

ADRIANO MONTEIRO DE OLIVEIRA

**PNEUS AUTOMOTIVOS: ANÁLISE CRÍTICA DOS
REQUISITOS DE SEGURANÇA E DE DESEMPENHO**

Trabalho de Curso apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Automotiva (Mestrado
Profissional)

São Paulo
2005

ADRIANO MONTEIRO DE OLIVEIRA

**PNEUS AUTOMOTIVOS: ANÁLISE CRÍTICA DOS
REQUISITOS DE SEGURANÇA E DE DESEMPENHO**

Trabalho de Curso apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Automotiva (Mestrado
Profissional)

Área de Concentração:
Engenharia Automotiva (Mestrado
Profissional)

Orientador:
Prof. Doutor
Otávio de Mattos Silveiras

São Paulo
2005

FICHA CATALOGRÁFICA

Oliveira, Adriano Monteiro de

**Pneus automotivos: análise crítica dos requisitos de segurança e de desempenho / A.M. Oliveira. -- São Paulo, 2004.
165 p.**

Trabalho de curso (Mestrado Profissionalizante em Engenharia Automotiva) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

1.Normas técnicas 2.Dinâmica veicular I.Universidade de São Paulo.Escola Politécnica II.t.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Otávio de Mattos Silves pela sua importante ajuda, orientação e atenção.

À minha esposa Silvana pelo permanente incentivo e compreensão.

Aos meus colegas da General Motors do Brasil e da indústria de pneus, que diretamente cooperaram com seu tempo, opinião e conhecimento técnico para enriquecer este trabalho, em particular: Mário Gonçalves, Ricardo Fanucchi, Ronaldo Suda, Daniel Vilela, Flávio Franceschini, Denis Jancar, Fábio Schneider, Gerson Varela, Antônio Seta, Fernando Scopiato e Luiz Navega.

A todos que, direta ou indiretamente, colaboraram com a execução deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho visa analisar o processo de desenvolvimento de pneus automotivos sob o aspecto normativo, focado em segurança, e sob o aspecto de desempenho, cujo papel na qualidade veicular é predominante. O texto volta-se a discutir a legislação técnica brasileira atual face às modificações normativas ocorridas recentemente nos EUA e também visa elaborar um processo de desenvolvimento de pneus com foco nas necessidades do consumidor. Para tal, são utilizadas bibliografias dos diversos órgãos regulamentadores, trabalhos técnicos na área da dinâmica veicular e também modelos matemáticos e físicos. São apresentados no texto os resultados e propostas advindos desta análise crítica, assim como recomendações para estudos futuros na área. Este texto também pretende colaborar com a divulgação de conceitos, definições técnicas e práticas de projeto de pneus para engenheiros de produto.

ABSTRACT

This report provides an analysis of the automotive tires development process, exploring the regulatory aspect, related to safety, as well as the performance aspect, which plays a fundamental role on vehicle quality. This text contains a discussion on current brazilian technical standards, supported by recent normative change in the US, and also elaborates a tire development process focused on customer demands. To do so, there are used references from various regulatory offices, technical papers in the field of vehicle dynamics, as well as mathematical and physical models. The results and proposals coming from this critical analysis are presented afterwards, besides the recommendations for future studies. This text should be also seen as an information source to product engineers, since concepts, technical definitions and design practices are presented.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Fig. 2.1 – Sistema de coordenadas | 6 |
| Fig. 2.2 – Eixos fixos no veículo | 7 |
| Fig. 2.3 – Componentes da aceleração | 8 |
| Fig. 2.4 – Diagrama de corpo livre do veículo no plano: (a) em XYZ, (b) em xyz | 11 |
| Fig. 2.5 – Diagrama de corpo livre do veículo em vista traseira numa curva à direita: (a) em XYZ, (b) em xyz | 13 |
| Fig. 2.6 – Eixos para pneus e a sua terminologia conforme SAE | 13 |
| Fig. 2.7 – Nomenclatura dos Pneus | 14 |
| Fig. 2.8 – Dimensões principais de um pneu | 16 |
| Fig. 2.9 – Vista em corte de um pneumático radial | 17 |
| Fig. 2.10 – Footprint | 20 |
| Fig. 2.11 – Um modelo mecânico da borracha, com amortecimento dependente da frequência | 20 |
| Fig. 2.12 – Pneu Diagonal | 22 |
| Fig. 2.13 – Pneu Radial | 23 |
| Fig. 2.14 – Deformação em um pneu sob a ação de força lateral | 26 |
| Fig. 2.15 – Variação da força lateral com o ângulo de deriva para dois pneus distintos | 27 |
| Fig. 2.16 – Propriedades de força lateral dos pneus | 27 |
| Fig. 2.17 – Ângulo e a força exercida pelo solo no pneu: (a) deriva, (b) câmber | 28 |
| Fig. 2.18 – Forças no pneu | 29 |
| Fig. 2.19 – Forças e momentos em uma roda motriz | 31 |
| Fig. 2.20 – Coeficiente de atrito versus escorregamento para um pneu a 60 km/h em diferentes pavimentos | 33 |
| Fig. 2.21 – Dependência do coeficiente de atrito dinâmico com a velocidade em diferentes pavimentos | 34 |
| Fig. 2.22 – Coeficientes laterais de atrito como função do ângulo de deriva e da condição da pista | 35 |

| | |
|--|-----|
| Fig. 2.23 – Atrito versus velocidade para frenagem com roda travada | 37 |
| Fig. 2.24 – Diagrama de blocos do sistema veículo-motorista | 38 |
| Fig. 2.25 – O sistema dinâmico do conforto | 39 |
| Fig. 2.26 – Desaceleração e Distância de Parada | 42 |
| Fig. 2.27 – Temperatura relativa do pneu e RR durante aquecimento | 44 |
| Fig. 2.28 - Coeficiente de RR versus pressão de inflação | 45 |
| Fig. 2.29 – RR versus velocidade | 46 |
| Fig. 2.30 – Coeficientes f_0 e f_s | 48 |
| Fig. 2.31 – Participação relativa das forças resistivas num automóvel Golf em condições de rodagem distintas | 49 |
| Fig. 2.32 – Parâmetros de força medidos | 50 |
| Fig. 2.33 – Variação de força radial (a) e lateral (b) | 51 |
| Fig. 2.34 – Conicidade | 51 |
| Fig. 2.35 – Excentricidade Radial | 52 |
| Fig. 2.36 – Excentricidade Lateral | 52 |
| Fig. 2.37 – Diferentes formas de desbalanceamento U | 53 |
| Fig. 3.1 - Forma final da rede neural | 59 |
| Fig. 3.2 – Componentes para a redução da distância de parada e suas conexões | 63 |
| Fig. 4.1 – Símbolos da luz de advertência de baixa pressão | 73 |
| Fig. 4.2 - Equipamento para teste de resistência à velocidade e à carga | 78 |
| Fig. 4.3 – Equipamento para o teste de impactos danosos da pista | 80 |
| Fig. 4.4 – Diagrama do equipamento de teste de resistência ao detalonamento .. | 81 |
| Fig. 4.5 – Escala subjetiva SAE | 100 |
| Fig. 4.6 – Máquina de teste da uniformidade | 106 |
| Fig. 5.1 – Climatologia de temperatura máxima do Brasil para as quatro estações do ano | 109 |
| Fig. 5.2 – “Elk Test” simulado para o Corsa: Aceleração Lateral x Tempo | 121 |
| Fig. 5.3 – “Elk Test” simulado para o Astra: Velocidade de Guinada x Tempo .. | 122 |
| Fig. 5.4 – Veículo em frenagem: Diagrama simplificado de forças | 128 |
| Fig. 5.5 – Veículo em frenagem: Diagrama simplificado de forças incluindo a resistência aerodinâmica | 129 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 5.6 – Relação entre d_p e μ para diferentes velocidades iniciais de teste no Corsa Hatchback 2004 e μ_{MIN} associado ao requisito CONTRAN 777/93 | 133 |
| Fig. 5.7 – Variação do coeficiente de atrito na faixa de 40 a 50 m para $V_0 = 100$ km/h no Corsa Hatchback 2004 | 134 |
| Fig. 5.8 – Coeficiente de atrito versus escorregamento | 135 |
| Fig. 5.9 – Variação da resistência aerodinâmica a 100 km/h na presença de vento frontal e traseiro no Corsa Hatchback 2004 | 137 |
| Fig. 5.10 – RR versus velocidade para P195/70 R14 90S | 139 |
| Fig. 5.11 - Pneu e tambor rotativo | 140 |
| Fig. 5.12 – Dados coletados no teste de “Coastdown” | 141 |
| Fig. 5.13 – Ciclo urbano EPA | 142 |
| Fig. 5.14 – Ciclo de estrada EPA | 142 |
| Fig. 5.15 – Requisito de conicidade de um dado veículo e suas implicações | 148 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela I – Coeficiente f_r para diferentes veículos e pavimentos | 47 |
| Tabela II - Carga e distribuição dos ocupantes para carga normal do veículo em várias capacidades de assentos | 70 |
| Tabela III – Luz de advertência de baixa pressão: mínima pressão de ativação .. | 72 |
| Tabela IV – Aplicação da carga durante o teste de resistência à carga | 79 |
| Tabela V – Categorias de velocidade de pneus, segundo ECE R.30 | 86 |
| Tabela VI – Cargas máximas admissíveis para velocidades entre 215 e 240 km/h em pneus com símbolo “V” | 87 |
| Tabela VII – Cargas máximas admissíveis para velocidades entre 240 e 270 km/h em pneus com símbolo “W” | 87 |
| Tabela VIII – Cargas máximas admissíveis para velocidades entre 270 e 300 km/h em pneus com símbolo “Y” | 88 |
| Tabela IX – Pressões de inflação para teste de resistência à carga e à velocidade | 91 |
| Tabela X – Quadro comparativo de requisitos de segurança | 96 |
| Tabela XI – Quadro comparativo do teste de resistência à velocidade | 97 |
| Tabela XII – Quadro comparativo do teste de resistência à carga | 98 |
| Tabela XIII – Critério subjetivo GMUTS | 101 |
| Tabela XIV – Modelo de tabela de uniformidade | 106 |
| Tabela XV – Patamares de velocidade: Comparação entre a norma brasileira e a americana | 114 |
| Tabela XVI - Vendas internas de veículos nacionais e importados (Brasil), de 1998 a 2002 | 116 |
| Tabela XVII – Cronograma usual de atividades de desenvolvimento de um pneu até sua aprovação | 124 |
| Tabela XVIII – Cronograma proposto de atividades de desenvolvimento de um pneu até sua aprovação | 125 |
| Tabela XIX – Custos associados à realização de um “loop” de avaliações em pista | 126 |
| Tabela XX – Obtenção do requisito d_p em outras velocidades de teste | 134 |

| | |
|--|-----|
| Tabela XXI – Tabela de controle de dados de RR | 145 |
| Tabela XXII – Quadro comparativo do teste de resistência à velocidade: proposta para teste INMETRO | 151 |
| Tabela XXIII – Quadro comparativo do teste de resistência à carga: proposta para teste INMETRO | 152 |
| Tabela XXIV – Quadro comparativo de requisitos de segurança: proposta para teste INMETRO | 153 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABS – Antilock Brake System

ALAPA – Associação Latino Americana de Pneus e Aros

BMW – Bayerische Motoren Werke

CONMETRO - Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

CONTRAN - Conselho Nacional de Trânsito

DENATRAN - Departamento Nacional de Trânsito

DOT – Department of Transportation (Estados Unidos da América)

ECE - Economic Commission for Europe

EEC - Commission of the European Communities

E.O.M. – Em Ordem de Marcha

EPA - Environmental Protection Agency

FARS – Fatality Analysis Reporting System

FMVSS - Federal Motor Vehicle Safety Standards

GMB – General Motors do Brasil

GVM – Gross Vehicle Mass

GVMR – Gross Vehicle Mass Rating

GVW – Gross Vehicle Weight

GVWR – Gross Vehicle Weight Rating

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

ISO – International Standards Organization

LT – Light Truck

M+S – Mud and Snow

MERF - Mean Equivalent Rolling Force

NASS-CDS - National Automotive Sampling System – Crashworthiness Data System

NHTSA - National Highway Traffic Safety Administration

PPAP – Production Part Approval Process

RR – Resistência ao Rolamento

SAE – Society of Automotive Engineers

SMERF - Standard Mean Equivalent Rolling Force

TPMS – Tire Pressure Monitoring System

TRA – Tire and Rim Association (Estados Unidos da América)

TWI – Tread Wear Indicator

W.d.K. – Wirtschaftsverband der deutschen Kautschukindustrie

LISTA DE SÍMBOLOS

Δ - Variação

μ - Coeficiente de atrito

ρ - Massa específica

μ_{MIN} – Coeficiente de atrito mínimo pneu-solo

μ_{P} – Coeficiente de atrito de pico

μ_{S} – Coeficiente de atrito dinâmico

SUMÁRIO

| | |
|---|----------|
| 1 – INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 – O objeto de estudo: Pneus automotivos | 1 |
| 1.2 – Os Requisitos de Segurança | 2 |
| 1.3 – Os Requisitos de Desempenho | 3 |
| 1.4 – Estrutura da discussão | 3 |
| | |
| 2 – CONCEITOS E DEFINIÇÕES | 5 |
| 2.1 – Definições de massa dos veículos | 5 |
| 2.2 – Sistemas de coordenadas, ângulos, velocidades e acelerações do veículo | 6 |
| 2.3 – Forças no veículo e notações | 9 |
| 2.4 – Sistema de coordenadas para os pneus | 13 |
| 2.5 – Nomenclatura dos pneus | 14 |
| 2.6 – Dimensões dos pneus | 15 |
| 2.7 – Estrutura de um pneumático | 17 |
| 2.7.1 – Talão | 17 |
| 2.7.2 – Carcaça | 17 |
| 2.7.3 – Cintas estabilizadoras | 18 |
| 2.7.4 – Parede lateral | 18 |
| 2.7.5 – Ombros | 18 |
| 2.7.6 – Banda de rodagem | 19 |
| 2.7.7 – Camada interna | 19 |
| 2.7.8 – Footprint | 20 |
| 2.7.9 – A borracha | 20 |
| 2.8 – Tipos de construção dos pneumáticos | 21 |
| 2.8.1 – Pneus diagonais | 21 |
| 2.8.2 – Pneus radiais | 22 |
| 2.8.3 – Pneus com ou sem câmara | 24 |
| 2.9 – Esforços na superfície de contato pneu-solo | 25 |

| | |
|--|-----------|
| 2.9.1 – Ângulo de deriva e força lateral | 25 |
| 2.9.2 – Cornering stiffness | 27 |
| 2.9.3 – Ângulo de câmbor e força de câmbor | 28 |
| 2.9.4 – Representação geral das forças e momentos | 29 |
| 2.10 – Forças longitudinais: escorregamento e atrito | 30 |
| 2.11 – Força lateral: escorregamento e atrito | 34 |
| 2.12 – Modelo de atrito apurado | 36 |
| 2.13 – Controle, estabilidade e dirigibilidade | 37 |
| 2.14 – Conforto | 38 |
| 2.15 – Motoristas | 39 |
| 2.16 – Testes | 40 |
| 2.17 – Distância de parada | 41 |
| 2.17.1 – O tempo de reação | 42 |
| 2.17.2 – Os tempos de resposta e aumento de pressão | 43 |
| 2.18 – Resistência ao rolamento | 43 |
| 2.18.1 – Fatores que afetam a resistência ao rolamento | 44 |
| 2.18.1.1 – Temperatura do pneu | 44 |
| 2.18.1.2 – Pressão de inflação | 44 |
| 2.18.1.3 – Velocidade | 45 |
| 2.18.1.4 – Material e projeto do pneu | 46 |
| 2.18.1.5 – Deslizamento (“slip”) | 46 |
| 2.18.2 – Coeficientes típicos | 46 |
| 2.19 – Carga total da pista | 49 |
| 2.20 – Uniformidade | 50 |
| 2.20.1 – Variações de força | 50 |
| 2.20.2 – Excentricidade | 52 |
| 2.20.3 – Desbalanceamento | 53 |
| 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 54 |
| 3.1 – Requisitos de Segurança | 54 |
| 3.2 – Requisitos de Desempenho | 58 |

| | |
|---|------------|
| 4 – REQUISITOS ESTABELECIDOS PARA PNEUS AUTOMOTIVOS .. | 66 |
| 4.1 – Requisitos de Segurança | 66 |
| 4.1.1 – Normas americanas | 68 |
| 4.1.1.1 – FMVSS 110: Seleção de pneus e aros para veículos motorizados leves até 4536 kg | 68 |
| 4.1.1.2 – FMVSS 138: Sistemas de monitoramento de pressão de pneus | 70 |
| 4.1.1.3 – FMVSS 139: Pneus novos para veículos leves até 4536 kg | 73 |
| 4.1.2 – Normas européias | 84 |
| 4.1.2.1 – ECE R.30: Provisões uniformes para a aprovação de pneumáticos para veículos e reboques | 85 |
| 4.1.3 – Normas brasileiras | 93 |
| 4.1.3.1 – INMETRO 05/00: Regulamento técnico da qualidade para pneus novos destinados à automóveis, camionetas de uso misto e seus rebocados leves, camionetas, microônibus, ônibus, caminhões e seus rebocados leves | 93 |
| 4.1.4 – Comparativo entre as normas | 96 |
| 4.2 – Requisitos de desempenho | 98 |
| 4.2.1 – Dirigibilidade e conforto | 99 |
| 4.2.2 – Distância de parada e desaceleração | 103 |
| 4.2.3 – Resistência ao rolamento | 104 |
| 4.2.4 – Uniformidade | 105 |
| 5 – ANÁLISE CRÍTICA | 107 |
| 5.1 – Requisitos de segurança | 107 |
| 5.1.1 – Temperaturas praticadas nos testes de resistência à carga e à velocidade | 108 |
| 5.1.2 – Cargas praticadas no teste de resistência à velocidade | 110 |
| 5.1.3 – Pressões praticadas no teste de resistência à velocidade | 112 |
| 5.1.4 – Velocidades e durações praticadas no teste de resistência à velocidade | 113 |
| 5.1.5 – Considerações sobre requisitos não exigidos pelo INMETRO | 115 |

| | |
|--|------------|
| 5.1.6 – Considerações adicionais | 118 |
| 5.2 – Requisitos de desempenho | 120 |
| 5.2.1 – Dirigibilidade e conforto | 120 |
| 5.2.1.1 – Período até a aprovação | 123 |
| 5.2.1.2 – Custos de engenharia | 126 |
| 5.2.2 – Distância de parada e desaceleração | 127 |
| 5.2.2.1 – Proposta de requisitos para o pneu que influenciam na distância de parada do veículo | 128 |
| 5.2.2.2 – Considerações gerais sobre o teste de distância de parada | 135 |
| 5.2.3 – Resistência ao rolamento | 138 |
| 5.2.4 – Uniformidade | 145 |
| 5.2.4.1 – Proposta para requisitos de uniformidade | 147 |
| 6 – CONCLUSÃO | 149 |
| 6.1 – Proposta de requisito de segurança aplicável ao Brasil | 149 |
| 6.1.1 – Teste de resistência à velocidade | 150 |
| 6.1.2 – Novo teste proposto: resistência a carga | 151 |
| 6.1.3 – Testes adicionais propostos | 152 |
| 6.2 – Proposta de processo de desenvolvimento | 154 |
| 6.3 – Recomendações | 155 |
| 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 157 |

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – O objeto de estudo: Pneus automotivos

Os pneus são componentes fundamentais nos veículos automotores, e determinam as características do comportamento dinâmico destes veículos. Apesar de serem vistos pelo público consumidor como um componente bastante comum, parte integrante de sua vida cotidiana, os pneus sofreram diversas evoluções de projeto desde sua criação no século XIX. Os pneus dos dias de hoje são construções bastante complexas, adaptadas para garantir conforto, aderência e a difícil tarefa de manter os veículos estáveis e com comportamento previsível pelo motorista. O projeto do pneumático evoluiu, chegando-se atualmente a um compósito de borracha, fibras sintéticas e aço, cujo processo de manufatura é complexo e elaborado.

Estando exposto e atuante na interface entre o veículo e o meio ambiente, o pneu torna-se um item de segurança, pois não pode falhar quando submetido aos esforços para os quais foi dimensionado, ou deteriorar-se nos ambientes aos quais é submetido. Ainda, é necessário que preserve suas características funcionais por determinado tempo, ou seja, tenha uma durabilidade mínima aceitável.

Para certificar pneus quanto à segurança, órgãos normativos de todo o mundo estabelecem requisitos que devem ser atendidos pela totalidade dos pneus à venda no mercado. Uma vez que o **requisito de segurança** é atendido, é necessário enxergarmos o pneu como um elemento que participa fortemente na caracterização da qualidade do automóvel. Além de ser um componente cuja operação segura é um pré-requisito, o pneu afeta as características de dirigibilidade, conforto, desempenho em frenagem e consumo de combustível do veículo. Estas características definem novos requisitos, os **requisitos de desempenho**, que são critérios de qualidade estabelecidos pelas montadoras para ir de encontro às necessidades do cliente. A participação do pneu nas características de desempenho é significativa, a ponto de

sua influência final no veículo ser determinante para o consumidor decidir ou não pela compra do automóvel.

Em função do exposto, este estudo analisa dois temas centrais: a **regulamentação de segurança** aplicada atualmente aos pneus, e o **processo de desenvolvimento** de pneus. Esta análise busca propor regulamentos de segurança atualizados e aplicáveis ao Brasil e um processo estruturado de desenvolvimento de pneus, que proporcione economia de recursos e foco nas características que realmente interessam ao consumidor final.

1.2 – Os Requisitos de Segurança

O pneu foi alvo de discussões recentes na mídia mundial e em diversos setores da indústria em função de acidentes automotivos. O banco de dados NASS-CDS americano [1] indica que de 1995 até 1998 houve 23.464 acidentes nos EUA causados por pneus estourados ou com baixa pressão. Em 9 de agosto de 2000, o fabricante de pneus Bridgestone-Firestone e a montadora Ford anunciaram em conjunto que **14,4 milhões** de pneus do modelo P235/75 R15 ATX, ATX II e Wilderness AT seriam retirados do mercado por problemas relacionados à segurança. Estes pneus, em sua maioria, equipavam picapes Ford Explorer e em escala menor outros veículos, inclusive de outros fabricantes, assim como faziam parte do mercado de reposição americano e de diversos países [2]. Devido à grande incidência destes acontecimentos num curto período de tempo, assim como sua decorrente gravidade para a segurança das pessoas, buscou-se, entre várias medidas, aumentar as exigências quanto aos requisitos de segurança dos pneus. Requisitos de segurança mais severos para pneus foram publicados oficialmente em novembro de 2002 pela NHTSA, a agência normativa americana.

Encontrou-se neste trabalho a oportunidade de analisar a nova norma americana e confrontá-la com o que é atualmente praticado na Europa e no Brasil. Na leitura do texto será possível conhecer as normas das três regiões, compará-las,

entender o teor das modificações efetuadas na norma americana e saber o quanto se poderá aproveitar delas para aperfeiçoar a norma brasileira, se isto for julgado necessário.

1.3 – Os Requisitos de Desempenho

Os requisitos de desempenho, que não têm necessidade de regulamentação legal, devem ser livremente estabelecidos pela montadora de veículos ao seu fornecedor, o fabricante do pneu, e neste caso ela pode defini-los de acordo com a sua visão de qualidade para o produto final, que é o veículo completo. Tendo em vista que o mercado de automóveis é atualmente bastante competitivo, a decisão de compra do consumidor se guia, entre outros fatores, por diferenciais de desempenho, que podem muitas vezes ser medidos ou percebidos subjetivamente. No tocante aos pneus, a crítica aqui presente se destina a discutir o processo de desenvolvimento de pneus face à tecnologias computacionais e à propriedades físicas importantes para o caso em questão, tais como atrito, resistência ao rolamento e uniformidade. A proposta buscada neste trabalho é a especificação de um processo de desenvolvimento de pneus que realmente vá de encontro ao interesse do consumidor.

Uma consequência direta deste estudo será a disseminação de conceitos e definições relacionadas a pneus, que podem ser úteis não só a profissionais da área, mas também aos diversos leitores, que certamente convivem com sua utilização no dia-a-dia.

1.4 – Estrutura da discussão

Como o objeto de estudo é inerentemente associado a definições da dinâmica veicular, foi necessário desenvolver um capítulo dedicado ao esclarecimento de conceitos essenciais ou úteis à compreensão do texto. No capítulo 2 são apresentados estes conceitos e definições, oriundos da mais atual bibliografia.

A revisão bibliográfica do capítulo 3 traz um apanhado das publicações e artigos mais recentes na área automotiva, com foco na segurança aplicada a pneumáticos, nas discussões acerca da subjetividade das avaliações veiculares e nos métodos e tecnologias de otimização da dinâmica do veículo, onde o pneu é um fator fundamental. Este material dará subsídio para discussões posteriores.

O capítulo 4 apresenta os órgãos normativos dos EUA, Europa e Brasil e os requisitos de segurança aplicados nas três regiões. É possível ver ao final do capítulo um sumário comparativo destas normas. São apresentados posteriormente os critérios e testes mais usuais de avaliação dos requisitos de desempenho, segundo prática corrente na indústria automotiva.

No capítulo 5 são levantados questionamentos acerca dos requisitos de segurança brasileiros, procurando-se entender como eles se posicionam frente aos outros países e às necessidades específicas do mercado local. Explora-se também a contribuição dos avanços de softwares de simulação e uma abordagem focada em dinâmica veicular para otimizar o processo de desenvolvimento e o projeto de pneus.

No capítulo 6 estão sumarizados os resultados atingidos pela análise crítica assim como colocadas as recomendações para estudos futuros.

2 – CONCEITOS E DEFINIÇÕES

2.1 – Definições de massa dos veículos

Dentre as diversas características que são padronizadas em um veículo automotor está a nomenclatura de sua massa e a de seus componentes. Como um veículo está sujeito a diversas condições de carregamento e ao uso de diversos equipamentos, é uma tarefa bastante complexa caracterizar sua massa. É comum encontrarmos referências a padrões de carga em livros de dinâmica veicular, assim como existem definições provenientes de órgãos como os americanos NHTSA e EPA. Simplificadamente, são descritos abaixo alguns termos essenciais para o entendimento deste trabalho, segundo padrões vigentes [3, 4].

2.1.1 - Veículo Básico

Massa do Veículo Básico: é a massa do veículo com todo o seu equipamento padrão, incluindo todos os lubrificantes e fluidos, exceto combustível e equipamentos opcionais.

2.1.2 - Curb (ou E.O.M.)

Massa em Curb Básica: é a soma da *Massa do Veículo Básico* com a massa do tanque de combustível cheio.

Massa em Curb: é a soma da Massa do Veículo conforme construído (ou seja, pode incluir opcionais) com a massa do tanque de combustível cheio.

2.1.3 - Capacidade de Carga do Veículo (ou “Payload”)

É o maior valor permitido para a soma da massa dos ocupantes com a massa de bagagens e de carga.

2.1.4 - GVM (ou GVW)

É, por lei, a máxima massa em que o veículo pode operar. É a soma da *Massa em Curb* com o “*Payload*” legal (de certificação legal) do veículo.

2.1.5 - GVMR (ou GVWR)

É a máxima massa que o veículo pode suportar. Para veículos de passageiros (veículos leves) é a soma da *Massa em Curb* com o “*Payload*” real do veículo.

2.2 - Sistemas de coordenadas, ângulos, velocidades e acelerações do veículo

Para estudarmos a resposta de um veículo a ações de controle ou a perturbações é necessário especificar um ou mais sistemas de coordenadas para medir a sua posição. Temos descrito abaixo o método recomendado pela SAE [5].

Primeiramente temos um sistema de coordenadas fixo à Terra XYZ (Fig. 2.1).

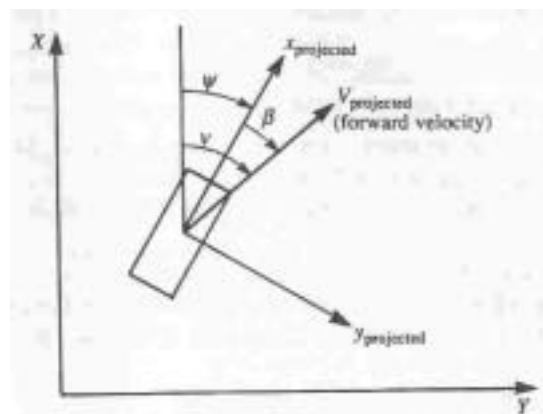


Fig. 2.1 – Sistema de coordenadas [6]

Letras maiúsculas denotam coordenadas fixadas à Terra. Para todos os veículos terrestres a Terra pode ser considerada como estacionária. O eixo X é escolhido longitudinalmente para frente no plano horizontal; Y está a 90° de X no

sentido horário e também no plano horizontal. Para seguir a regra da mão direita, o eixo Z está apontado para o solo. A origem do sistema XYZ pode estar posicionada em qualquer ponto conveniente, tipicamente no plano do solo. Este é o sistema SAE. Há também um sistema xyz fixado ao veículo (fig. 2.2).

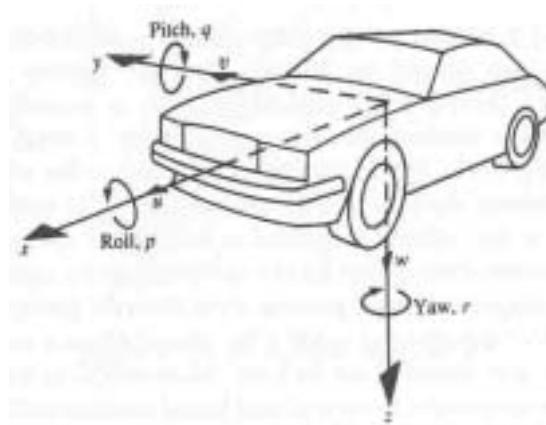


Fig. 2.2 – Eixos fixos no veículo [6]

A origem do sistema xyz é colocada no centro de massa do veículo. O ângulo do eixo x em relação ao plano horizontal é chamado de *atitude* (“pitch”), o ângulo do eixo y em relação ao plano horizontal é chamado de *rolagem* (“roll”) e o ângulo de *guinada* (“yaw”) é determinado pela rotação no eixo z. Em geral o veículo tem acelerações, portanto o sistema xyz não é inercial. A posição do veículo (dos eixos xyz) em relação aos eixos XYZ é medida por três coordenadas dando a posição da origem de xyz em XYZ e três rotações de xyz em XYZ. As rotações angulares seguem a regra da mão direita quanto ao seu sinal. As três rotações definidas são:

- Rotação de guinada ψ (“yaw”) em torno do eixo z;
- Rotação de atitude θ (“pitch”) em torno do eixo y;
- Rotação de rolagem ϕ (“roll”) em torno do eixo x.

A velocidade translacional do veículo é tomada como a velocidade de seu centro de massa G, na origem de xyz, medida no sistema XYZ. Para conveniência a velocidade é dividida em componentes nos eixos xyz (Figura 1.3.2). São eles:

- Velocidade **longitudinal** u no eixo x ;
- Velocidade **transversal** v no eixo y ;
- Velocidade **normal** w no eixo z .

Como os eixos x e y não são geralmente paralelos ao plano do solo outros termos são definidos: **velocidade frontal** (projeção da velocidade longitudinal no plano do solo) e **velocidade lateral** (projeção da velocidade transversal no plano do solo). A velocidade total no plano horizontal é a velocidade tangencial à trajetória do centro de massa do veículo. É também conveniente definir um componente da velocidade *perpendicular* ao plano do solo, positivo quanto mais distante deste ($-V_z$).

Como os eixos xyz estão ligados ao veículo, a posição de G é constante e tem velocidade e aceleração zero nestes eixos. A aceleração real do veículo no sistema XYZ é novamente dividida em componentes paralelos aos eixos xyz , havendo uma aceleração longitudinal u' em x , uma aceleração transversal v' em y e uma aceleração normal w' em z . Há também acelerações laterais, frontais e normais ($-A_z$). A figura abaixo, com ângulos exagerados, ilustra como a aceleração total horizontal pode ser decomposta em componentes **frontal** e **lateral** ou em componentes **tangencial** e **centrípeto**.

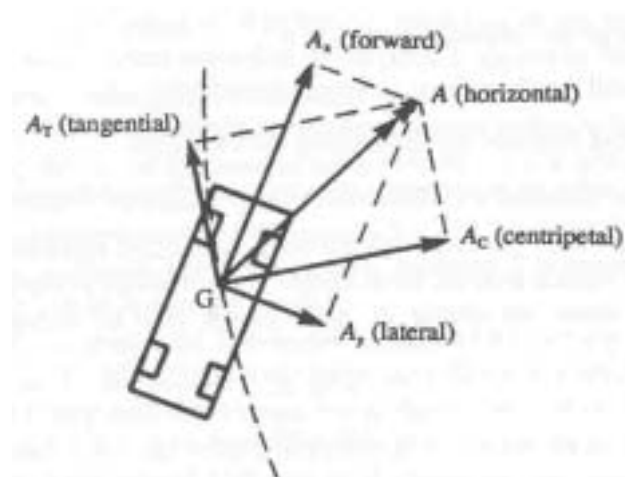


Fig. 2.3 – Componentes da aceleração [6]

A aceleração **centrípeta** é o componente paralelo ao plano da estrada e perpendicular à trajetória do veículo, direcionada ao centro de curvatura da trajetória.

As velocidades **angulares** do veículo são naturalmente medidas relativas ao sistema inercial XYZ, mas são posicionadas nos eixos xyz para conveniência, para dar:

- Velocidade angular de inclinação lateral (“**roll**”) **p**;
- Velocidade angular de **atitude q**;
- Velocidade angular de **guinada r**.

Estas são expressas em rad/s ou em grau/s. Também se definem acelerações de inclinação lateral (**p'**), de atitude (**q'**) e de guinada (**r'**).

Referindo-nos novamente à Fig. 1.3.1 olhando para baixo no plano XY temos:

- (1) A posição angular ψ (psi) do eixo x em relação ao eixo X, chamada de **ângulo de direcionamento** (“heading angle”);
- (2) A posição angular β (beta) da velocidade frontal, relativa ao eixo x, chamada de **ângulo de deslizamento lateral** (“sideslip angle”);

A posição angular do vetor velocidade que é tangencial à trajetória e denominada por ν (nu), chamada de **ângulo de curso**.

2.3 - Forças no Veículo e Notações

Segundo Dixon [6], o movimento do veículo é regido pelos seguintes fatores:

- (1) A **força resultante total** agindo no veículo;
- (2) O **momento resultante total** agindo no veículo;

(3) As propriedades inerciais de **translação** e de **rotação** do veículo

Duas equações se aplicam muito bem para o movimento do veículo: a **força resultante** que é igual à taxa de variação do momento linear e o **momento resultante** no centro de massa que é igual à taxa de variação do momento angular:

$$\overset{\rho}{F} = \frac{d\overset{\rho}{G}}{dt}$$
$$\overset{\rho}{M} = \frac{d\overset{\rho}{H}}{dt}$$

Estas são as leis básicas de movimento expressas por Euler. As três leis de movimento de Newton podem ser deduzidas da primeira equação. Na prática, em mecânica tridimensional é muito mais fácil trabalhar com a primeira das equações de Euler do que com a segunda. Considerando a primeira equação, aproximando o veículo como tendo massa constante, podemos expressá-la por $\mathbf{F} = m\mathbf{A}$, ou, subdividindo nos sistemas de coordenadas $F_x = mA_x$ (ex. eixo x), onde F_x é a soma de todos os componentes de força na direção x. Portanto, se todas as forças atuando no veículo são conhecidas, a aceleração do veículo pode ser determinada. Na prática, em muitos casos o centro de massa pode ser considerado fixo em relação à carroceria do veículo, o que não é totalmente verdade. A força total agindo é uma combinação das forças exercidas **pelo solo** nos pneus, das forças exercidas **pelo ar** na carroceria e da força peso exercida **pela gravidade**.

A resposta do veículo ao momento total agindo no seu centro de massa é muito mais difícil de se determinar. Isto ocorre devido a diversos fatores. Negligenciando o fato de que há rodas, motor e transmissão em rotação, ou seja, esquecendo que há efeitos giroscópicos e usando as mesmas aproximações do caso translacional, o veículo pode ser tratado como um corpo rígido. Contudo, as equações detalhadas do movimento ainda são complexas porque os eixos principais de inércia do veículo geralmente não coincidem com os eixos xyz. Felizmente, a maioria dos problemas de dirigibilidade são adequadamente analisados lidando-se

com casos simplificados, como por exemplo tratando o veículo como estando em movimento plano, paralelo ao plano do solo.

A notação de forças no veículo utiliza os diversos subscritos para as direções dos eixos, e termos como força longitudinal e lateral. A notação das forças no plano do solo segue a notação das acelerações da fig. 1.3.3. A força centrípeta F_C dá a aceleração centrípeta que causa a curvatura da trajetória. A força tangencial F_T controla a aceleração ao longo da trajetória.

A figura "a" abaixo mostra o diagrama de corpo livre do veículo no plano do solo, visto no sistema inercial XYZ. O diagrama de corpo livre mostra o corpo livre escolhido com as forças relevantes que atuam nele. Como resultado das forças líquidas desta figura, o veículo experimenta acelerações A_T e A_C de acordo com $\mathbf{F} = m\mathbf{A}$ no sistema inercial XYZ. Como exemplo a equação do movimento é $F_C = mA_C$.

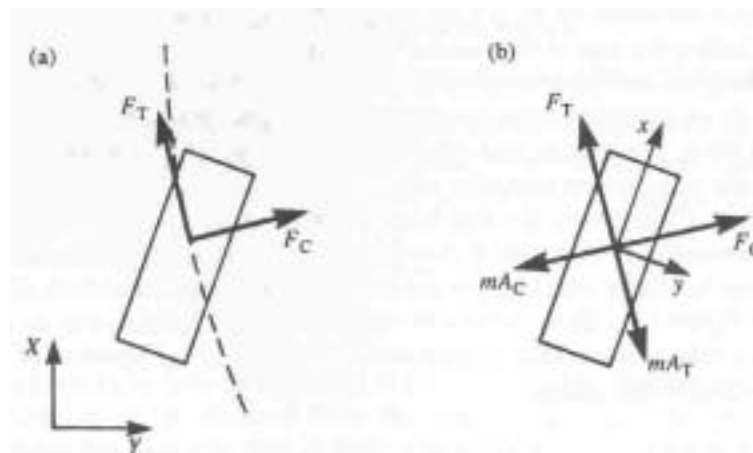


Fig. 2.4 – Diagrama de corpo livre do veículo no plano: (a) em XYZ, (b) em xyz [6]

Se nós passamos agora a ver o veículo num sistema não-inercial, tendo uma aceleração relativa a XYZ, a aceleração medida neste sistema será diferente. Ou seja, a aceleração calculada de $\mathbf{F} = m\mathbf{A}$ estará errada – a segunda Lei de Newton falha num sistema de coordenadas sob aceleração. Esta dificuldade pode ser superada ajustando o diagrama de corpo livre, adicionando-se forças de compensação fictícias, chamadas

forças de d'Alembert, trazendo-se assim o valor de \mathbf{F} em acordo com o $m\mathbf{A}$ medido no sistema de coordenadas acelerado. O valor da força de compensação necessária se iguala à massa do corpo vezes a aceleração do sistema de coordenadas, visto em eixos de coordenadas não acelerados. A força de compensação deve ser adicionada ao diagrama de corpo livre agindo na direção oposta à aceleração verdadeira do corpo livre.

Este método está mostrado na figura “b”, para o caso especial de eixos fixos ao corpo. A verdadeira aceleração centrípeta requer que adicionemos a força mA_C oposta à aceleração verdadeira. Da mesma forma mA_T é adicionada. Como xyz é um sistema fixado no veículo, o mesmo não tem aceleração neste sistema. Deste diagrama de corpo livre a equação de movimento perpendicular à trajetória é:

$$F_C - mA_C = 0$$

Comparando isto com a equação no sistema XYZ, vemos que está correto: a aceleração nos eixos inerciais é $A_C = F_C/m$.

A força mA_C , equilibrando a aceleração centrípeta é chamada de **força centrífuga** porque atua para fora do centro de curvatura. Esta força centrífuga é uma força de compensação, e aparece somente para fazer a segunda Lei de Newton válida no sistema de referência acelerado. Infelizmente, esta natureza especial das forças de compensação é normalmente esquecida, e se acredita que elas atuam mesmo em sistemas inerciais XYZ, o que leva a grande confusão.

A figura “a” abaixo mostra a vista traseira deste mesmo veículo em eixos inerciais XYZ. Aqui F_C nos dá a aceleração centrípeta real A_C . Também há transferência lateral de forças: N_1 excede N_2 para equilibrar o momento de F_C sobre G porque não há aceleração angular de “rolagem” (“roll”) em regime permanente.

A figura “b” abaixo mostra o diagrama de corpo livre correspondente visto nos eixos fixados ao veículo, e portanto incluindo a força centrífuga de compensação

mA_C . Por definição, neste sistema de coordenadas o veículo não tem aceleração, ou seja, está em equilíbrio.

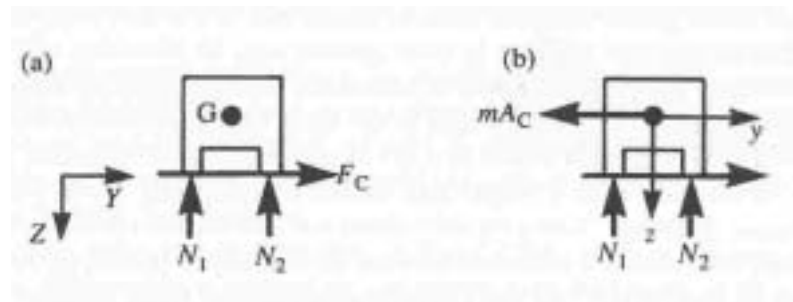


Fig. 2.5 – Diagrama de corpo livre do veículo em vista traseira numa curva à direita: (a) em XYZ, (b) em xyz [6]

2.4 - Sistema de coordenadas para os pneus

Devido à natureza peculiar da cinemática dos pneus é uma tarefa bastante complexa caracterizar um sistema de coordenadas adequado ao caso. Como exemplificação é mostrado abaixo o sistema de eixos segundo definição da SAE.

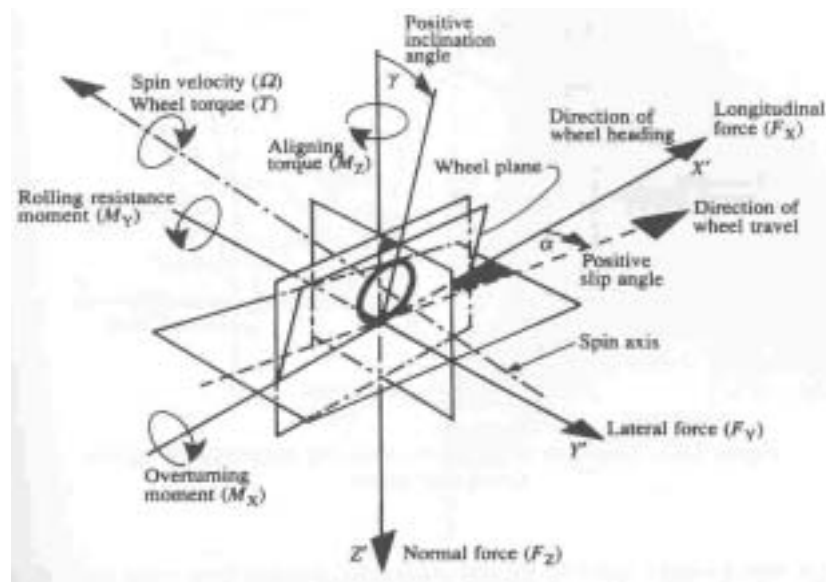


Fig. 2.6 – Eixos para pneus e a sua terminologia conforme SAE [6]

2.5 – Nomenclatura dos pneus

Todos os pneus apresentam informações gravadas em relevo em sua lateral externa. A seguir são descritas as informações principais [7].

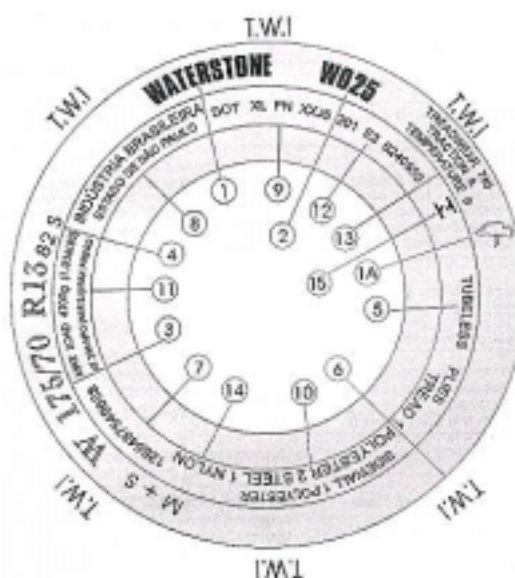


Fig. 2.7 – Nomenclatura dos Pneus [7]

Legenda:

1 - Nome do fabricante.

1A - Logotipo do fabricante.

2 - Modelo do pneu.

3 - Características das dimensões e tipos de construção:

175/70 R13

175 - indica a largura nominal do pneu, em milímetros.

70 - indica a relação entre a altura e a largura nominal do pneu. Representa a sua série técnica. Não existindo identificação, a série é 80.

R - indica que o pneu é de construção radial. A ausência deste código indica que o pneu é construção diagonal.

13 - indica, em polegadas, o diâmetro interno (do aro) do pneu.

4 - Índice de carga/código de velocidade:

82 - indica o peso que o pneu é capaz de suportar; índice de carga.

S - indica a velocidade máxima em que o pneu poderá rodar com total segurança.

5 - Pneu versão sem câmara (tubeless) ou com câmara (tube type).

6 - Posição dos indicadores de desgaste T.W.I. (Tread Wear Indicators).

7 - Códigos internos para controle de fabricação.

8 - Local de fabricação.

9 - Matrícula DOT : indica estabelecimento de produção, tipo do pneu e período de fabricação.

10 - Dados referentes à estrutura do pneu.

11 - Carga e pressão máxima.

12 - Registro de homologação - ECE (Economic Comission for Europe).

13 - Classificação do pneu junto à UTQG (Uniform Tyre Quality Grading).

14 - M + S : Significa pneu que pode ser usado em Lama e Neve.

15 - Símbolo de Certificação do INMETRO.

2.6 – Dimensões dos pneus

Com base na Fig. 2.8, pode-se identificar as principais dimensões de um pneu:

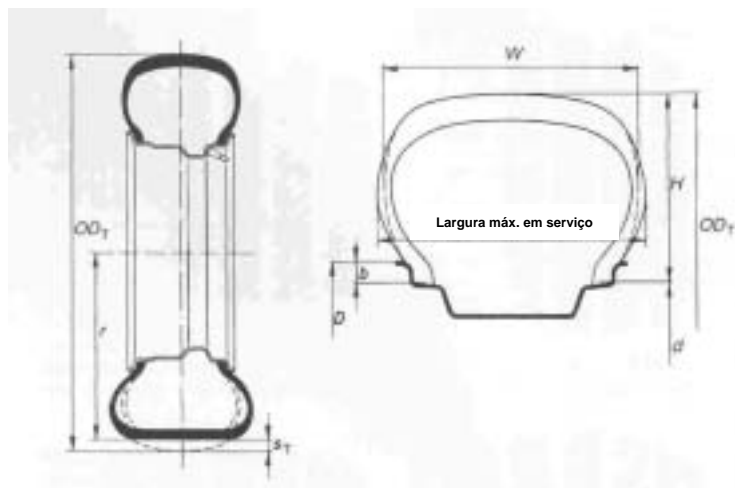


Fig. 2.8 – Dimensões principais de um pneu [8]

Legenda:

OD_T : Diâmetro Externo do pneu novo inflado à pressão de referência, valor regulamentado pela tabela normativa

W: Largura da Seção

H: Altura da Seção

S_T: deflexão do pneu causado pelo peso do veículo;

r: raio estático do pneu, que é a metade de OD_T descontada de S_T;

2.6.1 – Largura da seção e largura total

Como os pneus possuem inscrições em sua parede lateral é comum a distinção entre **largura da seção** e **largura total**. A **largura total** contempla estas inscrições em alto-relevo.

2.6.2 - Série

O quociente da altura pela largura da seção (H/W), conhecido também como **série**, **característica** ou **razão de aspecto**, é a maneira utilizada pelos órgãos

normativos para classificar os pneus. No caso de um pneu especificado como 175/65 R14 82H, o número 65 representa a série do pneu.

2.7 – Estrutura de um Pneumático

A seguir tem-se uma breve descrição dos principais elementos estruturais de um pneu e sua função desempenhada no conjunto da suspensão veicular:

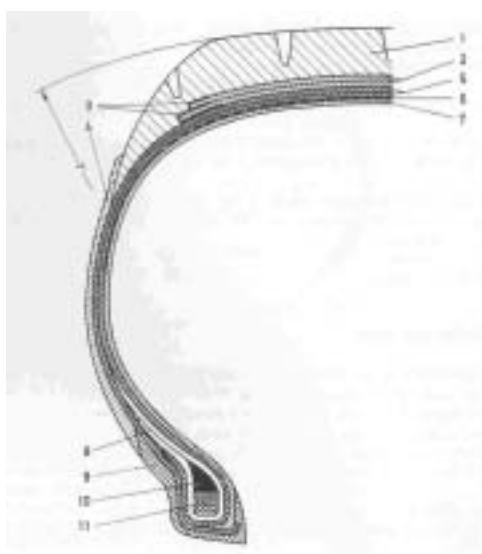


Fig. 2.9 – Vista em corte de um pneumático radial [8]

2.7.1 - Talão

O talão é o elemento estrutural do pneu que proporciona a ancoragem deste com a roda. Mantém o íntimo contato do pneu com o aro, e sua inextensibilidade é vital para a transmissão dos esforços. Ao mesmo tempo deve ser flexível o suficiente para permitir a montagem e a desmontagem do pneumático.

2.7.2 - Carcaça

Formada por uma manta de tecido ancorada nos talões, percorrendo toda a seção do pneumático e dando-lhe forma. Pneus diagonais têm os fios desta manta (cordões) orientados entre 30 e 40 graus em relação ao plano centro-longitudinal do pneu, enquanto que nos radiais este ângulo é de aproximadamente 90 graus. Variações muito significativas são notadas no comportamento dinâmico do pneu quando se varia o projeto construtivo da carcaça, que pode ser composta de “n” lonas, ser

constituída de rayon, nylon, aço ou fibra de vidro, ter diferentes orientações (ângulos), e diferentes tipos de colas, aglomerantes e borracha.

Vários materiais têm sido utilizados para os cordonéis. O algodão foi dominante até 1945, então o rayon até 1960, e daí nylon. Desde 1975 o poliéster têm sido o mais comum. Aço, fibra de vidro e fibras de aramida têm ganhado espaço desde 1970. Estas mudanças estão diretamente relacionadas com as propriedades mecânicas dos materiais candidatos.

2.7.3 - Cintas estabilizadoras

Na figura estão identificadas pelos números 2 (cinta estabilizadora de aço) e 3 (cinta estabilizadora de proteção). Aparecem somente em pneus radiais ou diagonais cintados. Sua função é dar estabilidade dimensional à carcaça e enrijecê-la lateralmente. É constituída de lonas similares às da carcaça, mas com fios mais grossos e resistentes. É montada externamente à carcaça, e sua construção também influi significativamente no comportamento de rotação do pneu. Os ângulos dos cordonéis variam com o número de lonas utilizadas na cinta.

2.7.4 - Parede lateral

Está identificada pelo número 4 na figura. Região do pneu mais exposta à solicitação de flexão. Além da função estrutural tem a função de dissipar o calor gerado no pneu. Um bom compromisso entre resistência e dissipação de calor ocorre em pneus com paredes laterais finas e carcaças de fios de aço.

2.7.5 - Ombros

Constituem a junção da parede lateral com a banda de rotação. Em função do acúmulo de borracha nesta região é uma região muito quente. Enquanto o veículo descreve uma linha reta os ombros são apenas uma extensão da parede lateral. Quando o veículo descreve uma curva o ombro passa a atuar como uma extensão da banda de rotação. Durante uma curva é importante que os ombros não se “levantem” do chão, para evitar que a área de contato pneu-solo seja reduzida, aumentando o desgaste da banda. A cinta estabilizadora tem a função de conter este fenômeno.

2.7.6 - Banda de rotação

É a região 1 da figura. É a região do pneumático que tem contato com o solo e é grandemente sujeita a desgastes, cortes e perfurações. Sua função é transmitir esforços de tração, de frenagem e laterais. O desenho da banda de rotação deve ser adequado para romper o filme de água e para drenar água para fora da região de contato pneu-solo.

A banda de rotação é desenhada com vincos, fendas e cortes tipicamente da profundidade de 8 mm quando o pneu é novo, para favorecer a drenagem em pistas molhadas. O padrão da banda também facilita a troca de calor entre o pneu e a

atmosfera externa em condições de pista seca. Quando grandes acelerações em quaisquer direções são requeridas do veículo, as propriedades de atrito da banda se tornam de maior importância. A borracha da banda deve ser muito dura para fornecer boas características de desgaste, e portanto na escolha do composto de borracha há um conflito entre desgaste e aderência. Em alguns casos uma camada de borracha mais macia é colocada na parte exterior da banda.

2.7.7 - Camada interna

A camada interna, ou “inner lining”, mostrada no número 7, é uma camada de borracha butílica utilizada nos pneus sem câmara. Quando estes pneus são submetidos a pequenas perfurações esta camada especial atua vedando e evitando a queda de pressão do pneu. É comum observarmos pneus que, mesmo perfurados por um prego, continuam a rodar por muitos quilômetros.

2.7.8 - Footprint

É a área do pneu que efetivamente está em contato com o solo. Na figura abaixo mostra-se o “footprint” de dois pneus distintos.



Fig. 2.10 – Footprint [8]

2.7.9 - A borracha

Conforme Dixon [6], a borracha do pneu inclui outros constituintes, como carbono preto e petróleo, e tem uma densidade média de 1200 kg/m^3 . Borracha, seja natural ou sintética, é um material **visco-elástico**. Isto significa que quando um corpo de borracha é distorcido ele resistirá com uma força, mas a borracha relaxa devido a efeitos viscosos e assim a força cai. A figura abaixo mostra um modelo bastante simples para este tipo de comportamento.

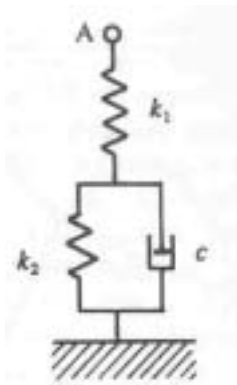


Fig. 2.11 – Um modelo mecânico da borracha, com amortecimento dependente da frequência [6]

Quando borracha pura é submetida a teste laboratorial de atrito contra vidro verifica-se que o coeficiente de atrito depende da velocidade e da temperatura. Uma importante conclusão é que a **visco-elasticidade** é a causa do atrito da borracha. A adição de carbono preto abaixa o valor médio de atrito e foi feita primeiramente pela Pirelli em 1907, quando se descobriu com isso aumentar em até três vezes a vida da banda de rodagem. O endurecimento da borracha por vulcanização com enxofre foi inventado pela Goodyear em 1839.

Um pneu completo é composto de diversas misturas de borracha, otimizadas para atender as propriedades desejadas e o custo final do produto. Um parâmetro importante é a dureza, governada pela quantidade de carbono preto e pelo grau de vulcanização.

2.8 - Tipos de construção dos pneumáticos

2.8.1 – Pneus Diagonais

No pneu diagonal, ou “bias-ply” o ângulo dos cordões é tipicamente 40° , e camadas alternadas são sobrepostas com inclinação para a esquerda e para a direita.

Segundo Reimpell [8], o uso destes pneus com estrutura cruzada tem ocorrido apenas em casos específicos, devido à grande difusão dos pneus radiais, particularmente nos veículos de passageiros. Entre os casos de uso dos pneus diagonais pode-se citar:

- Pneus-reserva de uso temporário (emergência), devido aos requisitos mais brandos de durabilidade em velocidades inferiores a 80 e 100 km/h;
- Motocicletas, devido à inclinação das rodas em oposição à força lateral (sabe-se que a lateral de um pneu diagonal é mais resistente que um pneu radial);
- Carros de competição, devido ao momento de inércia inferior ao dos pneus radiais;
- Veículos rurais, por não atingirem altas velocidades.

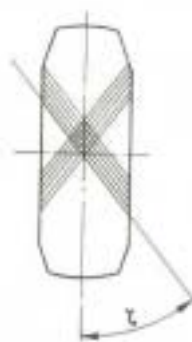


Fig. 2.12 – Pneu Diagonal [8]

2.8.2 - Pneus Radiais

Entre as duas Grandes Guerras surgiu na Alemanha o pneu radial, que proporcionou um atrito de rolamento menor que os pneus comuns, assim como menor geração interna de calor, significando menor consumo de combustível. A implementação do pneu radial no Brasil deu-se principalmente nos anos 70, impulsionada pela crise do petróleo.

Os pneus radiais consistem de dois talões unidos radialmente pela carcaça – daí o nome de pneu radial. Uma cinta sobreposta à carcaça fornece a rigidez necessária, enquanto que a parte externa do pneu consiste da banda de rodagem e da parede lateral, e o interior de um composto de borracha adequado para promover a correta vedação do ar (veja figura). Em veículos de passeio, a carcaça é feita de rayon ou nylon, a cinta de fios de aço ou uma combinação de aço, rayon ou nylon e o talão exclusivamente de aço. Devido à predominância do aço como componente das cintas estabilizadoras, estes pneus são normalmente designados como “radiais de aço”. Os materiais utilizados estão descritos na parede lateral do pneu. Em veículos comerciais a carcaça também pode ser feita de aço.

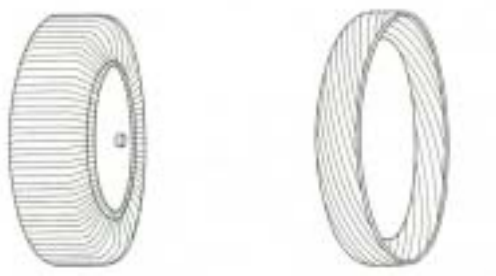


Fig. 2.13 – Pneu Radial. À esquerda temos a subestrutura e à direita a cinta estabilizadora [8]

Por características construtivas os pneus radiais são mais “ásperos” (no contexto de vibração) que os pneus diagonais, induzindo um aumento no nível de vibrações do veículo. A cinta rígida, conhecida também como cinta estabilizadora, provoca oscilações longitudinais. Para eliminar ou diminuir este efeito as suspensões dos automóveis passaram a ser projetadas com características de absorção de vibrações.

Segundo Reimpell [8], a última desvantagem dos pneus radiais em comparação aos diagonais é a sua maior susceptibilidade a danos nas paredes laterais. Já as vantagens dos radiais em relação aos diagonais podem ser enumeradas:

- Maior durabilidade;
- Maiores capacidades de carga aliada a um pneu mais leve;
- Menor resistência ao rolamento;
- Melhores propriedades de aquaplanagem;
- Melhor comportamento em frenagens com pisos molhados;
- Maiores forças laterais a uma mesma pressão de inflação;
- Maior conforto em estradas a velocidades altas

Comparados aos diagonais os pneus radiais proporcionam maior economia de combustível e têm características de desempenho e durabilidade superiores. Enquanto o pneu diagonal “levanta os ombros” sob aplicação de uma carga lateral o pneu radial os mantém em contato com o solo, e o “footprint” é nitidamente maior.

Os pneus diagonais perdem a aderência lateral de forma progressiva, enquanto que os pneus radiais reagem normalmente a uma solicitação crescente, até o ponto em que repentinamente perdem a aderência. Este fato, segundo Reimpell [8], ocorre devido a deformações excessivas da cinta estabilizadora. Por outro lado, a cinta estabilizadora inibe os movimentos “peristálticos” da banda de rodagem, que tanto contribuem para o desgaste dos pneus.

Os pneus radiais têm em média de 10 a 20% menor resistência ao rolamento que os pneus diagonais, e promovem uma redução do consumo na ordem de 4%. A resistência ao rolamento pode ser diminuída com menores ângulos dos cordonéis, com a utilização de cordonéis de aço, com a alteração dos compostos de colas e borrachas da banda de rodagem e das paredes laterais. A temperatura de trabalho de um pneu radial chega a ser em média 10° a 15°C inferior a dos pneus diagonais, o que é significativo na faixa de trabalho dos pneumáticos que é de 80 a 100°C, podendo atingir 110°C.

Reimpell [8] explica que o crescimento em serviço ocasionado pela rotação do pneu é grandemente minimizado em pneus radiais pela ação da cinta estabilizadora. O crescimento do diâmetro do pneu em serviço influi diretamente na determinação da região de alojamento dos pneus nos veículos, nos cálculos das transmissões e na calibração dos velocímetros e odômetros.

2.8.3 – Pneus com ou sem câmara

Os pneus sem câmara praticamente já substituíram os pneus com câmara no mercado. As principais vantagens daqueles em relação a estes são a facilidade de montagem e a regeneração da camada interna de borracha ao sofrer pequenas incisões. As duas condições básicas para se utilizar um pneu sem câmara são a presença de um contorno de segurança no aro da roda e a efetiva retenção de ar no pneu.

2.9 - Esforços na Superfície de Contato Pneu-Solo

Segundo Gillespie [9], o movimento do veículo é controlado pelas forças exercidas no pneu pela estrada, que têm um papel importante nos problemas de dirigibilidade. A função essencial de um pneu, segundo este autor, é interagir com a estrada, de modo a produzir as forças necessárias para o apoio e movimento do veículo. O pneu deve desenvolver forças laterais para controlar a direção do veículo, gerar aceleração lateral em curvas e resistir a forças externas, tais quais rajadas de vento e inclinações longitudinais da pista. Estas forças são geradas pela deriva do pneu – (**ângulo de deriva**) pela inclinação lateral do mesmo (**ângulo de câmber**) ou por uma combinação das duas. Também importantes são as forças normais e longitudinais na superfície de contato.

2.9.1 - Ângulo de Deriva e Força Lateral

Na produção das forças requeridas para dar ao veículo seu comportamento cinemático desejado é a área de contato – o “footprint”- que é o foco de atenção.

A reação a uma solicitação lateral (tal como vento, força centrífuga, esterçamento de direção ou inclinação do terreno) ocorre através dos pneumáticos, que devem produzir forças laterais. Esta perturbação provoca uma alteração na trajetória do veículo. Nesta situação, o pneumático na região do “footprint” deixa de se deslocar na direção de seu plano centro-longitudinal e passa a se deslocar em outra

direção, devido à deformação existente. Isto gera o chamado **ângulo de deriva (α)**, ou “slip angle”.

O “footprint” do pneu de um veículo parado sobre um plano horizontal tem a forma semelhante a uma elipse, e as tensões atuantes pneu-solo são apenas normais. Esta elipse se mantém quando o veículo descreve uma trajetória retilínea em plano horizontal, a velocidades baixas, mas neste caso passa-se a verificar também tensões tangenciais. A forma da elipse se altera sempre que houver um aumento da velocidade e o esterçamento da direção. “Neste caso, as tensões tangenciais terão orientação predominantemente perpendiculares ao plano centro-longitudinal do pneu, dando origem a **Força Lateral (F_y)**, cuja linha de ação está afastada “e” do plano vertical, que contém o eixo de rolamento da roda.”

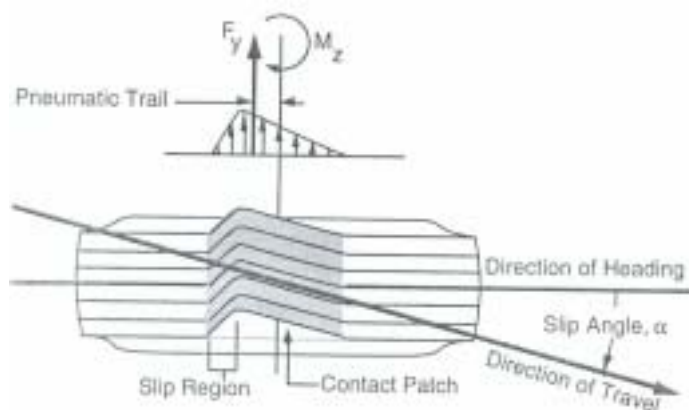


Fig. 2.14 – Deformação em um pneu sob a ação de força lateral [9]

O **Momento Auto-Alinhante M_z** é o momento produzido pela força lateral devido à excentricidade “e” em relação ao eixo vertical da roda. Seu efeito é de alinhar as rodas, colocando-as na posição de andar em linha reta.

Leite [10] informa que, quanto maior o ângulo de deriva, maior também será a força lateral. Comparando-se pneus distintos, o que apresentar maior força lateral para um dado ângulo de deriva terá uma maior “potência de viragem” e permitirá

conseqüentemente um melhor controle direcional do veículo. Isto ocorre porque este pneu suportará maiores solicitações laterais sem escorregar. A proporcionalidade entre a força lateral e o ângulo de deriva ocorre para ângulos de deriva pequenos (3 a 4°), e em ângulos superiores tende-se a atingir o limite de aderência do pneu, após o qual ocorre o escorregamento do pneumático.

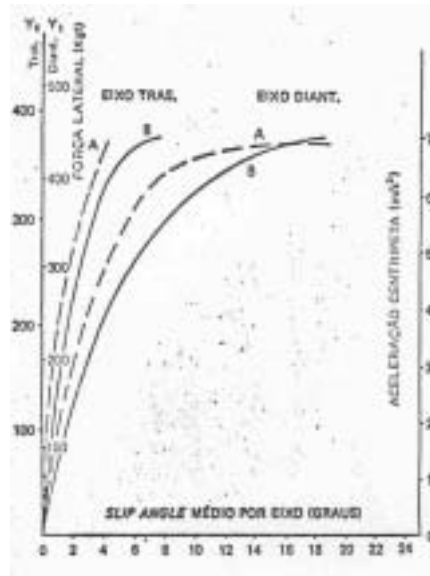


Fig. 2.15 – Variação da força lateral com o ângulo de deriva para dois pneus distintos [10]

2.9.2 - Cornering Stiffness

Uma propriedade fundamental para caracterizar a estabilidade e a capacidade de fazer curvas de um veículo é a inclinação inicial da curva de força lateral. A inclinação da curva quando o ângulo de deriva é zero é chamada de “**Cornering Stiffness**”, ou simplesmente C_{α} .

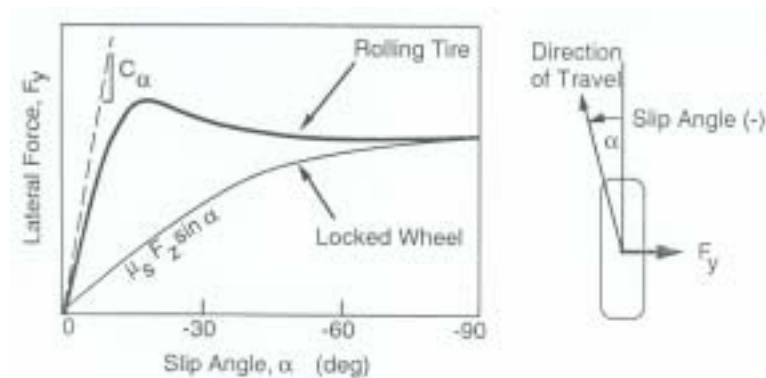


Fig. 2.16 – Propriedades de força lateral dos pneus [9]

Matematicamente:

$$C_\alpha = -\left. \frac{\partial F_y}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0}$$

Gillespie [9] informa que a propriedade “Cornering Stiffness” é dependente de muitas variáveis, dentre as quais as mais significativas pode-se citar: o tamanho e tipo de pneu, número de camadas na carcaça (“plies”), ângulos dos cordonéis, largura da roda e desenho da banda de rodagem.

2.9.3 - Ângulo de Câamber e Força de Câamber

No seu estado mais simples, a roda posiciona-se verticalmente e gira no seu plano de simetria. Se sua direção de deslocamento é outra senão o plano de simetria, então há um ângulo de deriva α , com uma força associada (figura “a” abaixo). Afora o ângulo de deriva, a roda também pode estar inclinada (figura “b” abaixo). A inclinação é medida positivamente quando a rotação é positiva no eixo X’. No padrão SAE, o valor positivo se associa à roda cujo topo aponta para fora do veículo. O ângulo de câamber da roda direita é o ângulo de inclinação desta. Na roda esquerda, é o mesmo ângulo com sinal oposto. O ângulo de câamber resulta numa força de câamber.

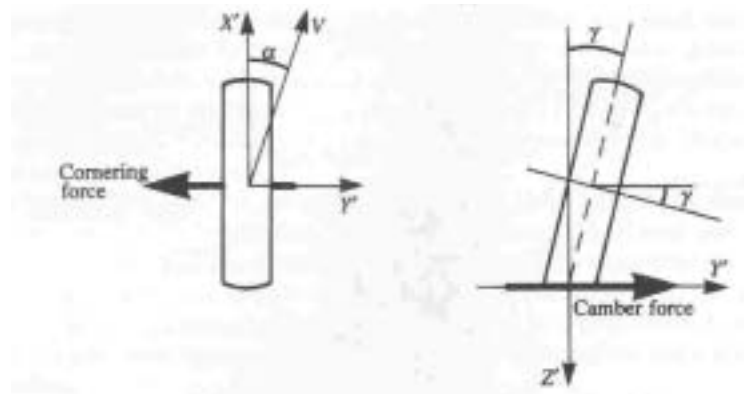


Fig. 2.17 – Ângulo e a força exercida pelo solo no pneu: (a) deriva, (b) câmbor [6].

O efeito do **câmbor** é prover o pneumático e o veículo de uma força lateral que se soma ou se subtrai da força lateral já existente no pneu. Devido ao ângulo de câmbor também é produzida uma excentricidade e em consequência um torque, chamado **Torque de Câmbor** (M_x).

2.9.4 - Representação geral das forças e momentos

A figura abaixo mostra deriva e câmbor combinados, assim como os eixos e forças. A força exercida no pneu pela estrada ao longo de X' , denotada por F_x , é chamada de **força longitudinal**, e é negativa para frenagem. A força ao longo de Y' , denotada por F_y , é chamada de força de curva (“cornering force”) ou força do ângulo de deriva, quando causada pelo ângulo de deriva somente, força de câmbor quando causada pelo ângulo de câmbor somente, ou mais geralmente **força lateral**.

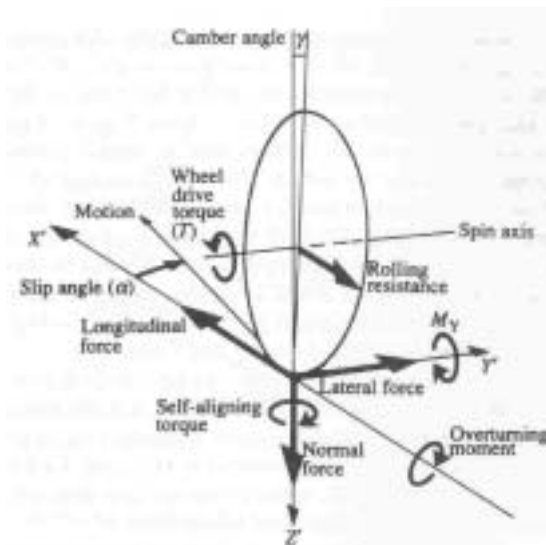


Fig. 2.18 – Forças no pneu [6]

A força no pneu ao longo de Z' , F_Z , é chamada de **força normal**; ela é negativa, então por conveniência a força para cima no pneu é chamada de força vertical, F_V . Daí:

$$F_V = -F_Z$$

O **momento auto-alinhante** M_Z e o **torque de câmbio** M_X têm sinal positivo de acordo com a regra da mão direita. Segundo Dixon [6], é melhor tratar a resistência ao rolamento como uma força atuando no centro de rotação da roda.

Em resumo, os componentes de força e momentos exercidos no pneu pela estrada são:

- (1) F_Z , **força normal**, positiva para baixo
- (2) F_V , **força vertical**, positiva para cima
- (3) F_X , **força longitudinal**, positiva no sentido frontal do veículo
- (4) F_Y , **força lateral** (força de curva F_α mais a força de câmbio F_γ)
- (5) M_X , **torque de câmbio**
- (6) M_Y , **momento de resistência ao rolamento**
- (7) M_Z , **momento auto-alinhante**

2.10 - Forças Longitudinais: Escorregamento e Atrito

Enquanto forças laterais se desenvolvem quando esterçamos o volante, forças longitudinais são criadas aplicando-se torques no eixo de rotação da roda; no último caso, ao menos que a roda não esteja girando, deve haver um fluxo de potência correspondente ou provendo energia cinética (motor) ou dissipando-a (freios). A SAE usa o termo “longitudinal” para se referir a forças ao longo do eixo X’ (fig, abaixo), e também para a direção do veículo como um todo. Tração é usada no sentido positivo de X’ e frenagem para o negativo.

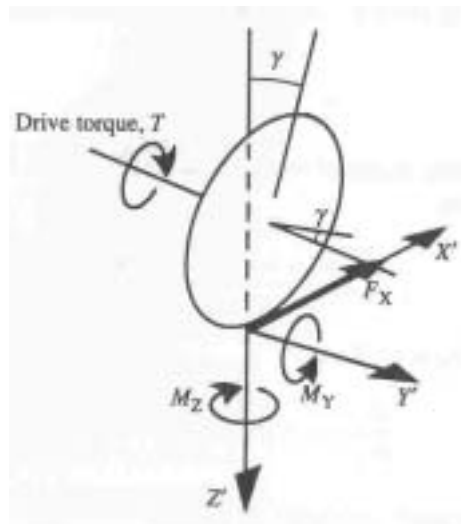


Fig. 2.19 – Forças e momentos em uma roda motriz [6]

No sistema SAE, um torque positivo T é definido a causar uma força longitudinal positiva. A figura acima mostra o diagrama de corpo livre correspondente. Para os momentos no eixo de rotação da roda:

$$-T + F_x R_l + M_y \cos \gamma + M_z \sin \gamma = I \ddot{\theta}$$

Para pequenos ângulos de câmbio, acelerações de roda e resistência ao rolamento:

$$T = F_x R_l$$

Se um torque de frenagem é aplicado a uma roda mantida à velocidade translacional constante, então a velocidade rotacional da roda muda suavemente. Isto significa que há uma diferença efetiva de velocidade entre o pneu e a pista, ΩR_l e V , respectivamente, relativo ao eixo de rotação da roda. Contudo, necessariamente não há um deslizamento real. A diferença nominal de velocidade é $V - \Omega R_l$. Isto pode ser adimensionalizado para dar o escorregamento longitudinal S :

$$S = \frac{(V - \Omega R_l)}{V} = 1 - \frac{\Omega R_l}{V}$$

O raio efetivo de rolamento é $R_e = V/\Omega$, então o escorregamento pode ser descrito como:

$$S = 1 - \frac{R_l}{R_e}$$

Quanto maior a força de frenagem ou tração a ser transmitida maior se torna o escorregamento. Dependendo da condição da pista, a força longitudinal transferida atinge seu valor máximo entre 10% e 30% de escorregamento e reduz até a roda travar (100% de escorregamento).

SAE define o **Coefficiente de Força Longitudinal (μ_x)** como o quociente entre a força longitudinal F_x e a força vertical F_z :

$$\mu_x = F_x / F_z$$

Se a força F_x for de tração, o coeficiente é chamado **Coefficiente de Força Motora**, se F_x for de frenagem chama-se **Coefficiente de Força de Frenagem**. O chamado **Coefficiente de Tração** é o valor máximo que μ_x pode atingir em tração ou frenagem.

Quando há 100% de escorregamento o Coeficiente de Força Longitudinal é o **Coeficiente de Atrito Dinâmico (μ_{Xdin})**.

Em todos os casos o Coeficiente de Tração é maior que o Coeficiente de Atrito Dinâmico. Segundo Reimpell [8], pode-se dizer genericamente que:

Pista **seca**: $\mu_X = 1,2 \cdot \mu_{Xdin}$

Pista **molhada**: $\mu_X = 1,3 \cdot \mu_{Xdin}$

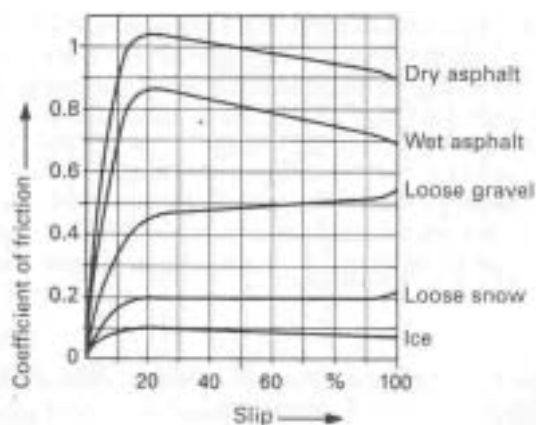


Fig. 2.20 – Coeficiente de atrito versus escorregamento para um pneu a 60 km/h em diferentes pavimentos [8]

2.10.1 - Influências da Pista: Pistas secas e molhadas

Numa pista seca o coeficiente de atrito é praticamente independente da velocidade do veículo (ver fig. abaixo), e a exceção ocorre em velocidades abaixo de 20 km/h, onde o raio de rolamento diminui e a área de contato do pneu com o solo aumenta. Isto promove um aumento no coeficiente de atrito. Em velocidades próximas a zero em superfícies rugosas há a presença de um efeito similar ao de dentes de engrenagem e o coeficiente de atrito passa a ser $\mu_X \geq 1,3$.

Quando a pista está úmida o coeficiente de atrito é reduzido, mas ainda independe da velocidade. Esta dependência somente se verifica em profundidades

maiores de água onde esta não escoa mais facilmente nas fendas de drenagem da banda de rodagem.

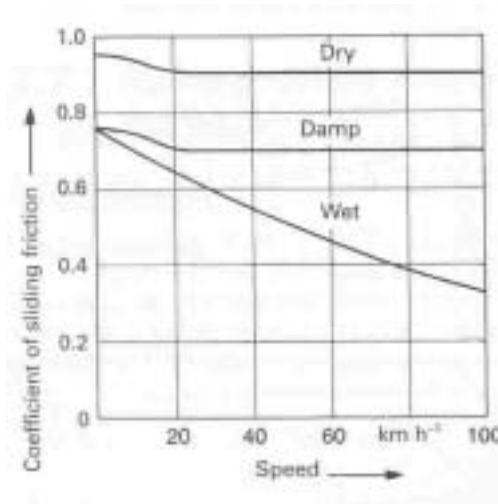


Fig. 2.21 – Dependência do coeficiente de atrito dinâmico com a velocidade em diferentes pavimentos [8]

2.11 - Força Lateral: Escorregamento e Atrito

Assim como no caso das forças longitudinais, SAE define o **Coefficiente de Força Lateral** (μ_Y) como o quociente entre a força lateral F_Y e a força vertical F_Z :

$$\mu_Y = F_Y / F_Z$$

O chamado **Coefficiente de Tração Lateral** é o valor máximo que μ_Y pode atingir.

Quando há 100% de escorregamento o Coeficiente de Força é o **Coefficiente de Atrito Dinâmico Lateral** ($\mu_{Y\text{din}}$).

Abaixo mostra-se um exemplo da variação do Coeficiente de Força Lateral (μ_Y) com o ângulo de deriva, para diferentes pavimentos:

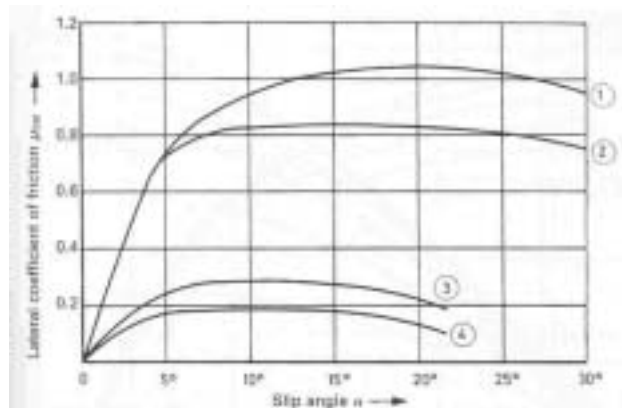


Fig. 2.22 – Coeficientes laterais de atrito como função do ângulo de deriva e da condição da pista: (1) concreto seco e áspero; (2) concreto seco e liso; (3) cobertura de neve; (4) cobertura de neve áspera [8]

Do mesmo modo observado com a força longitudinal o escorregamento S_Y (na direção lateral) é também levado em consideração. Ele é definido como:

$$S_Y = \text{sen} \alpha \cdot 100 \text{ [\%]}$$

Associado a um ângulo de deriva $\alpha = 10^\circ$ teríamos um escorregamento $S_Y = 17\%$, enquanto que para $\alpha = 20^\circ$ teríamos $S_Y = 34\%$. Se o pneu é girado até $\alpha = 90^\circ$, o escorregamento seria de 100% e o coeficiente de atrito se tornaria o coeficiente de atrito dinâmico lateral, ($\mu_{Y\text{din}}$), que segundo [8] é em média **30%** menor que o estático:

$$\mu_{Y\text{din}} = 0,7 \cdot \mu_Y$$

Em contraste ao concreto seco, particularmente em superfícies com gelo ou molhadas, não há incremento na força lateral acima de $\alpha = 10^\circ$ ($S_Y = 17\%$).

2.12 - Modelo de atrito apurado

Os experimentos de pneus mostram que o coeficiente de atrito depende da velocidade, mas também depende da duração do deslizamento que precede a medição a uma dada velocidade [6]. Como descrito anteriormente em 2.3, o coeficiente de atrito de qualquer borracha numa dada superfície depende da velocidade de deslizamento e da temperatura. Uma vez que a traseira do “footprint” está deslizando, a temperatura da borracha aumentará de maneira a ser difícil de quantificar. Contudo a consequência prática é que há uma redução no coeficiente de atrito porque a temperatura excede o ótimo. O valor do atrito inicialmente aumenta e depois cai com a velocidade de deslizamento. Para pneus reais e deslizamentos reais o atrito já passou do pico e tende somente a decrescer com a velocidade.

Segundo Dixon [6], há quatro modelos analíticos de atrito versus velocidade conhecidos:

- (1) μ constante
- (2) Diferentes valores estático (μ_S) e dinâmico (μ_D)
- (3) $\mu_D = \mu_S(1-KV)$
- (4) $\mu_D = \mu_S e^{-V/V_1}$

O coeficiente de atrito μ_S para veículos de passeio pode ter valores de até 1,2, enquanto que para caminhões é bem menor. A figura abaixo mostra resultados para testes de frenagem com rodas travadas. O valor menor verificado em caminhões é devido ao uso de compostos mais duros de borracha que promovem menor desgaste e devido às altas pressões de contato. Os valores maiores dos carros de corrida ocorrem em função de compostos especiais e de pressões de contato baixas.

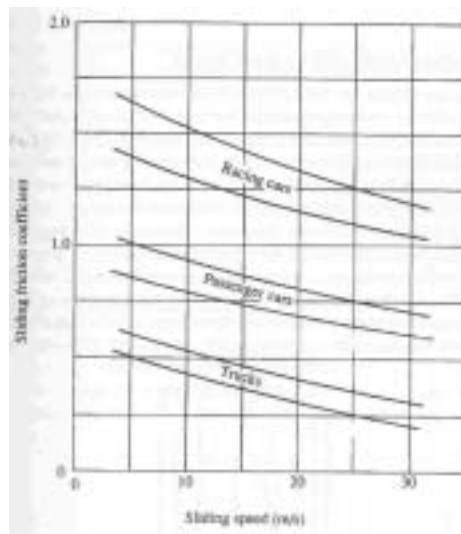


Fig. 2.23 – Atrito versus velocidade para frenagem com roda travada [6]

Apesar de precisarmos de modelos mais complexos para uma análise mais precisa de atrito, o modelo (2) se presta bem para o entendimento do efeito de dependência do atrito com a velocidade. Define-se um **coeficiente estático** limitando a parte não-deslizante do “footprint” e um **coeficiente dinâmico** (menor) para a parte deslizante.

2.13 - Controle, Estabilidade e Dirigibilidade

Segundo Dixon [6], *Controle* é a ação do motorista destinada a influenciar o movimento do veículo. Fisicamente falando, o motorista procura exercer controle sobre o vetor velocidade do veículo, e assim sobre sua trajetória. Este autor define *Estabilidade* como a resistência de um carro de ser desviado de sua trajetória atual. E *Dirigibilidade* (“*Handling*”) como a habilidade de um veículo executar curvas adequadamente, o estudo de como isto ocorre, e o estudo da percepção do motorista ao comportamento em curva do veículo. Taheri [11] sugere que “ ‘*dirigibilidade*’ inclui a resposta rápida e segura a comandos do volante, desenvolvimento da força lateral e boas propriedades do pneu em curvas.” O veículo como um todo pode ser influenciado somente por forças exercidas pela **pista**, pela **atmosfera** e pela

gravidade, e como conseqüência nós devemos estar interessados nas propriedades aerodinâmicas da carroceria assim como pelas características de forças dos pneus em curvas. Para a maioria dos casos práticos, as forças dos pneus são dominantes, com a aerodinâmica desempenhando um papel secundário na dirigibilidade.

A figura abaixo mostra o sistema motorista-veículo como um diagrama de blocos. A seção à direita da linha pontilhada é o sistema de **malha aberta** (“open-loop”). Isto representa o veículo e seu comportamento em resposta à ações de controle e perturbações da pista ou da atmosfera. O sistema completo inclui o motorista. Devido ao fato que o motorista recebe informação retro-alimentada do movimento do veículo e da direção isto é chamado de sistema de **malha fechada** (“closed-loop”). A análise de dirigibilidade pode ser baseada tanto na malha aberta, onde testes são executados para revelar as características do veículo, como na malha fechada, que também envolve o desempenho do motorista.

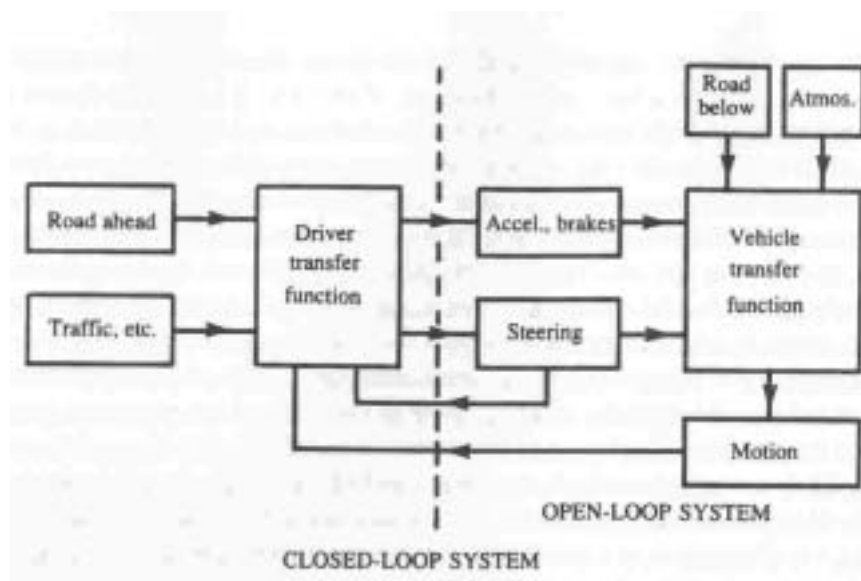


Fig. 2.24 – Diagrama de blocos do sistema veículo-motorista [6]

2.14 - Conforto

O termo **conforto** é associado neste trabalho ao termo inglês “Ride”, que é comumente usado para caracterizar vibrações táteis ou visuais. Já as vibrações

percebidas pela audição humana são classificadas de “Ruído”. Segundo Gillespie [9], as vibrações são critérios muito importantes pelos quais as pessoas julgam a qualidade do projeto e da construção de um carro. Como é um julgamento, é subjetivo por natureza, e daí ocorrem as maiores dificuldades em desenvolver métodos objetivos para quantificar a performance de conforto de um veículo. Para o entendimento do conforto de um veículo é interessante ver o veículo como um sistema que responde dinamicamente a excitações. Um modelo seria o da figura abaixo:

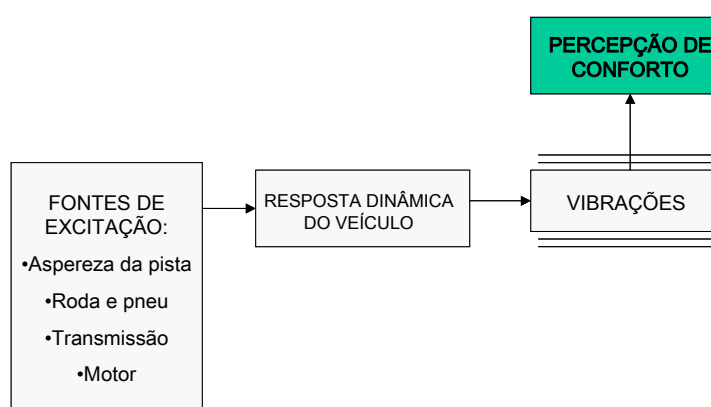


Fig. 2.25 – O sistema dinâmico do conforto [9]

2.15 - Motoristas

Segundo Dixon [6], o movimento de um carro depende do desempenho do sistema carro-motorista completo. A Fig. 2.24 mostrou os principais inter-relacionamentos. O motorista aceita informação retro-alimentada (“feedback”) do movimento do veículo, incluindo a posição na pista e a sensação na direção, sendo portanto este um sistema de malha fechada (“closed-loop”).

Dixon [6] sustenta que o motorista é muito sensível a pequenos “avisos” dados pelo veículo. Em testes de dirigibilidade em malha aberta a trajetória do veículo pode ser muito bem prevista, mesmo através de dados em regime permanente, mas a reação de um motorista a um veículo, ou seja, favorável ou

desfavorável, é muito mais difícil de prever. Ou seja, mudanças pequenas que seriam normalmente vistas como desprezíveis de uma perspectiva de engenharia e que fortemente afetam a resposta do veículo podem ter um efeito substancial na percepção do veículo pelo motorista, e podem fazer a diferença entre um veículo que subjetivamente é bom ou ruim. Portanto ao responder à pergunta de quais fatores de projeto levam a uma boa dirigibilidade, é essencial distinguir claramente entre o problema de adquirir uma boa resposta do veículo (ou seja, uma resposta rápida e estável a ações de controle), e o problema de criar uma boa sensação ao motorista (“driver feel”).

2.16 - Testes

Dixon [6] informa que testes em veículo são executados por diversas razões, por exemplo, para confirmar que um projeto proposto é aceitável, testar mudanças propostas, ou testar a teoria na esperança de adquirir entendimento que possa levar a um melhor comportamento do veículo. Este autor subdivide os testes em:

(1) Malha Aberta

- (a) Controle de posição
- (b) Controle de forças
- (c) Resposta a distúrbios

(2) Malha Fechada

- (a) Desempenho de tarefas
- (b) Avaliação subjetiva
- (c) Resposta a distúrbios

Controle de posição são os testes em malha aberta que medem a resposta do veículo a um dado comando no volante, como degrau, rampa, senoidal ou aleatório.

Testes de **controle de forças** não são usuais para veículos terrestres, apesar de comuns para aeronaves. **Resposta a distúrbios** inclui testes como exposição a ventos laterais. Para testes em malha fechada podem ser criadas **tarefas específicas**, tais como executar uma manobra à máxima velocidade ou no menor tempo, dando uma medida objetiva do desempenho em velocidade ou tempo. Exemplos são os testes de mudança de faixa (“lane change”), máxima velocidade em dupla mudança de faixa, testes de entrada e saída de curvas e velocidade em slalom. Alternativamente, na **avaliação subjetiva**, a opinião do motorista sobre o comportamento do veículo é solicitada.

Um ponto interessante levantado por Dixon [6] é que, apesar de ser possível correlacionar notas de motoristas de teste com medidas objetivas de desempenho e com o projeto detalhado do veículo, isto não é fácil e nem sempre é realizado com sucesso. Ele sustenta que, para entender dirigibilidade e relacioná-la a parâmetros de projeto, é usual utilizar-se vários testes-padrão em malha aberta. Estes testes são de uma natureza relativamente simples de modo que a resposta do veículo é medida objetivamente e pode ser diretamente relacionada ao projeto.

2.17 - Distância de Parada

Pode ser definida como a distância percorrida entre o momento em que um perigo é reconhecido e o momento em que o veículo pára completamente. Segundo Bosch [12], a distância de parada é a soma das distâncias percorridas durante o tempo de reação do motorista t_r , o tempo de resposta inicial do freio t_a (à velocidade constante v), e o tempo ativo de frenagem t_w . O máximo retardamento a é obtido no período de aumento de pressão t_s . De forma alternativa, metade do período de aumento de pressão pode ser considerado com máxima desaceleração.

Os períodos nos quais o freio não atua são combinados para formar o tempo perdido t_{vz} :

$$t_{vz} = t_r + t_a + \frac{t_s}{2}$$

Os limites superiores no retardamento são determinados pelo coeficiente estático de atrito entre os pneus e a superfície de rodagem. A diferença entre o tempo/distância de parada e o tempo/distância de frenagem é definida por t_{vz} , ou $v \cdot t_{vz}$. O período de atuação do freio é composto da soma $t_a + t_s/2$.

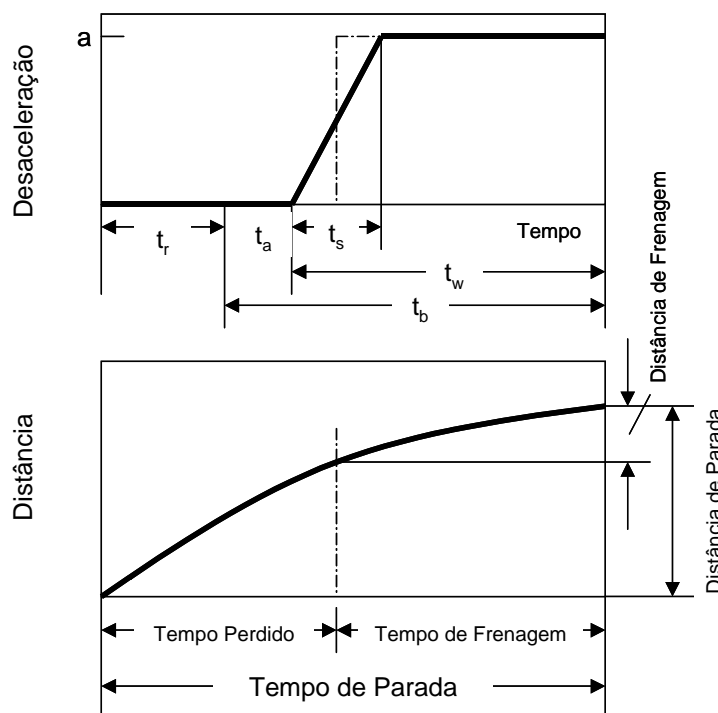


Fig. 2.26 – Desaceleração e Distância de Parada [12]

2.17.1 - O tempo de reação

O tempo de reação é o período que se passa entre o reconhecimento do objeto, a decisão de frear e o tempo que leva para o pé atingir o pedal de freio. O tempo de reação não é um valor fixo, ele varia de 0,3s a 1,7s, dependendo do motorista e de fatores externos.

2.17.2 - Os tempos de resposta e aumento de pressão

Os tempos de resposta e aumento de pressão, t_a e t_s , são determinados pelo mecanismo de atuação e transmissão de força e pela condição dos freios no momento em que eles são aplicados.

2.18 - Resistência ao rolamento

A resistência ao rolamento dos pneus é uma força que atua contra o movimento do veículo e é particularmente significativa em baixas velocidades e pavimentos irregulares. A força de resistência ao rolamento faz com que parte da potência aplicada à roda seja convertida em calor dentro do pneu. Os seguintes mecanismos são responsáveis pela origem da resistência ao rolamento:

- a. perda de energia devido à deflexão das laterais do pneu perto da área de contato com o solo;
- b. perda de energia devido à deflexão dos elementos da banda de rodagem;
- c. escorregamento (“slip”) do pneu nas direções longitudinais e laterais;
- d. deflexão da superfície da pista;
- e. arraste aerodinâmico dentro e fora do pneu;
- f. perda de energia em lombadas.

A resistência ao rolamento total é a soma da resistência de todas as rodas:

$$R_r = R_{rd} + R_{rt} = f_r \cdot W$$

onde:

R_{rd} : resistência ao rolamento das rodas dianteiras

R_{rt} : resistência ao rolamento das rodas traseiras

f_r : coeficiente de resistência ao rolamento

W: peso do veículo

2.18.1 – Fatores que afetam a resistência ao rolamento

O coeficiente f_r é um fator adimensional que expressa os efeitos das complicadas e interdependentes propriedades do pneu e do solo. Os principais fatores que o afetam são descritos abaixo:

2.18.1.1 - Temperatura do Pneu

Quando um pneu frio começa a rodar em um veículo sua temperatura aumentará e a resistência ao rolamento diminuirá até um certo valor, permanecendo constante a partir daí. Nos testes de pneus é comum aquecer-se os pneus por 20 minutos ou mais para possibilitar medições mais seguras.

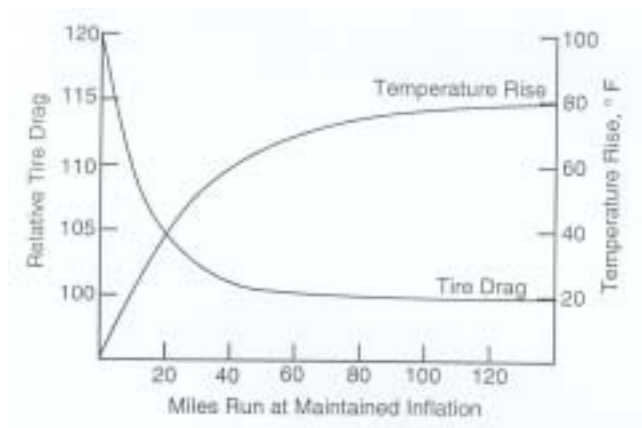


Fig. 2.27 – Temperatura relativa do pneu e RR durante aquecimento [13] apud [9]

2.18.1.2 – Pressão de Inflação

A figura abaixo mostra como o coeficiente de resistência ao rolamento f_r muda de acordo com o pavimento e a pressão. Enquanto que na areia a medida

adequada para diminuir a resistência ao rolamento é abaixar a pressão, em pavimentos como concreto e solo duro é necessário aumentá-la.

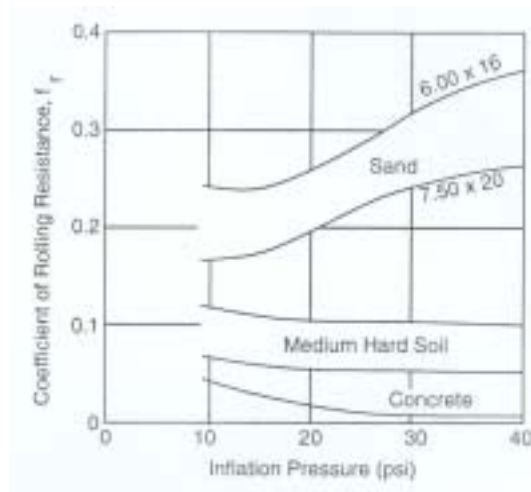


Fig. 2.28 - Coeficiente de RR versus pressão de inflação [9]

2.18.1.3 – Velocidade

O coeficiente f_r é diretamente proporcional à velocidade do veículo. A influência da velocidade é mais pronunciada quando a velocidade é combinada com baixa pressão de inflação. A figura abaixo mostra a evolução de f_r com a velocidade. O grande aumento de f_r a partir de certa velocidade ocorre devido à formação de uma onda de alta energia formada na carcaça do pneu, atrás da área de contato com o solo.

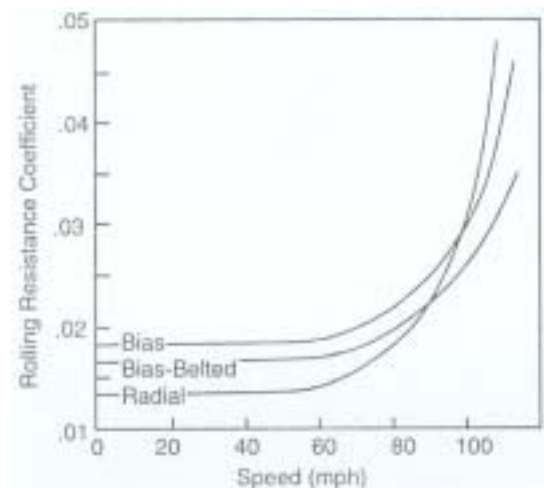


Fig. 2.29 – RR versus velocidade [9]

2.18.1.4 – Material e Projeto do Pneu

Gillespie [9] define que os materiais e espessuras das laterais e da banda dos pneus determinam a rigidez e a perda de energia no pneu rodante. Pneus carecas têm coeficientes até 20% menores que pneus novos. Pequenas espessuras, por outro lado, aumentam o coeficiente em até 25%. O material dos cordões nas laterais promovem pequenos efeitos na resistência ao rolamento enquanto que o ângulo dos cordões e a construção (diagonal ou radial) têm influência significativa.

2.18.1.5 – Deslizamento (“slip”)

Rodas transferindo forças trativas ou frenantes conferem maior resistência ao rolamento devido ao deslizamento na área de contato. As forças geradas em curva produzem os mesmos efeitos.

2.18.2 – Coeficientes Típicos

Devido à complexidade da interação entre os fatores que influenciam a resistência ao rolamento é virtualmente impossível deduzir uma fórmula que leve em

conta todas as variáveis. Algumas relações para f_r foram propostas por Gillespie [9], tais quais:

$$f_r = \frac{R_r}{W} = C \cdot \frac{W}{D} \sqrt{\frac{h_t}{w}}$$

onde:

R_r : força de resistência ao rolamento

W : peso na roda

C : constante refletindo a perda e características elásticas do material do pneu

D : diâmetro externo

h_t : altura da seção do pneu

w : largura da seção do pneu

Desta relação conclui-se que pneus largos e baixos (relação h/w baixa) promovem menor resistência ao rolamento.

Outras expressões são propostas, e naturalmente a precisão de seus resultados é limitada pela influência dos fatores negligenciados. Gillespie [9] propõe, a nível elementar, coeficientes f_r constantes para diferentes tipos de pavimento:

Tabela I – Coeficiente f_r para diferentes veículos e pavimentos [9]

| <i>Tipo de Veículo</i> | <i>Concreto</i> | <i>Superfície com dureza mediana</i> | <i>Areia</i> |
|----------------------------|-----------------|--------------------------------------|--------------|
| Veículos de passeio | 0,015 | 0,08 | 0,3 |
| Caminhões pesados | 0,012 | 0,06 | 0,25 |
| <i>Tratores</i> | 0,02 | 0,04 | 0,2 |

A baixas velocidades é proposta a expressão:

$$f_r = 0,01 \cdot \left(1 + \frac{V}{100}\right), \text{ onde } V: \text{ velocidade em milhas por hora};$$

O Instituto de Tecnologia de Stuttgart [9] desenvolveu a seguinte equação para a resistência ao rolamento numa superfície de concreto:

$$f_r = f_0 + 3,24 \cdot f_s \cdot \left(\frac{V}{100}\right)^{2,5}$$

onde:

V: velocidade em milhas por hora;

f_0 : coeficiente básico;

f_s : coeficiente do efeito de velocidade.

Os coeficientes f_0 e f_s dependem da pressão de inflação e são determinados pelo gráfico abaixo:

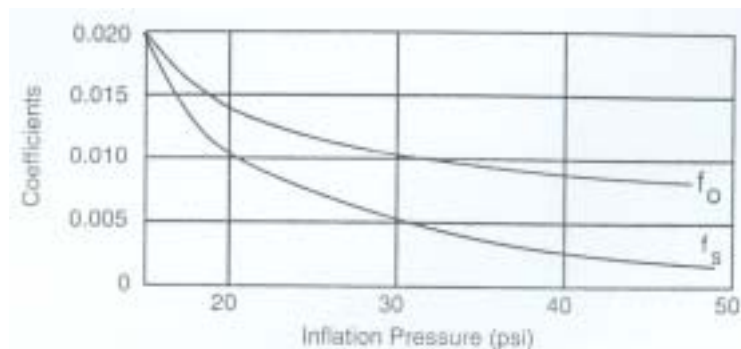


Fig. 2.30 – Coeficientes f_0 e f_s [9]

A resistência ao rolamento tem seu valor mínimo em superfícies duras, lisas e secas. Em superfícies molhadas a alta resistência ao rolamento se deve provavelmente à menor temperatura de operação do pneu, o que reduz sua flexibilidade.

2.19 – Carga Total da Pista

Gillespie [9], define que a soma da resistência ao rolamento com as forças aerodinâmicas (e forças devido à inclinação do pavimento, se presentes) constituem a carga de propulsão para o veículo, e é normalmente definida como a “**carga da pista**” ou **carga resistiva**:

$$R_{CP} = f_r \cdot W + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A \cdot V^2 + W \cdot \text{sen } \theta$$

A potência resistiva é dada pelo produto da equação anterior com a velocidade do veículo:

$$P_R = f_r \cdot W \cdot V + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A \cdot V^3 + W \cdot V \cdot \text{sen } \theta$$

Esta equação revela que, em altas velocidades, pequenos aumentos de velocidade resultam em grande aumento da potência requerida, com direta penalização da economia de combustível. É difícil prever com exatidão as melhorias de consumo advindas da diminuição das cargas resistivas devido à incerteza sobre a maneira que os carros são dirigidos.

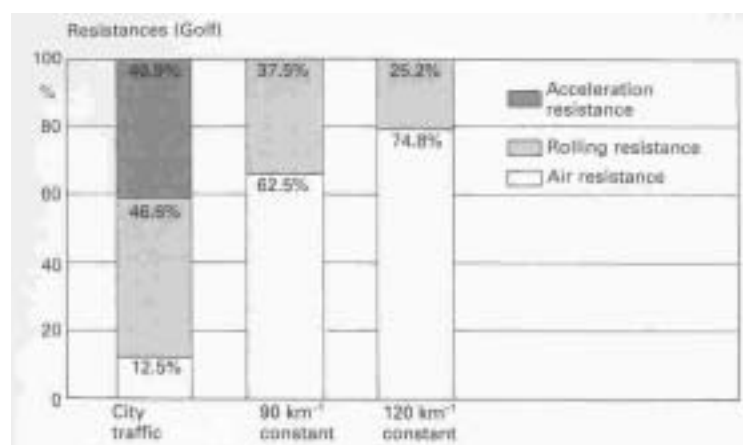


Fig. 2.31 – Participação relativa das forças resistivas num automóvel Golf em condições de rodagem distintas [8]

2.20 - Uniformidade

Como o processo produtivo de um pneu não é perfeito, este é produzido com variações de massa, espessura e de rigidez ao longo de sua circunferência e largura. Isto causa **variações de força** e **excentricidade**, cujo conjunto de medidas quantitativas é chamado de uniformidade. A rigor, estas medidas caracterizam a “não-uniformidade” de um pneu.

2.20.1 – Variações de Força

Para ocorrer qualquer variação de força é preciso aplicar uma carga ao pneu. A máquina de uniformidade (ver seção 4.2.4) mede dois tipos de variação de força: **Radial** e **Lateral**. As variações de força radial e lateral são medidas em ambas as direções (rotação horária e anti-horária do pneu).

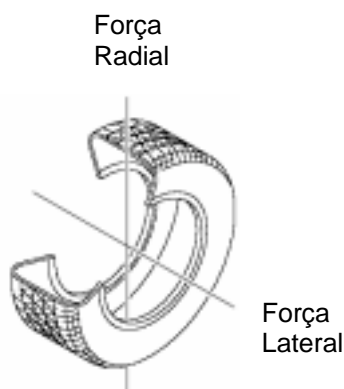


Fig. 2.32 – Parâmetros de força medidos

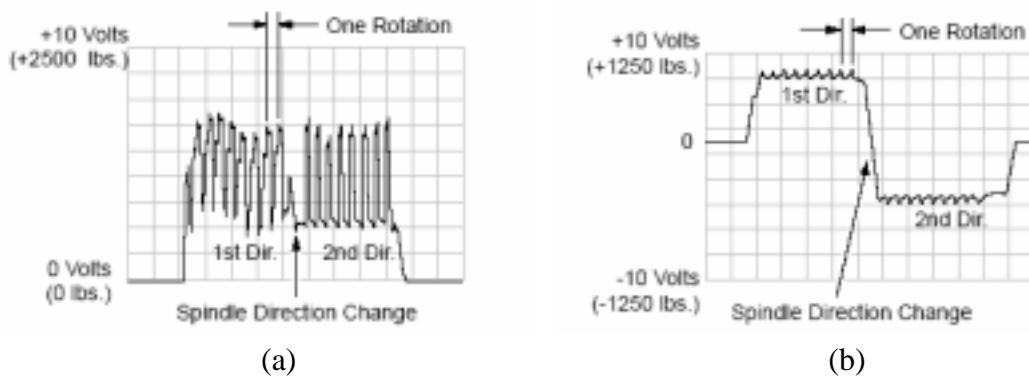


Fig. 2.33 – Variação de força radial (a) e lateral (b)

A variação de força “Lateral Shift” é definida como a média da força lateral para cada direção. Tipicamente, um “Lateral Shift” é positivo numa direção e negativo na outra.

A **conicidade** é uma força lateral, exercida sempre em uma só direção, originada pela forma “tronco de cone” que alguns pneus assumem. Esta forma ocorre pela descentralização da montagem da cinta estabilizadora do pneu. A conicidade é uma das causas de desvio direcional dos veículos. É definida como o “Lateral Shift” horário mais o anti-horário dividido por dois.

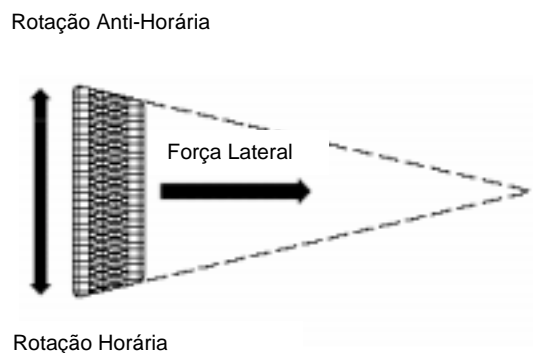


Fig. 2.34 – Conicidade

2.20.2 – Excentricidade

A excentricidade se refere à variação na circularidade, ou mudança na distância do centro do pneu até a banda de rodagem, enquanto o pneu é rotacionado. Importantes características são a excentricidade radial e a lateral.

2.20.2.1 - Excentricidade Radial

É a variação no raio livre (não deformado) do pneu.

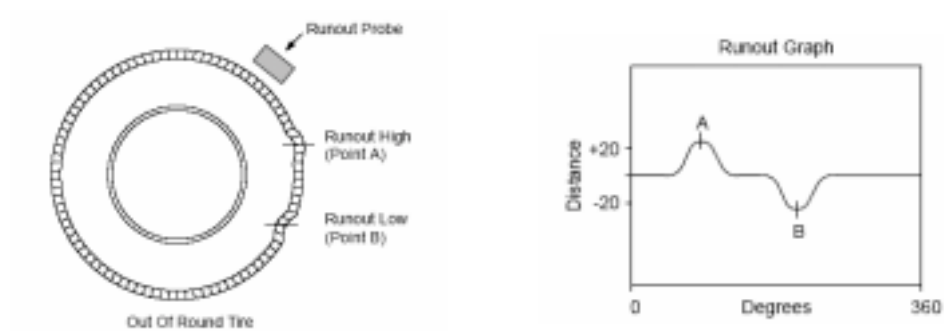


Fig. 2.35 – Excentricidade Radial

2.20.2.2 – Excentricidade Lateral

É a variação na geometria da parede lateral quando o pneu está inflado, sob carga e girando.

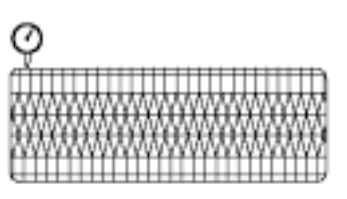


Fig. 2.36 – Excentricidade Lateral

2.20.3 - Desbalanceamento

Segundo Stoll [8], o desbalanceamento U ocorre quando há uma distribuição desigual de massa no pneu, fazendo com que as forças centrífugas resultantes não sejam iguais. Devido ao fato de que esta distribuição desigual não ocorre somente através da circunferência do pneu, mas também lateralmente, deve-se diferenciar o desbalanceamento estático do dinâmico (ver figura abaixo). Este desbalanceamento é calculado em magnitude e direção em máquinas balanceadoras e é eliminado pela adição de pesos balanceadores nas flanges internas e externas do aro da roda.

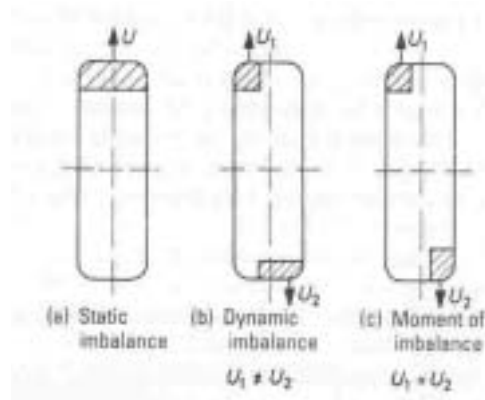


Fig. 2.37 – Diferentes formas de desbalanceamento U : (a) estático, (b) dinâmico. O desbalanceamento está eliminado em (c) [8].

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A bibliografia relativa aos requisitos de segurança é predominantemente constituída de normas estabelecidas por órgãos governamentais ou entidades reguladoras com a competência outorgada. Os requisitos de desempenho são estabelecidos pelas montadoras e a análise do desempenho tem sido objeto de pesquisa de vários autores.

3.1 –Requisitos de Segurança

A crítica mais significativa aos requisitos de segurança vigentes para pneus ocorreu recentemente nos Estados Unidos pela NHTSA, que, após análise detalhada do problema de segurança envolvendo pneus identificou nas normas existentes pontos a melhorar e introduziu novos itens mandatórios nas normas oficiais. Esta análise se concretizou em uma nova proposta para tais regulamentos, que se tornou lei válida no território americano a partir de 18 de novembro de 2002.

NHTSA [1], em seu documento “**Proposed Rule for Federal Motor Vehicle Safety Standards**” detalhou a proposta de um novo requisito de segurança para pneus, resumida em uma única norma FMVSS aplicável a novos pneus para uso em veículos com carga máxima (GVWR) de 4536 kg ou menos. Na elaboração desta proposta foi colocada uma ênfase maior na melhoria da habilidade dos pneus em suportar efeitos de **superaquecimento, baixa pressão e envelhecimento**. NHTSA examinou a possível contribuição que haveria ao se modificar os testes existentes, assim como de se propor testes adicionais. A nova norma para pneus, a **FMVSS 139**, contém os seguintes requisitos de desempenho de pneus: Dimensão do Pneu (igual à norma anterior), Resistência à Velocidade, Resistência à Carga, Impactos Danosos da Pista, Resistência ao Detalonamento, Desempenho à Baixa Pressão e Efeitos de Envelhecimento.

Os testes propostos de **Resistência à Velocidade e Resistência à Carga** substituiriam os testes vigentes até então com uma combinação mais rígida de parâmetros, tais como **temperatura ambiente, carga, pressão de inflação, velocidade e duração**. Ambos os testes especificaram temperatura ambiente de 40° C. A norma anterior especificava 38° C. A agência governamental argumenta que tal aumento visou refletir a temperatura típica durante o dia nos estados do Sul e Sudeste dos EUA nos meses de verão, pois segundo FARS (2002) apud NHTSA [1] as mais altas taxas de problemas com pneus foram detectadas nestes locais. NHTSA propôs o novo teste de **Resistência à Velocidade** com uma carga aplicada ao pneu menor que a anterior (85% da capacidade de carga do pneu contra 88%). Isto foi feito para ampliar a margem de segurança dos pneus em serviço quanto à carga, pois faz parte das normas americanas estabelecer que a carga submetida a um pneu em um veículo não pode ultrapassar a carga do teste de Resistência à Velocidade. Segundo NHTSA esta alteração não afetou a severidade do teste, pois a falha do pneu ocorreria mais em função da velocidade e da pressão do que de variações de carga entre 80 e 90%. Este teste também especificou **velocidades** (140, 150 e 160 km/h) **substancialmente maiores** que as especificadas na norma anterior, FMVSS 109 (120, 128 e 136 km/h). NHTSA [1] sustenta que as velocidades assim especificadas refletem melhor os limites superiores das velocidades praticadas nas rodovias. No teste para **Resistência à Carga** a nova norma especificou uma velocidade **50% maior** (120 km/h) do que a especificada na FMVSS 109 (80 km/h). Este aumento se deveu ao fato de que a velocidade de 80 km/h era apropriada para pneus diagonais, que eram os mais usados em 1968, quando a norma vigente foi criada. Adicionalmente, os limites atuais de velocidade nas rodovias interestaduais americanas é de 75 mph, ou 120 km/h. As cargas aplicadas neste teste foram aumentadas em 10% para, segundo a NHTSA, refletir a realidade, pois naquele mercado está se popularizando o uso de caminhões leves e vans, que apresentam um aumento no volume disponível para carga. O teste de Resistência à Carga especificou uma **duração 6 horas maior** (40h no total) que a especificada na norma anterior (34 h no total). Na velocidade de teste especificada (120 km/h), a distância a ser percorrida é de 4800 km, quase **o dobro** da distância acumulada no teste anterior (2720 km a 80 km/h). A NHTSA não justificou este aumento na duração do teste.

Os testes propostos para **Impactos Danosos da Pista e Resistência ao Detalonamento** foram baseados na prática recomendada da SAE J1981 e no Teste de Perda de Ar da Toyota, respectivamente. Estes testes substituiriam os anteriores Resistência à Penetração e Resistência ao Detalonamento da FMVSS 109 e estão descritos no Capítulo 4 deste trabalho.

Dois outros testes foram criados: **Desempenho a Baixa Pressão e Efeitos de Envelhecimento**. Segundo a NHTSA estes testes foram criados para responder a preocupações levantadas pelo Congresso Americano após ser apontado que os testes em vigor não avaliam adequadamente o comportamento dos pneus à baixa pressão ou quando expostos ao calor, fator este que acelera o envelhecimento do pneu. Em 2000, o órgão da NHTSA, “**Office of Defects Investigation**”, em sua investigação número EA00-023 relatou que a baixa pressão e o calor foram indicados como fatores que contribuíram para a falha de pneus Firestone “Wilderness” e “ATX” nos Estados Unidos.

Para o teste de Desempenho à Baixa Pressão foram propostos dois testes baseados nas análises de dados da NHTSA. Ambos os testes utilizam pneus com pressão reduzida, como por exemplo 20 psi para pneus P-métricos (veículos de passageiros), que é o limite de ativação da lâmpada de aviso no sistema de monitoramento de pressão (TPMS). Para testar a resistência a efeitos de envelhecimento a NHTSA propôs três testes que avaliariam a durabilidade a longo prazo do pneu. Os três testes focam na resistência ao descascamento, requisitos de durabilidade a longo prazo sob carga e envelhecimento. Ficou para uma decisão posterior¹ a escolha de qual dos dois testes seria adotado para classificar o Desempenho a Baixa Pressão e qual dos três testes seria adotado para classificar os Efeitos de Envelhecimento.

Adicionalmente à revisão dos procedimentos foram levantados os planos futuros para a segurança de pneus, tais como o uso da análise a laser (“shearography

¹ Até o momento não verificada.

analysis”) para avaliar as condições de pneus sujeitos aos procedimentos de teste acima.

Foi iniciado, mas não completado, o estudo dos custos gerais envolvidos com esta revisão dos procedimentos de segurança dos pneus.

A NHTSA estimou que com as mudanças nos requisitos de segurança seriam salvas 27 vidas por ano e diminuídos 667 feridos. Estimou também que o custo unitário de um pneu cresceria US\$ 3 para atender aos requisitos propostos, mas que apenas 32,8% de todos os pneus necessitariam de melhorias para passar nos testes de Resistência à Velocidade e Resistência à Carga, os mais significativos. O custo anual total estimado para estes testes foi de US\$ 282 milhões e o custo para cada vida salva seria de US\$ 7,2 milhões.

Muitos custos não puderam ser estimados, e levantou-se a preocupação de que esta proposta gerasse custos muito superiores à outras iniciativas normativas de segurança já praticadas pela NHTSA. Devido à incerteza na estimativa de custos e benefícios a agência procurou obter comentários e sugestões do público que fossem úteis à finalização desta norma de segurança.

Adicionalmente à revisão dos requisitos previamente citada, NHTSA [14], em seu documento “**Tire Pressure Monitoring Systems, Final Rule**” estabeleceu que todos os veículos com carga máxima de 4536 kg ou menos deverão possuir um Sistema de Monitoramento de Pressão dos Pneus (TPMS), devendo as montadoras seguirem um plano de transição de implementação no período de 31 de outubro de 2003 a 1 de novembro de 2006.

MacDicken [15], em seu artigo “**A Guarantee of Safety?**” argumenta que a revisão aos requisitos de segurança efetuada pela NHTSA é falha, pois não considera a responsabilidade de manutenção que os donos e usuários de veículos devem ter com os seus pneus. O autor cita que o sistema TPMS é um dos maiores problemas para a educação dos consumidores, pois desde que a norma criada estabelece que a

luz de advertência não deve acender antes de 30% abaixo da pressão especificada, isto seria um estímulo para os motoristas dirigirem com a pressão muito abaixo da recomendada. Ou seja, isto criaria o efeito oposto ao desejado pela nova lei. É mostrado pelo autor que outros países dirigem o controle ao consumidor, não à indústria de pneus, como é o caso do Reino Unido, onde o governo efetua verificações aleatórias na pressão dos pneus, impondo penalidades aos infratores. O autor combate a iniciativa do enrijecimento dos requisitos de segurança argumentando que os fabricantes de pneu deverão gastar milhões de dólares para agregar mais segurança a um produto que já tem um incrível histórico de segurança. Ele sustenta que os motoristas de hoje dirigem mais rápido e maiores distâncias que 30 anos atrás graças à tecnologia avançada utilizada na indústria de pneus, e que a diminuição da responsabilidade do motorista advinda desta lei terá um contraponto no preço maior que ele pagará por este componente.

3.2 – Requisitos de Desempenho

A discussão dos requisitos de desempenho a seguir apresentada decorre de pesquisa bibliográfica sobre a análise da dirigibilidade e da subjetividade das avaliações.

Moon et al. [16] em seu artigo **“Modeling of Human Response from Vehicle Performance Characteristics Using Artificial Neural Networks”** propuseram o uso de um método para prever a interpretação subjetiva da dirigibilidade de veículos. Foram efetuadas medições objetivas de características dinâmicas selecionadas de alguns veículos e, posteriormente, foi solicitado a avaliadores comuns dirigir e avaliar estes mesmos veículos. De posse dos dados objetivos coletados, os autores aplicaram técnicas de regressão linear múltipla e redes neurais artificiais para criar e refinar modelos das respostas humanas subjetivas. Comparando-se os resultados subjetivos simulados a partir dos modelos, e os reais, registrados pelo avaliadores, concluiu-se que é possível construir modelos para simular avaliações humanas por meio de dados objetivos, economizando-se

tempo e dinheiro no desenvolvimento de novos veículos e no estudo de fatores humanos. Foi possível perceber neste artigo que a iniciativa de prever notas de avaliação reconheceu a importância da subjetividade.

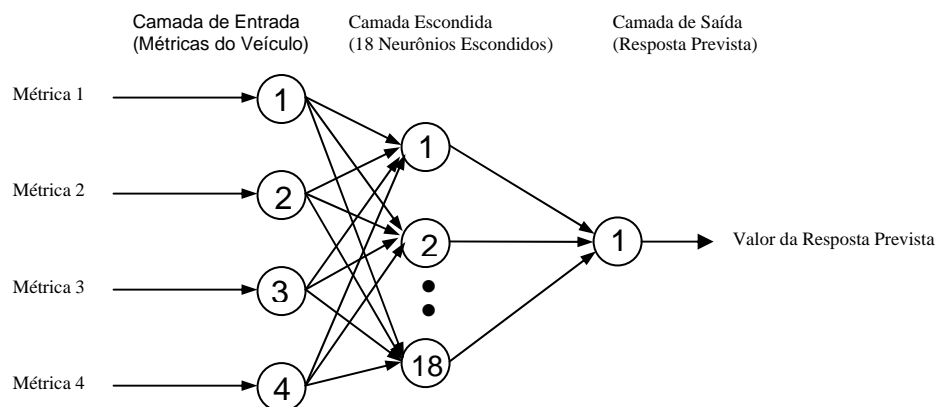


Fig. 3.1 - Forma final da rede neural [16]

Na mesma linha de pesquisa, King et al. [17] em “**Identification of Subjective-Objective Vehicle Handling Links Using Neural Networks for the Foresight Vehicle**” abordaram a aplicação de redes neurais para entender as relações entre notas subjetivas dos motoristas e características de desempenho mensuráveis do veículo. Os autores procuraram abordar uma metodologia baseada em algoritmos genéticos para encontrar relações não-lineares entre a dirigibilidade subjetiva e objetiva. Um fator interessante foi que estas técnicas permitiram a entrada de ruídos inerentes ao processo de avaliação dos motoristas, como por exemplo as distrações. Assim como no artigo anterior, o processo se baseia em dados objetivos, alimentando o programa para a obtenção dos dados subjetivos. A conclusão alcançada foi de que os resultados desta simulação se converteram em recomendações práticas de projeto para a obtenção de boas notas subjetivas de dirigibilidade. Foi constatado que os valores objetivos ideais estavam de acordo com os critérios que o engenheiro de teste experiente tende a favorecer.

Outro artigo trata da correlação entre avaliações subjetivas e objetivas de dirigibilidade. Data; Pascali e Santi [18] em “**Handling Objective Evaluation Using**

a **Parametric Driver Model for ISO Lane Change Simulation**” propuseram a correlação da qualidade da dirigibilidade, medida por impressões subjetivas dos motoristas, com parâmetros objetivos, medidos em testes de pista selecionados. Foi aplicado um método estatístico que gerou equações (chamadas índices parciais), que por sua vez eram alimentadas com parâmetros objetivos e os resultados eram previsões de notas subjetivas. Foi verificado que um dos testes de pista escolhidos, o teste ISO de mudança de faixa, influenciava as equações mais fortemente que os outros testes. Mais ainda, como eram testes que dependiam da habilidade dos motoristas, estavam sujeitos a variações na sua execução que poderiam gerar grande dispersão nos resultados, podendo mascarar a qualidade da dirigibilidade simulada. Foi feito então um estudo para gerar um procedimento de execução de manobras robusto para o teste ISO, adaptável a vários tipos de veículos. Os autores sustentam que o procedimento a que chegaram teve sucesso em superar os problemas anteriormente verificados.

A influência dos pneus na dirigibilidade e estabilidade dos veículos foi estudada por Allen et al. [19] em “**The Effect of Tire Characteristics on Vehicle Handling and Stability**”. Foi utilizado um programa de simulação previamente validado para verificar as conseqüências de diferentes escolhas de pneus na estabilidade de veículos. Após a análise dos resultados constatou-se que as características dinâmicas dos pneus, tais como **rigidez de curva** (“cornering stiffness”) e **coeficiente máximo de atrito lateral** são um fator dominante na estabilidade lateral e direcional dos veículos. Examinando-se estas características após seu cálculo na simulação concluiu-se que o seu comportamento é determinado pelo tamanho e a série² do pneu, e que pneus largos e com séries mais baixas tendem a dar respostas mais agressivas (maiores acelerações laterais). Paralelamente, em veículos onde a estabilidade lateral e direcional é marginal, como caminhões leves e utilitários, verificou-se que a seleção do pneu é um fator crítico.

Outros autores propõem a utilização de um método totalmente objetivo para a determinação das características de posicionamento do veículo em linha reta (“On-

² Série é um número que denota a altura da lateral do pneu, representada pela porcentagem da largura do pneu. Quanto menor este número, mais próxima a roda estará do solo, quanto maior, mais distante.

center”), que é um dos parâmetros avaliados em dirigibilidade. Higuchi; Sakai [20] em “**Objective Evaluation Method of On-Center Handling Characteristics**” revelam que é possível sair da análise completa da dirigibilidade em **malha fechada** e substituir o motorista por uma máquina para quantificar a habilidade de posicionamento central do veículo. Eles propõem a utilização de um teste conduzido em uma pista reta e lisa, a velocidade constante, onde um atuador mecânico aplica ângulos senoidais de baixa frequência no volante. No decorrer do teste são gravados o ângulo e o torque do volante, a **velocidade de guinada**, a **velocidade de rolagem**, a **aceleração lateral** e a velocidade do veículo. Os autores informam que estes dados permitem encontrar parâmetros como ganho, não-linearidade e atraso de tempo. Destes parâmetros objetivos, determinaram facilmente as ações para melhorar o desempenho em linha reta do veículo.

Naudé; Steyn [21] propõem em “**Objective Evaluation of the Simulated Handling Characteristics of a Vehicle in a Double Lane Change Manoeuvre**” um teste objetivo para outra característica de dirigibilidade tradicionalmente avaliada por notas subjetivas, a manobra de mudança dupla de faixa, ou teste do alce “*elk test*”. Os autores informam que a mudança dupla de faixa era avaliada somente por métodos subjetivos, devido à falta de critérios objetivos eficientes. Foi proposto então um método objetivo simulado em computador, que posteriormente foi comparado à medições experimentais em veículo, com boa correlação. A vantagem adicional à quantificação proporcionada pelo método objetivo foi a antecipação dos resultados pelo uso da simulação, vital para diminuir o tempo de desenvolvimento e economizar recursos. Outros autores tais como Gim; Nikravesch [22] e Garrott; Heydinger [23] desenvolveram com o mesmo objetivo outros modelos do veículo possibilitando simulações em computador. Modelos de pneus para a análise preditiva de dirigibilidade podem ser encontrados em Kao; Loh e Greenberg [24] e Araki; Sakai; Yanase [25].

A simulação de parâmetros reais com influência no conforto de veículos foi feita com boa correlação por Franceschini; Vilela; Mesquita Jr. [26] em “**Automotive Suspension Calibration**” e posteriormente foi feita uma conversão

destes parâmetros em notas subjetivas. A avaliação de veículos em pista comprovou a eficiência do modelo.

Em outro trabalho, “**Vehicle Dynamics Simulation Correlation with Field Maneuvers**”, Vilela [27] executa uma simulação de características de dirigibilidade e as correlaciona com sucesso com medições reais em veículo. Ficou para uma próxima etapa uma extensão do trabalho de simulação para a previsão de notas subjetivas.

Miles [28], em “**Truth be Told**” por outro lado debate o uso intenso de ferramentas de simulação para a determinação das características de dirigibilidade e conforto de um veículo. Ele sustenta que o trabalho de engenharia em veículos envolve muito mais abordagens para a solução de problemas que no caso da engenharia de motores, onde os critérios de projeto e de desempenho são bem definidos. No contexto da dinâmica veicular, especialmente o conforto de rodagem é um fator subjetivo. O autor defende que caso fosse possível simular todos os aspectos da dirigibilidade e conforto não existiriam carros medíocres com relação a estes aspectos. O que diferencia a qualidade de dirigibilidade e conforto são características muito difíceis de medir e simular, ou que consomem muito tempo para estas tarefas. A ausência de dados de pneus seria um fator que, segundo o autor, complica a realização de uma simulação dinâmica confiável do veículo. É lembrado que ferramentas de simulação não evitaram que o veículo Mercedes Classe-A tivesse problemas no “teste do alce”, assim como estas ferramentas não evitaram que alguns carros tivessem projetos de suspensão complicados, quando na prática se verificou que sistemas mais simples poderiam ser utilizados. Em suma, o autor procura valorizar a análise do engenheiro de desenvolvimento, que seleciona problemas de acordo com sua experiência.

Uma nova tecnologia para redução da distância de parada de veículos de passageiros foi proposta por Rieth; Eberz [29], em “**Reduction of Stopping Distance Through Chassis System Networking**”. Esta tecnologia consistiu de um

sistema integrado de componentes, otimizado para reduzir a distância de parada³ de um veículo. Os autores explicam que a distância de parada é composta da distância de **reação do motorista** (percepção até decisão), da distância de **crescimento das forças de frenagem** (operação do pedal) e da distância de **frenagem** propriamente dita. Segundo Rompe; Breuer (1999) apud Rieth; Eberz [29] uma redução de mero 0,5 segundo no tempo de reação do sistema veículo-motorista poderia evitar 50% de todas as colisões traseiras e acidentes em cruzamentos, assim como 30% de todos os acidentes de tráfego. O estudo consistiu portanto em reduzir a distância de parada em **20%** através de duas etapas, a primeira voltada à redução da distância de frenagem do veículo a 100 km/h de 38 m para 30 m e a segunda voltada para a redução da distância de reação do motorista e para a redução da distância de crescimento das forças de frenagem, utilizando-se um sistema inteligente de freio. O sistema proposto (Fig. 3.2) era composto de (1) freios eletro-hidráulicos e sensores nos pedais de aceleração e freio para monitorar as reações do motorista; (2) suspensão a ar, controlada eletronicamente; (3) sensores de distância (radares) e (4) pneus conceituais com sensor de torção da parede lateral:

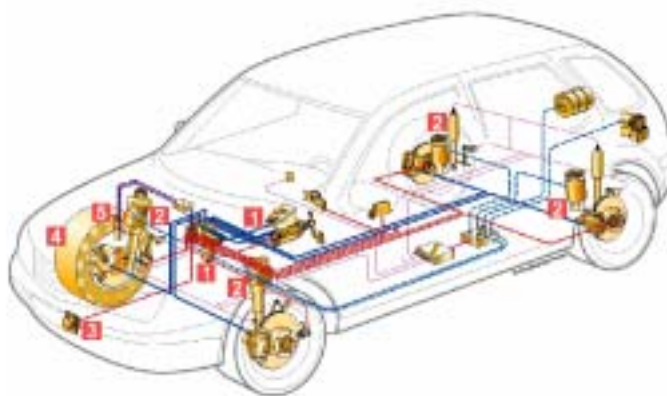


Fig. 3.2 – Componentes para a redução da distância de parada e suas conexões [29]

O projeto dos pneus de Rieth e Eberz, voltado ao atendimento da redução da distância de parada, se concentrou na otimização das suas propriedades de frenagem

³ Aqui foi definida como a distância percorrida pelo veículo desde a percepção do perigo pelo motorista até a parada total, enquanto que SAE [48] e GMB a definem como a distância percorrida do início da aplicação do freio até a parada total.

em piso seco, ficando a frenagem em piso molhado como segunda prioridade. Foi utilizada a dimensão 225/50 R16 e foram otimizados o **contorno do “footprint”** por um método de elementos finitos (para uniformizar a pressão na área de contato durante a frenagem), o **desenho da banda de rodagem** (para aumentar a rigidez do pneu na direção de frenagem) e o **composto de borracha**. O composto de borracha na lateral do pneu foi magnetizado, de forma a interagir com um sensor de torção e possibilitar a medição das forças laterais e longitudinais do pneu. Estes dados de força, por sua vez, alimentam o módulo de ABS para que seja assegurado o balanceamento do freio traseiro e assim a estabilidade lateral do veículo em frenagens severas.

Após medição através de testes em veículo os autores concluíram que o sistema é eficiente para reduzir a distância de parada. Porém, como o desenvolvimento do pneu foi focado unicamente nesta característica, é necessário que se verifique ainda a sua qualidade quanto a outras características, tais como dirigibilidade, conforto e ruído. É muito provável que o potencial completo de contribuição do pneu para a distância de parada não seja utilizado em veículos de produção seriada. Um sistema semelhante, contendo radares como sensores foi proposto por Kodaka et al. [30] em **“Rear-End Collision Velocity Reduction System”**.

Grover; Bordelon [31] em **“New Parameters for Comparing Tire Rolling Resistance”** introduzem uma nova metodologia para comparar a resistência ao rolamento de pneus. Ao contrário do método usual (norma SAE J1269 [63]), que especifica a medição de RR numa condição padrão de carga, pressão e velocidade, este novo método permite a coleta de dados à múltiplas velocidades, para cada condição de carga e pressão de inflação do pneu. Visto que a RR também depende da velocidade, os autores conseguem propor um parâmetro que contém embutida a informação das várias velocidades de uso dos veículos, tanto no uso urbano como em rodovias. Segundo os autores, esta abordagem permite, além da comparação de diferentes pneus, a especificação de requisitos de projeto para os mesmos. Este

trabalho teve importância na criação da nova norma SAE J2452: “Stepwise Coastdown Methodology for Measuring Tire Rolling Resistance” [32].

Nielsen; Sandberg [33] propõem um modelo para prever a **resistência ao rolamento** de pneus em “**A New Model for Rolling Resistance of Pneumatic Tires**”. O valor de resistência ao rolamento relaciona-se diretamente ao consumo de combustível de um determinado veículo assim como ao seu nível de emissões de poluentes. Segundo Sandberg (2001), Kiencke; Nielsen (2000) apud Nielsen; Sandberg [33] uma das aplicações da previsão do consumo de combustível é a otimização do projeto do trem de força do veículo. O modelo analítico proposto revela que o **coeficiente de resistência ao rolamento** é uma função da temperatura do pneu e da velocidade do veículo. Os dados simulados foram comparados com resultados reais de teste de um caminhão com excelente correlação. Outro modelo analítico para a resistência ao rolamento foi proposto por Guan et al. [34] em “**Modeling of Tire Rolling Properties by Using Experimental Modal Parameters**”.

Boas características de uniformidade dos pneus estão sendo propostas através de melhorias em métodos existentes de fabricação. Mihalik [35] em “**The Thread of an Idea**” revela a existência de um novo equipamento para executar a junção da cinta estabilizadora e banda de rodagem à carcaça do pneu, num processo conhecido como costura (“stitching”). A principal vantagem para a uniformidade dos pneus fabricados seria a redução nas forças radiais pico-a-pico.

4 – REQUISITOS ESTABELECIDOS PARA PNEUS AUTOMOTIVOS

O presente capítulo apresenta os requisitos de segurança e de desempenho definidos para pneus automotivos. Em primeiro lugar são descritos os requisitos de segurança de três locais de interesse (Estados Unidos, Europa e Brasil), provenientes de órgãos legais das respectivas regiões. É feita posteriormente uma comparação entre eles na forma de tabelas. Num segundo momento são colocados os requisitos de desempenho mais comumente exigidos pelas montadoras.

4.1 – Requisitos de Segurança

Um determinado pneu deve atender a requisitos de segurança e padronização para ser comercializado. Estes requisitos variam em função do país considerado e refletem a interpretação deste determinado país do que é segurança aplicada a pneus. Tais normas se constituem em leis após o consenso entre as entidades técnicas responsáveis e o governo e são sujeitas a revisões ao longo do tempo.

Antes da abordagem das normas legais relativas à segurança é importante o conhecimento de quais são os órgãos responsáveis pela sua publicação e regulamentação, nas três regiões de interesse para este trabalho:

a) Brasil

No Brasil os órgãos responsáveis são: CONMETRO, INMETRO, DENATRAN e CONTRAN. Para o caso específico de pneus, o CONMETRO (Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial) determina ao INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial), órgão subordinado ao Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, “elaborar regulamentação técnica com vistas à certificação compulsória de todos os tipos de pneus comercializados no País”. [36] O INMETRO

também atua na verificação da conformidade dos pneus às normas e regulamentos técnicos. [36]

Para outras normas associadas ao veículo o DENATRAN (Departamento Nacional de Trânsito), órgão executivo do Ministério das Cidades (antes do Ministério da Justiça) promulga as resoluções do CONTRAN (Conselho Nacional de Trânsito) por meio de portarias. “O CONTRAN é o coordenador do sistema e o órgão máximo normativo e consultivo” [37]. As normas com efeito de lei são as normas ABNT, que podem ter ou não como referência as leis americanas e européias.

b) Estados Unidos

Nos Estados Unidos existe um órgão equivalente ao DENATRAN no Brasil, chamado NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) do Departamento de Transportes americano que publica as normas FMVSS (Federal Motor Vehicle Safety Standards) que têm força de lei [38].

c) Europa

Na Europa existem as normas ECE (Economic Commission for Europe), publicadas pelas Nações Unidas e as normas EEC (Commission of the European Communities), ambas válidas para efeitos legais⁴.

Inicialmente serão descritas as normas de segurança americanas, as normas européias e por fim as brasileiras.

Para o escopo deste trabalho será considerada a aplicação de pneus pneumáticos **radiais** e **novos** (não reconicionados), utilizados em **veículos de**

⁴ OLIVEIRA, JOÃO (General Motors do Brasil Ltda., Contatos Técnicos de Engenharia). Informação verbal.

passaio (veículos leves até 4536 kg – ou 10.000 lb - exceto veículos Multipropósito, Caminhões, Ônibus e Trailers) **de quatro rodas** e com velocidade máxima admissível de até **300 km/h**.

4.1.1 – Normas Americanas

Conforme mencionado anteriormente, as normas americanas são as normas **FMVSS** (Federal Motor Vehicle Safety Standards). Elas são a **Parte 571** do Registro Federal 49 [1]. Estão definidas na **Parte 571** as normas **FMVSS 110, 117, 119, 120, 129, 138 e 139**. Para pneus constam também as Partes 567 (Certificação), 569 (Pneus Re-Sulcados), 574 (Identificação e Registros de Pneus), 575 (Normas de Informação ao Consumidor) e 590 (Requisitos para Submissão de Relatórios sobre Sistemas de Monitoramento de Pressão) do Registro Federal 49. Apenas a Parte 571, com as normas **FMVSS 110, 138 e 139** será considerada neste trabalho. As demais normas contemplam pneus reconicionados, temporários e aplicações para veículos pesados.

As normas **FMVSS** serão colocadas a seguir na sua forma revisada em 18 de Novembro de 2002. Esta revisão faz parte de um extenso trabalho para aumentar a segurança dos ocupantes de veículos, aumentando-se as exigências até então vigentes e incluindo-se requisitos de segurança adicionais. Como comentado anteriormente, esta ampla revisão ocorreu como resposta a acidentes envolvendo pneus.

4.1.1.1 – FMVSS 110: Seleção de Pneus e Aros para Veículos Motorizados leves até 4536 kg

NHTSA em **FMVSS 110** [4] especifica requisitos para seleção de pneus para prevenir sobrecarga do pneu. Esta norma se aplica a carros de passeio e montagens de pneu reserva não-pneumáticos, para uso em carros de passeio.

NHTSA em **FMVSS 110** (2002) define:

- **Peso de Acessórios:** significa o peso combinado da transmissão automática, direção hidráulica, freios assistidos, vidros elétricos, assentos elétricos, rádio e aquecedor, à medida que são disponíveis como itens opcionais (instalados ou não);
- **Peso Em Ordem de Marcha (E.O.M.):** é o peso do veículo com equipamento padrão incluindo a máxima capacidade de combustível, óleo e fluido de arrefecimento e, se assim equipado, ar condicionado e peso adicional do motor opcional;
- **Peso Máximo do Veículo Carregado:** é a soma do Peso E.O.M., Peso de Acessórios, a Capacidade de Carga do Veículo (“Payload”, definido a seguir) e o Peso dos Opcionais de Produção (definido a seguir);
- **Pneu Reserva Não-Pneumático:** é um conjunto roda-pneu não-pneumático destinado para uso temporário no lugar dos pneumáticos comuns que atendem a esta norma;
- **Peso Normal dos Ocupantes:** significa 68 kg vezes o número de ocupantes especificado na segunda coluna da Tab. II;
- **Distribuição dos Ocupantes:** significa a distribuição dos ocupantes especificada na terceira coluna da Tab. II;
- **Peso dos Opcionais de Produção:** é o peso combinado das opções normais de produção que têm massa superior a 2,3 kg em excesso dos itens-padrão que eles substituem, não previamente considerados no Peso E.O.M. ou Peso de Acessórios, incluindo freios “heavy duty”, niveladores de conforto, suporte para bagagens no teto, bateria “heavy duty” e acabamentos especiais;
- **Capacidade de Carga do Veículo (“Payload”):** significa a carga e o peso das bagagens somado com 68 kg vezes a capacidade designada de ocupantes do veículo;
- **Máxima Carga no Pneu:** é a carga num pneu individual, que é determinada distribuindo-se a cada eixo sua parcela do Peso Máximo do Veículo Carregado⁵, dividindo-a por dois;
- **Carga Normal no Pneu (“Normal Load”):** é a carga num pneu individual, que é determinada distribuindo-se a cada eixo sua parcela do Peso E.O.M.,

⁵ A parcela do peso total para cada eixo depende da posição do CG do veículo.

Peso de Acessórios, e Peso Normal dos Ocupantes (de acordo com a Tab. II), dividindo-a por dois.

Tabela II - Carga e distribuição dos ocupantes para carga normal do veículo em várias capacidades de assentos [4]

| <i>Capacidade de Assentos Designada, número de ocupantes</i> | <i>Carga Normal do Veículo, número de ocupantes</i> | <i>Distribuição dos Ocupantes em um Veículo “Normalmente” carregado</i> |
|--|---|---|
| 2 a 4 | 2 | 2 na frente |
| 5 a 10 | 3 | 2 na frente, 1 atrás |

4.1.1.1.1 – Requisitos

Segundo NHTSA em FMVSS 110 (2002) valem os seguintes requisitos:

Limites de Carga no Pneu para Veículos de Passeio:

“A máxima carga aplicada ao pneu não deve ser maior que a capacidade de carga do pneu indicada na lateral do mesmo. A Carga Normal no Pneu (“Normal Load”) aplicada pelo veículo não deve ser maior que a carga utilizada no teste de Resistência à Velocidade especificada em FMVSS 139 (**85% da capacidade de carga do pneu**);” [4]

4.1.1.2 – FMVSS 138: Sistemas de Monitoramento de Pressão de Pneus

Criada em 5 de Junho de 2002 esta norma especifica requisitos de desempenho para Sistemas de Monitoramento de Pressão de Pneus (TPMS), de modo a prevenir baixas pressões de inflação nos pneus, o que resultaria em

problemas de segurança [39]. Esta norma se aplica a veículos com GVWR de 4536 kg ou menos.

As seguintes definições são dadas:

- **Peso do Veículo Levemente Carregado:** significa o peso do veículo sem carga mais a massa de 180 kg, que inclui a massa do motorista e instrumentação;
- **Sistema de Monitoramento de Pressão de Pneus:** é um sistema que detecta quando um ou mais pneus de um veículo estão com pressão de inflação baixa e aciona uma luz de advertência.

4.1.1.2.1 – Requisitos

A norma FMVSS 138 especifica que a partir de 31 de outubro de 2003 os veículos a serem produzidos nos EUA deverão ser equipados com o TPMS e as montadoras deverão seguir o plano de transição que se estenderá até 1 de novembro de 2006. Antes de 1 de novembro de 2006 cada TPMS deve ser de uma das formas abaixo:

Opção 1: Quatro Pneus; 25% abaixo da pressão especificada:

O Sistema de Monitoramento de Pressão dos Pneus (TPMS) deve:

- Acionar a luz de advertência por não mais que 10 minutos após a pressão de inflação em um ou mais pneus do veículo, até o total de 4 pneus, ser igual ou menor que 25% da pressão recomendada a frio pelo fabricante do veículo ou igual ou menor que a pressão especificada na terceira coluna da Tabela III para o correspondente tipo de pneu, o que for maior;
- Continuar a acionar a luz de advertência enquanto a pressão de qualquer pneu estiver igual ou menor que o especificado no item acima, e a chave de ignição estiver acionada, esteja ou não o motor em funcionamento.

Opção 2: Um Pneu; 30% abaixo da pressão especificada

O Sistema de Monitoramento de Pressão dos Pneus (TPMS) deve:

- Acionar a luz de advertência por não mais que 10 minutos após a pressão de inflação em um dos pneus do veículo ser igual ou menor que 30% da pressão recomendada a frio pelo fabricante do veículo ou igual ou menor que a pressão especificada na terceira coluna da Tabela III para o correspondente tipo de pneu, o que for maior;
- Continuar a acionar a luz de advertência enquanto a pressão naquele pneu estiver igual ou menor que o especificado no item acima, e a chave de ignição estiver acionada, esteja ou não o motor em funcionamento.

Tabela III – Luz de advertência de baixa pressão: mínima pressão de ativação [14]

| <i>Tipo de Pneu</i> | <i>Máxima Pressão de Inflação</i> | | <i>Mínima Pressão de Ativação</i> | |
|---------------------|-----------------------------------|--------------|-----------------------------------|-----|
| | kPa | psi | kPa | psi |
| Normal | 240, 300 ou 350 | 35, 44 ou 51 | 140 | 20 |
| Reforçado | 280 ou 340 | 41 ou 49 | 160 | 23 |

A norma 138 especifica que a luz de advertência deve estar instalada dentro do habitáculo e com fácil visualização pelo motorista. Este sinal de advertência deve ser como um dos dois símbolos abaixo, cuja cor deve ser amarela:

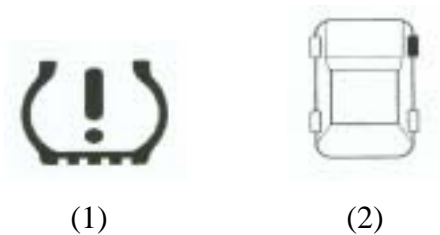


Fig. 4.1 – Símbolos da luz de advertência de baixa pressão: (1) Símbolo ISO; (2) Símbolo indicativo de qual pneu está com baixa pressão [14].

O restante da norma FMVSS 138 descreve condições e procedimentos de teste para o sistema de monitoramento de pressão, e finaliza com o detalhamento do calendário de implementação.

4.1.1.3 – FMVSS 139: Pneus Novos para Veículos Leves até 4536 kg

Esta norma foi oficializada em 18 de novembro de 2002 após revisão dos requisitos vigentes até então, para ser uma única norma FMVSS para pneus de veículos leves [40]. Baseada na prática recomendada da SAE J918c, a norma 139 especifica dimensões de pneus e requisitos laboratoriais de teste para **Resistência à Velocidade, Resistência à Carga, Desempenho à Baixa Pressão, Impactos Danosos da Pista, Resistência ao Detalonamento** (desmontagem do talão do pneu e do aro da roda), e **Efeitos de Envelhecimento**. Define também **classificações de carga** para os pneus e especifica requisitos de **marcação de informações** nas laterais dos pneus.

No tocante à caracterização das possíveis falhas apresentadas pelos pneus, a NHTSA na norma FMVSS 139 (2002) define:

- **Trincas** (“cracking”): qualquer ruptura na banda de rodagem, na parede lateral ou na camada interna (“innerliner”) estendendo-se até o material dos cordões;

- **Separação no talão:** uma quebra da ligação entre os componentes na área do talão;
- **Arrancamento** (“chunking”): a quebra e destacamento de pedaços da banda ou da parede lateral;
- **Separação da Camada Interna:** significa a separação da camada interna do material dos cordonéis na carcaça;
- **Emenda Aberta:** qualquer separação na junção da banda, parede lateral ou camada interna que se estende até o material dos cordonéis;
- **Separação de Camada** (“ply separation”): a separação do composto de borracha entre camadas adjacentes;
- **Separação da Parede Lateral:** a separação do composto de borracha do material dos cordonéis na parede lateral;
- **Separação da Banda:** a separação da banda de rodagem da carcaça do pneu.

Na seção de **Informações Relevantes sobre Pneus e Aros** a NHTSA na norma FMVSS 139 (2002) especifica que cada fabricante de pneu deve assegurar que estará disponível ao público consumidor uma lista contendo os aros permitidos para cada pneu fabricado. Esta lista deverá ter uma das formas abaixo:

- Lista por nome de fabricante ou de marca em um documento fornecido aos revendedores de pneus, para qualquer pessoa que requisitá-la e com cópia ao NHTSA;
- Lista contida em publicações com data compatível à data de fabricação do pneu, de pelo menos uma das seguintes organizações: *The Tire and Rim Association, The European Tyre and Rim Technical Organisation, Japan Automobile Tire Manufacturers' Association, Inc., The Tyre and Rim Association of Australia, Associação Latino Americana de Pneus e Aros* ou *South African Bureau of Standards*.

4.1.1.3.1 - Requisitos:

A norma 139 estabelece requisitos para **Tamanho e Construção, Desempenho, Amostras de Teste, Indicadores de Desgaste, Marcação de Informações e Procedimentos de Teste, Condições e Requisitos de Desempenho.**

NHTSA na norma FMVSS 139 (2002) define:

4.1.1.3.1.1 - Tamanho e Construção

O tamanho e construção dos pneus devem ser adequados à montagem nos aros de teste.

4.1.1.3.1.2 - Desempenho

Em relação a desempenho, os pneus devem estar de acordo com sua designação de tamanho, tipo e máxima pressão de inflação admissível. A máxima pressão de inflação admissível pode ser 32, 36, 40 ou 60 psi, ou 240, 280, 300, 340 ou 350 kPa (exceto pneus e aros CT, com flange invertida). Sua classificação de carga deve estar de acordo com as publicações emitidas pelo fabricante de pneu.

4.1.1.3.1.3 - Amostras de Teste

Para os testes especificados em 4.1.1.3.1.6 deve-se utilizar:

- **Um pneu** para Resistência à Velocidade;
- **Outro pneu** para Resistência à Carga e Desempenho à Baixa Pressão;
- **Outro pneu** para Impactos Danosos da Pista e Resistência ao Detalonamento; e
- **Um quarto pneu** para Efeitos de Envelhecimento.

4.1.1.3.1.4 - Indicadores de Desgaste

Para pneus fabricados após 1968 é obrigatória a inclusão de indicadores de desgaste (TWI) na banda do pneu, dando uma indicação visual de que o pneu se desgastou até restar 1/16 de polegada de espessura na banda. Para aros maiores que 12 polegadas deve haver pelo menos seis indicadores de desgaste igualmente distanciados na circunferência do pneu. Para aros iguais ou menores que 12 polegadas deve haver pelo menos três indicadores.

4.1.1.3.1.5 - Marcação de Informações

NHTSA na norma FMVSS 139 (2002) especifica quais informações devem constar da lateral do pneu, a saber:

- Designação de Tamanho;
- Máxima pressão de inflação permitida;
- Máxima carga permitida;
- Nome genérico do material de cada cordonel usado na parede lateral e banda do pneu;
- Número real de camadas na parede lateral e na banda de rodagem;
- As palavras “tubeless” (sem câmara), ou “tube type” (com câmara), quando aplicáveis; e
- A palavra “radial” se o pneu for radial.

Cada pneu deve conter o símbolo DOT (iniciais de “Department of Transportation” do governo americano) especificado de acordo com a Parte 574 do capítulo desta norma. Isto significa que o pneu foi certificado e atende às normas FMVSS. Cada pneu deve conter o nome do fabricante, o nome da marca e o número associado ao fabricante, conforme a Parte 574. Se a pressão máxima do pneu é 420 kPa (60psi) o pneu deve ter permanentemente moldado em suas laterais a inscrição “Inflate to 420kPa (60 psi)” ou “Inflate to 60 psi”.[\[40\]](#)

4.1.1.3.1.6 - Procedimentos de Teste, Condições e Requisitos de Desempenho

Segundo o exposto na norma 139, cada pneu deve atender a todos os requisitos a seguir, quando testados de acordo com as condições descritas em 4.1.1.3.1.3 e com os procedimentos abaixo.

Dimensões Físicas:

Determinar as dimensões físicas do pneu sob condições ambientes uniformes como segue:

- a) Montar o pneu no aro de teste especificado pelo fabricante do pneu ou por uma das publicações listadas em ‘Informações Relevantes sobre Pneus e Aros’ [40] e inflá-lo à pressão de **180 kPa** caso seja normal ou à pressão de **220 kPa** caso seja reforçado (somente pneus radiais e diagonais cintados);
- b) Deixá-lo a temperatura de $25 \pm 5^\circ \text{C}$ pelo menos por 24 horas;
- c) Reajustar a pressão conforme a);
- d) Medir a largura da seção e a largura total⁶ em seis pontos igualmente espaçados ao longo da circunferência do pneu;
- e) Registrar a média destas medidas como a largura da seção e a largura total;
- f) Determinar o diâmetro externo do pneu medindo a circunferência máxima do pneu e dividindo esta dimensão por pi (3,14).
- g) **Requisitos:** a largura da seção e a largura total para cada pneu medido não devem exceder a largura especificada em submissão feita pelo fabricante do pneu, por mais que **7 %** para pneus com pressão máxima de 32, 36 ou 40 psi e por mais que **7% ou 10 mm**, o que for maior, nos pneus com pressão máxima de 240, 280, 290, 300, 330, 350 ou 390 kPa ou 60 psi.

Resistência à Velocidade:

- a) Montar um pneu novo no aro de teste e inflá-lo até a pressão de **220 kPa**, caso seja normal ou de **260 kPa**, caso seja reforçado;
- b) Condicionar o conjunto a $35 \pm 5^\circ \text{C}$ durante no mínimo três horas;

⁶ A largura total leva em conta as inscrições em alto-relevo na lateral do pneu.

- c) Reajustar a pressão do pneu antes ou depois da montagem do conjunto roda-pneu no eixo de teste conforme a);
- d) Montar o conjunto roda-pneu no eixo de teste e pressioná-lo contra o tambor de teste de diâmetro $1,70\text{m} \pm 1\%$ (vide Fig. 4.2). A carga a ser aplicada é **85%** da capacidade de carga do pneu;
- e) Amaciar o pneu rodando-o por 15 minutos a 80 km/h;
- f) Esperar que o pneu esfrie até 40°C e reajustar a pressão de inflação de acordo com o especificado em a);
- g) Durante o teste a pressão de inflação não pode ser corrigida e a carga de teste deve ser mantida no valor especificado em d);
- h) Durante o teste a temperatura ambiente a uma distância de não menos que 150 mm e não mais que 1 m do pneu deve ser mantida no mínimo a 40°C ;
- i) Conduzir o teste, continuamente e sem interrupção, por **90 minutos** através de três estágios de **30 minutos** consecutivos nas seguintes velocidades: **140, 150 e 160 km/h**;
- j) Medir a pressão do pneu não mais que 15 minutos após o teste. Esperar que o pneu esfrie por 1 hora. Então esvaziar o pneu e removê-lo do aro de teste;
- k) **Requisitos:** quando o pneu foi submetido ao procedimento descrito nesta norma, não havendo deformação permanente no aro nem perda de pressão de ar, não deve haver nenhuma evidência visual de separação da banda, da parede lateral, de camada, de cordonel, de camada interna ou do talão; nenhuma evidência de arrancamento, cordonéis rompidos, trincas ou emendas abertas. A pressão do pneu no final do teste não deve ser menor que a pressão inicial especificada em a).



Fig. 4.2 - Equipamento para teste de resistência à velocidade e à carga MTS Road Wheel 860 [41]

Resistência à Carga:

- a) Montar o pneu no aro de teste e inflá-lo à pressão de **180 kPa** caso seja normal ou à **220 kPa** caso seja reforçado;
- b) Condicionar o conjunto a $35 \pm 5^\circ \text{C}$ durante no mínimo três horas;
- c) Reajustar a pressão do pneu para a condição a) imediatamente antes do teste;
- d) Montar o conjunto roda-pneu no eixo de teste e pressioná-lo contra a face externa de uma roda lisa com o diâmetro de $1,70\text{m} \pm 1\%$.
- e) Durante o teste a temperatura ambiente a uma distância de não menos que 150 mm e não mais que 1 m do pneu deve ser mantida no mínimo a 40°C ;
- f) Conduzir o teste, sem interrupções, a não menos que 120 km/h com cargas e períodos de teste não menores que os mostrados na tabela abaixo:

Tabela IV – Aplicação da carga durante o teste de resistência à carga [40]

| <i>Período de Teste</i> | <i>Duração (horas)</i> | <i>Carga como porcentagem do Índice de Carga (%)</i> |
|-------------------------|------------------------|--|
| 1 | 8 | 90 |
| 2 | 10 | 100 |
| 3 | 22 | 110 |

- g) Durante o teste a pressão de inflação não pode ser corrigida e a carga de teste deve ser mantida no valor especificado para cada período de teste, conforme a tabela em f);
- h) Medir a pressão do pneu não mais que 15 minutos após o teste. Esperar que o pneu esfrie por 1 hora. Então esvaziar o pneu e removê-lo do aro de teste;

- i) **Requisitos:** quando o pneu foi submetido ao teste de resistência à carga especificado nesta norma, não havendo deformação permanente no aro nem perda de pressão de ar, não deve haver nenhuma evidência visual de separação da banda, da parede lateral, de camada, de cordonel, de camada interna ou do talão; nenhuma evidência de arrancamento, cordonéis rompidos, trincas ou emendas abertas. A pressão do pneu no final do teste não deve ser menor que a pressão inicial especificada em a).

Impactos Danosos da Pista:

- a) O pneu é preparado e montado no equipamento de acordo com a seção 3.2 da Prática Recomendada SAE J1981 (jun. 1994): *Teste de Impactos Danosos da Pista para Conjuntos Roda-Pneu*;
- b) O pneu deve ser inflado a **180 kPa** caso seja normal e a **220 kPa** caso seja reforçado;
- c) O teste é iniciado de acordo com o procedimento de teste descrito na seção 3.3 da Prática Recomendada SAE J1981. Iniciar o teste levantando o pêndulo a uma altura de lançamento baseada num ângulo de 80° do pêndulo com a vertical. Repetir o teste de modo que o impacto ocorra em cinco pontos de teste igualmente espaçados ao longo da circunferência do pneu;
- d) **Requisitos:** quando o pneu foi submetido ao teste de Impactos Danosos da Pista especificado nesta norma, não havendo deformação permanente no aro, a pressão de teste não deve ser menor que a especificada em b). Não deve haver evidência visível de separação da banda, da parede lateral, de camada, de cordonel, de camada interna ou do talão; nenhuma evidência de arrancamento, cordonéis rompidos, trincas ou emendas abertas.

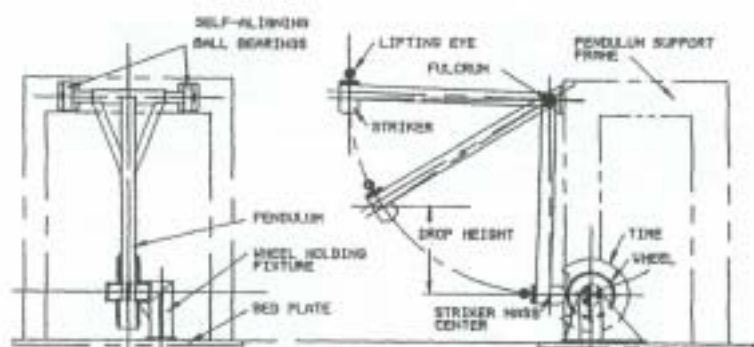


Fig. 4.3 – Equipamento para o teste de impactos danosos da pista

Resistência ao Detalonamento:

- a) Inclinor o pneu 5° em relação ao eixo vertical;
- b) A superfície simulada da pista deve ter um ângulo de inclinação de 10° com a horizontal. A superfície da pista deve estar livre de borracha e outras substâncias;
- c) Montar o pneu no aro sem o uso de lubrificante. A pressão de inflação deve ser de 180 kPa caso o pneu seja normal e de 220 kPa caso o pneu seja reforçado;
- d) Aplicar uma força lateral de 2 vezes maior que a carga máxima especificada na lateral do pneu, a uma velocidade de 220 mm/s, mantendo a força lateral por 20 segundos. Repetir o teste em no mínimo quatro pontos igualmente distanciados na circunferência do pneu;
- e) **Requisito:** o pneu testado de acordo com este procedimento não deve apresentar perda de ar.

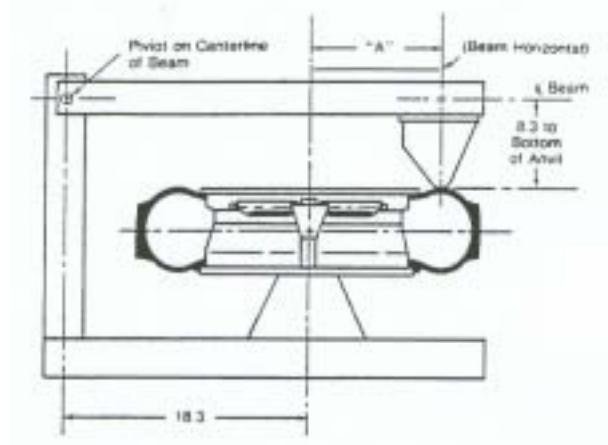


Fig. 4.4 – Diagrama do dispositivo aplicador da força lateral [42]

Desempenho à Baixa Pressão: Até esta data não estão definidos os procedimentos de teste de desempenho do pneu à baixa pressão. Apresenta-se aqui uma das alternativas mencionadas na seção 3.1.:

- a) Montar o mesmo pneu testado em Resistência à Carga no aro de teste e inflá-lo à pressão de **140 kPa** caso seja normal ou à **160 kPa** caso seja reforçado;
- b) Condicionar o conjunto a $35 \pm 5^\circ$ C durante no mínimo três horas;
- c) Reajustar a pressão do pneu antes ou depois da montagem do conjunto roda-pneu no eixo de teste conforme a);
- d) O teste é conduzido por 90 minutos a partir do final do teste de Resistência à Carga, contínua e ininterruptamente, a uma velocidade de 120 km/h;
- e) Pressionar o conjunto roda-pneu contra o tambor de teste de diâmetro 1,70m $\pm 1\%$;
- f) Aplicar ao eixo de teste uma carga igual a 100% da máxima capacidade de carga do pneu;
- g) No decorrer do teste a pressão de inflação não pode ser corrigida e a carga de teste deve ser mantida no seu valor inicial;
- h) Durante o teste a temperatura ambiente a uma distância de não menos que 150 mm e não mais que 1 m do pneu deve ser mantida no mínimo a 40° C;
- i) Medir a pressão do pneu não mais que 15 minutos após o teste. Esperar que o pneu esfrie por 1 hora. Então esvaziar o pneu e removê-lo do aro de teste;
- j) **Requisitos:** quando o pneu foi submetido ao teste de Desempenho à Baixa Pressão especificado nesta norma, não havendo deformação permanente no aro nem perda de pressão de ar, não deve haver nenhuma evidência visual de separação da banda, da parede lateral, de camada, de cordonel, de camada interna ou do talão; nenhuma evidência de arrancamento, cordonéis rompidos, trincas ou emendas abertas. A pressão do pneu medida antes de 15 minutos após o final do teste não deve ser menor que a pressão inicial especificada em a).

Efeitos de Envelhecimento: Os procedimentos para teste de pneus quanto aos efeitos de envelhecimento não foram ainda definidos pela NHTSA. Apresenta-se aqui uma das alternativas recomendadas pelo órgão americano:

- a) Montar o pneu no aro de teste e inflá-lo com uma mistura de gases composta de 50% de O₂ (oxigênio) e 50% de N₂ (nitrogênio) à pressão de **275 kPa**;
- b) Condicionar o conjunto a $35 \pm 5^{\circ}$ C durante no mínimo três horas;
- c) Reajustar a pressão do pneu para a condição a);
- d) Montar o conjunto roda-pneu no eixo de teste e pressioná-lo contra a face externa de uma roda lisa com o diâmetro de $1,70\text{m} \pm 1\%$.
- e) Durante o teste a temperatura ambiente a uma distância de não menos que 150 mm e não mais que 1 m do pneu deve ser mantida no mínimo a 40° C;
- f) Conduzir o teste, sem interrupções, a não menos que 96 km/h, por 250 horas com carga não inferior a 111% da capacidade de carga do pneu;
- g) Durante o teste a pressão de inflação não pode ser corrigida e a carga de teste deve ser mantida no valor original;
- h) Medir a pressão antes de 15 minutos após o final do teste. Esperar que o pneu esfrie por 1 hora. Então esvaziar o pneu e removê-lo do aro de teste;
- i) **Requisitos:** quando o pneu foi submetido ao teste de envelhecimento especificado nesta norma, não havendo deformação permanente no aro nem perda de pressão de ar, não deve haver nenhuma evidência visual de separação da banda, da parede lateral, de camada, de cordonel, de camada interna ou no talão; nenhuma evidência de arrancamento, cordonéis rompidos, trincas ou emendas abertas. A pressão do pneu no final do teste não deve ser menor que a pressão inicial especificada em a).

4.1.1.3.2 – Calendário de Implementação

Segundo NHTSA em FMVSS 139 (2002) deverá ser seguido o seguinte calendário de implementação para esta norma:

- Pneus P-Métricos (p/ veículos de passeio) fabricados de 1 de setembro de 2003 até 1 de setembro de 2004: 50 % dos pneus fabricados neste período deverão atender à FMVSS 139;
- Pneus P-Métricos fabricados a partir de 1 de setembro de 2004: 100% dos pneus fabricados deverão atender à FMVSS 139;

- Pneus LT (p/ comerciais leves) fabricados a partir de 1 de setembro de 2005: 100% dos pneus fabricados deverão atender à FMVSS 139;

4.1.1.3.3 - Comentários

Num contexto geral os requisitos de segurança americanos para pneus visam o atendimento à **padronização dimensional** e à **resistência estrutural do pneu** a solicitações externas.

A padronização dimensional de pneus já é prática corrente em todo o mundo e é suportada por órgãos normativos de diversos países. Pode-se inferir que a padronização, se praticada globalmente, permite a intercambiabilidade de pneus fabricados em diversos países sem o prejuízo da segurança do veículo e de seu ocupante. Em todo o mundo, a padronização dimensional segue uma denominação única. No caso americano o órgão responsável pela padronização dimensional é a TRA (“Tire and Rim Association”). No caso brasileiro é a ALAPA (Associação Latino Americana de Pneus e Aros).

Ao se estabelecer requisitos focados na resistência do pneu, delimita-se uma fronteira de operação segura para este componente, fronteira esta que deve refletir as solicitações externas mais importantes às quais o pneu é submetido e prover uma margem de segurança adicional. É importante observar que solicitações externas, como por exemplo a temperatura, são variáveis nas diferentes regiões do planeta. Os requisitos de resistência focam, por outro lado, no atendimento à própria padronização dimensional no caso do teste de resistência à carga, pois verifica-se o pneu ante o padrão (capacidade de carga) especificado nas tabelas da TRA [43]. A velocidade, apesar de ser regulamentada nestas tabelas (índices de velocidade) é avaliada diferentemente no teste de resistência à velocidade, pois escolheu-se as velocidades e tempos de exposição do pneu a estas velocidades arbitrariamente.

4.1.2 – Normas Européias

As normas européias, como exposto anteriormente, são elaboradas pela ECE (“Economic Commission for Europe”, das Nações Unidas), e pela EEC (“Commission of the European Communities”, ou União Européia).

Dentre as normas ECE pode-se citar a **ECE R.30** (Regulamento no.30), para pneumáticos novos projetados para veículos do tipo M1 (veículos de passeio), a **ECE R.54** (Regulamento no.54), para pneumáticos novos projetados para veículos do tipo M2, M3 e N (veículos exceto veículos de passeio) e a **ECE R.64** (Regulamento no.64), que se aplica a veículos do tipo M1 com pneus de uso temporário.

Dentre as normas EEC pode-se citar a **92/23/EEC** que reflete exatamente a **ECE R.30**, a **R.54** e a **R.64** e a **2001/43/EC**, que especifica requisitos legais de ruído emitido pelo contato pneu-solo. Para o propósito deste trabalho caberá analisar apenas a norma **ECE R.30**.

4.1.2.1 – ECE R.30: Provisões Uniformes para a Aprovação de Pneumáticos para Veículos e Reboques

A norma ECE R.30 [44] é subdividida em diversas seções, e dentre as mais relevantes pode-se citar: **Definições, Marcações e Requisitos**.

4.1.2.1.1 – Definições

A ECE R.30 (2002) apresenta definições de termos específicos de pneus, muitos já abordados nas seções anteriores. Outras definições úteis são fornecidas, tais como:

- **Tipo de pneu:** uma categoria de pneus que não difere quanto a fabricante, designação de tamanho, categoria de uso (ordinário, neve ou temporário), estrutura, símbolo de velocidade, capacidade de carga e seção transversal;
- **Pneu reforçado, ou “extra-load”:** pneu cuja carcaça é mais resistente que o correspondente pneu padrão;

- **Capacidade de Carga (Índice de Carga):** é um número de referência associado à carga que um pneu pode suportar;
- **Categoria de Velocidade (Índice de Velocidade):** é a máxima velocidade que um pneu pode sustentar, expressa pelo Símbolo da Categoria de Velocidade:

Tabela V – Categorias de velocidade de pneus, segundo ECE R.30 [44]

| Símbolo da Categoria de Velocidade | <i>Velocidade Máxima (km/h)</i> |
|---|---------------------------------|
| L | 120 |
| M | 130 |
| N | 140 |
| P | 150 |
| Q | 160 |
| R | 170 |
| S | 180 |
| T | 190 |
| U | 200 |
| H | 210 |
| V | 240 |
| W | 270 |
| Y | 300 |

- **Carga Máxima:** significa a máxima massa que um pneu pode suportar;
 - para velocidades até 210 km/h a carga máxima não deve exceder o valor associado ao índice de carga do pneu;
 - para velocidades maiores que 210 km/h, mas sem exceder 240 km/h (pneus com símbolo de velocidade “V”) a carga máxima não deve exceder a

porcentagem do índice de carga do pneu, indicada na tabela abaixo, com referência à velocidade máxima que o veículo pode atingir. Interpolações lineares são permitidas.

Tabela VI – Cargas máximas admissíveis para velocidades entre 215 e 240 km/h em pneus com símbolo “V” [44]

| <i>Velocidade máxima (km/h)</i> | <i>Carga Máxima (% do Índice de Carga)</i> |
|---------------------------------|--|
| 215 | 98,5 |
| 220 | 97 |
| 225 | 95,5 |
| 230 | 94 |
| 235 | 92,5 |
| 240 | 91 |

- para velocidades maiores que 240 km/h (pneus com símbolo de velocidade “W”) a carga máxima não deve exceder a porcentagem do índice de carga do pneu, indicada na tabela abaixo, com referência à velocidade máxima que o veículo pode atingir. Interpolações lineares são permitidas.

Tabela VII – Cargas máximas admissíveis para velocidades entre 240 e 270 km/h em pneus com símbolo “W” [44]

| <i>Velocidade máxima (km/h)</i> | <i>Carga Máxima (% do Índice de Carga)</i> |
|---------------------------------|--|
| 240 | 100 |
| 250 | 95 |
| 260 | 90 |
| 270 | 85 |

- para velocidades maiores que 270 km/h (pneus com símbolo de velocidade “Y”) a carga máxima não deve exceder a porcentagem do índice de carga do pneu, indicada na tabela abaixo, com referência à velocidade máxima que o veículo pode atingir. Interpolações lineares são permitidas.

Tabela VIII – Cargas máximas admissíveis para velocidades entre 270 e 300 km/h em pneus com símbolo “Y” [44]

| <i>Velocidade máxima (km/h)</i> | <i>Carga Máxima (% do Índice de Carga)</i> |
|---------------------------------|--|
| 270 | 100 |
| 280 | 95 |
| 290 | 90 |
| 300 | 85 |

4.1.2.1.2 – Marcações

A norma ECE R.30 (2002) estabelece que as seguintes marcações devem constar em ambos os lados (paredes laterais) de pneus simétricos⁷ e em pelo menos no lado externo de pneus assimétricos:

- O nome comercial do pneu;
- O tamanho do pneu;
- A estrutura do pneu (letra indicando se é diagonal, radial ou diagonal cintado);
- O símbolo da categoria de velocidade;
- A inscrição M+S ou M.S. ou M&S no caso de pneu de neve (M de “mud”, lama e S de “snow”, neve);
- A capacidade de carga do pneu;

⁷ Pneus simétricos são aqueles cujo desenho da banda de rodagem (“footprint”) tem lados simétricos, se dividido ao meio por um plano na direção de deslocamento do pneu. Pneus assimétricos possuem metades distintas.

- A palavra “TUBELESS” se o pneu é sem câmara;
- A palavra “REINFORCED” ou “EXTRA LOAD” se o pneu é reforçado;
- A data de fabricação do pneu;
- A configuração de montagem pneu-aro se fugir da configuração padrão;
- No caso de pneus temporários as palavras “TEMPORARY USE ONLY”.

Os pneus sob este regulamento também devem conter espaço para a marca de aprovação “E Mark” que atesta a conformidade com esta norma.

Pode-se de imediato observar que, comparando-se a norma europeia com a americana, temos em comum apenas a **designação de tamanho**, a **máxima carga permitida**, a indicação de que o pneu é **sem ou com câmara** e a **estrutura do pneu**. Caso um pneu seja destinado a ambos os mercados deverão estar presentes as exigências de marcação impostas pelas duas normas.

4.1.2.1.3 – Requisitos

Os requisitos principais da norma ECE R.30 (2002) são **requisitos para dimensões dos pneus e testes de resistência à carga e à velocidade**.

A sub-seção “Dimensões dos Pneus” é deveras criteriosa, e estabelece fórmulas para o cálculo da largura da seção e diâmetro externo do pneu. Descreve o procedimento de medição das dimensões dos pneus e tolerâncias dimensionais para largura da seção e diâmetro externo.

O procedimento para a medição de pneus segundo esta norma é:

Método de Medição de Pneus:

- a) “Montar o pneu no aro de medição especificado pelo fabricante e inflá-lo à pressão de 3 a 3,5 bar;
- b) Ajustar a pressão no caso de pneus radiais para 1,8 bar. No caso de pneus reforçados para 2,3 bar;
- c) Condicionar o conjunto roda-pneu à temperatura ambiente por não menos que 24 horas, salvo no caso do teste de resistência à carga e à velocidade em que a medição do diâmetro externo ocorre 6 horas após o teste;
- d) Reajustar a pressão conforme b);
- e) Medir a largura total em seis pontos igualmente espaçados ao longo da circunferência do pneu, considerando a espessura das projeções externas (as inscrições em alto-relevo na lateral do pneu). A maior medida é tida como a largura total;
- f) Determinar o diâmetro externo do pneu medindo a circunferência máxima do pneu e dividindo esta dimensão por pi (3,1415).”[44]

Pode-se imediatamente observar algumas diferenças entre o procedimento europeu e o americano para a medição de pneus. No caso americano qualquer medição só poderá ocorrer após 24 horas da inflação do pneu. A norma européia estabelece que a largura total é o maior valor de seis medições, enquanto que na norma americana a largura total é a média das medidas.

Na sub-seção “Teste de Resistência à Carga e à Velocidade” da norma ECE R.30 encontra-se o procedimento seguinte para pneus radiais:

- a) Montar o pneu novo no aro de medição especificado pelo fabricante;
- b) Inflá-lo à **pressão apropriada** descrita na tabela abaixo (em bar):

Tabela IX – Pressões de inflação para teste de resistência à carga e à velocidade [44]

| <i>Categoria de Velocidade</i> | Pressão de Inflação (Pneus Radiais) | |
|--------------------------------|--|---------------------|
| | Comuns (bar) | Reforçados (bar) |
| L, M, N | 2,4 | 2,8 |
| P, Q, R, S | 2,6 | 3,0 |
| T, U, H | 2,8 | 3,2 |
| V | 3,0 | 3,4 |
| W | 3,2 | 3,6 |
| Y | 3,2 | 3,6 |

- c) O fabricante pode requerer, dadas as razões, o uso de pressões diferentes da tabela acima;
- d) Condicionar o conjunto roda-pneu a temperatura ambiente da sala de teste (item “i”) por não menos que três horas;
- e) Reajustar a pressão conforme b) ou c);
- f) Montar o conjunto roda-pneu no eixo de teste e pressioná-lo contra a face externa de uma roda lisa de diâmetro $1,70m \pm 1\%$ ou $2m \pm 1\%$;
- g) Aplicar ao eixo de teste uma carga igual a **80%**:
 - da carga máxima equivalente ao Índice de Carga do pneu para pneus com símbolos de velocidade L a H inclusive (ver seção 4.1.2.1.1, Carga máxima);
 - da carga máxima associada com a velocidade máxima de 240 km/h para pneus com símbolo de velocidade ‘V’(ver seção 4.1.2.1.1, Carga máxima);
 - da carga máxima associada com a velocidade máxima de 270 km/h para pneus com símbolo de velocidade ‘W’ (ver seção 4.1.2.1.1, Carga máxima);

- da carga máxima associada com a velocidade máxima de 300 km/h para pneus com símbolo de velocidade ‘Y’ (ver seção 4.1.2.1.1, Carga máxima);
- h) Durante a realização do teste a pressão não deve ser corrigida e a carga de teste deve ser mantida constante;
- i) Durante o teste a temperatura na sala de teste deve ser mantida entre **20° C** e **30° C** ou em uma temperatura mais alta se o fabricante concordar;
- j) Iniciar o teste, sem interrupção, de acordo com o seguinte:
 - velocidade inicial de teste: máxima velocidade prescrita para o pneu (símbolo de velocidade) **menos 40 km/h** no caso da roda de teste de diâmetro 1,70m ± 1% ou **menos 30 km/h** no caso da roda de teste de diâmetro 2m ± 1%;
 - sucessivos incrementos de velocidade: **10 km/h**;
 - duração do teste em cada incremento de velocidade exceto o último: **10 minutos**;
 - duração do teste no último incremento de velocidade: **20 minutos**;
 - velocidade máxima de teste: máxima velocidade prescrita para o pneu (símbolo de velocidade) **menos 10 km/h** no caso da roda de teste de diâmetro 1,70m ± 1% ou **igual à máxima velocidade prescrita** para o pneu no caso da roda de teste de diâmetro 2m ± 1%;
 - contudo, para pneus com máxima velocidade de 300 km/h (Símbolo de Velocidade ‘Y’) a duração do teste é de 20 minutos no incremento inicial de velocidade e 10 minutos no último;

Após a execução deste teste o pneu não deve exibir **separação da banda, separação de camada, separação de cordonéis, arrancamento** ou **cordoneis rompidos**.

O diâmetro externo do pneu, medido seis horas após o teste de resistência à carga e à velocidade não deve diferir mais que ±3,5% do diâmetro externo medido antes do teste.”[44]

4.1.2.1.4 – Comentários

Assim como a norma americana, a norma européia basicamente consiste em especificar a **padronização dimensional** e a **resistência estrutural do pneu** a solicitações externas. A norma européia entretanto não especifica requisitos como **desempenho à baixa pressão, impactos danosos da pista, resistência ao detalonamento e envelhecimento**, focando apenas em um teste unificado de resistência à carga e à velocidade. Este teste se assemelha ao teste americano de resistência à velocidade, pois mantém a carga aplicada constante e induz incrementos de velocidade específicos em períodos de tempo específicos. A pressão de inflação do pneu de teste no caso europeu é associada à categoria de velocidade do pneu, enquanto que no caso americano ela é função da estrutura da carcaça (normal ou reforçada).

4.1.3 – Normas Brasileiras

No Brasil o INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial) emitiu a Portaria no. 5 em 14 de janeiro de 2000, identificada por **INMETRO 05/00**, cujo anexo estabelece “os requisitos e métodos de ensaios para pneus destinados a automóveis, camionetas de uso misto e seus rebocados leves, camionetas, microônibus, ônibus e caminhões e seus rebocados.” [36] Esta portaria utiliza como referência a norma **ABNT NBR 5531/87** – Veículos Rodoviários Automotores e a Resolução **CONTRAN 558/80**, que exige a marcação do logotipo INMETRO em todos os pneus utilizados em território brasileiro, inclusive os importados. Para conter este símbolo, naturalmente o pneu deverá estar aprovado quanto à portaria 05/00.

4.1.3.1 – INMETRO 05/00: Regulamento Técnico da Qualidade para Pneus Novos Destinados à Automóveis, Camionetas de Uso Misto e Seus Rebocados Leves, Camionetas, Microônibus, Ônibus, Caminhões e Seus Rebocados Leves

As seções mais relevantes deste anexo são **Definições, Requisitos e Métodos de Ensaio**.

4.1.3.1.1 – Definições

A sub-seção de definições contém termos relacionados à classificação e geometria de pneus, assim como seus modos de falha. São definições em comum com as normas americanas e européias e portanto previamente apresentadas nas seções 4.1.1. e 4.1.2.

4.1.3.1.2 – Requisitos

A portaria INMETRO 05/00 (2000) relaciona as **Características a Serem Identificadas nos Pneus** e classifica os **Tipos de Famílias de Pneus**:

Características a Serem Identificadas nos Pneus:

Marcações necessárias em ao menos um dos flancos do pneu:

- Marca e denominação registrada do Fabricante;
- Tamanho do Pneu, Capacidade de Carga ou Índice de Carga e Limite de Velocidade;
- Tipo de Estrutura ou Construção da Carcaça;
- A sigla “M+S” (ou ”M&S”), quando se tratar de pneu para lama ou neve;
- A sigla “RESSULCÁVEL” ou “REGROOVABLE”, quando o pneu permitir ressulcagem;
- A sigla “REFORÇADO” e/ou “REINFORCED”, quando o pneu possuir estrutura reforçada;
- A sigla “SEM CÂMARA” e/ou “TUBELESS”, quando o pneu for projetado para uso sem câmara;
- A Data de Fabricação.

Tipos de Famílias de Pneus:

São definidas as seguintes categorias de pneus:

- Categoria 1: Automóveis, Camionetas de Uso Misto e seus Rebocados Leves;
- Categoria 2: Camionetas, Microônibus e seus Rebocados;
- Categoria 3: Caminhões, Ônibus e seus Rebocados.

4.1.3.1.3 – Métodos de Ensaio

A INMETRO 05/00 (2000) define os métodos de ensaio para **Verificação Dimensional dos Pneus e Ensaio de Velocidade sob Carga:**

Verificação Dimensional dos Pneus:

O procedimento de teste de verificação dimensional dos pneus especificado em INMETRO 05/00 (2000) é exatamente o mesmo especificado pela ONU em **ECE R.30** (2002).

Ensaio de Velocidade sob Carga:

O procedimento de ensaio de velocidade sob carga especificado por INMETRO em INMETRO 05/00 (2000) é praticamente o mesmo especificado por Nações Unidas em **ECE R.30** (2002), com as seguintes diferenças:

- A pressão de inflação do pneu comum com índice de velocidade “P” foi especificado na norma brasileira como **2,4 bar**, contra **2,6 bar** na norma européia;
- Os pneus reforçados com índices de velocidade L, M, N, P não possuem pressão de inflação especificada na norma brasileira, enquanto que na européia L, M, N é **2,8 bar** e P é **3,0 bar**;
- Após o período de repouso de três horas e a pressão reajustada à pressão inicial a norma brasileira determina a medição do diâmetro

externo do pneu, pela medição do perímetro máximo externo e dividindo o valor encontrado por π (3,1416). Já a norma européia não exige tal medição;

- A norma brasileira dá a possibilidade da temperatura ambiente da sala de ensaios ser 25 ± 5 °C , como na norma européia, ou 38 ± 3 °C, valores estes não previstos na ECE R.30.

4.1.4 – Comparativo entre as Normas

A seguir são apresentadas tabelas comparativas relacionando as características mais significativas das normas mencionadas. Em primeiro lugar é feita uma comparação entre os tipos de requisitos de segurança estabelecidos pelas diferentes normas, e posteriormente são postos lado a lado os parâmetros dos testes de Resistência à Velocidade e Resistência à Carga.

Tabela X – Quadro comparativo de requisitos de segurança

| <i>Testes</i> | <i>EUA, FMVSS 139 (atual)</i> | <i>EUA, FMVSS 109 (até nov./2002)</i> | <i>Europa, ECE R30</i> | <i>Brasil, INMETRO 05/00</i> |
|--|---------------------------------------|---|----------------------------|--------------------------------------|
| Resistência à Velocidade | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Resistência à Carga | ✓ | ✓ | | |
| Desempenho à Baixa Pressão | ✓ | | | |
| Resistência à Penetração; ou Impactos Danosos da Pista | ✓ | ✓ | | |
| Resistência ao Detalonamento | ✓ | ✓ | | |
| Efeitos de Envelhecimento | ✓ | | | |

Tabela XI – Quadro comparativo do teste de resistência à velocidade

| <i>Parâmetros de Teste</i> | <i>EUA, FMVSS 139 (atual)</i> | <i>EUA, FMVSS 109 (até nov./2002)</i> | <i>Europa, ECE R30</i> | <i>Brasil, INMETRO 05/00</i> |
|--|---------------------------------------|---|---|--|
| Temp. Ambiente (°C) | 40 | 38 | 25±5 | 25±5 ou 38±3 |
| Carga (%) | 85 | 88 | 80 | 80 |
| Pressão de Inflação (kPa): Pneu normal Pneu reforçado Categoria de Velocidade (normal / reforçado): L,M,N P,Q,R,S T,U,H V W,Y | 220 260 | 220 260 | 240/280 260/300 280/320 300/340 320/360 | 240/ ND 260(240**)/300(ND**) 280/320 300/340 320/360 |
| Velocidade do Teste * (km/h) | 140, 150, 160 | 120, 128, 136 | VIT, +10, +20, +30 | VIT, +10, +20, +30 |
| Duração (min) | 90 | 90 | 50 | 50 |

* Para ECE R30 e INMETRO 05/00 a Velocidade Inicial de Teste (VIT) é definida como a velocidade respectiva à categoria do pneu menos 40 km/h;

** Pneu categoria de velocidade P;

ND: Não definido

Tabela XII – Quadro comparativo do teste de resistência à carga

| <i>Parâmetros de Teste</i> | <i>EUA, FMVSS 139 (atual)</i> | <i>EUA, FMVSS 109 (até nov./2002)</i> | <i>Europa, ECE R30</i> | <i>Brasil, INMETRO 05/00</i> |
|-----------------------------------|---------------------------------------|---|--------------------------------|--------------------------------------|
| Temp. Ambiente (°C) | 40 | 38 | ND | ND |
| Carga (%) | 90/100/110 | 85/90/100 | ND | ND |
| Pressão de Inflação (kPa): | | | | |
| Pneu normal | 180 | 180 | ND | ND |
| Pneu reforçado | 220 | 220 | ND | ND |
| Velocidade do Teste (km/h) | 120 | 80 | ND | ND |
| Duração (h) | 40 | 34 | ND | ND |

ND: Não definido

4.2 – Requisitos de Desempenho

Os requisitos de desempenho são os requisitos funcionais exigidos dos pneus que se somam aos requisitos de segurança previamente expostos, e que refletem a visão de qualidade da montadora na aplicação do pneu no veículo. Os requisitos de desempenho, ao contrário dos de segurança, podem ser livremente estabelecidos para caracterizar uma condição de operação desejada para o veículo. Os valores dos requisitos de desempenho são informações confidenciais, restritas à cada empresa. Entretanto, quando estes estão definidos surgem itens importantes e interessantes para análise, como os **critérios de avaliação** relacionados ao sistema veículo-

motorista (comuns na indústria automotiva) e os **componentes veiculares** envolvidos no processo de otimização, em particular o pneu.

Em contraste aos testes exigidos por lei tratados na seção anterior, que consideram o pneu isoladamente, os testes de desempenho são focados no comportamento do **sistema veículo-motorista** em suas diversas possibilidades de uso. O comportamento deste sistema, que se traduz em um tipo de veículo comercializado, pode ajudar a determinar a decisão de compra do consumidor para um determinado modelo e deve portanto estar coerente com a proposta ou conceito associado ao automóvel.

Os requisitos de desempenho dos pneus muitas vezes se confundem com os do próprio veículo. Dentre as diversas características de desempenho que se podem verificar no sistema veículo-motorista e que têm relação com os pneus, normalmente se estabelecem requisitos para: **Dirigibilidade e Conforto, Distância de Parada e Desaceleração, Resistência ao Rolamento e Uniformidade**. Sempre que possível será estabelecido um paralelo com práticas adotadas na General Motors do Brasil, de modo a compor posteriormente a análise crítica.

4.2.1 – Dirigibilidade e Conforto

A **Dirigibilidade e Conforto** é classificada por critérios de avaliação pré-estabelecidos, aos quais são atribuídas notas subjetivas pelo avaliador (motorista), que no caso é o engenheiro de desenvolvimento da montadora. A Dirigibilidade e Conforto é influenciada não só pelos pneus, mas também pela suspensão, carroceria e pelo sistema de direção do veículo. Entretanto, para atingir os objetivos deste trabalho, será considerada apenas a influência do pneu.

SAE [45] em sua prática recomendada “**Subjective Rating Scale for Vehicle Handling**” sugere uma escala de notas para avaliações subjetivas de dirigibilidade. Esta escala fornece meios para os avaliadores atribuírem valores numéricos aos seus julgamentos subjetivos. SAE sugere que a atribuição de notas seja feita por um grupo

de avaliadores treinados e familiares com as expectativas e necessidades do segmento de mercado. SAE informa que as notas são influenciadas pelas condições de avaliação e pela composição do grupo de avaliadores. As condições de avaliação são caracterizadas pelas **manobras** definidas (p.ex., mudança de faixa, aceleração em curva), pela **geometria e superfície da pista** escolhida, pelas **condições de operação do veículo** (p.ex., carga, velocidade) e pelas **condições ambientes** (p.ex., vento, neblina, gelo). A escala proposta, conforme mostrada abaixo, é unipolar e contínua com dez pontos. De dois em dois pontos são atribuídos adjetivos. A nota mais alta, 10, corresponde ao desempenho ideal do veículo naquele quesito e constitui o ponto superior da escala. A nota mais baixa, 1, corresponde ao pior desempenho e constitui o ponto inferior da escala. Entre 5 e 10 o desempenho é considerado “desejável” e de 1 a 5 “indesejável”. Uma nota 5 corresponde a um desempenho “marginal”.

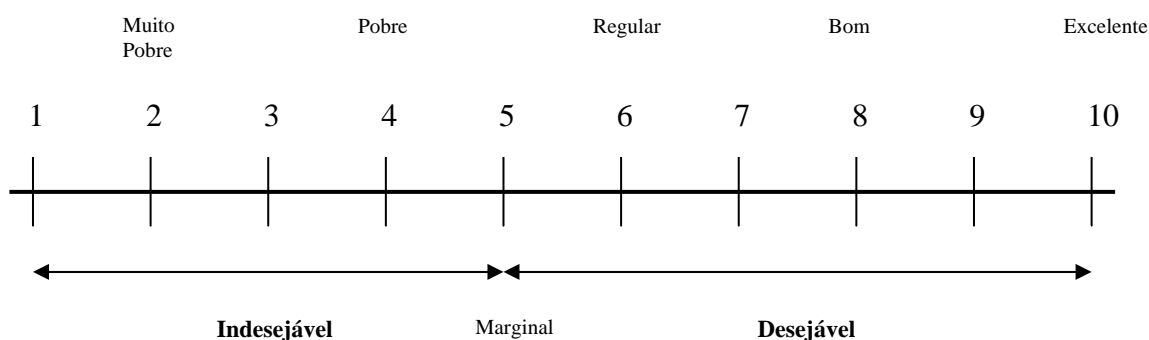


Fig. 4.5 – Escala subjetiva SAE

O critério subjetivo utilizado pela GMB [26] segue uma abordagem semelhante à da SAE, havendo contudo a atribuição de adjetivos para todas as notas e uma descrição do significado de cada uma. Há também uma diferença entre os adjetivos dados às notas 2, 3 e 6:

Tabela XIII – Critério subjetivo GMUTS [26]

| <i>Descrição</i> | <i>Nota</i> | <i>Desempenho</i> |
|--|-------------|-------------------|
| Nada é percebido | 10 | Excelente |
| Sinais observados por alguns avaliadores treinados | 9 | Muito bom |
| Sinais observados por todos os avaliadores treinados | 8 | Bom |
| Sinais observados por todos os avaliadores treinados mas não é um incômodo | 7 | Satisfatório |
| Incômodo para alguns consumidores | 6 | Aceitável |
| Incômodo para todos os consumidores | 5 | Marginal |
| Incômodo para alguns consumidores e falha para outros | 4 | Pobre |
| Falha para todos os consumidores | 3 | Muito pobre |
| Falha para alguns consumidores e não aceitável para outros | 2 | Ruim |
| Falha severa para todos os consumidores | 1 | Muito ruim |

Um ponto importante a ressaltar é que este critério também é utilizado para avaliações de Conforto, que são realizadas simultaneamente com as de Dirigibilidade.

A seguir são descritos alguns critérios conhecidos de avaliação de veículos, que pretendem traduzir tecnicamente a percepção do consumidor e o que ele mais valoriza em Dirigibilidade e Conforto, mesmo que inconscientemente.

4.2.1.1 – Critérios de Avaliação

A Dirigibilidade e o Conforto são avaliados comumente conforme os critérios seguintes [26] [27] [47]:

Dirigibilidade

- **Resposta de direção:** é o tempo de resposta da mudança direcional do veículo após o giro de um ângulo no volante. A reação desejada do veículo é não muito rápida nem muito devagar.
- **Sensibilidade a emendas longitudinais:** as emendas longitudinais da pista podem provocar uma aceleração de guinada (“yaw”) indesejável no veículo. A reação desejada é a menor aceleração possível;
- **Estabilidade em curvas:** classificada em **Precisão** (habilidade do pneu em seguir uma trajetória definida), **Progressividade** (comportamento da força lateral com o ângulo de deriva) e **“Torque and Brake Steer”** (habilidade do pneu em manter a trajetória da curva inalterada com a atuação do motor ou dos freios);
- **Sensibilidade de posicionamento central (“on-center”):** é o aumento verificado no torque do volante, como função de pequenos ângulos aplicados no mesmo ($\sim 5^\circ$) ao redor de sua posição central, com baixa velocidade angular ($\sim 20^\circ/s$);
- **Estabilidade em linha reta:** é a habilidade do veículo trafegar em linha reta em uma superfície de pista lisa independente de agentes externos;
- **Efeito sub e sobre-esterçante:** tendência da suspensão dianteira ou traseira escapar da trajetória da curva sem a atuação do motor ou dos freios;
- **Comportamento em mudança de faixa (“lane change”):** comportamento do veículo após mudança súbita de faixa em alta velocidade. Desejável a resposta mais segura possível do veículo. Para determinados tipos de veículo, especialmente as vans e minivans é utilizado a mudança dupla de faixa, conhecida também como “elk test”, ou teste do alce.

Conforto

- **Aspereza da pista:** é a capacidade de amortecimento do pneu quando o veículo está trafegando em uma superfície de pista corrugada. Quanto mais isolamento o pneu prover, melhor;

- **Capacidade de absorção do pneu:** é a capacidade de amortecimento do pneu ao atingir um obstáculo individual. Quanto mais isolamento o pneu prover, melhor;
- **Esforço de direção ao manobrar e dirigir:** quanto menor esforço o pneu prover, melhor;
- **Deformação do pneu (“flat spotting”):** deformação temporária do pneu após ser aquecido com o uso e deixado sob carga com o veículo parado. Quanto menor a deformação verificada, melhor;
- **Ruído de rodagem:** frequências de 25 a 20.000 Hz emitidas pelo pneu em amplitudes incômodas ao motorista. Quanto menos ruído o ocupante perceber, melhor ;
- **Impactos torcionais no volante (“wheel fight”):** é a “briga com o volante” que ocorre em curvas com raio constante e pavimento irregular. Quanto mais insensível, melhor;
- **Vibração vertical da dianteira do veículo:** estas vibrações são comuns na dianteira de veículos com motor dianteiro e transversal. O comportamento desejado é o mais isolado possível.

4.2.2 – Distância de Parada e Desaceleração

A **Distância de Parada** para o propósito deste trabalho é a distância mínima percorrida pelo veículo **após a aplicação dos freios**, a uma certa velocidade, sob determinada condição de carga até sua parada. Ou seja, desconsidera-se os fatores humanos que definem o tempo de reação t_r (conforme definido em 2.10), refletindo assim o teste real executado em pista. A distância de parada é uma característica mensurada objetivamente através de um teste de mesmo nome, e sofre influência direta do sistema de freios e dos pneus. O teste de distância de parada é aplicado em veículos equipados com ABS (leia-se: frenagem sem travamento das rodas), para velocidades de 60, 80, 100, 120 e 140 km/h. Como referência pode-se citar a Prática Recomendada SAE J299: “Stopping Distance Test Procedure” [48].

CONTRAN em sua portaria 777/93 [49] estabelece que, em uma frenagem partindo de **80 km/h** a distância de parada de um veículo, tanto vazio como em carga máxima (GVW) não pode ser maior que **50,6 metros**. Apesar de ser estabelecido pelo CONTRAN, o que justificaria sua classificação como requisito de segurança, este requisito é classificado aqui como requisito de desempenho, porque normalmente os veículos originais de fábrica atingem valores menores de distância de parada (mais rigorosos) do que o exigido por lei. Cabe então à montadora, dentro do limite legal, estabelecer os requisitos objetivos de distância de parada para um determinado veículo, atuando na percepção do consumidor no quesito de segurança de frenagem. Contudo, ainda não é prática das montadoras brasileiras definir, no início de um projeto, **requisitos de desempenho do pneu** objetivando o atendimento aos requisitos de distância de parada. A prática atual é, após receber o pneu pronto, fazer um comparativo entre o valor medido deste pneu e o valor de pneus de mesma dimensão produzidos por outros fabricantes. Isto pode implicar, caso não ocorra um bom resultado para o pneu e os prazos estiverem comprometidos, até na desconsideração do requisito de distância de parada estabelecido para o veículo no início do projeto, o que é indesejável.

O teste de **Desaceleração** é aplicado em veículos sem ABS, e visa medir a porcentagem de **g** (aceleração da gravidade) atingida em uma frenagem. Este teste é realizado em um veículo com o circuito de freio traseiro desativado, para evitar que um eventual travamento das rodas traseiras tire o carro da trajetória e comprometa as medições. Na categoria de veículos de passageiros, a frenagem é executada reduzindo-se a velocidade de 80 para 40 km/h, e não pode haver travamento das rodas. O desejável é a maior desaceleração possível acima do limite legal. A desaceleração mínima estabelecida pelo CONTRAN 777/93 é $5,8 \text{ m/s}^2$, facilmente atingida pelos veículos. Assim como no caso da Distância de Parada os valores de desaceleração podem ser estabelecidos como requisitos de desempenho, contudo estes ainda não são definidos.

4.2.3 – Resistência ao Rolamento

A avaliação de “**Coast-Down**”, prática comum das montadoras, refere-se basicamente aos efeitos aerodinâmicos e de **resistência ao rolamento** dos pneus. O teste avalia a desaceleração de um veículo que, a uma certa velocidade em linha reta no plano tem sua transmissão desconectada (embreagem desacoplada) e prossegue em sua trajetória até parar completamente. Dentre as forças resistivas ao movimento do veículo, a resistência ao rolamento proveniente dos pneus é avaliada indiretamente neste teste para a verificação de sua influência no consumo de combustível do automóvel. Apesar de ser uma característica importante e monitorada em testes, não é normalmente requerido pelas montadoras brasileiras um requisito objetivo para o valor da resistência ao rolamento dos pneus.

4.2.4 – Uniformidade

O pneu é um componente inerentemente não-uniforme, e pode apresentar variações de massa, espessura e rigidez. O grau de **Uniformidade** de um pneu influencia diretamente o desempenho do sistema veículo-motorista e a percepção final do usuário, fazendo portanto parte dos requisitos de desempenho. A uniformidade é um item significativo, pois nas últimas décadas o conforto e a fadiga dos passageiros tem-se tornado uma grande preocupação das montadoras. Dentre os fatores envolvidos estão os distúrbios vibratórios e audíveis. Os pneus, juntamente com outros componentes do veículo, participam na excitação destas vibrações e ruídos, além de poderem gerar forças que levem ao deslocamento lateral do veículo [50].

O engenheiro de produto deve estabelecer requisitos objetivos para os parâmetros que compõem a uniformidade. Cada pneu fabricado, no final da sua linha de produção, é submetido ao teste de uniformidade e, caso não atenda a todos os requisitos estabelecidos, não poderá ser enviado ao fabricante do veículo. Normalmente os pneus rejeitados são encaminhados ao mercado de reposição. Naturalmente, isto vale apenas para os pneus que passem nos requisitos mínimos de qualidade do fabricante do pneu.

A medição da uniformidade ocorre em uma máquina padronizada. Nela, o pneu a ser testado é montado automaticamente em um aro de teste, inflado e pressionado contra um tambor que gira a velocidade angular constante, enquanto um sistema de medição registra as variações dimensionais e de força [50].



Fig. 4.6 – Máquina de teste da uniformidade [51]

Dentre as características de uniformidade que são especificadas pelas montadoras verificam-se, em particular:

- máxima excentricidade radial;
- máxima excentricidade lateral;
- máxima força de conicidade;

É prática comum o registro dos requisitos de uniformidade em tabelas às quais todas as dimensões de pneu são referenciadas. Assim, cada dimensão de pneu tem seus valores de uniformidade claramente definidos e registrados. Um modelo de tabela de uniformidade é o seguinte:

Tabela XIV – Modelo de tabela de uniformidade

| <i>Tamanho do Pneu</i> | <i>Aro de Teste</i> | <i>Força no Aro [N]</i> | <i>Pressão do Ar [kPa]</i> | <i>Máxima Excentricidade Radial [mm]</i> | <i>Máxima Excentricidade Lateral [mm]</i> | <i>Máxima Conicidade [N]</i> |
|------------------------|---------------------|-------------------------|----------------------------|--|---|------------------------------|
| 175/70 R14 88T | | | A | B | C | D |
| 185/60 R15 88H | | | | | | |
| 185/55 R15 82H | | | | | | |

5 – ANÁLISE CRÍTICA

5.1 – Requisitos de Segurança

Considerando-se como ponto focal os requisitos de segurança estabelecidos na norma brasileira (INMETRO) pode-se levantar as questões a seguir:

- (a) As normas se adequam às necessidades e características do mercado local?
- (b) As recentes revisões nas normas americanas podem contribuir para aumentar a segurança dos pneus produzidos no Brasil?
- (c) Estas revisões seriam adequadas?
- (d) Os requisitos mais rígidos tornam os pneus mais seguros?
- (e) É necessário melhorar a segurança dos pneus brasileiros?
- (f) Esta melhoria afeta o custo do produto?

O intuito desta seção é analisar estas questões objetivando dar a melhor resposta a cada uma delas.

No capítulo 4 foram apresentados, em detalhe, os requisitos de segurança americanos, europeus e brasileiros e ficou clara a grande semelhança entre os requisitos das normas brasileiras com os das normas européias. Isto pode ser explicado pela presença maciça de veículos no mercado brasileiro cujo projeto foi originado na Europa. Como exemplo atual pode-se citar os veículos da linha da GM

do Brasil, da FIAT, da Volkswagen e da Ford, ou seja, as maiores montadoras brasileiras. Desta maneira, mantendo-se os requisitos de segurança das normas européias, se possibilitaria o desenvolvimento de projetos de veículos nacionais sem grande desvio do conceito original. Provavelmente, este cenário se consolidou paralelamente ao tradicional papel que a engenharia de veículos nacional tem de adaptar projetos já existentes às condições locais, a chamada “engenharia de aplicação”. No tocante aos requisitos de segurança levanta-se aqui a dúvida da real validade desta sinergia e se seria possível adaptá-los para, por um lado serem compatíveis com a origem européia de nossos projetos, e, por outro, atenderem às características do mercado local e necessidades de segurança.

Para o acompanhamento das seções subseqüentes sugere-se a consulta às tabelas apresentadas na seção 4.1.4.

5.1.1 – Temperaturas praticadas nos Testes de Resistência à Carga e à Velocidade

Verificou-se na norma americana para Resistência à Carga e à Velocidade a preocupação em se estabelecer uma temperatura de teste representativa das condições ambientes dos estados mais quentes (do Sul e Sudeste) dos EUA. Foi observado que, na última revisão da norma, optou-se por aumentar a temperatura de teste de 38 °C para 40 °C. Esta revisão procurou refletir picos de temperatura máxima que ocorrem nestas regiões, e não uma condição ambiente constante.

Cabe aqui uma exposição de dados de temperatura no Brasil, que podem fornecer subsídio para a análise da temperatura de teste definida atualmente pelo INMETRO. A figura abaixo nos mostra as temperaturas médias máximas para as diversas estações do ano no Brasil em um período definido:

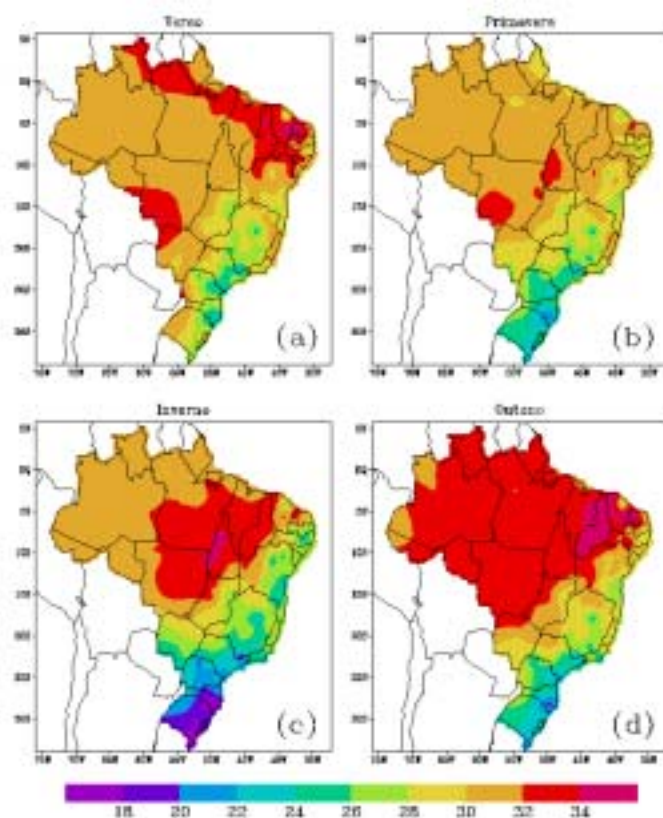


Fig. 5.1 – Climatologia de temperatura máxima (°C) do Brasil para as quatro estações do ano: verão (a); primavera (b); inverno (c) e outono (d); realizada durante o período de 1961 a 1990 [52]

Apesar de se verificarem temperaturas médias de até 35 °C no verão na região Nordeste, ainda é possível verificá-las no outono, principalmente no Estado do Piauí. As mesmas altas temperaturas ocorrem mesmo no inverno, como indicado no mapa (c) da Fig 5.1, ressaltando a persistência de temperaturas elevadas na região oeste do Estado de Tocantins ao longo do ano todo. Segundo De Quadro, M.F.L. et al. [52], “observa-se nas Regiões Norte e Nordeste temperaturas elevadas, com pouca variabilidade durante o ano, caracterizando o clima quente nestas Regiões.” Pontualmente, as seguintes temperaturas máximas do ar foram registradas em algumas cidades brasileiras [53]:

- Cuiabá (MT): **39,1 °C** (1993)
- Teresina (PI): **38,1 °C** (1989)

- Porto Alegre (RS): **37,2 °C** (1993)

Em contraste à norma americana, as normas brasileira e europeia especificam uma faixa de temperaturas permitidas no teste, e no caso brasileiro os valores podem variar de 20 a 30 °C (igual à norma europeia) ou de 35 °C a 41 °C. Pode-se verificar com esta segunda faixa que já houve uma iniciativa do INMETRO em adequar as condições do teste para temperaturas mais altas, entretanto ainda se dá a possibilidade de escolher pela faixa de 20 °C a 30 °C, o que minimiza a severidade do requisito. No caso de um determinado pneu falhar no teste brasileiro de Resistência à Velocidade e o elemento causador identificado for a temperatura, haverá a possibilidade do fabricante optar pela faixa inferior. Paralelamente, pode-se concluir que, com base nos dados acima, a faixa superior de 35 °C a 41 °C é adequada à realidade do clima brasileiro, principalmente nas estações de verão, outono e inverno.

Considerando que o efeito nocivo das altas temperaturas à integridade estrutural dos pneus é significativo (seção 3.1), fica válida a preocupação em representar nos testes as temperaturas ambientes possíveis e portanto seria mais adequado que a norma brasileira eliminasse a possibilidade do uso da faixa inferior.

5.1.2 – Cargas praticadas no Teste de Resistência à Velocidade

As cargas praticadas neste teste são especificadas como uma porcentagem da capacidade de carga do pneu, tal qual definida pelo índice de carga. Na norma americana atual esta porcentagem é de **85%** e nas normas brasileira e europeia **80%**.

A norma americana FMVSS 110 [4] diz claramente que a Carga Normal (“Normal Load”) no pneu aplicada pelo veículo (seção 4.1.1.1) não deve ser maior que a carga utilizada no teste de Resistência à Velocidade especificada em FMVSS 139 (85%). A razão pela qual os americanos optaram por reduzir o valor da norma 109 anterior [46], cujo valor era 88%, foi para aumentar a reserva de carga do pneu em um veículo sob “Normal Load” de 12% para 15%, resultando em uma margem de

segurança maior quando o veículo está em carga máxima (GVWR) ou está com pneus com pressão abaixo da especificada [1]. Uma consequência imediata desta medida é a necessidade de, em certos casos, a escolha do engenheiro de produtos recair em pneus com índices de carga maiores, pois o limite escolhido pode não prover a margem de segurança de 15%. Este portanto foi um ajuste normativo relacionado com a escolha da especificação de um pneu para um veículo e não com o aumento da severidade do teste. Adicionalmente, como exposto por NHTSA [1], a diminuição da carga não deixou o teste menos severo, pois constatou-se através de experimentos que o tempo até a falha é influenciado basicamente pela velocidade e pela pressão de inflação. Segundo NHTSA [1], o aumento das velocidades do teste (seção 5.1.4) tornou o teste de Resistência à Velocidade ainda mais rigoroso.

Entretanto, não existe nas normas brasileiras e européias uma ligação entre a carga praticada neste teste e a diretriz para seleção do índice de carga do pneu. A norma brasileira atual ALAPA [7] não faz referência ao teste de Resistência à Velocidade nem à condição de Carga Normal para a escolha do pneu. Na norma brasileira é **recomendado** que a carga máxima aplicada ao pneu não seja superior a **90%** do índice de carga [7]. Já a norma européia ETRTO [13] coloca o mesmo critério americano atual. Segundo informação obtida junto ao representante da GMB no órgão normativo de pneus⁸, a edição de 2003 da ALAPA passou a adotar a mesma especificação americana para a seleção de pneus. Esta atualização representa uma melhoria na norma brasileira, visto que a versão anterior não deixa claro qual o caminho a seguir pelo engenheiro da montadora na especificação de pneus. Em relação ao teste, como foi verificado que variações de carga na faixa de 80 a 90% têm pouca influência na ocorrência da falha [1] sugere-se neste trabalho que o padrão atual de **80%** seja mantido. Mesmo que houvesse esta influência, não fica claro como um aumento de carga poderia contribuir para adequar melhor o requisito ao Brasil ou para adicionar segurança aos pneus atuais.

⁸ GONÇALVES, MÁRIO (General Motors do Brasil Ltda., Engenharia de Produtos). Informação verbal.

5.1.3 – Pressões praticadas no Teste de Resistência à Velocidade

As pressões de inflação para pneus de passageiros não foram modificadas na revisão da norma americana, continuando a existir os valores de **220 kPa** para pneus normais e **260 kPa** para pneus reforçados. Como se pode verificar, existe uma diferença entre a norma americana e as normas brasileira e européia: enquanto a norma americana especifica pressões de acordo com a **capacidade de carga** do pneu, a brasileira e a européia especificam de acordo com a **capacidade de carga e categoria de velocidade**. As pressões da norma americana são sempre inferiores às da norma brasileira e européia. Esta diferença ocorre porque, segundo NHTSA [1] a escolha da pressão na norma americana baseou-se em pesquisas (Viergutz et al. apud NHTSA) que indicaram que os pneus são tipicamente utilizados nas ruas com algum grau de sub-inflação. Durante a revisão normativa, a NHTSA optou por não adotar o critério europeu porque as pressões não refletiriam os valores de pressão a frio recomendadas pelo fabricante do veículo, e não refletiriam as pressões reais praticadas nas ruas [1]. Conforme TRA [43], não é exigência legal americana a presença dos símbolos de velocidade nos pneus, o que nos faz concluir, em outras palavras, que para os EUA todos os pneus devem ser seguros para qualquer velocidade de operação. Isto explica a escolha de valores únicos de pressão para o teste de Resistência à Velocidade. Como a lei brasileira segue a lei européia, esta comunização de valores não seria possível, ao menos em curto prazo, o que significa que se deveria manter a classificação das pressões de acordo com o índice de velocidade. Já quanto aos valores propriamente ditos pode-se afirmar que eles foram escolhidos para definir o padrão do teste, pois eles têm significativa influência na aparição da falha [1]. Como estes valores não têm relação com as diferentes regiões (o motorista brasileiro não calibra o pneu diferentemente do europeu) e como continua a haver uma necessidade legal, em ambos locais, da classificação dos pneus por índices de velocidade, sugere-se que tais valores sejam mantidos.

Ao se comparar as pressões adotadas na norma brasileira e na européia é possível notar na norma brasileira um valor de pressão 20 kPa mais baixo para o pneu P e nenhum valor especificado para pneus reforçados de índice P, Q, R e S.

Após consulta a um fabricante de pneus, ativamente presente nas discussões normativas, constatou-se que tal ausência de informação ocorre por erro no documento oficial⁹.

5.1.4 – Velocidades e Durações praticadas no Teste de Resistência à Velocidade

As velocidades prescritas no teste de Resistência à Velocidade são nitidamente distintas ao compararmos os requisitos americanos com os brasileiros e europeus. Enquanto existem velocidades fixas definidas para o teste americano (**140, 150 e 160 km/h**) as velocidades no teste brasileiro e europeu são variáveis de acordo com o símbolo de velocidade do pneu (**VIT, +10, +20, +30 km/h**). Foi exposto no item 3.1 que a iniciativa recente do órgão normativo americano em aumentar as velocidades do teste baseou-se no argumento de que assim se representaria melhor a condição real de rodagem dos veículos nas estradas. É fato que tais níveis de velocidade possam ocorrer em estradas, mas é difícil que sejam sustentados por períodos de tempo altos, como por exemplo os **30 minutos** de cada patamar de velocidade no teste americano. Um fato atuando na contramão disto seria a própria legislação e os meios existentes de controle para a limitação da velocidade máxima nas rodovias. Segundo NHTSA [1], os estágios de **30 minutos** permitiriam ao pneu atingir sua temperatura máxima para cada velocidade e mantê-la, e que durações de **10 minutos** não seriam adequadas para tal, e também seriam muito curtas para provocar falhas. Esta não é a opinião dos órgãos normativos europeus e brasileiros, que praticam patamares de 10 minutos para este teste.

Pode-se fazer uma comparação direta da severidade do requisito americano com o brasileiro no item velocidade. Como foi dito anteriormente, os valores da norma americana são fixos, o que não ocorre na norma brasileira. Considerando-se os índices de velocidade mais comumente praticados para os veículos de passageiros da GMB, pode-se estabelecer a comparação seguinte¹⁰:

⁹ VARELA, GERSON (Pirelli Pneus, Engenharia). Informação verbal.

¹⁰ Considerando-se roda de teste de 1,70 m de diâmetro, comum à norma brasileira e americana. Caso se utilize a roda de 2,0 m, permitida no caso brasileiro, as velocidades da tabela aumentarão em 10 km/h.

Tabela XV – Patamares de velocidade: Comparação entre a norma brasileira e a americana

| <i>Patamar de Velocidade</i> | <i>EUA, FMVSS 139 (todos os pneus)</i> | <i>Brasil, INMETRO 05/00 (índice T)</i> | <i>Brasil, INMETRO 05/00 (índice H)</i> | <i>Brasil, INMETRO 05/00 (índice V)</i> |
|------------------------------|--|---|---|---|
| Velocidade 1 | 140 | 150 | 170 | 200 |
| Velocidade 2 | 150 | 160 | 180 | 210 |
| Velocidade 3 | 160 | 170 | 190 | 220 |
| Velocidade 4 | - | 180 | 200 | 230 |

Vemos claramente que as velocidades especificadas pelo INMETRO superam aquelas especificadas na norma FMVSS. Conforme citado em 4.1.2.1.3, cada patamar brasileiro é sustentado por **10 minutos** exceto o último, que é sustentado por **20 minutos**. Conclui-se que a utilização de velocidades mais altas na norma brasileira tem uma compensação no tempo menor de exposição escolhido. Se aparentemente esta escolha de velocidade e durações para as normas foi arbitrária, a norma brasileira justifica melhor a classificação dos pneus em categorias de velocidade, pois exige que pneus com símbolos de velocidade maiores suportem velocidades maiores.

Com exceção dos altos períodos de exposição definidos, a norma americana apresenta velocidades mais compatíveis com as praticadas nas estradas. Por outro lado, a norma brasileira apresenta velocidades fora da realidade das rodovias, mas dá um significado mais correto ao termo Resistência à Velocidade. Como citado acima, não é exigência legal americana a presença dos símbolos de velocidade nos pneus, o que justifica o requisito único da FMVSS 139. Vemos que há uma clara diferença de enfoque dos dois requisitos: enquanto o teste americano procura representar uma condição real de operação, os testes brasileiro e europeu procuram verificar o desempenho do pneu testado contra um padrão estabelecido (símbolo de velocidade). Não se vê, neste caso, uma justificativa para que a norma brasileira seja alterada.

5.1.5 – Considerações sobre Requisitos não exigidos pelo INMETRO

Um aspecto importante observado após a comparação dos requisitos de segurança (ver Tab.4.1.4.1) é que o requisito americano, confrontado ao brasileiro, estabelece 5 testes adicionais ao de Resistência à Velocidade, tais quais **Resistência à Carga, Desempenho à Baixa Pressão, Impactos Danosos da Pista, Resistência ao Detalonamento e Efeitos de Envelhecimento**.

Após a análise do teste de **Resistência à Carga** vê-se claramente que ele consiste em submeter o pneu a cargas crescentes durante períodos de tempo crescentes e a uma velocidade sempre constante. Segundo NHTSA [1], o propósito desta avaliação é verificar a resistência do pneu ao aumento da temperatura em seu interior. Esta referência informa que o mesmo fenômeno ocorre no teste de Resistência à Velocidade, onde a carga aplicada é constante e a velocidade é variável, mas não deixa clara a razão de existirem dois testes para verificar a mesma característica de desempenho do pneu. Aparentemente, ao definir estes dois testes, a entidade normativa americana procurou reproduzir o superaquecimento de um pneu ocasionado por aumentos de carga ou de velocidade, condições possíveis de ocorrer no uso real de um veículo. Se por um lado o órgão normativo europeu não vê uma justificativa criteriosa (talvez científica) para a adoção de um teste com o mesmo enfoque, o órgão americano parece assumir uma abordagem empírica quanto ao assunto. Como o superaquecimento é um causador de falha nos pneus e como carga e velocidade são fatores que o originam [1,6], sugere-se que o teste de Resistência à Carga seja incorporado aos requisitos brasileiros.

Neste trabalho propõe-se um teste de Resistência à Carga aplicável ao Brasil, valendo-se de alguns benefícios da última revisão normativa americana e outras características particulares, a saber:

- Temperatura: de **35 °C** a **41 °C**, como também sugerido em Resistência à Velocidade (seção 5.1.1);

- Carga: **85%**, **90%** e **100%** do índice de carga, ou seja, a mesma aplicada pela norma americana anterior (FMVSS 109). Aparentemente, o aumento das cargas na última revisão foi meramente arbitrário. A NHTSA justifica este aumento após identificar que a venda de caminhões leves e vans estaria se intensificando nos EUA (seção 3.1). Fazendo-se um paralelo desta afirmação para o Brasil verificou-se que a venda destes veículos apresenta comportamento oposto, como se pode ver na Tabela XVI, o que contribuiu para a escolha dos valores de carga originais;
- Pressão: **180 kPa** para pneus normais e **220 kPa** para pneus reforçados (valores iguais aos especificados em FMVSS 139 e 109);
- Velocidade: de **120 km/h**, mais condizente com pneus radiais, que são de uso mais comum atualmente (vide 3.1);
- Duração: **34 horas**, conforme a norma anterior americana. Não está justificado em [1] o motivo do aumento da duração do teste na nova norma. A manutenção da duração anterior poderia evitar custos maiores para o produto.

Tabela XVI - Vendas internas de veículos nacionais e importados (Brasil), de 1998 a 2003 [54]

| <i>Ano</i> | <i>Comerciais Leves (unidades)</i> | <i>Total da Produção (unidades)</i> | <i>Porcentagem da Produção Total (%)</i> |
|------------|------------------------------------|-------------------------------------|--|
| 1998 | 254.538 | 1.534.952 | 16,6 |
| 1999 | 183.762 | 1.256.953 | 14,6 |
| 2000 | 227.059 | 1.489.481 | 15,2 |
| 2001 | 216.091 | 1.601.282 | 13,5 |
| 2002 | 177.613 | 1.478.619 | 12,0 |
| 2003 | 177.649 | 1.428.610 | 12,4 |

O teste de **Desempenho à Baixa Pressão** foi incorporado aos requisitos americanos na última revisão normativa, e seu objetivo é avaliar o desempenho do pneu em uma condição de pressão mínima, mais especificamente a pressão escolhida para acionar a luz de advertência de baixa pressão no sistema TPMS (ver 4.1.1.2.1). Segundo [1], o valor de pressão mínima escolhido foi a menor pressão especificada nas tabelas normativas que relacionam carga e pressão [13], [43], [7].

Apesar de ser um teste associado ao sistema de monitoramento de pressão (TPMS), o teste de Desempenho à Baixa Pressão é válido na medida em que reproduz uma condição observada na realidade, que é a falta de cuidado de alguns consumidores em manter a pressão dos seus pneus nos valores especificados. Como o sistema TPMS requer investimento da indústria e sua implementação afetará diretamente o preço final do veículo, sua adoção no mercado brasileiro deverá ser objeto de discussões. Entretanto o teste de Desempenho à Baixa Pressão poderia ser aplicado ao Brasil independentemente da adoção do TPMS como dispositivo de segurança. A sugestão para o teste brasileiro é que ele siga os parâmetros de teste estabelecidos pela NHTSA.

O propósito do teste de **Impactos Danosos da Pista** é simular o impacto de um pneu contra um buraco ou uma saliência. O teste americano segue a Prática Recomendada SAE J1981, que especifica os parâmetros de teste. Segundo o Ministério dos Transportes brasileiro [55], no ano 2000 o Brasil possuía 1.724.929 km de quilômetros de estradas, sendo que apenas 164.988 km eram pavimentadas (ou seja 9,56%). Isto faz, conforme citado pela Agência Estado [56] que “o Brasil esteja entre os países com os coeficientes de pavimentação mais baixos do mundo”. Esta fonte ilustra que no Brasil existem 19 km de rodovia por 1.000 km² de território, e já nos Estados Unidos, há 373 km por 1.000 km². Fica evidente que a preocupação americana é significativa, pois apesar de suas estradas terem uma boa qualidade ainda se considerou a possibilidade (real, diga-se) de haver imperfeições nas mesmas. Isto seria aplicável também ao caso europeu, a despeito da boa qualidade de suas estradas ainda há a possibilidade da ocorrência de tais problemas. Como é sabido que as estradas brasileiras são mal-conservadas, estando os veículos sujeitos a diversos tipos de riscos, isto potencializa a ocorrência de falhas desta natureza e portanto sugere-se que seja adotada, na norma brasileira, a exigência do teste de Impactos Danosos da Pista.

O teste de **Resistência ao Detalonamento** visa avaliar quão bem o talão permanece encaixado no aro da roda durante curvas severas. Dados de 1998 coletados pela NHTSA [1] mostram que, ao serem testados 12 veículos em manobras

severas e em superfície de pista nivelada (sem impactos externos ao pneu), 3 apresentaram detalonamento. A falha por detalonamento pode causar consequências desastrosas para os ocupantes do veículo, portanto é fortemente recomendável que a exigência deste teste passe a constar da norma INMETRO. A forma do teste escolhida seria em bancada (conforme 4.1.1.3.1.6), pois assim ficaria insensível ao eventual tipo de veículo utilizado.

Apesar de submeterem os pneus a diversas condições de funcionamento, próximas das reais, os testes acima não consideram a exposição do pneu a fatores ambientais tais quais os experimentados em veículos que percorreram 40.000 km ou mais. Este é o propósito do teste de **Efeitos de Envelhecimento**, cuja forma descrita em 4.1.1.3.1.6 é a proposta do fabricante Michelin [1] para a durabilidade a longo prazo do pneu. Este mesmo teste já é utilizado pela GM americana como indicativo da durabilidade do pneu, e fornece adequadamente uma antecipação dos efeitos provocados pelo uso continuado do componente. Desta forma, propõe-se que tal teste seja incorporado ao requisito INMETRO.

De acordo com o exposto acima verifica-se que é possível adaptar ainda mais os requisitos INMETRO ao mercado brasileiro, aproveitando iniciativas já praticadas nos Estados Unidos sem inviabilizar contudo uma sinergia com a padronização imposta pela norma européia.

5.1.6 – Considerações adicionais

No início deste capítulo foi questionado se requisitos mais severos tornariam os pneus mais seguros. Com a análise aplicada à última revisão normativa americana pôde-se perceber que foram alterados parâmetros de teste, de forma a dar uma resposta aos problemas de segurança já veiculados amplamente na imprensa. As medidas originaram-se de observações experimentais e de condições ambientes locais, contudo algumas delas foram aparentemente tomadas de forma arbitrária, apenas impondo uma exigência maior ao pneu. No seu conjunto, toda a revisão da norma tornou mais rígidos os requisitos e, em consequência, os pneus fabricados sob sua vigência apresentarão maior nível de segurança. Entretanto fica a dúvida se o

custo mais elevado não poderia ser evitado com a aplicação de métodos analíticos e de simulação, melhorando a relação custo/benefício. Numa primeira análise, considerando-se a adição de testes na norma INMETRO proposta na seção anterior, os pneus nacionais passariam a ter um nível de segurança maior.

Outra questão levantada é quanto a necessidade de melhorar a segurança dos pneus brasileiros. Se considerarmos a norma INMETRO 05/00, que deixa de especificar requisitos importantes, a resposta é positiva. O estabelecimento de requisitos de segurança para pneus deveria levar em conta, além da abordagem científica, o estudo das condições ambientes locais, principalmente no tocante à temperaturas e condições das estradas, e o estudo do comportamento real do motorista. O requisito europeu, base para o requisito brasileiro, peca por não avaliar o uso do pneu em pistas irregulares, danificadas ou esburacadas e também não considera efeitos ocasionados pelo uso do pneu com baixa pressão, que ocorre pela manutenção inadequada do pneu. Isto faz com que haja a necessidade de uma revisão dos requisitos atuais. Por outro lado, após consulta aos maiores fabricantes de pneus brasileiros (informação verbal) constatou-se que não somente eles atendem aos requisitos americanos para todos os seus pneus, como todo o pneu fabricado passa por requisitos de qualidade internos, frequentemente mais severos que os requisitos legais. Isto nos revela que a grande maioria dos pneus brasileiros já possuem uma boa confiabilidade. Se por um lado os pneus fabricados atualmente cumprem testes severos de segurança, a lei brasileira ainda possibilita que muitos deles não sejam executados, o que implica na necessidade de sua revisão. Há, em particular, a possibilidade de um fabricante de pneus se instalar no Brasil e produzir pneus somente de acordo com a norma INMETRO, o que, apesar de juridicamente correto, não seria adequado à segurança veicular. Outro fator importante observado após o contato com os fabricantes foi a que a revisão da norma INMETRO, conforme sugerida acima, não implicaria em investimentos adicionais nem no aumento do custo do componente.

5.2 – Requisitos de Desempenho

Podemos visualizar os requisitos de desempenho sob a ótica de custo - estrutural ou de produto - e do tempo de desenvolvimento até o lançamento do produto (“time-to-market”). Se por um lado a definição de requisitos de segurança dos pneus pode afetar todas as montadoras indiscriminadamente, diretamente no custo do pneu, a escolha da montadora de como atingir os requisitos de desempenho também influencia custos, que muitas vezes podem ser evitados. Esta escolha afeta não somente o custo do veículo final, mas também o tempo de desenvolvimento e otimização do automóvel. Assumindo que os requisitos de desempenho estejam criteriosamente estabelecidos por pesquisas e projeções de mercado, entra em cena o processo escolhido para atingi-los, que freqüentemente pode ser encurtado pelo uso intensivo de simulação e análise de dados. Entende-se que esse é um campo onde progressos possam contribuir para a competitividade das montadoras no seu segmento de mercado.

5.2.1 – Dirigibilidade e Conforto

Após a análise da bibliografia mais recente relativa às avaliações de dirigibilidade e conforto (Capítulo 3), constatou-se que há estudos consistentes no sentido de antecipar resultados objetivos e subjetivos de teste através de simulação computacional. Estes estudos beneficiam as montadoras e fornecedores quanto à redução de prazos e custos. A adoção de métodos abrangentes de simulação envolveria uma mudança cultural nas empresas, pois hoje o trabalho de desenvolvimento de produtos está muitas vezes calcado em processos de “tentativa-e-erro”. Por outro lado, no tocante ao desenvolvimento de pneus, os benefícios do uso da simulação podem ser significativos e também mensuráveis.

Quando é realizado o desenvolvimento de um pneu totalmente novo, normalmente utiliza-se 3 ciclos (“loops”) de avaliação subjetiva, focados nas características de dirigibilidade e conforto. Estes ciclos são executados pelo

fabricante do veículo em seu campo de provas ou instalações similares de teste e ocorrem após a disponibilidade das amostras, ou seja, após a finalização do ferramental (molde) no fornecedor do pneu. O “loop” de dirigibilidade e conforto, como praticado atualmente, visa **verificar** o comportamento do veículo completo perante o novo pneu, e normalmente são necessários “loops” adicionais até a determinação da especificação final do pneu. Entre cada “loop” o fornecedor altera características construtivas do pneu de acordo com as necessidades levantadas na última avaliação e então submete novas amostras. Considerando-se fixo o prazo de execução do ferramental, vemos que há um potencial de otimização do tempo dispendido para as avaliações de dirigibilidade e conforto, paralelamente à uma importante mudança do papel dos ciclos de avaliação. A proposta apresentada aqui é mudar o significado destes ciclos: de **verificação** para **confirmação (validação)**.

É possível utilizar programas computacionais em que são alimentadas características físicas dos componentes do veículo e posteriormente são coletados os resultados objetivos de testes de rodagem em percursos previamente selecionados. Programas como Adams® [27] e Virtual Ride® [26] são por vezes apelidados de “Campos de Provas Virtuais”, e proporcionam excelentes correlações de dados com a realidade quando bem utilizados [27]. As Figs. 5.2 e 5.3 mostram a comparação entre resultados de simulação e de medição, respectivamente da aceleração lateral e da velocidade de guinada em testes do tipo “Elk Test”, realizados em veículos Corsa e Astra 2001 da GMB.

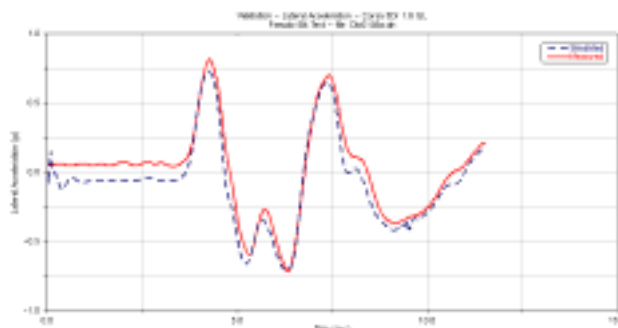


Fig. 5.2 – “Elk Test” simulado para o Corsa 2001: Aceleração Lateral x Tempo (vermelho contínuo: medido; preto pontilhado: simulado) [27]

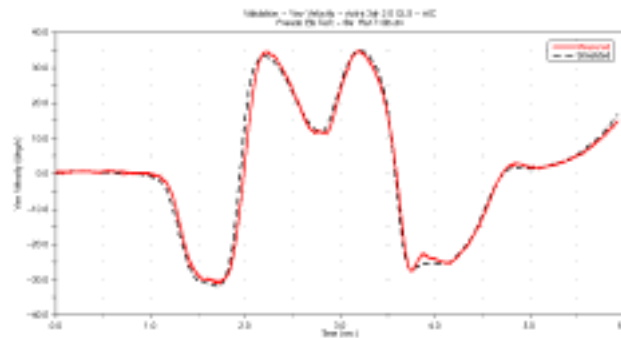


Fig. 5.3 – “Elk Test” simulado para o Astra 2001: Velocidade de Guinada x Tempo (vermelho contínuo: medido; preto pontilhado: simulado) [27]

Com o propósito de otimizar o tempo de desenvolvimento do pneu, a proposta é que os resultados buscados pelos testes de rodagem simulados sejam exatamente as características de resposta dinâmica do veículo que efetivamente influem no julgamento subjetivo do motorista. De posse desses dados, seria possível chegar, através do tratamento por métodos de redes neurais ou similares [16] [17], às notas subjetivas simuladas. Partindo do princípio em que já temos as notas subjetivas definidas - **os requisitos** - o trabalho de simulação viria de trás para frente, ou seja, revelando qual a especificação correta que cada componente deve ter (buchas, batentes, amortecedores, molas, pneus) para atendê-los. Dessa forma seria possível, antes mesmo do trabalho do fornecedor em ferramental, ter em mãos um apanhado de especificações técnicas para o componente – no caso o pneu – para atender aos requisitos do projeto.

Neste ponto, ocorreria uma mudança significativa no modo de trabalhar o desenvolvimento do pneu. O desenvolvimento direcionado ao atendimento de características físicas definidas levaria agora à utilização de **apenas um “loop”** de avaliações de dirigibilidade e conforto, cujo novo papel seria **validar** o desenvolvimento virtual previamente realizado. Paralelamente, o trabalho no fornecedor seria guiado objetivamente desde o início das atividades, evitando-se decisões incorretas de projeto por falta de informação. O engenheiro de produtos da montadora deveria lidar, a partir de então, com uma gama de informações técnicas sobre o pneu muito maior do que a utilizada atualmente e deveria ser capaz de

analisá-la e discuti-la desde cedo com o fornecedor. Este novo processo influenciaria diretamente o **período** dispendido até a aprovação final do pneu e também os **custos** de engenharia.

5.2.1.1 - Período até a aprovação

A seqüência de atividades até a aprovação do pneu é composta das seguintes etapas:

“Packaging” e Definição dos Requisitos: O “Packaging” é o estudo em computador da instalação do novo pneu no veículo, onde se define a dimensão adequada do pneu. A definição dos requisitos é formalizada em um documento contendo os requisitos de desempenho, dados normativos, datas a serem atendidas, necessidades de amostras, entre outras informações.

Definição do Fornecedor: Processo de nomeação do fornecedor do pneu pelo departamento de compras da montadora;

Elaboração do Desenho do Componente: É uma etapa cumprida pelo fornecedor já nomeado, de modo a atender aos requisitos de documentação e qualidade da montadora;

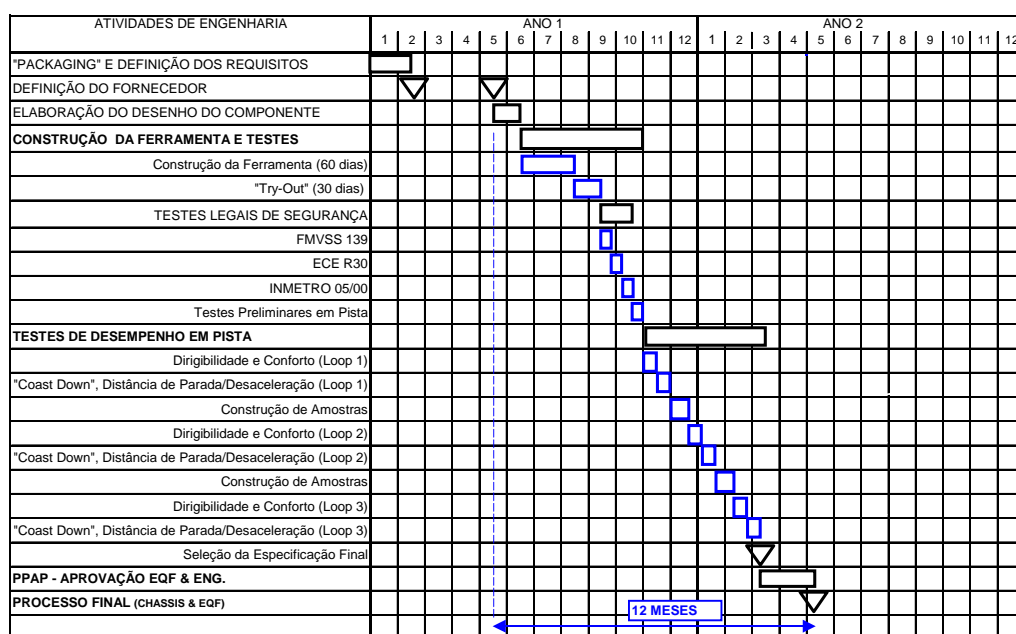
Construção da Ferramenta e Testes: Esta etapa compreende a execução da ferramenta, obtenção das primeiras amostras, execução dos testes exigidos pela legislação e de testes dinâmicos preliminares no fornecedor;

Testes de Desempenho em Pista: É neste período que ocorrem os “loops” de dirigibilidade e conforto. Em cada “loop” é verificado também o desempenho do pneu quanto à distância de parada, desaceleração e resistência ao rolamento. Normalmente dura **4,5 meses**;

Processo de Aprovação de Peça de Produção (“PPAP”) e Aprovação Final: Após a seleção da especificação do pneu pelo engenheiro de produto, o departamento de qualidade da montadora executa a verificação do processo produtivo do fornecedor e de sua prontidão para atender à repetibilidade da especificação aprovada e aos volumes definitivos de produção.

Esquemáticamente, pode-se visualizar estes eventos em um cronograma típico de desenvolvimento de pneu:

Tabela XVII – Cronograma usual de atividades de desenvolvimento de um pneu até sua aprovação



O trabalho de desenvolvimento do pneu após a nomeação do fornecedor ocorre durante **12 meses**. A finalização do desenvolvimento é caracterizada pela aprovação formal da especificação final do pneu (projeto) e de sua produção seriada (processo).

Uma razão para que se execute sempre nos “loops” **2** e **3** avaliações de “coast-down” e distância de parada é o fato do desenvolvimento de um pneu ser sempre um balanço de compromissos, muitas vezes antagônicos. Normalmente, ao

Consideração Adicional:

Assim como ocorre com os requisitos de dirigibilidade e conforto, os valores de distância de parada e resistência ao rolamento devem estar claramente definidos. O acompanhamento do engenheiro de produtos e do engenheiro de desenvolvimento deve ocorrer desde o início dos trabalhos do fornecedor, de modo a possibilitar o atendimento destes requisitos já no 1º “loop”. Estas características de desempenho serão abordadas nas seções 5.2.3 e 5.2.4.

5.2.1.2 - Custos de Engenharia

Numa abordagem direta, os custos economizados com a adoção da proposta acima estão relacionados à eliminação dos “loops” 2 e 3 . Contudo, como a proposta do uso de simulação é abrangente, exclui-se com esta abordagem os benefícios associados à redução do tempo de desenvolvimento de outros componentes, como os da suspensão. Há também benefícios indiretos ao projeto do veículo completo, mais difíceis de serem mensurados.

Executando um estudo dos custos de engenharia envolvidos foi possível compor os custos associados a cada “loop” de avaliação em pista:

Tabela XIX – Custos associados à realização de um “loop” de avaliações em pista (US\$)

| Teste | Custo de Engenharia (US\$) | Custo de Oficina (US\$) | Custo de Material (US\$) | TOTAL (US\$) |
|-----------------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------|
| Amaciamento | 1.800,00 | 1.230,00 | 210,00 | ↓ |
| Avaliação Subjetiva | 3.000,00 | 2.050,00 | 210,00 | |
| Medição de Aceleração Lateral | 2.400,00 | 1.640,00 | 210,00 | |
| Desaceleração/Distância de Parada | 750,00 | 1.025,00 | 210,00 | |
| Coast-Down | 1.800,00 | 615,00 | - | |
| SUB-TOTAL | 9.750,00 | 6.560,00 | 840,00 | 17.150,00 |

Obs: Cotação média do dólar em junho de 2003: 1 US\$ = R\$ 2,88

Conclui-se portanto que a supressão dos dois “loops” de avaliação resultaria numa economia de US\$ 32.620,00 em mão-de-obra e de US\$ 1.680,00 em material, totalizando **US\$ 34.300,00** de economia para cada pneu desenvolvido em um projeto. Deve-se ainda levar em conta a economia associada à supressão das atividades do fornecedor entre cada “loop”, tais como custos de engenharia, de produção de novas amostras e de logística.

5.2.2 – Distância de Parada e Desaceleração

Durante a frenagem do veículo em condições de perigo o valor da distância de parada desempenha um papel importante no impedimento de colisões traseiras, comuns no trânsito em geral. Assumindo que a segurança mínima seja suprida pelo requisito legal passa-se a classificar as melhorias adicionais na distância de parada como aumento da qualidade de frenagem, ou seja, um diferencial de desempenho.

Com o advento dos “test-drives” nas concessionárias o consumidor passou a obter mais informações sobre o veículo de seu interesse. Mesmo não tendo conhecimento detalhado sobre automóveis, o consumidor comum é capaz de criticar e comparar características básicas de seu funcionamento. As características de desempenho: Distância de Parada e Desaceleração, sofrem influência dos pneus, e se associam à sensação de segurança do motorista em uma frenagem, podendo ser, entre outros fatores, um elemento diferencial na escolha entre dois modelos de veículo. Esta é uma boa razão para justificar a definição de requisitos objetivos para o desenvolvimento do pneu que efetivamente atuem na segurança e desta forma contribuam para a conquista do cliente. Assim como para a dirigibilidade e conforto, o prévio conhecimento das informações sobre distância de parada e desaceleração por parte do fabricante do pneu, possibilitaria o desenvolvimento do pneu focado nesta característica, resultando em menores custos e prazos de desenvolvimento.

Conforme comentado na seção 4.2.2, apesar de serem definidos os requisitos objetivos de distância de parada para um **veículo** (cujo resultado depende da interação do sistema de freio com as rodas e pneus), não há uma preocupação

direcionada ao desempenho do **pneu** isoladamente, nos estágios iniciais do projeto. No entanto, após uma análise do problema físico de frenagem correspondente ao teste em pista, pode-se propor requisitos de desempenho específicos para o pneu.

5.2.2.1 – Proposta de Requisitos para o Pneu que Influenciam na Distância de Parada do Veículo

As forças que atuam no retardamento do veículo em frenagem são, em ordem decrescente de magnitude, a força de atrito pneu-solo, o arrasto aerodinâmico e a resistência ao rolamento dos pneus [9].

Assumindo que somente atua a força de atrito na superfície de contato pneu-solo durante a aplicação dos freios, verifica-se uma desaceleração constante do veículo. Veja o diagrama abaixo:



Fig. 5.4 – Veículo em frenagem: Diagrama simplificado de forças

Aplicando a Lei da Conservação de Energia, estabelecemos que a força de atrito pneu-solo deve executar trabalho para reduzir a energia cinética do veículo para zero:

$$W_{atrito} = \Delta E_C$$

$$W_{atrito} = -\mu.M.g.d_p = -\frac{1}{2}.M.V_0^2$$

A distância de parada é portanto:

$$d_p = \frac{V_0^2}{2 \cdot \mu \cdot g} \quad (1)$$

Isto implica em uma distância de parada independente da massa do veículo, o que constitui um caso idealizado, como veremos a seguir.

Existe ainda o efeito adicional de desaceleração provocado pelo arraste aerodinâmico, que é proporcional ao quadrado da velocidade do veículo. A força de arraste atuando no centro de pressão do veículo é dada pela expressão [9] [57]:

$$R_a = \left(\frac{\rho}{2} \right) \cdot C_a \cdot A \cdot (V - V_v)^2 \quad (2)$$

onde:

ρ = massa específica do ar ($\cong 1,2 \text{ Kg/m}^3$);

C_a = coeficiente de arraste aerodinâmico (adimensional)

A = área frontal projetada (m^2)

V = velocidade do veículo (m/s)

V_v = velocidade do vento (m/s), considerada desprezível nesta análise.

Considerando-se a ação da força de arraste temos a segunda condição de estudo, representada no esquema abaixo:

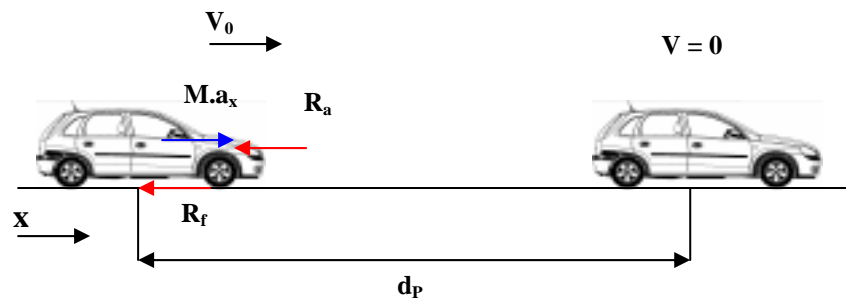


Fig. 5.5 – Veículo em frenagem: Diagrama simplificado de forças incluindo a resistência aerodinâmica

Aplicando a 2ª Lei de Newton para o veículo na direção x temos:

$$\sum F_x = M \cdot a_x$$

$$\sum F_x = M \cdot \frac{dV}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = M \cdot V \cdot \frac{dV}{dx}$$

ou seja:

$$dx = \frac{M \cdot V \cdot dV}{\sum F_x}$$

Sabendo que $\sum F_x = R_f + R_a$ e integrando os dois lados da expressão acima temos:

$$\int_0^{d_p} dx = M \int_{V_0}^0 \frac{V dV}{R_f + R_a}$$

ou seja:

$$d_p = \frac{M}{\rho \cdot C_a \cdot A} \ln \left(\frac{\mu \cdot M \cdot g + \frac{1}{2} \rho \cdot C_a \cdot A \cdot V_0^2}{\mu \cdot M \cdot g} \right) \quad (3)$$

Como exemplo, utilizando características do Corsa Hatchback modelo 2004 temos:

$$C_a = 0,320$$

$$A = 2,005 \text{ m}^2$$

$$M = 1548 \text{ kg (GVW, carga máxima)}$$

A expressão genérica $d_p = f(\mu, V_0)$ aplicada a este veículo é:

$$d_p = 2011 \cdot \ln\left(\frac{15186 \cdot \mu + 0,385 \cdot V_0^2}{15186 \cdot \mu}\right) \quad (4)$$

Considerando a velocidade inicial de 100 km/h (27,7 m/s), temos a seguinte expressão para a distância de parada:

$$d_p = 2011 \cdot \ln\left(\frac{15186 \cdot \mu + 295,37}{15186 \cdot \mu}\right)$$

O valor de distância de parada definido para o veículo implicará no conhecimento do requisito do pneu, traduzido pelo coeficiente de atrito pneu-solo (μ). Considerando-se que a pista de teste utilizada para certificação seja sempre a mesma, com característica de rugosidade constante, a proposta é que o pneu desenvolvido deverá prover o coeficiente de atrito mínimo para garantir a distância de parada especificada para o veículo. Da eq. (4) pode-se isolar μ para determinar o coeficiente de atrito mínimo pneu-solo:

$$\mu_{MIN} = \frac{0,385 \cdot V_0^2}{15186 \cdot \left[\exp\left(\frac{d_p}{2011}\right) - 1 \right]} \quad (5)$$

No caso particular de $V_0 = 100$ km/h:

$$\mu_{MIN} = \frac{1,9450 \cdot 10^{-2}}{\left[\exp\left(\frac{d_p}{2011}\right) - 1 \right]}$$

Podemos, para efeito de comparação, calcular o coeficiente de atrito considerando apenas o atrito solo-pneu (eq. (1)) e considerando também a resistência aerodinâmica (eq. (4)). Para o caso em que a distância de parada requerida é de 50m e a velocidade inicial é de 100 km/h temos:

$\mu_{\text{MIN}} = 0,7821$ (considerando apenas o atrito solo-pneu)

$\mu_{\text{MIN}} = 0,7765$ (considerando o atrito solo-pneu mais o arraste aerodinâmico)

O valor menor de atrito requerido ocorre em função da atuação da força de arraste aerodinâmico, que auxilia na frenagem do veículo. Se considerarmos a ação da força de resistência ao rolamento, μ poderá ser ainda menor. Entretanto, para simplificação da análise, e como a força de RR normalmente possui valores muito pequenos, este fator não será considerado.

Os valores mínimos de atrito determinados pela eq. (5) constituem a proposta de requisitos de desempenho para o pneu e conerão desta forma uma pequena margem de segurança em função da ausência da resistência ao rolamento.

Nota: A frenagem executada no teste de certificação da GM é realizada sem o travamento das rodas (atrito estático somente) e com a transmissão desacoplada (o motor não retarda o movimento). O trecho da pista de testes é plano, o que significa que não existe a componente horizontal do peso do veículo desacelerando o mesmo.

Resta agora conhecer o coeficiente de atrito mínimo correspondente ao requisito legal do CONTRAN (vide seção 4.2.2). Este valor será o limite mínimo para os coeficientes definidos como requisitos de desempenho. Aplicando os dados do Corsa Hatchback 2004 e a distância de parada de 50,6 m com velocidade inicial de 80 km/h na eq. (3) temos:

$\mu_{\text{MÍN}} = 0,4911$

Com base no equacionamento desenvolvido acima é possível conhecermos graficamente a relação entre d_p e μ para diferentes velocidades iniciais de teste:

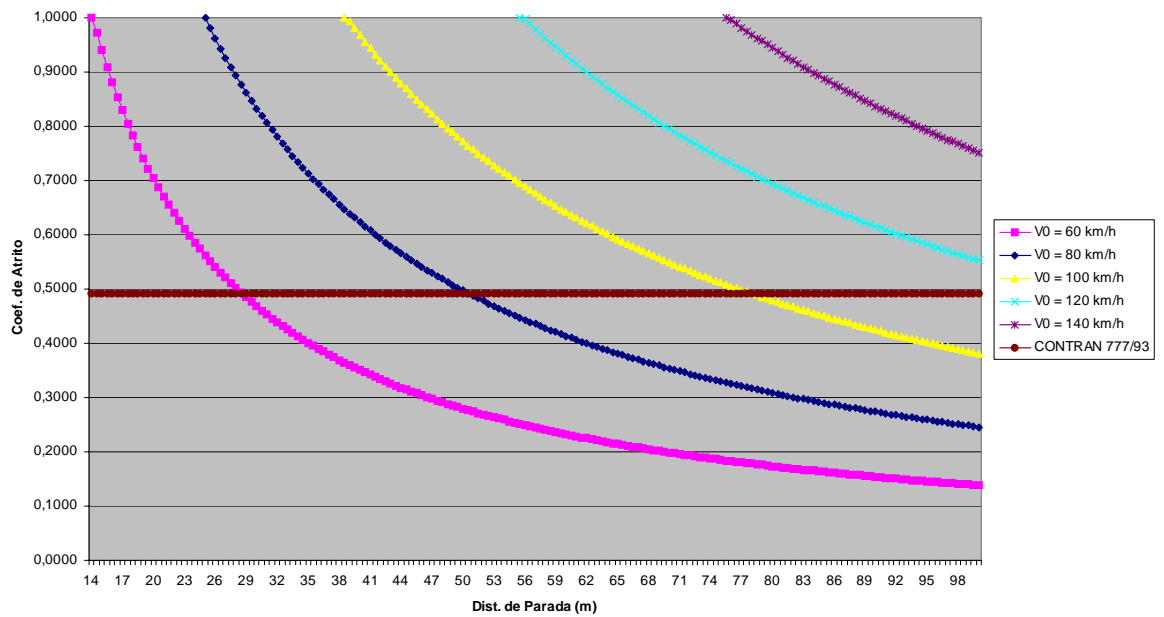


Fig. 5.6 – Relação entre d_p e μ para diferentes velocidades iniciais de teste no Corsa Hatchback 2004 e μ_{MIN} associado ao requisito CONTRAN 777/93

Pode-se verificar como o coeficiente de atrito varia com a distância de parada para diferentes velocidades iniciais de teste. O limite mínimo de atrito, imposto pelo teste de frenagem legal do CONTRAN também foi incluído.

Como os valores de requisitos de d_p praticados para o Corsa Hatchback 2004 situam-se na faixa de 40 a 50m, vemos que os valores correspondentes de μ a 100 km/h variam de 0,9682 a 0,7726. Esta faixa de μ corresponde, para diferentes velocidades de teste a diferentes faixas de requisitos de distância de parada:

Tabela XX – Obtenção do requisito d_p em outras velocidades de teste

| <i>Velocidade Inicial de Teste, V_0 (km/h)</i> | <i>Requisito (d_p)</i> |
|---|-------------------------------------|
| 60 | 14,5 a 18 m |
| 80 | 26 a 32 m |
| 120 | 58 a 72 m |
| 140 | 78 a 97 m |

Portanto, o conhecimento do relacionamento entre d_p , μ e V_0 mostrado previamente permite ao engenheiro de produtos extrapolar os requisitos de d_p para outras velocidades de teste.

Pode-se ainda traçar o gráfico na condição particular de $V_0 = 100$ km/h e d_p variando de 40 a 50 m:

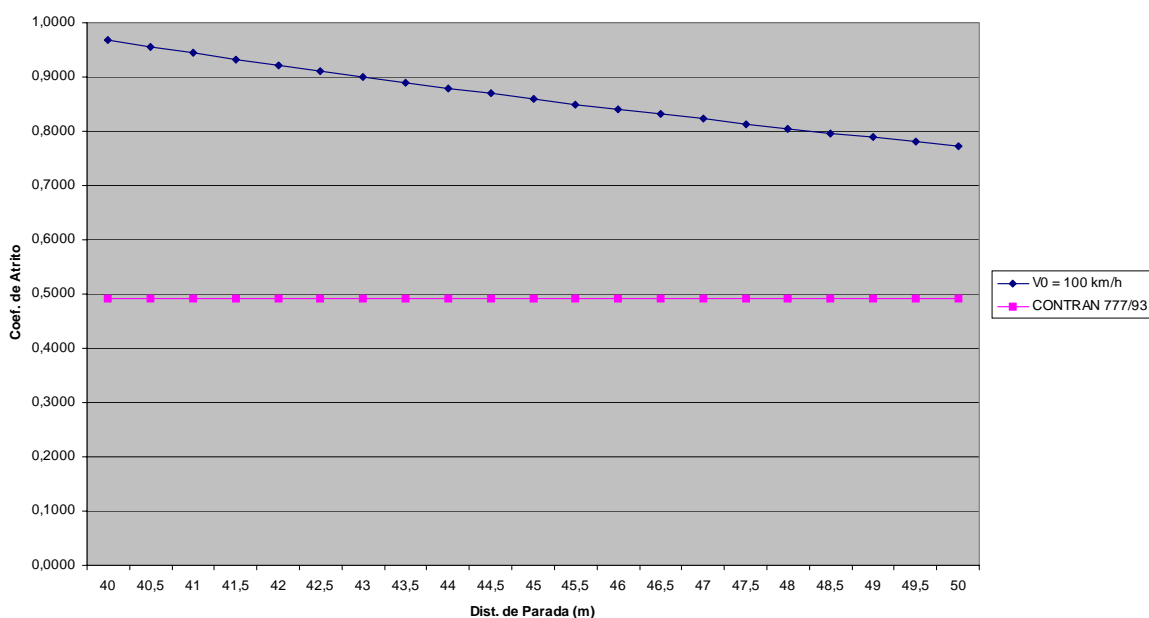


Fig. 5.7 – Variação do coeficiente de atrito na faixa de 40 a 50 m para $V_0 = 100$ km/h (Corsa Hatchback 2004)

Confirma-se que os valores de coeficiente de atrito na faixa de 40 a 50 m (considerada a faixa de operação dos carros de passeio) são sempre maiores que o valor mínimo do CONTRAN, atestando que o requisito legal é mais brando que o requisito atual das montadoras.

Há um benefício adicional da obtenção da relação entre μ e d_p . A representação gráfica da variação de μ com d_p serviria como um guia ao engenheiro de produtos da montadora, podendo ser utilizado em qualquer novo projeto de pneu e/ou veículo. Em um novo projeto, em função do valor de distância de parada definido para o **veículo**, o engenheiro do pneu poderá consultar o gráfico acima e identificar o valor mínimo do coeficiente de atrito a ser atendido pelo fornecedor de pneu. Este requisito deveria posteriormente ser incluído no documento gerado na fase Definição de Requisitos (seção 5.2.1.1).

5.2.2.2 - Considerações gerais sobre o teste de distância de parada:

Conforme definido por Gillespie [9], o coeficiente de atrito varia com o escorregamento do pneu (“slip”). O coeficiente μ cresce rapidamente com o escorregamento, atingindo um valor de pico (μ_p) e daí decresce até o valor de atrito dinâmico (μ_s), onde a roda está completamente travada (veja figura abaixo).

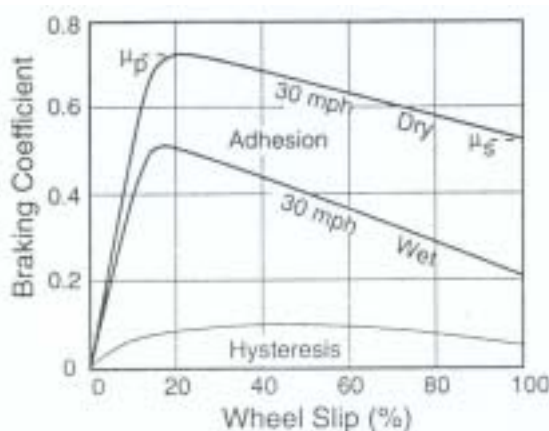


Fig. 5.8 – Coeficiente de atrito μ versus escorregamento [9]

O coeficiente de pico μ_P é uma propriedade que estabelece a máxima força de frenagem possível para um dado par pneu-pavimento. Entretanto, o ponto μ_P é instável, e é atingido plenamente apenas na teoria. Para um dado torque de frenagem, uma vez que a roda é desacelerada para atingir μ_P , qualquer perturbação nesta condição resulta num excesso de torque de frenagem, que causa desaceleração adicional da roda. O escorregamento cada vez maior reduz a força de frenagem, de maneira que a desaceleração da roda continua e a roda chega a travar. Somente uma liberação do freio (como induzida por um sistema ABS) pode retornar a roda para a operação em μ_P [9]. Esta é a razão pela qual o teste de distância de parada é realizado apenas com veículos equipados com ABS.

O coeficiente de atrito a ser exigido como requisito (seção 5.2.3.1) poderá ser considerado μ_P como simplificação.

Como diversos fatores influenciam no coeficiente de atrito disponível, é importante que, no procedimento do teste de distância de parada, estes estejam claramente definidos:

a) Tipo de veículo: O tipo de veículo deve ser especificado, pois caracteriza a força de resistência aerodinâmica.

b) Velocidade Inicial: A velocidade inicial do teste influencia na distância de parada e deve portanto ser especificada claramente no procedimento. Sugere-se como velocidade padrão **100 km/h**.

c) Carga vertical (massa do veículo): O quociente da força de frenagem pela carga vertical é o coeficiente de atrito. Portanto, é conveniente que uma condição de carga padrão seja estabelecida para o teste, por exemplo, carga máxima (**GVW**).

d) Velocidade do Vento: Como a velocidade do vento foi desprezada na análise da resistência aerodinâmica (seção 5.2.3.1) é aconselhável que o teste seja realizado com pouco vento, de modo que V_0 represente o mais fielmente possível a velocidade

inicial do veículo. Segundo Gillespie [9], a velocidade de vento total que incide sobre um veículo é a soma de dois vetores de velocidade: o primeiro é gerado pelo movimento do veículo (V), e o segundo é o vento atmosférico (V_v), que é aleatório em direção e sentido e afeta a força de resistência aerodinâmica, diminuindo-a ou aumentando-a. Quando o vento incide na mesma direção e sentido do deslocamento do veículo o efeito é a diminuição de R_a . Quando o vento incide no outro sentido o efeito é inverso. Segundo este autor, o aumento de R_a num vento frontal é muito maior que a diminuição de R_a num vento traseiro com a mesma velocidade, pois R_a é proporcional ao quadrado de V . Fazendo a análise de sensibilidade de R_a na presença de vento frontal e traseiro com o veículo a 100 km/h (eq. 2) pode-se observar que realmente ocorrem variações maiores em ventos frontais. Esta variação se acentua quanto maior for o módulo de V_v :

| | V_v (m/s) | R_a (N) | Varição de R_a | |
|-------------------|-------------|-----------|------------------|--------------|
| VENTO FRONTAL | -10 | 547,14 | 85,24 % | ↑ AUMENTO |
| | -9 | 518,50 | 75,54 % | |
| | -8 | 490,63 | 66,10 % | |
| | -7 | 463,53 | 56,93 % | |
| | -6 | 437,20 | 48,01 % | |
| | -5 | 411,63 | 39,36 % | |
| | -4 | 386,84 | 30,97 % | |
| | -3 | 362,82 | 22,83 % | |
| | -2 | 339,57 | 14,96 % | |
| | -1 | 317,09 | 7,35 % | |
| | 0 | 295,38 | 0 % | |
| VENTO TRASEIRO | 1 | 274,43 | -7,09 % | ↓ REDUÇÃO |
| | 2 | 254,26 | -13,92 % | |
| | 3 | 234,86 | -20,49 % | |
| | 4 | 216,23 | -26,80 % | |
| | 5 | 198,37 | -32,84 % | |
| | 6 | 181,27 | -38,63 % | |
| | 7 | 164,95 | -44,16 % | |
| | 8 | 149,40 | -49,42 % | |
| | 9 | 134,62 | -54,43 % | |
| | 10 | 120,60 | -59,17 % | |

Fig. 5.9 – Variação da resistência aerodinâmica a 100 km/h na presença de vento frontal e traseiro no Corsa Hatchback 2004

Para velocidades menores do veículo a variação porcentual de R_a é cada vez maior, considerando-se a mesma velocidade do vento V_v . Como R_a tem um papel secundário

na distância de parada, propõe-se permitir uma variação de até 23% em seu valor durante o teste, o que corresponde a $V_v \leq 3 \text{ m/s}$.

Adicionalmente há outros fatores de influência que devem igualmente ser definidos:

e) Presença de água na pista: A presença de água diminui significativamente o atrito por adesão, que é a maior parcela do atrito entre o pneu e o solo [9]. É portanto necessário que a superfície da pista esteja **seca** neste teste.

f) Temperatura da pista: Segundo Costa [58], a temperatura da pista influencia o coeficiente de atrito. Deve-se estabelecer assim uma faixa de temperatura aceitável para o teste. Uma sugestão seria adotar a faixa de temperaturas da pista utilizada pela GM Européia: **5 a 40° C**.

g) Pressão de inflação dos pneus: Em pista seca, a pressão dos pneus influencia levemente os coeficientes μ_p e μ_s [9]. Sugere-se que no teste todos os pneus estejam com a mesma pressão, de preferência a pressão especificada na **etiqueta** do veículo.

5.2.3 – Resistência ao Rolamento

Conforme definido na seção 2.19 a resistência ao rolamento total e as forças aerodinâmicas no veículo compõem a chamada “carga da pista”, cujo valor tem influência direta no consumo de combustível do automóvel. Como um dos objetivos da montadora é a execução de um projeto de veículo (e de pneu) voltado a desempenho, é natural que, dentre as características a otimizar esteja a resistência ao rolamento do pneu. Quanto menor for a RR, menor será a contribuição do pneu para o consumo de combustível do veículo.

Curiosamente, as montadoras brasileiras ao iniciarem novos desenvolvimentos não costumam especificar aos fabricantes de pneus um requisito objetivo de RR. Em consequência, o desenvolvimento do pneu acaba sendo executado sem foco em consumo de combustível e acaba-se privilegiando apenas o desempenho em dirigibilidade, conforto e requisitos de segurança.

Propõe-se, nesta parte do trabalho, a inclusão da RR como um dos requisitos estabelecidos no início do projeto do pneu. Uma vez definido este requisito, o fabricante do pneu terá claro mais um dos objetivos de projeto a perseguir.

Devido à ausência de valores de referência, inclusive dos pneus atualmente fabricados, é necessário estabelecer um procedimento para definir o requisito de RR para futuros projetos. Este procedimento proposto envolve a medição e a comparação dos pneus existentes.

A medição da RR de pneus é regulamentada pela norma ISO 8767 [62] e por práticas recomendadas da SAE J1269 [63] e J2452 [32]. As duas primeiras normas estabelecem a medição de RR numa condição padrão de carga, pressão de inflação e uma única velocidade de teste, 80 km/h, e são ainda muito utilizadas na indústria, inclusive na Europa [59]. Já a nova norma SAE J2452 considera a medição em múltiplas velocidades. Como a RR depende da velocidade e quase 95% das velocidades experimentadas por um pneu em uso urbano são abaixo de 80 km/h (ciclo urbano EPA, Fig. 5.13) o método SAE J2452 pode ser visto como superior aos demais. Veja por exemplo o comportamento da RR em função da velocidade para dois pneus P195/70 R14 90S de dois fabricantes diferentes:

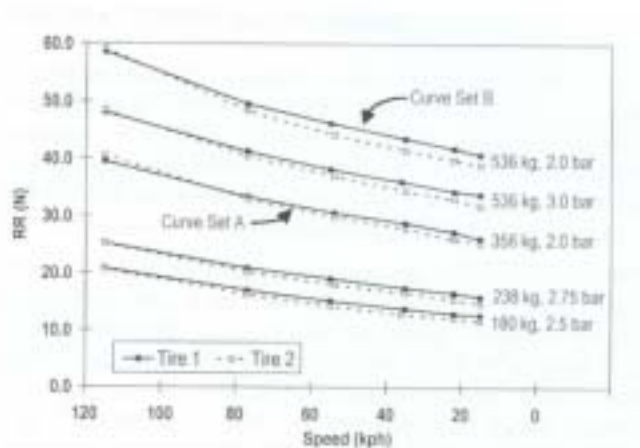


Fig. 5.10 – RR versus velocidade para P195/70 R14 90S (dois fabricantes diferentes, medidas no mesmo laboratório) [31]

Quando as curvas de RR se interceptam, o “ranking” dos pneus se altera, dependendo da velocidade analisada. Portanto, considera-se adequado explorar o método SAE J2452 [32] para definir o requisito de RR.

A norma SAE J2452 é um novo procedimento de teste para medir RR de pneus em laboratório. Ela considera a dependência de RR pela velocidade em adição ao efeito da carga no pneu e da pressão de inflação. A RR, carga aplicada e pressão do pneu são medidos à várias velocidades para cada combinação de carga e pressão.

São executados ciclos de “Coastdown” (livre desaceleração) do pneu, que é pressionado contra um tambor rotativo:

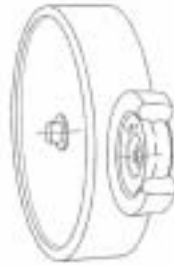


Fig. 5.11 - Pneu e tambor rotativo [32]

Cada “Coastdown” é feito em uma combinação de carga e pressão de inflação, e os dados são coletados num mínimo de 6 velocidades. Pelo menos 24 valores de RR são gerados:

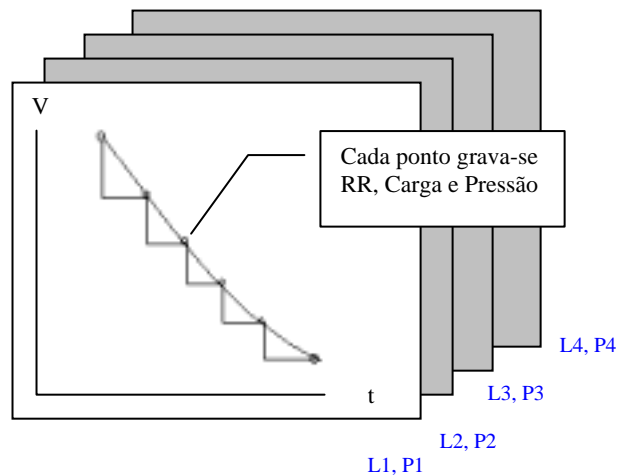


Fig. 5.12 – Dados coletados no teste de “Coastdown”

Através dos dados coletados, é possível desenvolver um modelo matemático que caracteriza o comportamento de RR como função das variáveis independentes carga, pressão de inflação e velocidade:

$$RR = P^\alpha Z^\beta (a + b.V + c.V^2) \quad (6)$$

onde:

RR = resistência ao rolamento (N)

P = pressão de inflação do pneu (kPa)

Z = carga aplicada (N)

V = velocidade (km/h)

α, β = expoentes da regressão

a, b, c = coeficientes da regressão

Na regressão não-linear feita na eq. (6) são utilizados os valores medidos de P, Z e V para cada condição L-P. A equação acima representa a RR de um pneu sobre uma faixa de cargas, pressões e velocidades, e pode ser vista como a “assinatura” da RR do pneu nas condições de serviço [32]. Este modelo também possibilita o cálculo da RR em quaisquer condições de carga, pressão e velocidade.

O procedimento SAE J2452 introduz a definição de um novo parâmetro, chamado MERF (“Mean Equivalent Rolling Force”), que é eficiente para capturar o desempenho da RR de um pneu sobre faixas de velocidades de interesse. As faixas de velocidades de interesse são ciclos de utilização de veículos em cidades e estradas. Estes são padrões velocidade versus tempo que são utilizados em testes de emissões de poluentes e economia de combustível, segundo a EPA, agência de proteção ambiental dos EUA (“Environmental Protection Agency”) [60]:

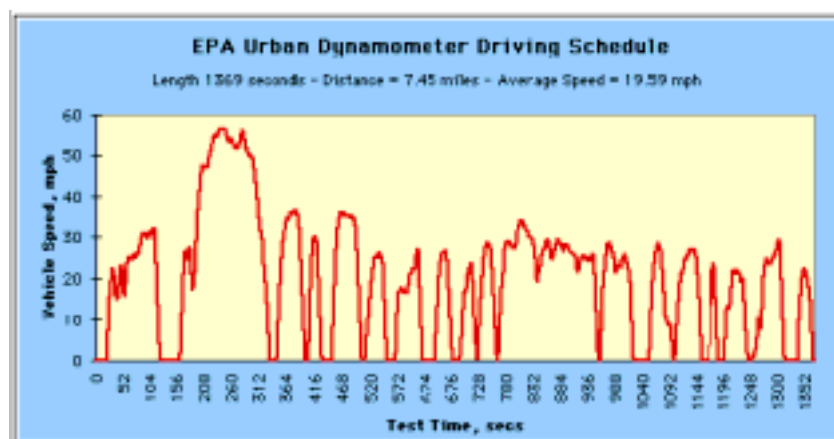


Fig. 5.13 – Ciclo urbano EPA [60]

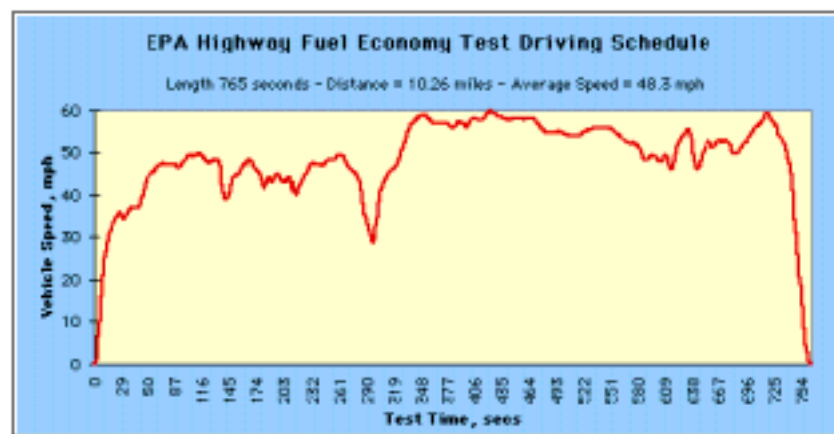


Fig. 5.14 – Ciclo de estrada EPA [60]

O parâmetro MERF é definido, a uma dada condição de pressão e carga, como a média de todos os valores de RR correspondentes a cada ponto velocidade-tempo no ciclo padrão. A RR é ponderada à cada velocidade, pelo período de tempo gasto naquela velocidade durante o ciclo. Caso se opte por não utilizar o ciclo padrão EPA pode-se inserir qualquer ciclo para o cálculo de MERF.

Matematicamente:

$$MERF_{U/E} = \frac{\int_{t_0}^{t_f} RR \cdot dt}{\int_{t_0}^{t_f} dt}$$

onde $MERF_{U/E}$ é a RR média equivalente sobre qualquer ciclo urbano ou de estrada. O termo t_0 corresponde ao início do ciclo e t_f ao tempo no final do ciclo. O integrando RR vem da Equação XX.

Substituindo as variáveis, vemos que, para uma dada condição carga/pressão MERF fica apenas em função de t. Aplicando um método de integração numérica e selecionando um intervalo de tempo $\Delta t = 1s$ entre pontos sucessivos de velocidade na curva Vx t do ciclo tem-se a definição do MERF:

$$MERF_{U/E} = \frac{P^\alpha Z^\beta \left(at_f + b \sum_{i=1}^f V + c \sum_{i=1}^f V^2 \right)}{t_f}$$

A equação acima deve ser utilizada para calcular o MERF tanto para o ciclo urbano como o de estrada. O MERF final deve ser uma composição dos resultados dos dois ciclos, e conforme é colocado pela norma:

$$MERF = 0,55(MERF_U) + 0,45(MERF_E)$$

Para se estabelecer uma base comum de comparação pode-se definir uma condição única de carga e pressão para todos os pneus. A norma SAE estabelece os seguintes valores:

- Pneus de Passageiros Tipo “P”: Carga = 70% da máxima recomendada; Pressão de Inflação = 260 kPa
- Pneus de Utilitários Leves Tipo “LT”: Carga = 70% da carga a 350 kPa; Pressão de Inflação = 350 kPa
- Pneus de Utilitários Leves Tipo “High Flotation”: Carga = 70% da carga a 35 psi; Pressão de Inflação = 35 psi

Resta contudo conhecermos os valores-padrão para pneus milimétricos, o que poderia ser utilizado em uma norma brasileira.

Quando calcularmos o MERF nas condições acima estaremos determinando o SMERF (“Standard Mean Equivalent Rolling Force”). Estes serão os valores destinados a gerar os requisitos de RR dos pneus. O pneu com menor valor de SMERF terá a menor RR em toda a faixa de velocidades consideradas nos ciclos-padrão.

Com a adoção do procedimento acima para calcular o valor da RR surgirá um banco de dados para todos os pneus de interesse. Tomando como exemplo os pneus aplicados na General Motors do Brasil pode-se sugerir uma tabela de controle, a qual também pode conter dados de pneus de veículos concorrentes, mesmo que a dimensão do pneu não seja igual ao do veículo analisado. Isto possibilitará uma análise comparativa por segmento veicular:

Tabela XXI – Tabela de controle de dados de RR

| No. | Pneu | Fornecedor | Aplicação | SMERF (N) |
|-----|------------|------------|-------------|-----------|
| 1 | 165/70 R13 | Goodyear | Corsa/Celta | |
| 2 | 165/70 R13 | Pirelli | Corsa/Celta | |
| 3 | 165/70 R13 | Firestone | Corsa/Celta | |
| 4 | 165/70 R13 | Pirelli | Palio | |
| 5 | 165/70 R13 | Michelin | Reposição | |
| 1 | 175/65 R14 | Goodyear | Fiesta | |
| 1 | 175/70 R14 | Pirelli | Meriva | |
| 2 | 175/70 R14 | Firestone | Montana | |
| 1 | 185/60 R15 | Pirelli | Meriva | |

Identificando-se o menor valor para cada pneu passa-se a adotá-lo como requisito para o projeto seguinte. Caso o projeto de pneu seja novo para a montadora, adota-se o menor valor da concorrência ou do mercado. Caso o projeto do pneu seja totalmente novo adota-se o requisito de RR do pneu com medida e construção mais próxima.

O requisito de RR deverá estar claramente identificado no documento gerado na etapa “Packaging e Definição dos Requisitos” (ver seção 5.2.1.1.) que será entregue aos fornecedores de pneu participantes do processo de cotação comercial.

5.2.4 – Uniformidade

Ao abordarmos os requisitos de desempenho o foco se concentrou na busca da melhoria de qualidade do projeto do pneu e de sua aplicação no veículo. Entre os parâmetros que caracterizam esta qualidade também se inclui a uniformidade, que conforme definida no Capítulo 2, é a medida quantitativa das variações geométricas e de força quando o pneu está em movimento. Como resultado de uma inferência direta, quanto mais uniforme for o pneu, mais satisfeito ficará o consumidor.

Entretanto, existem limitações no processo produtivo do pneu que impossibilitam sua fabricação totalmente uniforme, por mais perfeito que seja este processo. Por outro lado, é necessário controlar determinadas características e estabelecer valores aceitáveis para estas variações de modo a não afetar negativamente o funcionamento do veículo e a percepção do cliente. Com base nisto, cada montadora estabelece limites de uniformidade, mais comumente:

- Máxima excentricidade radial;
- Máxima excentricidade lateral;
- Máxima conicidade.

Quanto mais rígidos forem estes limites maior é a rejeição na linha de produção do pneu, e em conseqüência, o custo deste para a montadora passará a ser maior¹¹. O desafio portanto é definir valores de uniformidade que sejam exatamente o mínimo necessário para garantir a qualidade do automóvel e assim não onerar desnecessariamente o seu custo final.

Em busca do entendimento da origem dos valores atualmente praticados e exigidos dos fornecedores de pneu descobriu-se que¹²:

- a) O **aro de teste**, a **força** e a **pressão** aplicadas no pneu testado são pré-estabelecidas em norma. Considerando-se a norma SAE J332 para pneus de passageiros [50], a força aplicada deve ser igual a 85% da capacidade de carga (índice de carga) do pneu. Já a pressão deve estar na faixa de $205 \pm 3,45$ kPa. Outra norma comumente utilizada é a W.d.K. 109, da Associação Econômica da Indústria Alemã de Borracha [61].
- b) Os valores de **máxima excentricidade radial e lateral** e **conicidade** são os mesmos para todas as dimensões de pneu.

¹¹ Conforme mostrado em 4.2.4 os fabricantes de pneus verificam a uniformidade de 100% dos pneus produzidos. Os que estão dentro dos limites da montadora são enviados para a montadora, os demais vão para o mercado de reposição.

¹² Veja tabela em 4.2.4.

Conforme relatado por engenheiros da Adam Opel AG, no passado as montadoras européias, ao se depararem com problemas de vibração nos veículos, resolveram contatar os fabricantes de pneu para gerar uma solução para o problema, e foram oferecidos pneus com diferentes características de uniformidade, em particular de **excentricidade radial**. Através de testes, cada montadora conseguiu convergir para o valor que representava o melhor compromisso entre performance e custo. Desta maneira, aplicou-se o mesmo procedimento para a excentricidade lateral e a conicidade, gerando os valores praticados atualmente. Tais valores também são hoje aplicados no Brasil, sem alteração.

A experiência de avaliações na Europa revelou que a excentricidade e as forças **radiais** são não só as mais críticas para o desempenho do veículo, como também são as que mais afetam custo. E esta relação desempenho-custo é diretamente proporcional. A BMW por exemplo, busca atualmente restringir ainda mais a excentricidade radial como medida para favorecer a performance do veículo, e, conseqüentemente, obtém penalização no custo final do pneu.

5.2.4.1 – Proposta para Requisitos de Uniformidade

Visto que existem veículos com diferentes sensibilidades à vibração pode-se, para efeito de redução de custo, tentar buscar valores de excentricidade radial menos severos nos veículos que, por ventura, tiverem “sobra” deste requisito . Desta forma, pode-se repetir o procedimento outrora adotado pelos europeus (de avaliar diferentes valores de excentricidade radial) e aplicá-lo para os veículos brasileiros, considerando-se também a peculiar característica de nossos pavimentos. Se houver casos em que a excentricidade deva ser restringida deve-se observar a contrapartida em custo.

Já os valores de conicidade estão diretamente relacionados ao desvio direcional do veículo, e não à vibração. O desvio direcional é, juntamente com a vibração no volante, um dos efeitos indesejáveis que, quando presente, o consumidor reclama. Testes realizados no Campo de Provas da Cruz Alta (GM do Brasil)

indicaram que veículos de passeio respondem diferentemente a um mesmo valor de conicidade. Portanto, assim como em relação à excentricidade radial, é aconselhável determinar o melhor valor de conicidade para cada tipo de veículo. Pode-se, com este trabalho, evitar o desvio direcional gerado por conicidade e também evitar, em grau menor, custos desnecessários aplicados atualmente ao pneu.

Para ilustrar a idéia da otimização dos requisitos segue um diagrama aplicado ao requisito de conicidade:

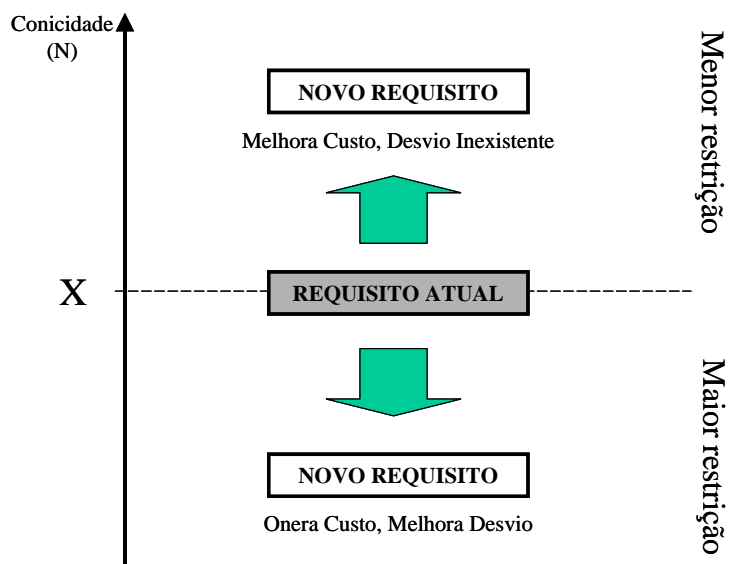


Fig. 5.15 – Requisito de conicidade de um dado veículo e suas implicações

6- CONCLUSÃO

A análise realizada neste trabalho abordou requisitos exigidos de um pneu durante o seu desenvolvimento. A Fig. 6.1 sumariza os requisitos julgados mais importantes neste trabalho.

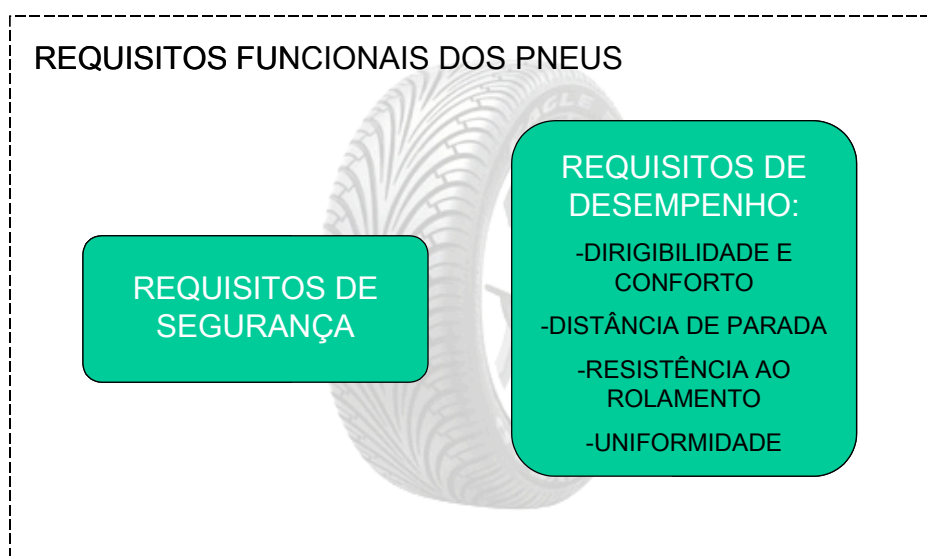


Fig. 6.1 – Requisitos funcionais exigidos dos pneus

A conclusão principal a que se pode chegar é que foi possível, através da análise crítica, gerar propostas relacionadas ao procedimento de teste para certificação legal de pneus no Brasil e ao processo de desenvolvimento de pneus entre uma montadora e seu fornecedor. Cada proposta é sumarizada a seguir.

6.1 – Proposta de requisito de segurança aplicável ao Brasil

A análise dos requisitos americanos e europeus contribuiu para a crítica dos atuais requisitos brasileiros e para a proposta de adequação destes requisitos às características do mercado local. Com isso, foi possível sugerir algumas modificações na norma atual, descritas abaixo.

6.1.1 - Teste de Resistência à Velocidade

O teste de resistência à velocidade teve suas características modificadas conforme segue:

- a) Temperatura: uma única faixa, de **35 °C** a **41 °C**;
- b) Carga: **80%** da capacidade de carga do pneu;
- c) Pressão: mantida conforme índice de velocidade e corrigida pelas pressões aplicadas em **ECE R.30**;
- d) Velocidades: mantida a especificação “Velocidade Inicial de Teste” (**VIT**) **+10, +20 e +30 km/h**;
- e) Duração: **50 minutos**.

Na tabela XXII a seguir pode-se analisar as diferenças entre os requisitos existentes e a proposta apresentada.

Tabela XXII – Quadro comparativo do teste de resistência à velocidade: proposta para teste INMETRO

| <i>Parâmetros de Teste</i> | <i>EUA, FMVSS 139 (atual)</i> | <i>Europa, ECE R30</i> | <i>Brasil, INMETRO 05/00</i> | <i>Brasil, proposta</i> |
|--|-------------------------------|---|--|---|
| Temp. Ambiente (°C) | 40 | 25±5 | 25±5 ou 38±3 | 38±3 |
| Carga (%) | 85 | 80 | 80 | 80 |
| Pressão de Inflação (kPa): Pneu normal Pneu reforçado Categoria de Velocidade (normal / reforçado): L,M,N P,Q,R,S T,U,H V W,Y | 220 260 | 240/280 260/300 280/320 300/340 320/360 | 240/ ND 260(240**)/300(ND**) 280/320 300/340 320/360 | 240/280 260/300 280/320 300/340 320/360 |
| Velocidade do Teste * (km/h) | 140, 150, 160 | VIT, +10, +20, +30 | VIT, +10, +20, +30 | VIT, +10, +20, +30 |
| Duração (min) | 90 | 50 | 50 | 50 |

* Para ECE R30 e INMETRO 05/00 a Velocidade Inicial de Teste (VIT) é definida como a velocidade respectiva à categoria do pneu menos 40 km/h;

** Pneu categoria de velocidade P;

ND: Não definido

6.1.2 - Novo teste proposto: Resistência a Carga

Conforme exposto em 5.1.5, é sugerido que o teste de resistência à carga passe a ser considerado no requisito brasileiro. São relevantes as seguintes características propostas:

- a) Temperatura: de **35 °C** a **41 °C**;
- b) Carga: **85%**, **90%** e **100%** do índice de carga;
- c) Pressão: **180 kPa** para pneus normais e **220 kPa** para pneus reforçados;

d) Velocidade: **120 km/h**;

e) Duração: **34 horas**.

Da mesma forma que no caso anterior, segue um comparativo entre as normas de interesse:

Tabela XXIII – Quadro comparativo do teste de resistência à carga: proposta para teste INMETRO

| <i>Parâmetros de Teste</i> | <i>EUA, FMVSS 139 (atual)</i> | <i>Europa, ECE R30</i> | <i>Brasil, INMETRO 05/00</i> | <i>Brasil, proposta</i> |
|-----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| Temp. Ambiente (°C) | 40 | ND | ND | 38±3 |
| Carga (%) | 90/100/110 | ND | ND | 85/90/100 |
| Pressão de Inflação (kPa): | | | | |
| Pneu normal | 180 | ND | ND | 180 |
| Pneu reforçado | 220 | ND | ND | 220 |
| Velocidade do Teste (km/h) | 120 | ND | ND | 120 |
| Duração (h) | 40 | ND | ND | 34 |

ND: Não definido

6.1.3 – Testes adicionais propostos

Juntamente com o teste de resistência à carga foram propostos testes adicionais, tais quais:

- **Desempenho à Baixa Pressão**, segundo especificação atual da NHTSA;
- **Impactos Danosos da Pista**, segundo prática recomendada SAE J1981;
- **Resistência ao Detalonamento**, segundo especificação atual da NHTSA;
- **Efeitos de Envelhecimento**, segundo especificação Michelin/GM/NHTSA.

Desta forma, os requisitos de segurança brasileiros passariam a conter todos os testes descritos na FMVSS 139, com a devida adaptação ao caso local. Segue um comparativo geral do conteúdo dos requisitos de segurança e o cenário proposto para o caso brasileiro.

Tabela XXIV – Quadro comparativo de requisitos de segurança: proposta para teste INMETRO

| <i>Testes</i> | <i>EUA, FMVSS 139 (atual)</i> | <i>Europa, ECE R30</i> | <i>Brasil, INMETRO 05/00</i> | <i>Brasil, proposta</i> |
|--|---------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| Resistência à Velocidade | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Resistência à Carga | ✓ | | | ✓ |
| Desempenho à Baixa Pressão | ✓ | | | ✓ |
| Resistência à Penetração; ou Impactos Danosos da Pista | ✓ | | | ✓ |
| Resistência ao Detalonamento | ✓ | | | ✓ |
| Efeitos de Envelhecimento | ✓ | | | ✓ |

Conclusões adicionais foram obtidas ao se analisar outras questões levantadas no capítulo 5. Concluiu-se que a revisão da norma americana tornou mais severos os requisitos de segurança, e por conseqüência os pneus fabricados conforme esta regra são mais seguros, porém mais caros. Concluiu-se também que a norma INMETRO atual deixa de especificar variáveis importantes, tais como as temperaturas e condições das estradas, assim como do possível “mau-uso” do produto pelo consumidor, como, por exemplo, a negligência com a pressão de inflação. A adição de testes na norma INMETRO incorporará mais segurança aos pneus nacionais, visto que eles estarão homologados a condições mais próximas do uso real.

6.2 – Proposta de processo de desenvolvimento

Com a análise crítica do processo de desenvolvimento atual foi possível propor um processo aperfeiçoado, cujo objetivo é identificar, logo no início do projeto, todas as variáveis relevantes para o desenvolvimento do pneu, focando-se em desempenho, prazo e custo. A proposta consiste em especificar na etapa “Definição dos Requisitos” (vide 5.2.1.1):

- a) os **requisitos físicos objetivos** para os pneus (p.ex. “cornering stiffness”, etc), conforme resultado do trabalho de simulação;
- b) o **coeficiente mínimo de atrito** para atingir o objetivo de distância de parada do veículo;
- c) o **valor máximo de resistência ao rolamento** do pneu, com base em banco de dados previamente construído segundo o método SMERF (SAE J2452);
- d) o **valor de uniformidade ótimo** para privilegiar custo e desempenho.

Tem-se então um processo estruturado até a obtenção dos requisitos de desempenho do pneu, conforme mostra a Fig. 6.2:



Fig. 6.2 – Fluxograma do processo até a consolidação dos requisitos de desempenho

Após esta especificação objetiva da necessidade de projeto, pode-se partir para etapas seguintes, tais como a definição do fornecedor, a construção do molde, os testes de homologação, a validação em veículo e a aprovação final.

Ao desenvolver o requisito de desempenho do pneu associado à distância de parada do veículo, foi sugerido que o procedimento de teste de distância de parada seja executado nas condições abaixo:

- a) Tipo de veículo: especificado e **único** para cada teste;
- b) Velocidade inicial: **100** km/h;
- c) Carga vertical (massa do veículo): carga máxima (**GVW**);
- d) Velocidade do vento: $V_v \leq 3$ m/s;
- e) Condição da pista: pista **seca**;
- f) Temperatura da pista: **5** a **40°** C;
- g) Pressão de inflação dos pneus: pressão especificada na **etiqueta** do veículo (pressão mínima recomendada).

6.3 – Recomendações

Recomenda-se que seja desenvolvido um software integrado para a simulação de julgamentos subjetivos dos avaliadores, que possibilite a entrada de notas subjetivas (os requisitos subjetivos) e a saída na forma de especificações técnicas de componentes do veículo, entre eles o pneu. Este software poderia ser composto de um módulo com algoritmos de redes neurais, que converteria as notas subjetivas em valores objetivos da dinâmica do veículo (p.ex. valor da aceleração de guinada, etc) e outro módulo, que converteria estes valores objetivos em propriedades dos componentes do veículo (p.ex. “cornering stiffness” do pneu).

É também sugerido para um estudo posterior o equacionamento da expressão de distância de parada com a força de resistência ao rolamento do pneu. Esta expressão traria maior precisão na estimativa do coeficiente de atrito mínimo a ser atingido pelo pneu.

Por fim, sugere-se que seja traçado novamente o gráfico $\mu \times d_p$ considerando-se o limite superior escolhido de velocidade do vento para o teste de distância de parada, $V_v = 3$ m/s.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] FEDERAL REGISTER. 49 CFR Part 571: Federal Motor Vehicle Safety Standards - Tires; Proposed Rule. Washington, DC: National Archives and Records Administration, 5 de março de 2002. 34p.

[2] BRIDGESTONE-FIRESTONE. EUA, 2002. Informações sobre acidentes envolvendo pneus Firestone. Disponível em: <<http://www.bridgestone-firestone-wilderness-atx-tires-accident-tread-car.com/>>. Acesso em 15 de fevereiro de 2002.

[3] GENERAL MOTORS CORPORATION. **Definitions and Terminology – Vehicle and Component Mass - GM North American Engineering Standards – Procedimento L/R-0-2/7001**. Detroit, 2001. (Documento interno da General Motors)

[4] NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION. **Tire Selection and Rims: Passenger Cars - Norma FMVSS 110**. Washington, DC, 2002.

[5] SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **Vehicle Dynamics Terminology – Surface Vehicle Recommended Practice SAE J670e**. Warrendale, 1976.

[6] DIXON, J.C. **Tires, Suspension and Handling**. 2.ed. Warrendale: SAE International, 1996. 621p. ISBN 1-56091-831-4

[7] ASSOCIAÇÃO LATINO AMERICANA DE PNEUS E AROS. Manual de Normas Técnicas 2004. São Paulo, SP, 2003. 307p.

[8] REIMPELL, J.; STOLL, H.; BETZLER, J.W. **The Automotive Chassis: Engineering Principles**. 2.ed. Warrendale: SAE International, 2001. 444p. ISBN 0-7680-0657-0

[9] GILLESPIE, T.D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. 1.ed. Warrendale: SAE International, 1992. 480p. ISBN 1-56091-199-9

- [10] LEITE, H. R. **Pneumáticos: Desempenho em Veículos**. 1.ed. São Bernardo do Campo: Ivan Rossi Editora, 1978. 89p.
- [11] TAHERI, S. **Tire as a Vehicle Component – Apostila de Treinamento Interno Goodyear**. Akron: 1999.
- [12] BOSCH, R. (Ed.) **Automotive Handbook**. Stuttgart: Robert Bosch, dez. 2000. 43 seções. ISBN 0-7680-0669-4
- [13] THE EUROPEAN TYRE AND RIM TECHNICAL ORGANISATION. Standards Manual 2004. Bruxelas, Bélgica, 2003. 300p.
- [14] FEDERAL REGISTER. 49 CFR Part 571 and 590: Federal Motor Vehicle Safety Standards – Tire Pressure Monitoring Systems; Controls and Displays; Final Rule. Washington, DC: National Archives and Records Administration, 5 de junho de 2002. 45p.
- [15] MACDICKEN, B. A Guarantee of Safety?. Revista Tire Technology International, Dorking, Surrey (Reino Unido), p.12-14, setembro 2002.
- [16] MOON, K.S. et al. Modeling of Human Response From Vehicle Performance Characteristics Using Artificial Neural Networks. In: SAE AUTOMOTIVE DYNAMICS AND STABILITY CONFERENCE AND EXHIBITION, Detroit, 2002. **SAE Technical Papers Series**. Warrendale: SAE International, 2002. Artigo SAE 2002-01-1570.
- [17] KING, R.P. et al. Identification of Subjective-Objective Vehicle Handling Links Using Neural Networks for the Foresight Vehicle. In: SAE 2002 WORLD CONGRESS, Detroit, 2002. **SAE Technical Papers Series**. Warrendale: SAE International, 2002. Artigo SAE 2002-01-1126.

[18] DATA, S.C.; PASCALI, L.; SANTI, C. Handling Objective Evaluation Using a Parametric Driver Model for ISO Lane Change Simulation. In: SAE AUTOMOTIVE DYNAMICS AND STABILITY CONFERENCE AND EXHIBITION, Detroit, 2002. **SAE Technical Papers Series**. Warrendale: SAE International, 2002. Artigo SAE 2002-01-1569.

[19] ALLEN, R.W. et al. The Effect of Tire Characteristics on Vehicle Handling and Stability. In: SAE 2000 WORLD CONGRESS, Detroit, 2000. **SAE Technical Papers Series**. Warrendale: SAE International, 2000. Artigo SAE 2000-01-0698.

[20] HIGUCHI, A.; SAKAI, H. Objective Evaluation Method of On-Center Handling Characteristics. In: SAE 2001 WORLD CONGRESS, Detroit, 2001. **SAE Technical Papers Series**. Warrendale: SAE International, 2001. Artigo SAE 2001-01-0481.

[21] NAUDÉ, A. F.; STEYN, J. L. Objective Evaluation of the Simulated Handling Characteristics of a Vehicle in a Double Lane Change Manoeuvre. In: JOHNSON, E. (Ed.) **Tires and Handling**. 1.ed. Warrendale: SAE International, 1996. p. 287-292. ISBN 1-56091-762-8

[22] GIM, G.; NIKRAVESH, P. E. Comprehensive Three Dimensional Models for Vehicle Dynamic Simulations. In: JOHNSON, E. (Ed.) **Tires and Handling**. 1.ed. Warrendale: SAE International, 1996. p. 219-227. ISBN 1-56091-762-8

[23] GARROTT, W. R.; HEYDINGER, G. J. An Investigation, Via Simulation, of Vehicle Characteristics that Contribute to Steering Maneuver Induced Rollover. In: JOHNSON, E. (Ed.) **Tires and Handling**. 1.ed. Warrendale: SAE International, 1996. p. 271-286. ISBN 1-56091-762-8

[24] KAO, B.G.; LOH, W.Y.; GREENBERG, J.A. A 3D Dynamic Tire Model for Vehicle Handling Analysis. Revista Testing Technology International, Compilado Anual de Artigos, Dorking, Surrey (Reino Unido), p.25-31, dezembro 2001.

[25] ARAKI, K.; SAKAI, H.; YANASE, M. Study of Tire Model Consisting of Theoretical and Experimental Equations for Vehicle Dynamics Analysis – Part 1: Under the Condition of Constant Velocity. In: JOHNSON, E. (Ed.) **Tires and Handling**. 1.ed. Warrendale: SAE International, 1996. p. 229-238. ISBN 1-56091-762-8

[26] FRANCESCHINI, F.; VILELA, D.; MESQUITA JR., V. Automotive Suspension Calibration. In: CONGRESSO SAE BRASIL 2002, São Paulo, 2002. **SAE Technical Papers Series**. Warrendale: SAE International, 2002.

[27] VILELA, D. Vehicle Dynamics Simulation Correlation with Field Maneuvers. In: CONGRESSO SAE BRASIL 2001, São Paulo, 2001. **SAE Technical Papers Series**. Warrendale: SAE International, 2001.

[28] MILES, J. Truth be Told. Revista Testing Technology International, Dorking, Surrey (Reino Unido), p.16-20, fevereiro 2002.

[29] RIETH, P.E.; EBERZ, T. Reduction of Stopping Distance Through Chassis System Networking. In: CONVERGENCE 2002, Detroit, 2002. **SAE Technical Papers Series**. Warrendale: SAE International, 2002. Artigo SAE 2002-21-0027.

[30] KODAKA, K. et al. Rear-End Collision Velocity Reduction System. In: SAE 2003 WORLD CONGRESS, Detroit, 2003. **SAE Technical Papers Series**. Warrendale: SAE International, 2003. Artigo SAE 2003-01-0503.

[31] GROVER, P. S.; BORDELON, S. H. New Parameters for Comparing Tire Rolling Resistance. In: SAE INTERNATIONAL CONGRESS AND EXPOSITION, Detroit, 1999. **SAE Technical Papers Series**. Warrendale: SAE International, 2000. Artigo SAE 1999-01-0787

- [32] SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **Stepwise Coastdown Methodology for Measuring Tire Rolling Resistance - Surface Vehicle Recommended Practice SAE J2452**. Warrendale, 1999.
- [33] NIELSEN, L.; SANDBERG, T. A New Model For Rolling Resistance of Pneumatic Tires. In: SAE 2002 WORLD CONGRESS, Detroit, 2002. **SAE Technical Papers Series**. Warrendale: SAE International, 2002. Artigo SAE 2002-01-1200
- [34] GUAN, D. et al. Modeling of Tire Rolling Properties by Using Experimental Modal Parameters. In: SAE 2000 WORLD CONGRESS, Detroit, 2000. **SAE Technical Papers Series**. Warrendale: SAE International, 2000. Artigo SAE 2000-01-0361
- [35] MIHALIK, P. The Thread of an Idea. Revista Tire Technology International, Dorking, Surrey (Reino Unido), p.30-31, dezembro 2002.
- [36] DIÁRIO OFICIAL. Portaria n. 5, de 14 de janeiro de 2000 – INMETRO: Regulamento Técnico da Qualidade para Pneus Novos Destinados à Automóveis, Camionetas de Uso Misto e seus Rebocados Leves, Camionetas, Microônibus, Ônibus, Caminhões e seus Rebocados Leves. Brasília: Imprensa Nacional, n. 13, 19 de janeiro de 2000.
- [37] DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO. Brasília, 2003. Informações e legislação de trânsito. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/>>. Acesso em 17 de março de 2003.
- [38] NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION. Washington, DC, 2002. Informações e legislação sobre trânsito e segurança veicular. Disponível em: <<http://www.nhtsa.dot.gov/>>. Acesso em 22 de abril de 2002.

[39] NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION. **Tire Pressure Monitoring Systems - Norma FMVSS 138**. Washington, DC, jun. 2002.

[40] NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION. **New Pneumatic Tires for Motor Vehicles with a GVWR of 10,000 pounds or less - Norma FMVSS 139**. Washington, DC, nov. 2002.

[41] MTS SYSTEMS CORPORATION. Eden Prairie, Minnesota. Fornecedor global de dispositivos de testes mecânicos. Disponível em: <<http://www.mts.com>>. Acesso em: 15 de março de 2003.

[42] NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION. **New Pneumatic Tires - Norma FMVSS 109**. Washington, DC, jun. 1996.

[43] THE TIRE AND RIM ASSOCIATION INC. 2004 Year Book. Copley, Ohio, 2003. 308p.

[44] UNITED NATIONS. **Uniform Provisions Concerning the Approval of Pneumatic Tyres for Motor Vehicles and their Trailers - Norma ECE R.30**. Genebra, nov. 2002.

[45] SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **Subjective Rating Scale for Vehicle Handling - Surface Vehicle Recommended Practice SAE J1441**. Warrendale, 1998.

[46] NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION. **Tire Selection and Rims: Passenger Cars - Norma FMVSS 110**. Washington, DC, mar. 1995.

[47] NUTI, A. C. Objective Metrics for Handling. In: CONGRESSO SAE BRASIL 2001, São Paulo, 2001. **SAE Technical Papers Series**. Warrendale: SAE International, 2001.

[48] SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **Stopping Distance Test Procedure – Surface Vehicle Recommended Practice SAE J299**. Warrendale, 1993.

[49] MINISTÉRIO DA JUSTIÇA. Brasília. Resolução CONTRAN 777/93. Disponível em: <<http://www.mj.gov.br/consultafacil/>>. Acesso em: 27 de junho de 2004.

[50] SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **Testing Machines for Measuring the Uniformity of Passenger Cars and Light Truck Tires – Surface Vehicle Recommended Practice SAE J332**. Warrendale, 1981.

[51] SEICHTER TIRE TESTING SYSTEMS. Hannover. Informações sobre testes de uniformidade. Disponível em: <http://www.tireuniformity.com/usa_index.htm>. Acesso em: 23 de março de 2003.

[52] DE QUADRO, M. F. L. et al. Climatologia de Precipitação e Temperatura. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC/INPE. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliensp10a/chuesp.html>>. Acesso em: 7 de abril de 2003.

[53] GEONLINE. Brasília. Apresenta textos sobre os tipos climáticos do Brasil. Disponível em: <www.formosaonline.com.br/geonline/textos/geografia/brasil_fisico04.htm>. Acesso em 7 de abril de 2003.

[54] ANFAVEA. São Paulo. Informações sobre a indústria, mercado interno e exportações automobilísticas do Brasil. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/Index.html>>. Acesso em 15 de abril de 2003.

[55] MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. Brasília. Anuário Estatístico do GEIPOT (96 a 00) – Rede Rodoviária. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/bit/trodo/ESTATISTICA/RODOVGEI.HTM>>. Acesso em: 7 de abril de 2003.

[56] AGÊNCIA ESTADO SETORIAL. São Paulo. Construção Civil. Disponível em: <<http://www.aesetorial.com.br/construcao/artigos/2003/jan/20/303.htm>>. Acesso em: 20 de janeiro de 2003.

[57] MADUREIRA, O. M. **Dinâmica de Veículos: Apresentação e Discussão dos Fatos Básicos**. São Paulo. Universidade de São Paulo, 2001. (Apostila)

[58] COSTA, A. L. A.; APS, M. Aderência Pneu-Pavimento. São Paulo, out. 2003. / Palestra proferida por ocasião do 2º Seminário de Tecnologia Pirelli, São Paulo, 2003 /

[59] GENERAL MOTORS EUROPE. **Tire Rolling Resistance: Basic Test - GM Europe Engineering Standards - Procedimento GME 6757**. Rüsselsheim, 2001. (Documento interno da General Motors).

[60] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Washington, DC. Apresenta recursos e atividades desenvolvidas. Disponível em: <<http://www.epa.gov/otaq/emisslab/methods/quickdds.htm>>. Acesso em: 22 de fevereiro de 2004.

[61] WIRTSCHAFTSVERBAND DER DEUTSCHEN KAUTSCHUKINDUSTRIE E.V. **Medição da Uniformidade de Pneus - Condições de Teste para Pneus de Carros de Passeio – Norma W.d.K 109**. Frankfurt, 1989.

[62] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Passenger Car Tires: Methods of Measuring Rolling Resistance - Norma ISO 8767**. Genebra, 1992.

[63] SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **Rolling Resistance Measurement Procedure for Passenger Car, Light Truck, and Highway Truck and Bus Tires - Surface Vehicle Recommended Practice SAE J1269.** Warrendale, 2000.

[64] GENERAL MOTORS CORPORATION. Detroit, 2002. Apresenta informações sobre segurança veicular, os centros de desenvolvimento de pneus da GM e perguntas e respostas sobre o tema. Disponível em:
<http://www.gm.com/company/gmability/safety/avoid_crash/gm_tire_safety/>.
Acesso em: 20 de agosto de 2002.