboração de guias de orientação aos usuários destes veículos, que podem colaborar na otimização do carregamento do veículo e na elevação do desempenho e da segurança na sua utilização, conforme mostrado no Capítulo 7.

O desenvolvimento de guias de orientação aos usuários destes veículos necessita da efetiva participação dos mesmos, pois conforme DEIRLEIN (1995) e EBERT & KOWALSKI (1993), o usuário do veículo comercial conhece as limitações e vantagens deste produto na prática e neste sentido, ouvi-lo e aproximá-lo do desenvolvimento do produto é uma necessidade e uma forma de satisfazê-lo como cliente. Além disso, esta pode ser uma estratégia para conhecer, antecipar e superar as suas expectativas em relação ao produto.

Também são propostas de trabalhos futuros o desenvolvimento de estudos sobre a utilização de sistemas de freio automáticos (ABS) e de válvulas

proporcionadoras nos freios dos veículos combinados, a introdução de sistemas de controle eletrônico dos freios destes veículos (EBS), os efeitos de modificações nas características técnicas e construtivas dos freios, da configuração dos eixos e da suspensão, da velocidade do veículo e da variação da temperatura dos freios no desempenho, na estabilidade e na segurança durante o processo de freagem destes veículos.

Outros trabalhos futuros podem ser elaborados considerando-se os aspectos legais, como o desenvolvimento de pesquisas que indiquem sugestões para o aperfeiçoamento da legislação sobre sistemas de freios, como o desenvolvimento de estudos sobre os efeitos de modificações da legislação atual nos limites de peso por eixo e nas configurações veiculares permitidas, no desempenho e na segurança dos veículos rodoviários articulados pesados na freagem.

ANEXO A - Equações

As equações (3), (4) e (5) foram utilizadas para a obtenção do c.g. do cavalo, conforme método descrito em CANALE (1989).

Através do balanceamento estático no eixo dianteiro:

$$Lf_1 = (Wr_1 \cdot L_1) / W_1 \quad (3)$$

Através do balanceamento estático no lado esquerdo:

$$Sle_1 = (Wld_1 \cdot S_1) / W_1 \quad (4)$$

Através do balanceamento estático e do levantamento do ED do cavalo:

$$H_1 = Rdin_1 + [((Wr_{IED} - Wr_1) \cdot L_1 \cdot (L_1^2 - h_{IED}^2)^{1/2}) / (W_1 \cdot h_{IED})] \quad (5)$$

As equações (6), (7), (8), (9) e (10) foram utilizadas para a obtenção do c.g. do semi-reboque, conforme método descrito por CANALE (1989), adaptado para este veículo.

Através do balanceamento estático na quinta-roda:

$$Lf_2 = (W_2^* \cdot Lf_2^* + nrod_2 \cdot Wrod_2 \cdot (Lp_2 + Ls_2)) / (W_2^* + (ne_2 - 1) \cdot nrod_2 \cdot Wrod_2) \quad (6)$$

$$Lf_2^* = (Wr_2^* \cdot Lt_2) / W_2^* \quad (7)$$

Através do balanceamento estático no lado esquerdo:

$$Sle_2 = (Wld_2 \cdot S_2) / W_2 \quad (8)$$

Através do balanceamento estático e do levantamento da quinta-roda do semi-reboque:

$$H_2 = (W_2^* \cdot H_2^* + (ne_2 - 1) \cdot nrod_2 \cdot Wrod_2 \cdot Rdin_2) / (W_2^* + (ne_2 - 1) \cdot nrod_2 \cdot Wrod_2) \quad (9)$$

$$H_2^* = Rdin_2 + [((Wr_{2QR} - W_2^*) \cdot Lt_2 \cdot (Lt_2^2 - h_{2QR}^2)^{1/2}) / (W_2^* \cdot h_{2QR})] \quad (10)$$

Limites do mapa de desempenho:

$$Lf_{2QR} = ((W_2 + Wq) \cdot L_2 - Wl_{51} \cdot L_2) / (W_2 + Wq) \quad (11)$$

$$Lf_{2r} = (ne_2 \cdot Wlr_2 \cdot L_2) / (W_2 + Wq) \quad (12)$$

Freagem do veículo-trator-semi-reboque em trecho retilíneo, com desaceleração obtida através da aplicação dos freios instalados nas rodas dos eixos deste veículo, conforme esquema de forças no veículo da Figura 33 mostrada no Anexo B.

$\Sigma F_X = 0$, no semi-reboque:

$$Ri_2 + Rd5_{2X} + Br_2 = 0 \quad (13)$$

$\Sigma F_Z = 0$, no semi-reboque:

$$Wdr_2 + Rd5_{2Z} - W_2 = 0 \quad (14)$$

$\Sigma M_A = 0$:

$$Rd5_{2Z} \cdot L_2 - W_2 \cdot Lr_2 - Ri_2 \cdot H_2 - Rd5_{2X} \cdot H_5 = 0 \quad (15)$$

$\Sigma M_B = 0$:

$$Wdr_2 \cdot L_2 + Br_2 \cdot H_5 + Ri_2 \cdot (H_2 - H_5) - W_2 \cdot Lf_2 = 0 \quad (16)$$

$\Sigma F_X = 0$, no cavalo:

$$Ri_1 - Bf_1 - Br_1 - Rd5_{1X} = 0 \quad (17)$$

$\Sigma F_Z = 0$, no cavalo:

$$Wdf_1 + Wdr_1 - W_1 - Rd5_{1Z} = 0 \quad (18)$$

$\Sigma M_C = 0$:

$$Wdf_1 \cdot L_1 + Rd5_{1X} \cdot H_5 - W_1 \cdot Lr_1 - Ri_1 \cdot H_1 - Rd5_{1Z} \cdot Lf_5 = 0 \quad (19)$$

$\Sigma M_D = 0$:

$$Wdr_1 \cdot L_1 - Rd5_{1X} \cdot H_5 - W_1 \cdot Lf_1 + Ri_1 \cdot H_1 - Rd5_{1Z} \cdot Lf_3 = 0 \quad (20)$$

$$Wdt = Wdf_1 + Wdr_1 + Wdr_2 = W_1 + W_2 \quad (21)$$

$$Ri_1 = W_1 \cdot b / g = W_1 \cdot b\% / 100 \quad (22)$$

$$Ri_2 = W_2 \cdot b / g = W_2 \cdot b\% / 100 \quad (23)$$

$$Ri_1 + Ri_2 = Bf_1 + Br_1 + Br_2 \quad (24)$$

$$\mu f_1 = Bf_1 / Wdf_1 \quad (25)$$

$$\mu r_1 = Br_1 / Wdr_1 \quad (26)$$

$$\mu r_2 = Br_2 / Wdr_2 \quad (27)$$

$$B_i = (2 \cdot BF_i \cdot (p - \Delta p_i) \cdot AC_i \cdot (2,54)^2 \cdot \eta_{bs_i} \cdot (Dt_i / 2) \cdot Lajf_i) / (Rdin_i \cdot Dcs_i) \quad (28)$$

$$B_t = B_{f_1} + B_{r_1} + B_{r_2} \quad (29)$$

$$B\%f_1 = B_{f_1} \cdot 100 / B_t \quad (30)$$

$$B\%r_1 = B_{r_1} \cdot 100 / B_t \quad (31)$$

$$B\%r_2 = B_{r_2} \cdot 100 / B_t \quad (32)$$

$$B\%t = B\%f_1 + B\%r_1 + B\%r_2 \quad (33)$$

$$Wd\%f_1 = W_{df_1} \cdot 100 / W_{dt} \quad (34)$$

$$Wd\%r_1 = W_{dr_1} \cdot 100 / W_{dt} \quad (35)$$

$$Wd\%r_2 = W_{dr_2} \cdot 100 / W_{dt} \quad (36)$$

$$Wd\%t = Wd\%f_1 + Wd\%r_1 + Wd\%r_2 \quad (37)$$

$$b_{max} = B_t / W_t \quad (38)$$

$$b_{med} = V^2 / 2 \cdot S_{max} \quad (39)$$

$$S_{max} = (V^2 / 2 \cdot b_{max}) + (T_a + T_b / 2) \cdot V \quad (40)$$

$$\eta_b = b_{max} \cdot 100 / b_{ideal} \quad (41)$$

$$W_t = W_1 + W_2 + W_q \quad (42)$$

Freagem do veículo-trator sem o semi-reboque em trecho retilíneo, com desaceleração obtida através da aplicação dos freios instalados nas rodas dos eixos deste.

$$\Sigma F_x = 0, \text{ no cavalo:}$$

$$R_{i_1} - B_{f_1} - B_{r_1} = 0 \quad (43)$$

$$\Sigma F_z = 0, \text{ no cavalo:}$$

$$W_{df_1} + W_{dr_1} - W_1 = 0 \quad (44)$$

$$\Sigma M_C = 0:$$

$$W_{df_1} \cdot L_1 - W_1 \cdot L_{r_1} - R_{i_1} \cdot H_1 = 0 \quad (45)$$

$$\Sigma M_D = 0:$$

$$W_{dr_1} \cdot L_1 - W_1 \cdot L_{f_1} + R_{i_1} \cdot H_1 = 0 \quad (46)$$

$$W_{dt} = W_{df_1} + W_{dr_1} = W_1 \quad (47)$$

$$\mu_{f_1} = B_{f_1} / W_{df_1} \quad (48)$$

$$\mu_{r_1} = B_{r_1} / W_{dr_1} \quad (49)$$

ANEXO B - Diagrama de corpo livre do veículo-trator-semi-reboque

FIGURA 34 - Forças no veículo-trator-semi-reboque

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, W.J.P.; SPENCE, D.R. (1976). Practical aspects of testing anti-lock systems on commercial vehicles. *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers. Part C: Mechanical Engineering Science*, v.191, n.33, p.125-134.
- ADAS, C.A.; CANALE, A.C.; FERNANDES, D.L.G. (1998). Performance Charts: a complete analysis of heavy vehicle braking performance. *SAE Technical Paper Series*, n.982915.
- AIRHEART, F.B. (1974). Design approaches to truck disc brakes. *SAE Technical Paper Series*, n.740604.
- ALDEN, J. (1973). The harmonization of truck technical regulations within the European common market. *SAE Technical Paper Series*, n.730635.
- ALLEN, R.W. (1986). Research methodology for crash avoidance studies. *Transportation Research Record*, n.1059, p.1-5.
- ALLEN, R.W.; STEIN, A.C. (1990). The use of simulation in truck safety research, driver training and proficiency testing. *SAE Technical Paper Series*, n.902271.
- ALLEN, R. et al. (1996). Driving simulator study of the performance effects of low blood alcohol concentration. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, v.2, p.943-946.
- ANDERSON, B.D. (1975). Air wedge disc brakes for heavy trucks front axles. *SAE Technical Paper Series*, n.750734.
- AOKI, K. (1978). Trend of Japanese truck, bus, and trailer brakes. *SAE Technical Paper Series*, n.781068.
- ARD, H.N. (1957). Friction brake limitations in logging truck service. *SAE Transactions*, n.570284.
- ARNOLD, P.K. et al. (1997). Hours of work and perceptions of fatigue among truck drivers. *Accident Analysis and Prevention*, v.29, n.4, p.471-477, July.
- ASANO, M. (1998). Furthering the evolution of function and performance for ABS systems. *SAE Technical Paper Series*, n.980236.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1990a). *NBR 10966 - Desempenho de sistemas de freio para veículos rodoviários*. NB1253, Rio de Janeiro, ABNT. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1990b). *NBR 10969 - Desempenho de sistema de freio para veículos rodoviários - Prescrições relativas à fontes e aos reservatórios de energia*. NB1254, Rio de Janeiro, ABNT. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1990c). *NBR 10970 - Desempenho de sistema de freio para veículos rodoviários - Prescrições relativas às condições específicas para o freio de mola acumuladora (câmara combinada do freio)*. NB1255, Rio de Janeiro, ABNT. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1990d). *NBR 10967 - Sistema de freios para veículos rodoviários - Ensaio de desempenho*. MB3160, Rio de Janeiro, ABNT. 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1990e). *NBR 10968 - Sistema de freios para veículos rodoviários - Medição do tempo de resposta para veículos rodoviários equipados com freio pneumático - desempenho*. MB3161, Rio de Janeiro, ABNT. 6p.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGA - NTC. (1997). Viabilidade de operação do duplo semi-reboque de cinco eixos no Brasil - 3, São Paulo, SP. In: *Transporte Moderno*, n.383, Suplemento, 31p.

BALL, K. et al. (1994). Visual attention problems as a predictor of vehicle crashes in older drivers. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, y.94, U.S.A.

BERNARD, J.E. (1973). A digital computer method for the prediction of braking performance of trucks and tractor-trailers. *SAE Transactions*, v.82, n.730181.

BILLING, J.R. et al. (1995). Further experience with antilock brake systems. *Proceedings of Heavy Vehicle Weights and Dimension - Road Transport Technology*, Ontario, Canada, p.551-561.

BIRCH, S. (1989). Tech briefs: truck rear wheel steering. *Automotive Engineering*, v.97, n.11, p.50-69, Nov.

BIRGE, W.T. (1968). Status report on application and supplemental requirements of current brake system road test codes. *SAE Transactions*, n.680177.

BISHEL, R.A. (1987). Eletronic vehicle integration for the '90s: *an overview*. *SAE Technical Paper Series*, n.872253.

BLAKEMORE, T. (1996). Safety in numbers. *Transport Engineer*, p.25-27, Dec.

- BLEVINS, J.R.; HUTCHINS, M.L. (1988). Practical considerations of North American heavy vehicle air brake antilock systems. *SAE Technical Paper Series*, n.880987.
- BODE, O. (1951). Tests to determine characteristics value for direct brake testing on tractor/trailer combinations equipped with trailer brakes having automatic adjustment for load. *Deutsche Kraftfahrtforschung*, n.101.
- BODE, O.; MERZ, W. (1955). Determination of the most suitable brake testing procedures for motor vehicles and trailers. *Deutsche Kraftfahrtforschung*, n.87.
- BODE, O. (1958). Lastzugbremsung und lastanpassung. *ATZ*, v.60, n.3.
- BODE, O.; GÖRGE, W. (1961a). Mathematical investigation of the braking performance of articulated vehicles. *Deutsche Kraftfahrtforschung*, n.49.
- BODE, O.; GÖRGE, W. (1961b). Braking tests on articulated vehicles. *Deutsche Kraftfahrtforschung*, n.150.
- BOTTO, M.P. (1995). Heavy duty vehicle accidentology. *Ingenieurs de l'Automobile*, n.701, p.54-59.
- BRACH, R.M. (1986). Impact of articulated vehicles. *SAE Technical Paper Series*, n.860015.
- BRASIL. Ministério dos Transportes. Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes. (1993). *Reconstruindo as artérias para o desenvolvimento: um projeto de recuperação do sistema de transportes*. Brasília, D.F., GEIPOT. p.10.
- BRAVER, E.R. et al. (1997). Incidence of large truck-passenger vehicle underride crashes in fatal accident reporting system and national accident sampling system. *Transportation Research Record*, n.1595, p.27-33.
- BUELER, R.C.; FALK, E.J. (1973). A practical approach to the selection and sizing of brakes to meet FMVSS-121. *SAE Technical Paper Series*, n.730198.
- BUNTING, A. (1996a). Truck disc brakes with electronics. *Automotive Engineer*, v.21, n.4, p.73, Aug.-Sept.
- BUNTING, A. (1996b). Heavy weight braking. *Automotive Engineer*, v.21, n.6, p.57-58, Dec.
- BURRIS, R.F.; McLEAN, A.D. (1961). Emergency brakes. *SAE Technical Paper Series*, n.610387.

- CANALE, A.C. (1989). *Automobilística: dinâmica e desempenho*. São Paulo, Érica.
- CANALE, A.C. (1991). *Estudo do desempenho de autoveículos rodoviários considerando o passeio do centro de gravidade e restrições impostas pelo binômio pneumático x pavimento*. São Carlos, 1991. 290p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CHEN, E.H.C. (1991). Practical reliability program for electronics system design in cars, trucks, and buses. *SAE Technical Paper Series*, n.912546.
- CHEN, C. et al. (1995). Steering and independent braking control for tractor-semitrailer vehicles in automated highway systems. *Proceedings of the IEEE on Decision and Control*, v.2, 95CH3580-3, p.1561-1566.
- CHIRA-CHAVALA, T.; CLEVELAND, D.E. (1985). Causal analysis of accident involvements for the nation's large trucks and combination vehicles. *Transportation Research Record*, n.1047, p.56-64.
- CHIRA-CHAVALA, T. (1986). Problems of combination trucks on wet pavements: an accident analysis. *Transportation Research Record*, n.1068, p.70-75.
- CHURCH, W.P.; CLARK, W.G. (1989). Compatibility - past, present, future. *SAE Technical Paper Series*, n.892472.
- CLAR GUEVARA, J.P. (1968). The influence of time-lag in the braking of commercial vehicles. In: FISITA, 12, paper 2-08, May.
- COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRÁFEGO - CET. (1997). Fatos & Estatísticas de Acidentes de Trânsito. *Prefeitura de São Paulo*, São Paulo.
- CROLLA, D.A.; SPENCER, H.B. (1984). Tractor handling during control loss on sloping ground. *Vehicle System Dynamics*, n.13, p.1-17.
- CULLEN, D. (1993). Where braking is finally headed? *Fleet Owner*, v.88, n.5, p.39-44, May.
- DAY, A.J.; HARDING, P.R.J. (1983). Performance variation of cam operated drum brakes. *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers. Part C: Mechanical Engineering Science*, v.197, n.10, p.69-77.
- DAY, A.J. et al. (1991). Thermal effects and pressure distributions in brakes. *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers. Part D: Automobile Engineering*. v.205, n.3, p.199-206.
- DAY, A.J. (1991). Drum brake interface pressure distributions. *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers. Part D: Automobile Engineering*. v.205, n.2, p.127-136.

- DAWSON, V.E. (1975). Observations concerning on-site brake testing of large mining trucks in British Columbia. *SAE Technical Paper Series*, n.750560.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. (1997). Estatísticas de acidentes nas rodovias. *Governo do Estado de São Paulo*, DER, São Paulo, SP.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO. (1995). Estatísticas de acidentes nas rodovias brasileiras. *Governo Federal*, DENATRAN, Brasília, DF.
- DEIRLEIN, B. (1995). Fleet managers help design tomorrow's trucks. *World Wastes*, v.38, n.3, 4p., Mar.
- DENHOLM, M.J. et al. (1970). Make the trucks stop, too. *SAE Technical Paper Series*, n.700114.
- DEWAARD, D.; BROOHUIS, K.A. (1991). Assessing driver status: a demonstration experiment on the road. *Accident Analysis and Prevention*, v.23, n.4, p.297-307.
- DEWANDRE, C. (1965). Braking proportional to load. *Automobile Engineer*, Nov.
- DOE, R. et al. (1990). Electronic data acquisition and analysis for NHTSA ABS fleet evaluation. *SAE Technical Paper Series*, n.902264.
- DOI, A. et al. (1994). Development of a rear-end collision avoidance system with automatic brake control. *JSAE Review*, n.15, p.335-340, Oct.
- DORION, S.L.; PICKARD, J.G.; VESPA, S. (1989). Are anti-jackknife devices feasible? *Automotive Engineering*, v.97, n.11, p.39-41, Nov.
- DUFFIN, A.R. (1994). ABS braking systems subjected to failure mode analysis. *Automotive Engineer*, v.19, n.6, p.20-22, Dec.
- DUGOFF, H. et al. (1970). An analysis of tire traction properties and their influence on vehicle dynamic performance. In: INTERNATIONAL AUTOMOBILE SAFETY CONFERENCE COMPENDIUM, New York, U.S.A. *SAE*.
- DUGOFF, H.; MURPHY, R.W. (1971). The dynamic performance of articulated highway vehicles - a review of the state-of-the-art. *SAE Technical Paper Series*, n.710223.
- EATON, W.C.; SCHREUR, I.J. (1966). Brake proportioning valve. *SAE Technical Paper Series*, n.660400.

- EBERT, D.G.; KOWALSKI, M.F. (1993). Brake design parameters for customer satisfaction. *Automotive Engineering*, v.101, n.6, p.13-16, June.
- ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE. (1990). *ECE-R13 - Uniform provisions concerning the approval of vehicles of categories M, N and O with regard to braking*. United Nations - ECE, Geneva, Switzerland, 114p.
- ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE. (1996). *ECE-R13H - Uniform provisions concerning the approval of passenger cars with regard to braking*. United Nations - ECE, Geneva, Switzerland, 114p.
- EUROPEAN ECONOMIC COMMUNITY. (1993). *EEC 71/320 - Consolidated braking directive*. EEC, Bruxelles, Bélgica, 136p.
- EHLBECK, J.M. et al. (1989). Full ABS with tandem control for Freightliner trucks. *SAE Technical Paper Series*, n.892503.
- EKSTROM, G.A.; YOUNG, M.R. (1973). Industrial lift truck capacity limiting system. *SAE Technical Paper Series*, n.730833.
- ELGESKOG, E.; BRODD, S. (1976). The influence of wheel slip control dynamics on vehicle stability during braking and steering. *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers. Part C: Mechanical Engineering Science*, v.191, n.28, p.59-68.
- EL-GINDY, M. (1992). Use of Heavy vehicle performance measures for design and regulation. *Transportation Systems - American Society of Mechanical Engineers. ASME*, New York, NY, U.S.A., v.44, p.367-382.
- ELLIS, J.R. (1963). The dynamics of vehicles during braking. In: SYMPOSIUM CONTROL OF VEHICLES, Automobile Division, London, *Institution of Mechanical Engineers*, p.20-29.
- EMIG, R.; SCHRAMM, H. (1989). Traction control for commercial vehicles. *SAE Technical Paper Series*, n.890046.
- EMIG, R.; DECKER, H. (1989). Increased safety and improved comfort thanks to electronic systems for bus and truck applications. *SAE Technical Paper Series*, n.892509.
- EMIG, R. et al. (1990). Antilock braking systems (ABS) for commercial vehicles - status 1990 and future prospects. *SAE Technical Paper Series*, n.901177.
- EMORI, R.I. et al. (1987). Motion of tractor-semitrailer in accident-prone conditions. *SAE Technical Paper Series*, n.871181.

- ESHLEMAN, R.L. et al. (1973). Parameter studies in articulated vehicle handling. *SAE Technical Paper Series*, n.730673.
- ESMAILZADEH, E. (1996). Directional performance and yaw stability of articulated combination trucks. *SAE Technical Paper Series*, n.962154.
- EVANS, D.W.; GINSBURG, A.P. (1985). Contrast sensitivity predicts age-related differences in highway-sign discriminability. *Human Factors*, v.27, n.6, p.637-642.
- EVANS, L. (1988). Older driver involvement in fatal and severe traffic crashes. *Journal of Gerontology: Social Sciences*, v.43, n.6, p.186-193.
- FANCHER, P.S. et al. (1970). Experimental studies of tire shearforce mechanisms - a summary report. Final Report NBS CST-928-5, HSRI, July.
- FANCHER, P.S.; MACADAM, C.C. (1976). Computer analysis of antilock system performance in the braking of commercial vehicles. *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers. Part C: Mechanical Engineering Science*, v.191, n.32, p.113-124.
- FANCHER, P.S. (1989). Directional dynamics considerations for multi-articulated, multi-axled heavy vehicles. *SAE Technical Paper Series*, n.892499.
- FANCHER, P.S.JR.; MATHEW, A. (1989). Performance factors for heavy trucks. *Automotive Engineering*, v.97, n.11, p.21-24, Nov.
- FANCHER, P.S. (1991). Safety issues associated with trucks with multiple trailers. Advanced Automotive Technologies - American Society of Mechanical Engineers. *ASME*, v.40, New York, NY, U.S.A., p.11-15.
- FANCHER, P.S.; FLICK, M.A. (1992). Evaluation of braking strategies on downgrades. *SAE Technical Paper Series*, n.870504.
- FANCHER, P.S.; BAREKET, Z. (1993). Including roadway and tread factors in a semi-empirical model of truck tyres. *Vehicle Systems Dynamics*, v.21, suppl., p.92-107.
- FANCHER, P. et al. (1995). Statistical and mechanical analysis of brake adjustment criteria for heavy trucks. *Proceedings of Heavy Vehicle Weights and Dimension - Road Transport Technology*, Ontario, Canada, p.563-574.
- FEDERAL MOTOR VEHICLE SAFETY STANDARD. (1998). *FMVSS 105 - Hydraulic brake systems*. National Highway Traffic Safety Administration - NHTSA. Washington, U.S.A., 28p.

- FEDERAL MOTOR VEHICLE SAFETY STANDARD. (1995). *FMVSS 121 - Air brake systems*. National Highway Traffic Safety Administration - NHTSA. Washington, U.S.A., 27p.
- FEDERAL MOTOR VEHICLE SAFETY STANDARD. (1997). *FMVSS 135 - Passenger car brake systems*. National Highway Traffic Safety Administration - NHTSA. Washington, U.S.A., 27p.
- FERMER, M.; LUNDEN, R. (1991). Transient brake temperatures found by use of analytical solutions for finite hollow cylinders. *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers. Part C: Mechanical Engineering Science*, v.205, n.3, p.189-200.
- FERNANDES, D.L.G. (1994). *Estudo da Freagem de Autoveículos Rodoviários Articulados Pesados*. São Carlos, 1994. 153p. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- FERNANDES, D.L.G. et al. (1995a). A Description of a Computer System for the Study of Brake Performance of Heavy Trucks. *SAE Technical Paper Series*, n.952214, p.1-7.
- FERNANDES, D.L.G. et al. (1995b). A Study of the Braking Performance of Heavy Trucks Using the Static Equilibrium or Centre of Gravity Range Technique. *SAE Technical Paper Series*, n.952215, p.1-7.
- FERNANDES, D.L.G. et al. (1995c). A Study of the Influence of the Brake Force Distribution on the Directional Stability of Heavy Vehicles During the Braking Process. *SAE Technical Paper Series*, n.952213, p.1-7.
- FERNANDES, D.L.G. (1996). Análise Comparativa entre as Normas Internacionais ECE-R13 e FMVSS-121. In: COLLOQUIUM DE FREIOS, 2. *SAE BRASIL*. Caxias do Sul.
- FERNANDES, D.L.G. et al. (1997a). Performance, Distribution of Braking and Compatibility of Heavy Vehicles During Braking Process Including ECE-R13 Requirements. *SAE Technical Paper Series*, n.973045, p.1-10.
- FERNANDES, D.L.G. et al. (1997b). Performance and Directional Stability of Combination Vehicles During the Braking Process Under Any Operation Condition. In: ISATA International Congress, 30. N.97VR048. Florence, Italy.
- FEYER, A.M. et al. (1997). Balancing work and rest to combat driver fatigue: an investigation of two-up driving in Australia. *Accident Analysis and Prevention*, v.29, n.4, p.541-553, July.

- FLICK, M.A.; RADLINSKI, R.W. (1986). Tractor and trailer brake system compatibility. *SAE Technical Paper Series*, n.861942.
- FRIES, T.R.; JONES, T.D. (1992). Calculating speed from heavy truck skid marks. Accident Reconstruction: Technology and Animation - SAE Special Publication, n.907. *SAE*, Warrendale, PA, U.S.A., p.35-46.
- FRITH, W.J. (1994). Case control study of heavy vehicle driver's working time and safety. *Road Safety Proceedings*, Australian Road Research Board Ltd., Nunawading, Australia, v.17, n.5, p.17-30.
- FRITZSCHE, G. (1959). Statische regelung der bremskräfte und kraftfahrzeug und anhängen nach last und abbremung. *ATZ*, v.61, n.8.
- FRITZSCHE, G. (1961). Bremsauslegung bei sattelzügen. *ATZ*, v.63, n.1.
- FUFAEV, N.A. (1985). On the theory of accident-free braking. *Izvestiya AN SSSR / Mekhanika Tverdogo Tela*, v.20, n.6, p.58-60.
- GANGOPADHYAY, S. et al. (1995). Analysis of the braking performance of a tractor-trailer unit. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v.22, n.6, p.1178-1184, Dec.
- GERBERT, G. (1979). Analysis of crank mechanism brakes supplied with an integrated automatic slack adjuster. *SAE Technical Paper Series*, n.790476.
- GILLESPIE, T.D. (1976a). Front brake interactions with heavy vehicle steering and handling during braking. *SAE Technical Paper Series*, n.760025.
- GILLESPIE, T.D. (1992). *Fundamentals of vehicle dynamics*. 2.ed. Warrendale, U.S.A., SAE. Cap.3, p.45-76: Braking Performance; Cap.4, p.97-98, p.110-118: Road Loads; Cap.6, p.195-202: Steady-state Cornering.
- GLADYSHEV, S.P. et al. (1998). Calculating experimental technique on choosing the components and algorithms of anti-lock system functioning in the air brake system. *SAE Technical Paper Series*, n.980245.
- GOEBELS, H. et al. (1985). ABS - highly flexible modular system for commercial vehicles. *SAE Technical Paper Series*, n.852326.
- GOHRING, E. (1986). Worldwide truck electronic systems - trends for the 90s. *SAE Technical Paper Series*, n.861970.
- GOHRING, E. (1988a). Reliability of Daimler-Benz/Wabco anti-lock systems - five years of experience after production began. *SAE Technical Paper Series*, n.880986.

- GOHRING, E. (1988b). Eletronic traction control system ASR and its integration in the anti-lock braking system ABS to form a safety system "ABS/ASR" for commercial vehicles. *SAE Technical Paper Series*, n.881137.
- GOHRING, E. (1989). The impact of different ABS-philosophies on the directional behavior of commercial vehicles. *SAE Technical Paper Series*, n.892500.
- GOHRING, E.; Von GLASNER, E.C. (1990). Performance comparison of drum and disc brakes for heavy duty commercial vehicles. *SAE Technical Paper Series*, n.902206.
- GOLDSTEIN, A.A. (1996). Finite element analysis of a quasi-static rolling tire model for determination of truck tire forces and moments. *Tire Series & Technology*, v.24, n.4, p.278-293, Oct-Dec.
- GÖTZ, H. (1987). Commercial Vehicles. In: HUCHO, W.H. *Aerodynamics of road vehicles*. London, Great Britain, Butterworth. Cap.8, p.295-354.
- GRAHAM, J.R. et al. (1997). Minimum luminance of highway signs required by older drivers. *Transportation Research Record*, n.1573, p.91-98.
- GRIMM, R.A. et al. (1977). Evaluation of vehicle installed wheel lock control hardware with a hybrid computer simulation. *SAE Technical Paper Series*, n.770098.
- GRUENING, J. et al. (1998). Driving simulation. *SAE Technical Paper Series*, n.980223.
- HALES, F.D. (1965). Lateral stability problems of simply articulated vehicles., In: INTERNATIONAL UNION THEORETICAL MECHANICAL SYMPOSIUM, p.17-34.
- HALES, F.D. et al. (1966). The handling and stability of motor vehicles - Part 3, *Motor Industry Research Assn*.
- HALES, F.D. (1967). The ride and handling of articulated vehicles, Commercial vehicles: Engineering and operation, London: *Institution of Mechanical Engineers*. p.130-152.
- HALES, F.D. (1976). Lateral stability of commercial road vehicle trains under braking conditions. *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers. Part C: Mechanical Engineering Science*, v.191, n.23, p.35-44.
- HARDY, M.S.A.; CEBON, D. (1995). Investigation of anti-locking strategies for heavy goods vehicles. *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers. Part D: Journal of Automobile Engineering*, v.209, n.4, p.263-271.

- HARRIES, D.A. (1978). Pedal feel with power braking systems. *Lucas engineering Review*, v.7, n.3, p.65-69.
- HARTLEY, L.R. et al. (1994). Indicator of fatigue in truck drivers. *Applied Ergonomics*, v.25, n.3, p.143-156, June.
- HARWOOD, D.W. et al. (1989). Characteristics of accidents and incidents in highway transportation of hazardous materials. *Transportation Research Record*, n.1245, p.23-33.
- HECKER, F. et al. (1997). Vehicle dynamics control for commercial vehicles. *SAE Technical Paper Series*, n.973284.
- HENDERSON, G.W.; SCHILKE, N.A. (1992). Mobility technology tomorrow II. *Automotive Engineering*, v.100, n.5, p.23-30, May.
- HEUSSER, R.B. (1991). Heavy duty deceleration rates as a function of brake adjustment. *SAE Technical Paper Series*, n.910126.
- HEUSSER, R.B. (1992). Air brake inspections of five-axle combinations. *SAE Technical Paper Series*, n.922443.
- HIDA, M.M. (1997). A visão e a segurança nas rodovias. *Jornal Brasileiro de Medicina*, Editora de Publicações Científicas Ltda., Rio de Janeiro, v.73, n.1, p.121-126, jul.
- HILDEBRAND, E.D.; WILSON, F.R. (1997). Development and intermediate findings of a level III heavy-truck collision study. *Transportation Research Record*, n.1595, p.39-45.
- HIRANO, M. (1993). Development of vehicle-following distance warning system for trucks and buses. *Proceedings of IEEE on Vehicle Navigation and Informations Systems*, 93CH3285-4, p.513-516.
- HOWARD, D.U.D. (1996). Reducing driver fatigue by improving heavy vehicle directional stability. *SAE Technical Paper Series*, n.962182.
- HUANG, Y.M.; SHYR, J.S. (1995). Effect of friction on drum brakes. *Impact, Waves and Fracture*, ASME, AMD, New York, NY, U.S.A., v.205, p.105-114.
- HYKES, P.G. (1963). Truck downhill control-prediction procedure. *SAE*, n.630A.
- INGRAM, B.; OPPENHEIMER, P. (1973). Safer braking systems. *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers. Part C: Mechanical Engineering Science*, v.187, n.10, p.87-97.

- INGRAM, B.; THOMPSON, R.E. (1986). Truck brakes - European style. *SAE Technical Paper Series*, n.861964.
- IVEY, D.L. et al. (1986). Strategies for reducing truck accidents on wet pavements. *Transportation Research Record*, n.1084, p.1-8.
- IWASAKI, T. et al. (1990). Development of 4-wheel-control ABS for trucks and buses with air-over-hydraulic braking system. *JSAE Review*, v.11, n.3, p.85-87, July.
- IWASAKI, K. et al. (1998). Smart algorithm for a tire pneumatic pressure monitor embedded in ABS program. *SAE Technical Paper Series*, n.980237.
- JACOBSON, M. (1997). Eletronic braking systems review. *Automotive Engineer*, v.22, n.1, p.54-55, Feb.
- JACKSON, L.E. (1986). Truck accident studies. *Transportation Research Record*, n.1052, p.137-145.
- JARVIS, J.R. (1989). The in-service braking levels of Australian heavy vehicles. *SAE Technical Paper Series*, n.892505.
- JOHN, R.S. (1997). Equations simplify drum brake analysis. *Power Transmission Design*, v.39, n.6, p.49-54, June.
- JOHNSON, H.D. (1973). Motorway accidents in fog and darkness. *Transport and Road Research Laboratory - TRRL Report LR*, n.573, p.1-6.
- JOVANIS, P.P.; CHANG, H. (1986). Modeling the relationship of accidents to miles traveled. *Transportation Research Record*, n.1068, p.42-51.
- KANEKO, T.; JOVANIS, P.P. (1992). Multiday driving patterns and motor carrier accident risk - a disaggregate analysis. *Accident Analysis and Prevention*, v.24, n.5, p.437-456, Oct.
- KARCZEWSKI, J. (1992). Evolution in braking. *Automotive Engineering*, v.100, n.8, p.10-11, Aug.
- KAWABE, T. et al. (1997). Sliding mode controller for wheel slip ratio control system. *Vehicle System Dynamics*, v.27, n.5-6, p.393-408, June.
- KELLER, A.T. (1973). Jackknife control for tractor-trailer. *SAE Technical Paper Series*, n.730643.
- KENNET, P. (1996). Safe and sound in the long run. *Transport Engineer*, p.10-12, Dec.

- KIBBEE, L.C. (1969). Report of truck brake tests conducted for the Virginia Twin Trailer Study Commission. *Virginia Highway Users Association*, Mar.
- KIMBROUGH, S.; CHIU, C. (1991). A brake control algorithm for emergency stops (which may involve steering) of tow-vehicle trailer combinations. *Proceedings of American Control Conference*, Green Valley, AZ, U.S.A., v.1, p.409-414.
- KIMBROUGH, S. et al. (1994). Braking controllers and steering controllers for combination vehicles. *Heavy Vehicle Systems*, v.1, n.2, p.195-222.
- KIRKPATRICK, M. (1987). The role of critical incidence and prevalence studies in truck safety research. *SAE Technical Paper Series*, n.870491.
- KLINE, T.J.B. et al. (1990). Visibility distance of highway signs among young, middle-aged, and older observers: icons are better than text. *Human Factors*, v.32, n.5, p.609-619.
- KOBE, G. (1997). Fluidless brakes. *Chilton's Automotive Industries*, v.177, n.3, p.65-66, Mar.
- KOJIMA, Y.; TAKUBO, N. (1989). Characteristics of rollover or jackknife accidents of articulated trucks (a case study for driver education and vehicle safety improvements). *SAE Technical Paper Series*, n.891227.
- KOPPA, R.J. (1996). Measuring driver performance in braking maneuvers. *Transportation Research Record*, n.1550, p.8-15, Nov.
- KOUTNY, Z. (1966). Small-scale test installation for research on the stability of road vehicles during braking. *C.I.D.I.T.V.A. Bul.* n.27, Sept.
- KRAMER, D.; ROPER, D.; TRACHMAN, E. (1987). Drive axle antilock improves truck braking stability. *Automotive Engineering*, v.95, n.11, p.61-65, Nov.
- KRAUTER, A.I.; WILSON, R.K. (1972). Simulation of tractor-semitrailer handling. *SAE Transactions*, v.81, n.720922.
- KULAKOWSKI, B.T. et al. (1992). Measurement and modeling of truck tire traction characteristics. ASTM Special Technical Publication, n.1164, *ASTM*, Philadelphia, PA, U.S.A., p.14-31.
- LAM et al. (1979). Evaluation of braking performance of a tractor-semitrailer equipped with two different types of anti-lock systems. *SAE Technical Paper Series*, n.791046.
- LEASURE, W.A.J.; WILLIAMS, S.F.J. (1989). Antilock systems for air-braked vehicles. *SAE Technical Paper Series*, n.890113.

- LEBER, M. et al. (1997). New chances for the drum brake through electronically controlled self energizing. *SAE Technical Paper Series*, n.971036.
- LEE, J. et al. (1997a). Collision avoidance behavior of unalerted drivers using a front-to-rear-end collision warning display on the Iowa Driving Simulator. *Transportation Research Record*, n.1573, p.1-7.
- LEE, T.S. et al. (1997b). Regulating performance for tractor-semitrailer vehicle systems: a Lyapunov minimax approach. *Proceedings of the IEEE*, v.4, 97CH36041, p.2473-2477.
- LEE-GOSSELIN, M.E.H. et al. (1990). Truck accident involvement with and without front-axle brakes: application for case control methodology. *Transportation Research Record*, n.1270.
- LERNER, N.D. (1993). Brake perception-reaction of older and younger drivers. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, v.1, p.206-210.
- LEUZZI, V. (1957). Braking of road vehicles with tandem axle connected by a equalizing bar. *ATZ*, v.59, n.3, p.58-61, Mar.
- LEWIS, J.M. (1974). A fleet operator's comments on FMVSS 121 braking system compatibility. *SAE Technical Paper Series*, n.740049.
- LEIBBRAND, N. et al. (1990). ABS 6S/4K - A modular system for simplified installation in tractors, semi-trailers and trailers. *Transactions of SAE*, v.99, n.2, p.715-722.
- LINDEMANN, K. et al. (1997). EBS and tractor trailer brake compatibility. *SAE Technical Paper Series*, n. 973283.
- LIMPERT, R. (1971). An investigation of the brake force distribution of tractor-semitrailer combinations. *SAE Transactions*, v.80, n.710044.
- LIMPERT, R.; WARNER, C.Y. (1971). Proportional braking of solid-frame vehicles. *SAE Transactions*, v.80, n.710047.
- LIMPERT, R.; ANDREWS, D.F. (1987). Analysis of truck braking accidents. *SAE Technical Paper Series*, n.870504.
- LIMPERT, R. (1992). *Brake design and safety*. Warrendale, PA, U.S.A., SAE, 460p.
- LLANERAS, R.E. et al. (1996). Older commercial drivers: abilities, age and driving performance. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, v.2, p.933-937.

- LOCOCO, K. et al. (1990). Traffic control design elements for accommodating drivers with diminished capacity. Final Technical Report, Department of Transportation, *FHA*, Ketron, Inc., Malvern, PA, v.2.
- LORD, J.W. (1942). Design elements affecting safety. *SAE Transactions*, n.420076.
- LUECK, F.E.; et al. (1969). Proportioning valve to skid control - a logical progression. *SAE Technical Paper Series*, n.690456.
- LUOMA, J. et al. (1997). Effects of turn-signal colour on reaction times to brake signals. *Ergonomics*, v.40, n.1, p.62-68, Jan.
- MALCOLM, G.D. (1991). Objectives of the New Zealand heavy vehicle brake code. *SAE Technical Paper Series*, n.912716.
- MALECK, T.L.; HUMMER, J.E. (1986). Driver age and highway safety. *Transportation Research Record*, n.1059, p.6-12.
- MAMITI, G.I. (1986a). Calculation of the shoes of drum brakes. *Soviet Engineering Research / Vestnik Mashinostroeniya*, v.66, n.7, p.23-25.
- MAMITI, G.I. (1986b). Functional calculation of two-shoe drum brakes. *Soviet Engineering Research / Vestnik Mashinostroeniya*, v.66, n.11, p.25-28.
- MARKERT, M.E. (1972). Disc brakes for heavy duty vehicles. *SAE Technical Paper Series*, n.720060.
- MATHUES, T.P. (1994). Extending the scope of ABS. *Automotive Engineering*, v.102, n.7, p.15-17, July.
- MEIERKORT, J.; THOMS, E. (1990). Air disc brakes realization during the development and application introduction. *SAE Technical Paper Series*, n.902205.
- McDOLE, T.L. (1977). Inspection, defect detection, and accident causation in commercial vehicles. *SAE Technical Paper Series*, n.770116.
- McLEAN, D.; NEWCOMB, T.P.; SPURR, R.T. (1976). Simulation of driver behaviour during braking. *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers. Part C: Mechanical Engineering Science*, v.191, n.41, p.197-202.
- MILOSEVIC, S. (1997). Driver's fatigue studies. *Ergonomics*, v.40, n.3, p.381-389, Mar.
- MITSCHKE, M.; RUNGE, D. (1965). Load controlled brake force in semi-trucks. *Bosch Tech. Berichte*, v.1, n.3, June.

- MODLIN, R.R.; DOUGLAS, J.W. (1977). The truck stabilizer, a means of preventing roll-over during braking and handling test situations. *SAE Technical Paper Series*, n.770892.
- MOHAMEDSHAH, Y.M. et al. (1993). Truck accident models for interstates and two-lane rural roads. *Transportation Research Record*, n.1407, p.35-41.
- MOLLER, E. (1954). Pneumatic braking systems on tractor/trailer combinations. *ATZ*, v.56, n.12.
- MORENO, J.C. (1995). Como enfrentar os peso-pesados. *Quatro Rodas*, Ano 35, n.414, p.84-90, jan.
- MORSE, R.J. (1966). Brake balance - it can be improved. *SAE Technical Paper Series*, n.660398.
- MORTIMER, R.G. (1976). Implications of some characteristics of drivers for brake system performance. *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers. Part C: Mechanical Engineering Science*, v.191, n.40, p.187-196.
- MORTIMER, R.G. (1993). High mounted brake lamp: a cause without a theory. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, v.2, p.955-959.
- MUELLER, G. (1960). Erhöhte bremsicherheit der sattel und lastzüge. *ATZ*, v.62, n.7.
- NAKAZAWA, M.I. et al. (1995). Braking force distribution control for improved vehicle dynamics and brake performance. *Vehicle Systems Dynamics*, v.24, n.4-5, p.413-426, June.
- NELSON, R.E.; FITCH, J.W. (1968). Optimum braking, stability, and structural integrity for longer truck combination. *SAE Transactions*, v.77, n.680547.
- NELSON, J.E. (1970). Vehicle air brake performance evaluation. *SAE Technical Paper Series*, n.700514.
- NEWCOMB, T.P.; SPURR, R.T. (1968). CV braking: state of the art. *Automotive Design Engineering*, v.7, Nov.
- NEWCOMB, T.P. (1976). Basic principles. *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers. Part C: Mechanical Engineering Science*, v.190, n.22, p.1-9.
- NILSON, L.; HAKAN, A. (1991). Effects of mobile telephone use on elderly drivers' behaviour - including comparisons to young drivers' behaviour. *Swedish Road and Traffic Research Institute*, Linköping, Sweden.

- NISHIWAKI, M. (1990). Review of study on brake squeal. *JSAE Review*, v.11, n.4, p.48-54, Oct.
- NOON, W.D. (1966). Dynamic brake balance via the computer. *SAE Transactions*, v.75, n.660399.
- NORDSTROM, O. (1989). Heavy duty vehicle dynamics related to braking, steering and tyres - Swedish research and proposals by VTI. *SAE Technical Paper Series*, n.892502.
- NORDSTROM, O. (1993). Stability, steerability and braking performance of heavy duty vehicles: a review of experimental and theoretical research and regulation proposals by VTI in Sweden. *Heavy Vehicle Systems*, v.1, n.1, p.34-62.
- NORTH, M.R.; OLIVER, S.J. (1967). Transient load transfer in an articulated vehicle under braking conditions. *M.I.R.A. Report*, n.1967/7, June.
- NOVAK, A.J. et al. (1990). Computer simulation of semi-trailer haul truck roll-over dynamics. *SAE Transactions*, v.99, n.2, p.491-497.
- OETZEL, J.G. (1952). Synchronization of brakes on multi-axle truck-trailer trains, *SAE Quart. Trans.*, v.6, n.2, Apr.
- OLIVEIRA, Z.A.A. et al. (1993). Nova técnica para aumentar a vida útil do material de atrito dos freios a ar tipo S came e pneus aplicados em caminhões, ônibus e semi-reboques, sem aumentar custos. *SAE Technical Paper Series*, n.952193-P.
- OLSON, P.L.; SIVAK, M. (1986). Perception-response time to unexpected roadway hazards. *Human Factors*, v.28, n.1, p.91-96.
- OLSON, P.L. (1992). Reducing the problems of nighttime driving for older individuals. *SAE Technical Paper Series*, n.920616.
- OPPENHEIMER, P. (1974). Braking regulations in Europe. *SAE Technical Paper Series*, n.740313.
- OPPENHEIMER, P. (1988). Computer aided stops. *Automotive Engineering*, v.96, n.8, p.61-66, Aug.
- ORDORICA, M.A. (1973). The Mather jackknife control unit. *SAE Technical Paper Series*, n.730641.
- PALKOVICS, L. et al. (1996). Adaptative identification of heavy truck stability control. *Vehicle Systems Dynamics*, suppl., v.25, p.502-518.

- PALKOVICS, L.; EL-GINDY, M. (1996). Examination of different control strategies of heavy-vehicle performance. *Transactions of the ASME - Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, v.118, p.489-497, Sept.
- PEPOY, R.A. (1976). Commercial vehicle braking simulation: problem or solution to the vehicle manufacturer. *SAE Technical Paper Series*, n.760028.
- PERSEGUIM, O.T.; FERNANDES, D.L.G.; CANALE, A.C. (1995). Obtenção das Forças que Ocorrem nos Eixos e na Suspensão de um Veículo Combinado Articulado. In: COBEM, 13, 1995. *Anais*. Belo Horizonte, UFMG, Brasil.
- PETERS, W.C. (1997). Antilock braking systems revisited. *Fire Engineering*, v.150, n.4, 2p, Apr.
- PETERSEN, E. et al. (1990). New ABS with integral automatic traction control for air-braked trucks and buses. *SAE Transactions*, v.99, n.2, p.688-703.
- PIERCE, P.R. (1985). Controlled load transfer during braking on a four-spring trailer suspension. *SAE Technical Paper Series*, n.852344.
- PILLAI, P.S.; FIELDING-RUSSEL, G.S. (1992). Tire rolling resistance from whole-tire hysteresis ratio. *Rubber Chemistry and Technology*, v.65, n.2, p.444-452, May-June.
- POLÍCIA RODOVIÁRIA. (1996). Estatísticas sobre acidentes nas rodovias estaduais. *Governo do Estado de São Paulo*, São Paulo.
- POLUS, A. et al. (1985). Truck impact on roadway safety. *Transportation Research Record*, n.1047.
- PONDS, R.W. et al. (1988). Age differences in divided attention in a simulated driving task. *Journal of Gerontology: Psychological Sciences*, v.43, n.6, p.151-156.
- POPOV, G. et al. (1993). Dynamic of liquid sloshing in horizontal cylindrical road containers. *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, v.207, n.37, p.399-406.
- POTTINGER, M.G. et al. (1995). Combined cornering and braking test for heavy duty truck tires. *Proceedings of Heavy Vehicle Weights and Dimension - Road Transport Technology*, Ontario, Canada, p.583-592.
- POTTINGER, M.G. et al. (1996). Straight-line braking test for truck tires. *Rubber World*, v.214, n.6, 7p, Sept.
- RADLINSKI, R.W. et al. (1982). The importance of maintaining air brake adjustment. *SAE Technical Paper Series*, n.821263.

- RADLINSKI, R.W. (1987). Braking performance of heavy U.S. vehicles. *SAE Technical Paper Series*, n.870492.
- RADLINSKI, R.W.; FLICK, M.A. (1987). Benefits of front brakes on heavy trucks. *SAE Technical Paper Series*, n.870493.
- RADLINSKI, R.W. (1989). Heavy vehicle braking - U.S. versus Europe. *SAE Technical Paper Series*, n.892504.
- RAFFLE, P.A.B. (1989). The drinking driver: a medical view. *Transport Reviews*, Taylor & Francis Ltd., England, v.9, n.4, p.315-345.
- RAKHEJA, S.; PICHE, A. (1990). Development of directional stability criteria for an early warning safety device. *SAE Technical Paper Series*, n.902265.
- RANGANATHAN, R. (1989). Steady turning stability of partially filled tank vehicles with arbitrary tank geometry. *Transactions of the ASME - Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, v.111, p.481-489, Sept.
- RANGANATHAN, R.; YANG, Y.S. (1996). Impact of liquid load shift on the braking characteristics of partially filled tank vehicles. *Vehicle Systems Dynamics*, v.26, n.3, p.223-240, Sept.
- RANNEY, T.A.; SIMMONS, L.A. (1992). The effects of age and target location uncertainty on decision making in a simulated driving task. *Proceedings of Human Factors Society*, In: 36th Annual Meeting, Atlanta, U.S.A.
- RAVES, P. (1977). Truck disc brakes - *practice makes perfect*. *SAE Technical Paper Series*, n.770667.
- REINECKE, E. (1985). An anti-lock system with extended safety and control system functions. *International Journal of Vehicle Design*, v.6, n.4/5, p.561-566.
- RITCEY, R.M.; TACIUK, W. (1977). Testing and evaluation of large, off-highway haulage truck brake systems. *SAE Technical Paper Series*, n.770547.
- ROBBINS, W.O. (1962). Truck brake testing procedure. *SAE Transactions*, n.620100.
- ROGERS, W.C. et al. (1996). Research to enhance the safe driving performance of older commercial vehicle drivers: effects of selected ergonomic interventions upon driving performance. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, v.2, p.938-942.
- ROLLINS, J.B.; McFARLAND, W.F. (1986). Costs of motor vehicle accidents and injuries. *Transportation Research Record*, n.1068, p.1-7.

- ROMARO, M. et al. (1995). Análise de acidentes com veículos comerciais e sua contribuição ao desenvolvimento da segurança veicular. *SAE Technical Paper Series*, n.952193-P.
- ROSKAN, J. (1982). *Airplane flight dynamics and automatic flight controls*. Roskan Aviation and Engineering Corporation. Ottawa, Kansas, v.2: Rigid and elastic airplane flight dynamics and automatic flight controls.
- ROUSE, J.A. (1963). The distribution of braking on motor vehicles. *Proceedings of Symposium on Control of Vehicles during Braking and Cornering*, London, Institution of Mechanical Engineers.
- RUNGE, D. (1967). Matching trailer braking to the loading of the truck/trailer combination. *ATZ*, v.69, n.7.
- RYUKO, F.; KUBOTA, K. (1989). Truck braking standards and regulations in Japan. *SAE Technical Paper Series*, n.890867.
- SAKAI, H. et al. (1978). The effect of hydroplaning on the dynamic characteristics of car, truck and bus tires. *SAE Technical Paper Series*, n.780195.
- SCHEIBE, R.R. et al. (1996). Safety monitoring of air brake systems on board commercial vehicles. *Transportation Research Record*, n.1560, p.40-47, Nov.
- SCHMID, I. (1967). Engineering approach to truck and tractor train stability. *SAE Technical Paper Series*, n.670006.
- SCHUBERT, K. et al. (1989). Increasing the safety of commercial vehicles. *Automotive Engineering*, v.53, n.4, p.52-55, July-Aug.
- SCHWARZ, R. et al. (1998). Modelling and control of a electromechanical disk brake. *SAE Technical Paper Series*, n.980600.
- SCIALFA, C.T. et al. (1987). Age differences in judgements of vehicle velocity and distance. *Proceedings of Human Factors Society*. In: 31st Annual Meeting, U.S.A., p.558-561.
- SCOTT, P.P. (1980). The relationship between road lighting quality and accident frequency. *Transport and Road Research Laboratory - TRRL Laboratory Report*, London, U.K., n.929, p.1-14.
- SEIFF, H.E. (1985). Heavy truck safety - what we know. *SAE Technical Paper Series*, n.851191.
- SEIFF, H.E. (1989). Status report on large truck safety in the United States. *SAE Technical Paper Series*, n.892541.

- SEIFF, H. (1995). Heavy truck brake adjustment - problems and solutions. *Proceedings of Heavy Vehicle Weights and Dimension - Road Transport Technology*, Ontario, Canada, p.575-582.
- SEPLATEC. (1997). A frota brasileira e as mudanças, São Paulo, SP. In: *Transporte Moderno*, n.383, 1997.
- SHERARD, T.D. (1971). Safety and operating characteristics of big trucks. *SAE Technical Paper Series*, n.710632.
- SHIRAI, N. et al. (1994). Experimental study of the stability of heavy duty tractor-trailer in a critical state: programmed control of the test vehicle. *Journal of Mechanical Engineering Laboratory*, v.48, n.5, p.1-11, Sept.
- SIEGMUND, G.P. et al. (1996). Correlation of steering behavior with heavy truck driver fatigue. *SAE Technical Paper Series*, n.961683.
- SIVAK, M. et al. (1987). Brake lamp photometrics and automobile rear signaling. *Human Factors*, v.29, n.5, p.533-540.
- SIVAK, M. et al. (1989). Cross-cultural differences in driver risk-perception. *Accident Analysis & Prevention*, v.21, n.4, p.355-362.
- SIVAK, M. et al. (1994). Reaction times to neon, LED and fast incandescent brake lamps. *Ergonomics*, v.37, n.6, p.989-994, June.
- SJAH DANULIRWAN, M. (1993). Analytical model for the prediction of tyre-road friction under braking and cornering. *International Journal of Vehicle Design*, v.14, n.1, p.78-99.
- SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. (1976). *SAE J670e - Vehicle dynamics terminology*. Revised ed. Warrendale, PA, U.S.A., SAE.
- SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. (1988). *SAE J687 - Nomenclature - truck, bus, trailer*, Warrendale, PA, U.S.A., SAE.
- SOLTIS, P.J. (1979). Straight air disc brakes. *SAE Technical Paper Series*, n.791041.
- STAPLIN, L. et al. (1990). Traffic control design elements for accommodating drivers with diminished capacity. Final Technical Report, *Department of Transportation*, FHA, Ketron, Inc., Malvern, PA, v.2.
- STOKES, S.L. (1974). Heavy truck disc brakes - testing for toughness. *SAE Technical Paper Series*, n.740603.

- STORIE, V.J. (1984). Involvement of goods vehicles and public service vehicles in motorway accidents. *Transport and Road Research Laboratory - TRRL Laboratory Report*, London, U.K., n.1113, p.1-26.
- STRAUB, L. (1992). Electronic control of braking systems - Legislation (ECE R.13). *SAE Technical Paper Series*, n.922490.
- STUMP, E. (1962). Probleme des nutzfahrzeugbaues, teil 2: bremskraftverteilung an sattelzügen. *ATZ*, v.64, n.7.
- SUMMALA, H.; MIKKOLA, T. (1994). Fatal accidents among car and truck drivers: effects of fatigue, age and alcohol consumption. *Human Factors*, v.36, n.2, p.315-326, June.
- SUPER, R.K. (1960). Economics of heavy-duty brake design and maintenance. *SAE Transactions*, v.68, p.346-351, n.600040.
- SUSEMIHL, E.A.; KRAUTER, A.I. (1974a). Automatic stabilization of tractor jackknifing in tractor-semitrailer trucks. *SAE Technical Paper Series*, n.740551.
- SUSEMIHL, E.A.; KRAUTER, A.I. (1974b). Jackknifing of tractor-semitrailer trucks - detection and corrective action. *Transactions of ASME - Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, p.244-252, June.
- SVENSON, R.R. (1970). Foundation air brake performance at low operating pressures. *SAE Technical Paper Series*, n.700513.
- SWEATMAN, P. et al. (1987). The dynamic stability testing of articulated vehicles. *SAE Technical Paper Series*, n.871180.
- SWEENEY, M.M. et al. (1995). Need for sleep: discriminating between fatigue related and nonfatigue related truck accidents. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, v.2, p.1122-1126.
- TABOREK, J.J. (1957). Motion of wheels. *Machine Design*, v.29, p.5-9, May.
- TAKEDA, N. et al. (1990). Disc brakes for heavy duty trucks in Japan. *SAE Technical Paper Series*, n.902200.
- TANAKA, S. et al. (1990). The compatibility of air disc brakes and S-cam brakes installed on combination vehicles. *SAE Technical Paper Series*, n.902201.
- TAOKA, G.T. (1989). Na analytical model for driver response. *Transportation Research Record*, n.1213, p.1-3.

- TETARD, C. et al. (1993). Unsafe practices of truck drivers on long grades: the case of the expressway in the Mont-Blanc - Le Fayet tunnel. *Heavy Vehicle Systems*, v.1, n.1, p.63-78.
- THAKUR, K.P.; WHITE, D.M. (1997). Development of driver-vehicle model on risk time basis. *Heavy Vehicle Systems*, v.4, n.2-4, p.204-221.
- THOMAS, J. (1956). Emergency braking systems for combinations of commercial motor vehicles. *SAE Technical Paper Series*, n.560313.
- THOMAS, D.R. (1977). Brake testing and lining evaluation of large off-highway mining trucks. *SAE Technical Paper Series*, n.780777.
- TODOROVIC, J. et al. (1989). The influence of mechanical losses of drum brakes on the braking force distribution. *SAE Technical Paper Series*, n.892506.
- TRANSPORT ENGINEER (1993a). Tractor brakes retested. p.11, Mar.
- TRANSPORT ENGINEER (1993b). Closer to braking compatibility. p.25-26, Dec.
- TRANSPORT ENGINEER (1994a). Braking compatibility of combinations. p.9, May.
- TRANSPORT ENGINEER (1994b). Brake by wire soon. p.10-11, Mar.
- TRAVART, J.C. (1990). Disk brakes and safety. *Renault Véhicules Industriels*, p.169-173.
- TUEGEL, R.O. (1968). Truck and bus brake system performance requirement. *SAE Technical Paper Series*, n.680175.
- TURVILL, P.A. (1973). Comparative analysis of air brake antiskid systems - a truck builder's view. *SAE Technical Paper Series*, n.730698.
- UFFELMANN, F. (1989). Layout of braking system and influence on handling under consideration of European braking standards. *SAE Technical Paper Series*, n.892507.
- UNDERHILL, A.E. (1967). Progressive braking system for trailer vehicles. *Hydraulic Pneumatic Power*. Oct.
- VEIT, M.; WALGRAVE, S. (1989). Heavy duty truck dynamics and simulations. *SAE Technical Paper Series*, n.892508.
- VINCENT, R.J.; KRAUTER, A.I. (1973). Tractor-semitrailer handling: a dynamic tractor suspension model. *SAE Technical Paper Series*, n.730653.

- Von GLASNER, E.C. et al. (1996). Influence of braking force distribution on the directional stability of commercial vehicle. *Heavy Vehicle Systems*, v.3, n.1-4, p.438-449.
- Von GLASNER, E.C. et al. (1997). Compatibility of tractor/trailer combinations during braking maneuvers. *SAE Technical Paper Series*, n.973282.
- Von GLASNER, E.C. et al. (1998). Electronic systems designed to improve the active safety of commercial vehicles. *SAE Technical Paper Series*, n.982949.
- VOTYPKA, J.W.; HOWE, E.V. (1941). Brake equalization between truck-tractors and trailers. *SAE Transactions*, n.410029.
- WALKER, G.; DOIGE, A.G. (1976). Proportional braking for large trucks in mountain mine service - some aspects of design. *SAE Technical Paper Series*, n.760655.
- WALSH, R.E.; CICCHETTI, G.E. (1973). Use of simplified jackknife restraint device significantly reduces the hazard of jackknifing. *SAE Technical Paper Series*, n.730642.
- WATSON, C.; NEWCOMB, T.P. (1990). New developments in drum brake analysis. *SAE Transactions*, v.99, n.2, p.856-869.
- WEIBLEN, W. et al. (1998). Innovative methodology for brake torque and residual brake torque measurement. *SAE Technical Paper Series*, n.980591.
- WILKINS, H. A. (1977). Accidents to articulated vehicles fitted with loading sensing or anti-locking brakes to counteract jack-knifing. *Transport and Road Laboratory*, suppl. report 222, Department of Transport, Crowtorne, Berkshire, England, 10p.
- WILKLER, C.B. et al. (1992). Variability in center of gravity height measurement. *SAE Technical Paper Series*, n.920050.
- WILLIAMS, A.F. et al. (1994). Driver experience with antilock brake systems. *Accident Analysis and Prevention*, v.26, n.6, p.807-811, Dec.
- WILLIAMS, A.R. et al. (1976). The tyre/road interface - its effect on braking. *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers. Part C: Mechanical Engineering Science*, v.191, n.25, p.69-79.
- WILLIAMS, A.R. (1992). Review of tire traction. ASTM Special Technical Publication, n.1164, *ASTM*, Philadelphia, PA, U.S.A., p.125-148.

- WILSON, A.J. (1967). Brakes and brake systems. *Commercial Vehicles, Engineering and Operation*, chapter 7. London: Institution of Mechanical Engineers.
- WILSON, F.R. et al. (1989). Evaluation of driver/vehicle accident reaction times. Fredericton, N.B., Canada, *The Transportation Group*, University of Brunswick, Canada, Jan.
- WILSON, J.F. (1991). Reconstruction of tractor semitrailer accidents using Gauss principle of least constraint. *International Journal of Impact Engineering*, v.11, n.2, p.139-148.
- WOLF, R.A. (1968). Overall view of truck accidents and traffic safety. *SAE Technical Paper Series*, n.680491.
- WOODS, M. et al. (1993). Modelling the handling behaviour of rigid trucks. *Transactions of Canadian Society for Mechanical Engineering*, v.17, n.4B, p.895-905.
- WREDE, J.; DECKER, H. (1992). Brake by wire for commercial vehicles. *SAE Technical Paper Series*, n.922489.
- YANG, X. et al. (1997a). Study of control characteristics of articulated vehicle driver. *Heavy Vehicle Systems*, v.4, n.2-4, p.373-397.
- YANG, X. et al. (1997b). Study of directional analysis of a closed loop driver/tractor-semitrailer vehicle. *SAE Technical Paper Series*, n.973262.
- YANG, Y.T. (1994). Intra platoon collision behavior during emergency operations. *Vehicle Systems Dynamics*, v.23, n.4, p.279-292, May.
- YOUNG, W. et al. (1990). Antilock brake systems for the North America truck market. *SAE Technical Paper Series*, n.901174.
- YOUNG, S.L. et al. (1996). Fatigue and trucking accidents: two modes of accident causation. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, v.2, p.952-956.
- ZIEGLER, H. (1938). Der einfluss von bremsung und steigung auf die querschwingungen von kraftwagenanhängern. *Ing. Arch.* v.9, p.241-243.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1983). *Frictional interaction of tire and pavement*. Philadelphia, U.S.A., ASTM. 334p. (ASTM Special Technical Publication, 793).
- ARIAS-PAZ, M. (1970). *Manual do automóvel*. 2.ed. São Paulo, Mestre Jou. 752p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1989). *NBR 6023 - Referências Bibliográficas: procedimento*. Rio de Janeiro, ABNT. 18p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1990). *NBR 10966 - Desempenho de sistemas de freio para veículos rodoviários*. NB1253, Rio de Janeiro, ABNT. 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1990). *NBR 10969 - Desempenho de sistema de freio para veículos rodoviários - Prescrições relativas à fontes e aos reservatórios de energia*. NB1254, Rio de Janeiro, ABNT. 4p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1990). *NBR 10970 - Desempenho de sistema de freio para veículos rodoviários - Prescrições relativas às condições específicas para o freio de mola acumuladora (câmara combinada do freio)*. NB1255, Rio de Janeiro, ABNT. 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1990). *NBR 10967 - Sistema de freios para veículos rodoviários - Ensaio de desempenho*. MB3160, Rio de Janeiro, ABNT. 11p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1990). *NBR 10968 - Sistema de freios para veículos rodoviários - Medição do tempo de resposta para veículos rodoviários equipados com freio pneumático - desempenho*. MB3161, Rio de Janeiro, ABNT. 6p.
- BASTOW, D. (1980). *Car suspension and handling*. London, U.K, Pentech. 256p.
- BERNARD, J. et al. (1998). Evaluation of vehicle/driver performance using genetic algorithms. *SAE Technical Paper Series*, n.980227.
- BRACH, R.M. et al. (1998). Comparison of tire friction test methodologies used in accident reconstruction. *SAE Technical Paper Series*, n.980367.
- BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. (s.d.). *Normas para o projeto geométrico de estradas de rodagem*. Brasília, D.F. 89p.

- BROEN, N.L. et al. (1996). Braking response times for 100 drivers in the avoidance of an expected obstacle as measured in a driving simulator. *Proceedings of Human Factors and Ergonomics Society*, v.2, p.900-904.
- CAIRD, J.K. et al. (1997). Time cost of head up displays for older drivers: critical event onset, task location and display type. *Proceedings of Human Factors and Ergonomics Society*, v.2, p.1008-1012.
- CANALE, A.C. (1991). *Estudo do desempenho de autoveículos rodoviários considerando o passeio do centro de gravidade e restrições impostas pelo binômio pneumático x pavimento*. São Carlos, 1991. 290p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CANALE, A.C. (1989). *Automobilística: dinâmica e desempenho*. São Paulo, Érica. 125p.
- CANALE, A.C.; RUFFINO, R.T. (1992). A study of the brake performance of road vehicles using the "static equilibrium" or "centre of gravity range" technique. *SAE Technical Paper Series*, n.921438 E, p.1-6.
- CHAPMAN, B.J.; HATCH, D. (1976). Cast iron brake rotor metallurgy. *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers. Part C: Mechanical Engineering Science*, v.191, n.33, p.143-152.
- DAY, A.J.; KIM, S.Y. (1996). Noise and vibration analysis of S-cam drum brake. *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers. Part D: Journal of Automobile Engineering*, v.210, n.1, p.35-43.
- DE WAARD, D. et al. (1997). Behavioural adaptation of drivers to warning and tutoring messages: results from an on-the-road and simulator test. *Heavy Vehicle systems*, v.4, n.2-4, p.222-234.
- ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE. (1990). *ECE-R13 - Uniform provisions concerning the approval of vehicles of categories M, N and O with regard to braking*. United Nations - ECE, Geneva, Switzerland, 114p.
- ELLIS, J.R. (1969). *Vehicle dynamics*. London, U.K., Business Book. Cap.1, p.1-44: The pneumatic tyre.
- ERWIN, R.D. (1976). Measurements of the longitudinal and lateral traction properties of truck tires. *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers. Part C: Mechanical Engineering Science*, v.191, n.30, p.93-100.
- EUROPEAN ECONOMIC COMMUNITY. (1993). *EEC 71/320 - Consolidated braking directive*. EEC, Bruxelas, Bélgica, 136p.

FARMER, C.M. (1996). Effectiveness estimates for center high mounted stop lamps: a six year study. *Accidents Analysis and Prevention*, v.28, n.2, p.201-208, March.

FEDERAL MOTOR VEHICLE SAFETY STANDARD. (1995). *FMVSS 121 - Air brake systems*. National Highway Traffic Safety Administration - NHTSA. Washington, U.S.A., 27p.

FEDERAL MOTOR VEHICLE SAFETY STANDARD. (1995). *FMVSS 105 - Hydraulic brake systems*. National Highway Traffic Safety Administration - NHTSA. Washington, U.S.A., 27p.

FEKPE, E.S.K. (1997). Utilisation of five and six axle tractor-semitrailers in western Canada. *Heavy Vehicle Systems*, v.4, n.1, p.1-9.

FERNANDES, D.L.G. (1990). *Distribuição das forças nos eixos e nas rodas, durante um movimento circular, de um veículo de transporte de cargas articulado, num movimento acelerado*. / Apresentado no Curso de Dinâmica dos Autoveículos, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, ministrado pelo Prof. Dr. Antônio Carlos Canale.

FERNANDES, D.L.G. et al. (1995). Estudo do Desempenho na Freagem de Veículos Pesados Usando a Técnica do Balanceamento Estático ou Passeio do Centro de Gravidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 13. CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2. Belo Horizonte, 1995. *Anais*. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

FERNANDES, D.L.G. et al. (1995). Uma Descrição de um Sistema Computacional para o Estudo do Desempenho na Freagem de Veículos Pesados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 13. CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2. Belo Horizonte, 1995. *Anais*. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

FERNANDES, D.L.G. et al. (1997). Desempenho de Veículos Pesados na Freagem Considerando os Requisitos da Regulamentação ECE-R13 In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE INGENIERIA MECÁNICA, 3. Habana, 1997. *Anais*. Habana, Facultad de Ingenieria Mecánica, Cuba.

FERNANDES, D.L.G. et al. (1997). Análise do Desempenho e Estabilidade de Uma Bicicleta Durante a Freagem. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE INGENIERIA MECÁNICA, 3. Habana, 1997. *Anais*. Habana, Facultad de Ingenieria Mecánica, Cuba.

- FERNANDES, D.L.G. et al. (1997). Performance of Heavy Vehicles During Braking Process Considering the Requirements of ECE-R13 Regulation. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 14. Ilha Solteira, 1997. *Anais*. Ilha Solteira, Faculdade de Engenharia Mecânica de Ilha Solteira, UNESP, Brasil.
- FERREIRA, A.B.H. (1986). *Novo Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa*. 2.ed., Rio de Janeiro, Nova Fronteira, 1838p.
- GILLESPIE, T.D. (1992). *Fundamentals of vehicle dynamics*. 2.ed., Warrendale, U.S.A., SAE. 495p.
- GOHRING, E. et al. (1991). Contribution to the force transmission behavior of commercial vehicle tires. *SAE Technical Paper Series*, n.912692.
- GUNTUR, R.R.; WONG, J.Y. (1978). Application of the parameter plane method to the analysis of directional stability of tractor-semitrailers. *Transactions of ASME - Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. v.100, p.9-17, Mar.
- HASKARA, I. et al. (1997). Combined decentralized longitudinal and lateral controller design for truck convoys. *Proceedings of IEEE on Intelligent Transportation Systems*, 97TH8331, p.123-128.
- HUCHO, W.H. (1987). *Aerodynamics of road vehicles*. London, Great Britain, Butterworth. 566p.
- KACK, B.; RICHARD, M.J. (1997). Effect of load distribution devices on the stability of heavy vehicles. *Heavy Vehicle Systems*, v.4, n.1, p.29-48.
- KLOEPPPEL, E. et al. (1994). Comparison of older and younger driver responses to emergency driving events. *Proceedings of Human Factors and Ergonomics Society*, v.2, 986p.
- KUHN, K.P.; HEIDINGER, A. (1997). On-line driver type classification. *International Journal of Vehicle Design*. v.18, n.6, p.616-625.
- KUHN, B.T. et al. (1997). Model guidelines for visibility of on premise advertisement signs. *Transportation Research Record*, n.1605, p.80-87.
- KUWAHARA, T. et al. (1992). Braking characteristics of high-speed retarder. *JSAE Review*, v.13, n.3, p.40-44, July.
- KUWAHARA, T.; ARAKI, K. (1992). Development of permanent-magnet-type eddy current retarder. *JSAE Review*, v.13, n.1, p.92-96, Jan.

- LIMPERT, R. (1978). *Motor vehicle accident reconstruction and cause analysis*. Charlottesville, U.S.A., Michie. 443p.
- LIMPERT, R. (1992). *Brake design and safety*. Warrendale, U.S.A., SAE. 460p.
- LOZANO, J.A. et al. (1998). Computational dynamical model for traffic accident reconstruction. *International Journal of Vehicle Design*, v.19, n.2, p.213-227.
- McLEAN, J.; FOLEY, G. (1998). Road surface characteristics and condition: effects on road users. *Research Report ARR*, n.314, p.1-55, Jan.
- MERCEDES-BENZ DO BRASIL. (1987). *Manual de oficina: freio pneumático*. São Bernardo do Campo. 134p.
- MILLNER, N. (1976). A theory of drum brake squeal. *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers. Part C: Mechanical Engineering Science*, v.191, n.39, p.177-186.
- MORELLAS, V. et al. (1997). Preview based control of a tractor trailer using DGPS for preventing road departure accidents. *Proceedings of IEEE on Intelligent Transportation Systems*, 97TH8331, p.797-805.
- MORITA, T. et al. (1995). Improvement of vehicle dynamics by rear braking force control. *Vehicle Systems Dynamics*, v.24, n.4-5, p.401-412, June.
- MORTIMER, R.G. (1997). Vehicle-driver communications to reduce rear-end collisions: what makes sense and why? . *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, v.2, p.849-853.
- NORTH, M.R. (1976). Disk brake squeal. *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers. Part C: Mechanical Engineering Science*, v.191, n.38, p.169-176.
- POTTER, T.E.C. et al. (1997). Assessing road-friendliness: a review. *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers. Part D: Journal of Automobile Engineering*, v.211, n.6, p.455-475.
- QIAN, M. et al. (1997). Modelling and control of eletromagnetic brakes for enhanced braking capabilities for AHS. *Proceedings of IEEE on Intelligent Transportation System*, 97TH8331, p391-396.
- RAJALIN, S.; SUMMALA, H. (1997). What surviving drivers learn from a fatal road accident. *Accident Analysis and Prevention*, v.29, n.3, p.277-283, May.

- REICHELT, W.; FRANK, P. (1997). Driver assistance systems to improve active safety in the closed-loop system driver vehicle surroundings. *International Journal of Vehicle Design*, v.18, n.6, p.639-651.
- RÓDITCHEV, V.; RÓDITCHEVA, G. (1987). *Tractores e automóveis*. Moscou, U.R.S.S., Mir. 303p.
- RUDD, R.W. et al. (1998). Lower extremity and brake pedal interaction in frontal collisions: computer simulation. *SAE Technical Paper Series*, n.980364.
- RUDD, R.W. et al. (1998). Lower extremity and brake pedal interaction in frontal collisions: sled tests. *SAE Technical Paper Series*, n.980359.
- SAKAKIBARA, K.; TSUTSUI, T. (1992). Aerodynamic yaw characteristics of commercial vehicle influenced by front side vortices. *JSAE Review*, v.13, n.3, p.54-59. July.
- SANNIKOV, V.A. (1986). Method of determining kinematic constraints of a free-rolling wheel with an elastic tire. *Izvestiya AN SSSR / Mekhanika Tverdogo Tela*, v.21, n.3, p.78-81.
- SARTORI, S. (1972). *Uma contribuição ao estudo de aquecimento e ao ensaio dos freios de tambor*. São Carlos, 1972. 227p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SCHIMIDT, R.A. et al. (1997). Pedal misapplications: their frequency and variety revealed through police accident reports. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, v.2, p.1023-1027.
- SCHMITZ, J. (1986). Specifying non-asbestos friction materials. *Automotive Engineering*, v.94, n.4, p.70-74, Apr.
- SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. (1992). *Surface vehicle brake systems manual*. Warrendale, U.S.A., SAE. 349p. (SAE HS, 24).
- SONG, T. et al. (1998). Rolling resistance of tires - an analysis of heat generation. *SAE Technical Paper Series*, n.980255.
- SURI, K.M. (1984). Automatic slack adjusters. *SAE*, SP-574, p.27.
- SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. (1992). *Surface vehicle brake systems manual*. Warrendale, U.S.A., SAE. 349p. (SAE HS, 24).
- TABOREK, J.J. (1957). Braking performance limits. *Machine Design*, v.29, p.70-77, Nov.
- TABOREK, J.J. (1957). Center of gravity. *Machine Design*, v.29, p.43-46, Aug.

- TABOREK, J.J. (1957). Cornering and directional control. *Machine Design*, v.29, p.10-15, June.
- TABOREK, J.J. (1957). Dynamics of braking. *Machine Design*, v.29, p.64-69, Nov.
- TABOREK, J.J. (1957). Limits of vehicle performance. *Machine Design*, v.29, p.54-58, Sept.
- TABOREK, J.J. (1957). Longitudinal stability. *Machine Design*, v.29, p.47-53, Sept.
- TABOREK, J.J. (1957). Motion of wheels. *Machine Design*, v.29, p.5-9, May.
- TABOREK, J.J. (1957). Motion: resisting forces. *Machine Design*, v.29, p.30-34, July.
- TABOREK, J.J. (1957). Performance Limits. *Machine Design*, v.29, p.59-63, Oct.
- TABOREK, J.J. (1957). Resistance forces. *Machine Design*, v.29, p.35-41, Aug.
- TABOREK, J.J. (1957). Stability on a curve. *Machine Design*, v.29, p.25-29, July.
- TABOREK, J.J. (1957). Steering forces and stability. *Machine Design*, v.29, p.16-24, June.
- UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. (1996). Escola de Engenharia de São Carlos. Serviço de Biblioteca. *Diretrizes para elaboração de dissertações e teses na EESC-USP*. 2ed. São Carlos, 56p.
- VIRABOV, R.V. et al. (1986). Investigation into the effect of the parameters of a motor vehicle on the resistance to its motion on a road with a hard surface. *Soviet Engineering Research / Vestnik Mashinostroeniya*, v.66, n.4, p.48-50.
- WASHABAUGH, F.J. (1986). Ultra-short fibers aid brake lining materials. *Automotive Engineering*, v.94, n.9, p.50-57, Sept.
- WILLIAMS, T. (1976). Wet friction: tyre and road. *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers. Part C: Mechanical Engineering Science*, v.191, n.29, v.190, p.81-91.
- WELLSTEAD, P.E. et al. (1997). Analysis and redesign of an antilock brake system controller. *Proceedings of the IEE on Control Theory and Applications*, v.144, n.5, p.413-426, Sept.
- WONG, J.Y. (1989). *Terramechanics and off-road vehicles*. Amsterdam, Netherlands, Elsevier. 251p.

APÊNDICE 1

Figuras da obtenção do CG das configurações veiculares de estudo

FIGURA 35 - Instrumento para obtenção dos pesos das cargas (célula de carga).

FIGURA 36 - Detalhe da medição dos pesos das cargas.

FIGURA 37 - Medição dos pesos nos eixos do veículo-trator LS 1935.

FIGURA 38 - Balança para medição de pesos nos eixos veiculares e rampa de acesso.

FIGURA 39 - Preparação da medição dos pesos nos eixos do semi-reboque FNV

FIGURA 40 - Medição dos pesos nos eixos do semi-reboque FNV

APÊNDICE - 2

Figuras dos instrumentos de medição e dos testes de campo

FIGURA 41 - Conexões entre veículo-trator e semi-reboque

FIGURA 42 - Suportes e calços para fixação das cargas no semi-reboque

FIGURA 43 - Instrumentos para testes (CORREVIT, YOKOGAWA e conversor)

FIGURA 44 - Instrumento para medição da temperatura nos freios (YOKOGAWA)

FIGURA 45 - Verificação da altura do sensor do CORREVIT (canhão)

FIGURA 46 - Detalhe de instalação do sensor do CORREVIT (canhão)

FIGURA 47 - Captador para calibração do CORREVIT

FIGURA 48 - Manômetro e *display* do CORREVIT para acompanhar medições

FIGURA 49 - Dispositivo para regulagem de pressão na aplicação do pedal de freio

FIGURA 50 - Válvula pedal, transdutor de pressão e conexões pneumáticas do freio

FIGURA 51 - Cilindros combinados do freio das rodas traseiras do veículo-trator

FIGURA 52 - Alavanca ajustadora de folga do freio do eixo traseiro do veículo-trator

FIGURA 53 - Freio a tambor da roda direita do eixo dianteiro do veículo-trator

FIGURA 54 - Detalhe do freio da roda direita do eixo dianteiro do veículo-trator

FIGURA 55 - Sensor de temperatura na lona do freio do eixo dianteiro do VT

FIGURA 56 - Cilindros do freio das rodas de um dos eixos do semi-reboque

FIGURA 57 - Marca da ocorrência de travamento nas rodas do primeiro eixo do SR

FIGURA 58 - Borracha impregnada nas rodas do segundo eixo do SR

FIGURA 59 - Rodas do terceiro eixo do semi-reboque

FIGURA 60 - Marcas no pavimento do travamento do primeiro eixo do semi-reboque

FIGURA 61 - Marcas no pavimento típicas de travamento de rodas durante a freagem

FIGURA 62 - Marcas no pavimento típicas de iminência de escorregamento das rodas

GLOSSÁRIO

Brake fading (fadiga do freio): fenômeno no qual a aderência entre as superfícies de atrito do sistema de freios é reduzida, podendo comprometer o desempenho do veículo na freagem. A temperatura dos freios e a velocidade são alguns dos fatores que influenciam na ocorrência deste fenômeno.

Brake factor (fator de freio): é a relação entre a força de atrito produzida no contato entre as superfícies de atrito dos freios e a força de aplicação dos freios, pode ser entendido como o ganho do sistema de freios.

Para um freio a tambor, a força de aplicação dos freios é a força que move as sapatas de freio (que apoiam as lonas) contra o tambor, neste caso o fator de freio depende das características geométricas e construtivas do freio a tambor, do coeficiente de atrito entre lonas e tambor (que depende dos materiais utilizados para a fabricação de ambos, da temperatura, da velocidade e outros fatores).

Para um freio a disco, a força de aplicação dos freios é a força que move as pastilhas de freio contra o disco, neste caso o fator de freio depende apenas do coeficiente de aderência entre pastilha e disco (devido à forma construtiva deste tipo de freio). FERNANDES (1994) explica com detalhes as características dos freios a tambor e a disco.

Stability (estabilidade): é definida como a tendência decrescente das amplitudes do movimento perturbado de um veículo/avião, após algum tempo do término da perturbação, conforme ROSKAN (1982).

Directional stability (estabilidade direcional): capacidade do veículo de manter a sua trajetória e sobre controle do motorista mesmo após a introdução de uma perturbação durante o seu movimento, determinada pela capacidade dos pneumáticos em contato com o pavimento de suportarem esforços laterais.

A ocorrência de *jackknife* pode ser considerada um caso de instabilidade direcional. DORION et al. (1989) descreve com detalhes a ocorrência de *jackknife* em veículos articulados pesados, conforme mostrado no Capítulo 2 deste trabalho.

Rollover stability (estabilidade ao tombamento): estabilidade do veículo com relação ao ângulo de rolamento (*roll angle*), definido no plano YZ.

Rollover (tombamento): pode ser interpretado como a ocorrência de um giro do veículo em torno do eixo X capaz de levá-lo ao tombamento.

Handling: Conforme GILLESPIE (1992), este termo pode ser interpretado como a capacidade de resposta do veículo a uma entrada que pode ser realizada pelo motorista, também envolve a relação entre o motorista e o veículo que pode ser considerado como um sistema de malha fechada. No popular, pode ser entendido como a facilidade de controle do veículo que é observada pelo motorista.

Maneuverability (manobrabilidade): é definida como a capacidade e habilidade do veículo/piloto em sair de uma condição de movimento em regime permanente a uma outra desejada. Os termos controlabilidade e dirigibilidade podem ser considerados sinônimos de manobrabilidade, conforme CANALE (1991).

Steady state (regime permanente): condição de equilíbrio alcançada pelo sistema motorista-veículo em movimento no tempo.

Vehicle response (resposta do veículo): é definida como as mudanças das variáveis de movimento relativas à uma condição inicial de movimento em regime permanente, como resultado de uma perturbação gerada externamente (por exemplo, a atuação de forças e momentos aerodinâmicos que podem provocar instabilidade, a variação do coeficiente de aderência disponível no contato entre pneumático e pavimento) e internamente (por exemplo, o acionamento do sistema de direção, a aplicação dos freios instalados no veículo).

Ride: conforme GILLESPIE (1992) é o espectro de vibrações que pode ser percebido de forma tátil e visual pelo motorista e passageiros durante o movimento do veículo (na faixa de frequência entre 0 e 25 Hz).

Sloshing: o movimento de cargas líquidas transportadas em reservatórios, está relacionado com a quantidade de carga líquida e a forma do reservatório entre outros fatores.