

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Produção - PPGEP

**EFEITOS DA VARIAÇÃO DA CARGA POR EIXO,
PRESSÃO DE INFLAÇÃO E TIPO DE PNEU NA
RESPOSTA ELÁSTICA DE UM PAVIMENTO**

João Fortini Albano

**Dissertação para obtenção do título de
Mestre em Engenharia**

**Porto Alegre
1998**

ESCOLA DE ENGENHARIA
RIRI LOTECA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Produção - PPGEP

**EFEITOS DA VARIAÇÃO DA CARGA POR EIXO,
PRESSÃO DE INFLAÇÃO E TIPO DE PNEU NA
RESPOSTA ELÁSTICA DE UM PAVIMENTO**

João Fortini Albano

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Produção - PPGEP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Transportes.

Porto Alegre

agosto de 1998

EFEITOS DA VARIAÇÃO DA CARGA POR EIXO, PRESSÃO DE INFLAÇÃO E TIPO DE PNEU NA RESPOSTA ELÁSTICA DE UM PAVIMENTO

João Fortini Albano

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de *Mestre em Engenharia* e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: _____

Prof. Dr. **Luis Antonio Lindau**, UFRGS

Banca Examinadora:

Prof. Dr. **Manoel Henrique Alba Sória**, USP

Prof. Dr. **Jorge Augusto Pereira Ceratti**, UFRGS

Prof. Dr. **Luiz Afonso dos Santos Senna**, UFRGS

Prof. Dr. **Luis Antonio Lindau**

Coordenador do PPGEP

Porto Alegre, agosto de 1998

Dedico este trabalho a pessoas muito especiais:

João Pitanguy Albano e Anerys Fortini Albano, pais,
amigos e educadores e

Suzana, Filipe, Fabio e Marcelo de Medeiros Albano,
minhas grandes paixões.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. **Luis Antonio Lindau**, que exerceu uma orientação de alta qualidade:

Ao Prof. **Jorge A. Pereira Ceratti** e ao Diretor do DAER Eng. **José Luiz da Rocha Paiva** que, além do apoio, ajudaram a definir o sentido geral do trabalho;

Ao Presidente **Eudes Antidis Missio**, conselheiros e funcionários do Conselho Rodoviário do DAER cujo apoio e colaboração foram indispensáveis;

Ao **Colegiado** do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da UFRGS, cuja sensibilidade viabilizou maior dedicação ao trabalho;

Ao colega **Washington Peres Núñez** cuja luz de seu conhecimento iluminou e facilitou muitos rumos desta pesquisa;

Ao Prof. **Luiz A. dos Santos Senna** e à Prof^a. **Suyen Matsumura Nakahara** pelo contínuo incentivo;

Ao Eng. **José A. de Oliveira**, dirigente da Unidade de Normas e Pesquisas do DAER e aos funcionários **Newton Martins Sobrinho** e **Cledir M. Charão** pela colaboração no experimento;

Ao Eng. **Luiz Fernando Thorel**, supervisor da fiscalização das obras RS/240 e aos funcionários do DAER **Alfeu L Boeni**, **Arildo R. Coelho**, **José Carlos R. Novo** e **Novaldir P. da Luz** e ainda aos Eng. **Francisco Barreto**, Econ. **Ricardo Zíngano**, **Luiz Gadens** e **Sérgio Coitinho** do DAER e STE na operação do posto do pedágio da RS/240, pela ajuda nos levantamentos de campo;

Ao **Batalhão da Polícia Rodoviária Estadual** pelo apoio e acompanhamento no levantamento dos dados de campo;

As empresas **Toniolo Busnello S.A.** e **INCORP Consultoria Ltda.** pela colaboração com a cessão de equipamentos importantes;

Ao mecânico **Ivo de Azevedo** e os auxiliares de pesquisa **Rafael Lerch** e **Carlo Framarim**, da Área de Pesquisas e Testes da UFRGS/DAER;

A **Suzana de Medeiros Albano** que, quando minha inquietude apontava para outros rumos, sugeriu um mestrado em transportes e,

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu mais sincero reconhecimento.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	vii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE QUADROS	xii
LISTA DE TABELAS	xiii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 O Contexto da Pavimentação Rodoviária e o Tema Escolhido	1
1.2 Objetivos da Dissertação e Método Utilizado	2
1.4 Limitações do Trabalho	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 Carga Rodoviária	7
2.1.1 <i>Ação do Tráfego</i>	7
2.1.2 <i>Limites Legais</i>	11
2.1.3 <i>Excesso de Carga</i>	19
2.2 Pressão de Enchimento	23
2.2.1 <i>Valores Normalmente Praticados</i>	23
2.2.2 <i>Principais Efeitos</i>	28
2.3 Tipo de Pneu	31
2.4 Conclusões	37
3 ÁREA DE TESTES E O SIMULADOR DE TRÁFEGO UFRGS/DAER	39
3.1 Área de Testes	39
3.2 Simulador de Tráfego	41

4 PESQUISA DE CAMPO	46
4.1 Descrição da Pesquisa	46
4.2 Coleta de Dados	51
4.3 Resultados Obtidos	54
4.4 Análise dos Resultados	58
4.5 Conclusões	61
5 EXPERIMENTO FATORIAL	62
5.1 Descrição do Experimento	62
5.2 Coleta de Dados e Resultados	69
5.3 Análise das Deflexões, Área e Pressão de Contato	73
5.3.1 <i>Deflexões</i>	73
5.3.2 <i>Área e Pressão de Contato</i>	79
5.4 Conclusões	86
6 ESTUDO DO DESEMPENHO DO PAVIMENTO	87
6.1 A Deflexão Recuperável como Resposta Estrutural	87
6.2 Desempenho do Pavimento	92
6.2.1 <i>Serventia e Fator de Equivalência de Cargas</i>	92
6.2.2 <i>Medida do Desempenho do Pavimento</i>	97
6.3 Conclusões	103
7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	105
7.1 Conclusões da Dissertação	105
7.2 Recomendações e Sugestões para Trabalhos Futuros	110
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112
ANEXO A - Aferição da Unidade Hidráulica	117
ANEXO B - Análises de Variância e Modelos de Regressão	119
ANEXO C - Gráficos com os Resultados da Pesquisa de Campo	131

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AASHO:** American Association of State Officials
- AASHTO:** American Association of State Highway and Transportation Officials
- ABNT:** Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABPv:** Associação Brasileira de Pavimentação
- Ac:** Área de Contato
- Acirc:** Área Circular
- ALF:** Accelerated Loading Facility
- ANFIR:** Associação Nacional dos Fabricantes de Implementos Rodoviários
- ANPET:** Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes
- AREOP:** Associação Rio Grandense de Empreiteiros de Obras Públicas
- ASTM:** American Society for Testing and Materials
- BD:** Basalto Decomposto
- CA:** Concreto Asfáltico
- CALTRANS:** Department of Transportation / State of California
- CBUQ:** Concreto Betuminoso Usinado a Quente
- CDH:** California Division of Highways
- Ce :** Carga por Eixo
- CE:** Corpo de Engenheiros
- CMT:** Capacidade Máxima de Tração
- CONTRAN:** Conselho Nacional de Trânsito
- COPPE:** Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia da UFRJ
- CR:** Conselho Rodoviário
- CTB:** Código de Trânsito Brasileiro
- CTI:** Central Tire Inflation
- Dadm:** Deflexão admissível
- DAER:** Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem
- DECIV:** Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da UFRGS
- DER:** Departamento de Estradas de Rodagem

DERSA: Departamento de Estradas de Rodagem Sociedade Anônima
DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
EUA: Estados Unidos da América
FAPERGS: Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio Grande do Sul
FEC: Fator de Equivalência de Cargas
FHWA: Federal Highway Administration
FWD: Falling Weight Deflectometer
GEIPOT: Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes
HDM: Highway Design and Maintenance Standards Model
HVS: Heavy Vehicle Simulator
IS: Índice de Serventia
IPR: Instituto de Pesquisas Rodoviárias
LVDT: Linear Variable Differential Transformer
MERCOSUL: Mercado Comum do Sul
MT: Ministério dos Transportes
N: Número equivalente de operações de um eixo padrão
NCHRP: National Cooperative Highway Research Program
NE: Número Estrutural
PBT: Peso Bruto Total
PBTC: Peso Bruto Total Combinado
Pc: Pressão de Contato
Pe: Pressão de Enchimento
PCA: Portland Cement Association
PPGEP: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFRGS
R: Raio de curvatura
RAPv: Reunião Anual de Pavimentação
RS: Rio Grande do Sul
TRB: Transportation Research Board
TSD: Tratamento Superficial Duplo
UFIR: Unidade Fiscal de Referência
UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFRJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro

UH: Unidade Hidráulica

UNP: Unidade de Normas e Pesquisas

USA: United States of America

USP: Universidade de São Paulo

VDM: Volume Diário Médio

LISTA DE FIGURAS

- 1.1 Organização do Trabalho
- 2.1 Ciclo de Vida de uma Rodovia Pavimentada
- 2.2 Variação do FEC em Função dos Diferentes Níveis de Pressão de Enchimento
- 2.3 Corte Transversal em um Pneu Típico
- 2.4 Configuração de Pneus Diagonais e Radiais
- 2.5 Efeitos da Força Lateral Aplicada ao Pneu
- 3.1 Visão Panorâmica da Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos
- 3.2 O Simulador de Tráfego UFRGS/DAER
- 3.3 Distribuição Transversal de Cargas sobre Cada Setor
- 4.1 Local da Pesquisa: o Posto de Pedágio da RS/240
- 4.2 Coleta de Dados em Veículos de Carga junto ao Posto do Pedágio da RS/240
- 4.3 Planilha Utilizada na Pesquisa de Campo
- 5.1 Planta Baixa da Pista 3 (sem escala)
- 5.2 Determinação da Deflexão com a Viga Benkelman
- 5.3 Impressões da Área de Contato do Rodado com o Piso
- 5.4 Modelo de Planilha Adotado para Coleta de Dados
- 5.5 Deflexão x Pressão de Enchimento
- 5.6 Efeito da Pressão de Inflação sobre a Deflexão Superficial
- 5.7 Diagrama de Colunas: Deflexão x Carga/Eixo
- 5.8 Diagrama de Colunas: Deflexão x Pressão de Enchimento
- 5.9 Dimensões e Forma da Área de Contato
- 5.10 Área de Contato x Área Circular para uma Pressão de Inflação de 552 kPa (80 psi)
- 5.11 Área de Contato x Área Circular para uma Pressão de Inflação de 620 kPa (90 psi)
- 5.12 Área de Contato x Área Circular para uma Pressão de Inflação de 689 kPa (100 psi)
- 5.13 Pressão de Contato x Pressão de Inflação
- 6.1 Nr Até o Final de Vida Restante do Pavimento
- 6.2 Proporcionalidade entre Carga/Eixo e Deflexão
- 6.3 Variação dos FEC Empírico-Mecanísticos

6.4 Variação dos FEC Calculados segundo a AASHO

6.5 FEC Empírico-Mecanísticos x Redução % da Vida Útil

6.6 FEC (derivados da AASHO) x Redução % da Vida Útil

A.1 Leituras para a Equação de Calibração

B.1 Modelo de Regressão para Deflexão: Plotagem de Probabilidade, Ajuste de Linha e Resíduos

C.1 Incidência do Tipo de Fabricação de Pneus

C.2 Distribuição Percentual por Tamanho de Pneu

C.3 Distribuição das Profundidades dos Sulcos de Pneus Dianteiros

C.4 Distribuição das Profundidades dos Sulcos de Pneus Não-Dianteiros

C.5 Composição Percentual da Amostra de Caminhões

C.6 Discriminação da Amostra por Fabricante de Pneus

C.7 Marcas de Veículos

C.8 Relação de Trabalho dos Motoristas

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1 - Classificação e Limites de Carga dos Principais Veículos da Frota Brasileira

QUADRO 2.2 - Limites de Carga na Europa

QUADRO 2.3 - Alguns Limites Estaduais de Cargas desde Janeiro de 1988 nos EUA

QUADRO 2.4 - Comparação entre os Limites de Carga do Brasil com EUA e Europa

QUADRO 2.5 - Excesso de Peso por Eixo Praticado no Brasil

QUADRO 2.6 - Cargas Máximas e Pressões de Enchimento

QUADRO 2.7 - Relação entre Pressão de Inflação e Carga Atuante por Cada Roda

QUADRO 3.1 - Primeiras Pistas Experimentais nos EUA

QUADRO 3.2 - Tempo Transcorrido para Degradar um Pavimento

QUADRO 5.1 - Constituição do Pavimento da Pista 3

QUADRO 5.2 - Organização das Leituras da Deflexão no Experimento

QUADRO 5.3 - Disposição de Dados com o Resultado das Leituras de Deflexões (0,01 mm)

QUADRO 5.4 - Área de Contato x Área Circular

LISTA DE TABELAS

- TABELA 4.1** - Estimativas de Tamanho da Amostra
- TABELA 4.2** - Pressão de Inflação na Amostra de Pneus Dianteiros
- TABELA 4.3** - Pressão de Inflação na Amostra de Pneus Não - Dianteiros
- TABELA 4.4** - Tipos de Pneus
- TABELA 4.5** - Composição da Amostra por Tamanho e Tipo de Pneus
- TABELA 4.6** - Composição da Amostra por Tipo de Veículo
- TABELA 4.7** - Distribuição das Profundidades dos Sulcos da Rodagem de Pneus Dianteiros
- TABELA 4.8** - Distribuição das Profundidades dos Sulcos da Rodagem dos Pneus Não -
Dianteiros
- TABELA 4.9** - Divisão da Amostra por Fabricante de Pneus
- TABELA 4.10** - Divisão da Amostra por Relação de Trabalho do Motorista
- TABELA 4.11** - Marcas dos Veículos da Amostra
- TABELA 5.1** - Variação da Temperatura Ambiente durante o Experimento
- TABELA 5.2** - Área de Contato Medida e Pressão de Contato Calculada para o Tipo de Pneu
Convencional
- TABELA 5.3** - Teste F
- TABELA 5.4** - Efeito da Pressão de Inflação na Deflexão (0,01 mm)
- TABELA 5.5** - Efeito da Carga/Eixo sobre a Deflexão
- TABELA 5.6** - Valores da Pressão de Contato Calculados - kPa (psi)
- TABELA 6.1** - Valor da Deflexão em Função de C_e e P_e
- TABELA 6.2** - Número de Solicitações até o Final da Vida Restante
- TABELA 6.3** - Proporcionalidade entre Carga/Eixo e Deflexão
- TABELA 6.4** - FEC Empírico-Mecanísticos Calculados
- TABELA 6.5** - FEC Calculados segundo a AASHO
- TABELA 6.6** - Condição Crítica do Pavimento Considerando FEC Empírico-Mecanísticos
- TABELA 6.7** - Condição Crítica do Pavimento Considerando FEC derivados da AASHO
- TABELA 6.8** - Evolução dos FEC (empírico-mecanísticos) e Redução da Vida Útil

TABELA 6.9 - Evolução dos FEC (derivados da AASHO) e Redução da Vida Útil

TABELA B.1 - Análise de Variância: Comparação entre **Grupos de Veículos**, Anova: Fator Único

TABELA B.2 - Análise de Variância: Comparação entre **Tamanho de Pneus**, Anova: Fator Único

TABELA B.3 - Análise de Variância: Comparação entre **Marcas de Pneus**, Anova: Fator Único

TABELA B.4 - Regressão Linear Simples: Aferição da Unidade Hidráulica do Simulador

TABELA B.5 - Regressão Linear Simples: Área de Contato x Área Circular Calculada

TABELA B.6 - Modelo de Regressão: Deflexão Recuperável

TABELA C.1 - Discriminação da Amostra de Pneus por Tamanho e Tipo de Construção

TABELA C.2 - Discriminação da Amostra por Tipo de Veículo

TABELA C.3 - Discriminação da Amostra por Marcas de Veículos

TABELA C.4 - Discriminação da Amostra por Tipo de Relação de Trabalho do Motorista

RESUMO

O presente trabalho é uma análise experimental que procura investigar os efeitos dos fatores carga por eixo, pressão de inflação e tipo de pneu sobre o desempenho de pavimentos. Os dados e informações existentes sobre o quadro de cargas por eixo praticada pela frota de veículos pesados é razoável. A ação conjunta dos referidos fatores é ainda uma questão pouco explorada. Assim, para compensar a escassez de dados sobre pressão de inflação e tipo de construção de pneus utilizados na frota de carga, programou-se uma pesquisa de campo na rodovia estadual RS/240. As informações oriundas da pesquisa demonstram que há um acréscimo generalizado no valor da pressão dos pneus e um aumento de uso dos pneus de fabricação radial em relação aos pneus convencionais. Os dados de campo subsidiaram a programação de um experimento fatorial cruzado executado na Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos da UFRGS/DAER. A variação dos níveis dos fatores deu-se através de um simulador linear de tráfego atuando sobre uma pista experimental com 20 m de comprimento por 3,5 m de largura. Tendo como resposta estrutural do pavimento a máxima deflexão superficial recuperável medida com uma viga Benkelmam, determinou-se como significantes os efeitos dos fatores carga por eixo e pressão de enchimento dos pneus. Os cálculos estatísticos indicam também que não há diferenças significativas entre os pneus tipo 9.00R20 e 9.00x20 e que todas interações não exercem efeitos significativos sobre a variável de resposta. Em seqüência, determinaram-se as áreas de contato do rodado duplo do simulador de tráfego com a superfície do pavimento ensaiado para as combinações dos níveis dos fatores. Pode-se, então, comparar área de contato medida com área circular calculada, considerada em muitos modelos de dimensionamento de pavimentos. Relacionou-se a variação da pressão de contato com a deflexão recuperável e procedeu-se uma comparação da mesma com a pressão de inflação nominal dos pneus. Apresenta-se um modelo de análise do desempenho do pavimento em função da carga por eixo e da pressão de inflação, nos limites do experimento. Os dados decorrentes do experimento viabilizaram a determinação dos Fatores de Equivalência de Cargas para os níveis dos fatores, considerando-se o pavimento ensaiado. Avaliou-se, via evolução das deflexões e dos Fatores de Equivalência de Cargas, a redução da vida do pavimento, obtendo-se, para a combinação de níveis mais críticos de carregamento, resultados significativos de até 88 % de redução. Propõe-se, por último, uma formulação para o Fator de Equivalência de Cargas que considere também a ação da pressão de inflação.

ABSTRACT

This thesis presents an experimental study of the effects of trucks axle loads, inflation pressures and tire types on pavements performance. Though a great amount of data on trafficking axle loads is available, only a few researches have analyzed the combined action of those variables. Since information about trucks inflation pressure and tire type is scarce, a field survey was carried out in RS/240 state road. Collected data have show that during the past decades inflation pressure has generally increased and the use of radial tires instead of bias ones is growing. Based on those data, a factorial experiment was developed at the UFRGS/DAER Pavement Testing Facility. Different axle loads, inflation pressures and tire type were applied by a linear traffic simulator on a test section 20 m long and 3.5 m wide. The corresponding deflections were measured with a Benkelman beam. Tests results have demonstrated that axle load and inflation pressure do affect the measured deflections. Conversely, neither the type nor the interactions between the studied variables seem to play an important role on the pavement elastic behavior. Tire-pavement contact areas were graphically determined for every combination of axle load and inflation pressure and then compared to the calculated areas, assumed as circular in several design methods. Pavement deflections were related to contact pressures. The experimental results also allowed to determine load equivalence factors corresponding to the tested pavement structure and traffic characteristics. Those factors relate the deflection caused by a given combination of a axle load and inflation pressure related to the one due Brazilian standard values (axle load of 82 kN and inflation pressure of 552 kPa). Both deflections and load equivalence factors were used to calculate pavement residual life, which proved to be remarkably shortened by axle load and tire pressure increase. Finally, based on the obtained results, model relating deflections to axle loads and inflation pressures is presented for estimating pavement performance.

1 INTRODUÇÃO

1.1 O Contexto da Pavimentação Rodoviária e o Tema Escolhido

A partir de meados da década de oitenta, houve uma redução dos investimentos públicos na malha rodoviária do país. Por outro lado, salvo honrosas exceções, os avanços tecnológicos na área de pavimentação foram poucos. Pode-se referir que somente em dezembro de 1994 foi oficializado um método de projeto de reforço com base na análise de modelos elásticos, o DNER-PRO 269/94 (BRASIL. DNER, 1995), que considera as propriedades resilientes de solos do subleito e materiais granulares do pavimento, reciclagem do concreto betuminoso usinado a quente - CBUQ, modelos de fadiga de misturas betuminosas brasileiras e cálculo de tensões e deformações através da teoria da elasticidade não linear.

A idade avançada dos pavimentos, o precário estado geral da rede rodoviária, a elevação dos custos operacionais e a redução da segurança viária constituíram o cenário ideal para o surgimento de ações amplas na área de planejamento. A Gerência de Pavimentos, cuja finalidade básica é a destinação judiciosa dos recursos disponíveis através da adoção de modernas técnicas de avaliação de prioridades, cresceu no Brasil. Observou-se, no início dos anos 90, uma espécie de reação à estagnação da área na década anterior.

Deve-se registrar também, como atualidade, as crescentes exigências de maior padrão técnico dos projetos de restauração e programas de manutenção formuladas pelo Banco Mundial para concessão de empréstimos e, ainda, os programas de concessões rodoviárias através dos quais a União e os Estados delegam à iniciativa privada a manutenção de rodovias com alto volume de tráfego, sendo os custos correspondentes cobertos pelo pedágio arrecadado.

Para completar a descrição do contexto atual, não se pode esquecer que a virtual estabilidade econômica tem promovido um uso mais intenso de rodovias. A distribuição e o fornecimento rápido e programado de insumos passam a ser fundamentais na competição

econômica. A intensificação do transporte como fator de produção e de satisfação de necessidades está carregando e congestionando boa parte do sistema viário implantado. Este é o atual desafio rodoviário brasileiro: vias em boas condições, custos de construção e manutenção reduzidos, menores tempos de deslocamentos e fluxo de tráfego seguro.

Na busca de soluções para as atuais questões e objetivando a redução de custos dos investimentos em pavimentação rodoviária, a Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS e o Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem - DAER/RS celebraram, no início desta década, um protocolo de colaboração técnico-científica para estudos de alternativas econômicas para pavimentação de rodovias coletoras e o desenvolvimento de pesquisas na área de pavimentação. A partir deste convênio, foi construído um simulador de tráfego e uma Área de Pesquisas e Testes, localizados no Campus do Vale da UFRGS, em Porto Alegre.

A necessidade de desenvolvimento do sistema de transportes por rodovias, principalmente no que se refere a manutenção da rede, é um convite a muitas iniciativas. Por muitas razões, os pesados recursos investidos na ampliação e conservação da rede rodoviária não têm retornado de forma adequada à população. O transporte de cargas e a sua relação com a longevidade de rodovias pavimentadas é uma das causas que inspirou a investigação pretendida por esta dissertação. A possibilidade oferecida com a utilização do simulador de tráfego para quantificar os efeitos nocivos em pavimentos decorrentes do acréscimo da pressão de inflação de pneus e, ainda, as conseqüências pouco conhecidas do maior uso de pneus radiais, foram também agentes motivadores deste estudo. Desta forma, ficou definido o tema da dissertação: um programa experimental para investigação dos efeitos simultâneos sobre um pavimento dos fatores carga por eixo, pressão de inflação e tipo de pneus e suas possíveis combinações.

1.2 Objetivos da Dissertação e Método Utilizado

De uma maneira geral, pretende-se com o desenvolvimento da dissertação, colher e desvendar dados e informações que, tendo a possibilidade de somar-se às existentes, possam

ampliar o conhecimento e a aplicação de medidas práticas no âmbito da pavimentação viária. Discriminam-se também objetivos específicos, listados a seguir:

- a) investigar e medir os efeitos da variação conjunta da carga por eixo, da pressão de inflação e do tipo de pneus (radial e lonas) no comportamento de um pavimento típico de rodovia existente na Área de Testes da UFRGS, em Porto Alegre, considerando como resposta estrutural a *deformação máxima recuperável* do pavimento;
- b) com base nos dados do experimento quantificar os efeitos decorrentes e propor modelos de desempenho do pavimento ensaiado;
- c) especificar a redução da vida útil do pavimento, destacando o custo do recapeamento prematuro, tendo em vista a necessidade de manutenção da via nas condições iniciais de uso;
- d) constatar, mediante pesquisa bibliográfica e informações obtidas em órgãos rodoviários, a realidade e a dimensão dos valores de carga por eixo praticados em rodovias pavimentadas;
- e) levantar, através de uma pesquisa de campo, os valores de pressão de inflação de pneus e os tipos de construção de pneus utilizados na frota de veículos de carga e, marginalmente, medir a profundidade do sulco da banda de rodagem dos pneus para avaliação das condições de segurança;
- f) fornecer aos agentes responsáveis, elementos técnicos consistentes e indicadores da possível necessidade de monitoramento e inibição ostensiva do excesso de peso por eixo e da pressão de inflação de pneus, tendo em vista a preservação do patrimônio rodoviário implantado;
- g) alertar os engenheiros para possíveis revisões nas metodologias de projeto existentes e a necessidade do desenvolvimento de maiores pesquisas no âmbito do tema da dissertação e,
- h) chamar a atenção de autoridades e usuários de rodovias quanto aos potenciais prejuízos financeiros, econômicos e ainda, da falta de segurança viária advinda do aumento dos acidentes, decorrentes dos efeitos dos excessos praticados.

Para atingir os objetivos propostos, planejou-se uma estrutura básica para o trabalho e um cronograma de ações cuja implementação contou com o indispensável apoio institucional do Conselho Rodoviário do Estado do Rio Grande do Sul, do Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem - DAER, do Departamento de Engenharia Civil da Escola de

Engenharia da UFRGS e da Coordenação da Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos da UFRGS/DAER.

O primeiro passo foi o desenvolvimento de uma ampla pesquisa bibliográfica para conhecimento das principais conclusões de estudos semelhantes. O Cap. 2 da dissertação, organizado por abordagem individualizada dos fatores carga por eixo, pressão de enchimento e tipo de pneu, procura descrever o estado-da-arte do tema e os limites legais previstos na legislação. As informações foram obtidas de várias fontes, destacando-se periódicos nacionais e estrangeiros.

A descrição da Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos, cenário principal da pesquisa experimental, e do simulador de tráfego utilizado como instrumento de solicitação do pavimento ensaiado, estão divulgados no Cap. 3 do trabalho.

A ausência de maiores dados, principalmente no Brasil, particularmente no que se refere a pressão de inflação de pneus, indicou a realização de uma pesquisa de campo na rodovia RS/240, descrita no Cap. 4. Apresentam-se as informações obtidas e desenvolve-se uma análise dos resultados.

Os elementos oriundos da pesquisa de campo alimentaram a programação de um experimento fatorial cruzado com os níveis de variação dos fatores calibrados de acordo com a realidade. O experimento, descrito no Cap. 5, indica se há significância dos fatores testados sobre a deflexão recuperável, adotada como variável de resposta do pavimento.

No Cap. 6, procura-se apresentar uma análise de desempenho do pavimento sob o ponto de vista de redução da vida útil prevista, devido a variação da deflexão superficial e dos fatores de equivalência de cargas especificamente determinados. Sugere-se também um modelo de regressão para avaliação do desempenho do pavimento ensaiado.

O estudo encerra com o Cap. 7, no qual apresentam-se as principais conclusões. Quantificam-se os efeitos decorrentes das principais combinações de fatores e sugere-se rumos para trabalhos futuros sobre temas similares.

Neste capítulo inicial discute-se aspectos gerais do contexto da área de pavimentação, os objetivos da dissertação, suas limitações e os principais agentes motivadores do tema desenvolvido, concluindo-se com apresentação de um fluxograma (Fig. 1.1) com a seqüência cronológica das principais etapas do trabalho.

1.4 Limitações do Trabalho

A amostra de veículos utilizada na pesquisa de campo tem um tamanho julgado conveniente, pressupondo-se que representa o fluxo de veículos de carga usuário do principal eixo rodoviário entre Porto Alegre e Caxias do Sul. Maiores extrapolações e generalizações dos dados levantados devem ser feitas com restrições.

Da mesma forma, o experimento fatorial desenvolvido é válido e restrito ao âmbito de sua circunscrição. Foram utilizados pneus tamanho 9.00R20 e 9.00x20 equipados em eixo simples de rodado duplo. As conclusões da dissertação, exaradas no capítulo 7, referem-se ao pavimento da Pista 3 da Área de Testes da UFRGS. Em breve, deverão ser desenvolvidos trabalhos similares ao de RAAD *et al.* (1998) no qual investiga-se, entre outros, os efeitos da espessura da camada de concreto asfáltico e de base granular combinados com a pressão de inflação de pneus.

Projeções de uso do modelo sugerido além dos limites dos níveis dos fatores utilizados no experimento devem ser evitadas ou, no máximo, serem feitas com reservas.

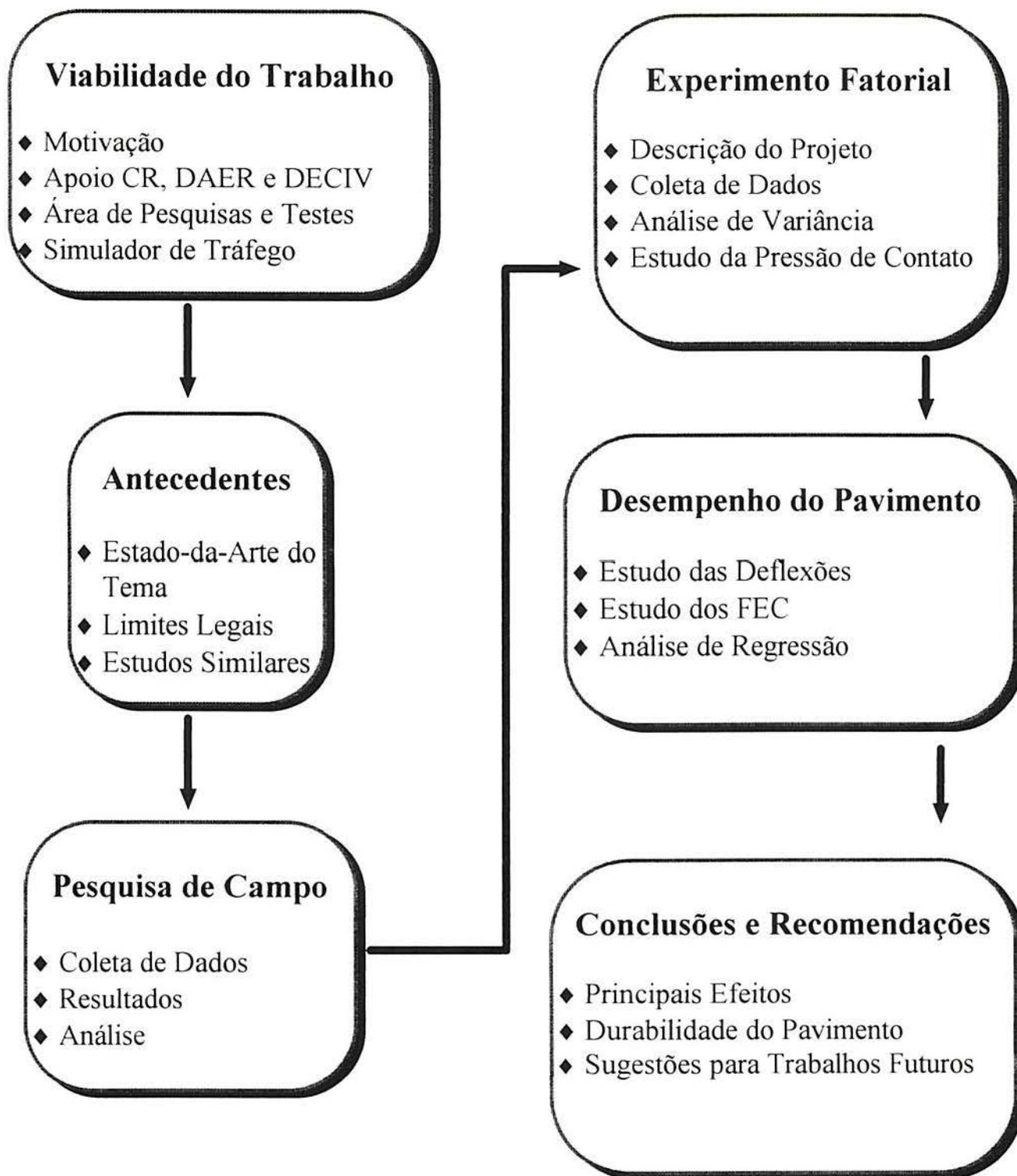


FIGURA 1.1 - Organização do Trabalho

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Cap.2 procura apresentar os antecedentes e descrever o estado-da-arte do tema central da dissertação. Por uma questão meramente organizacional, carga por eixo, pressão de inflação e tipo de pneu são enfocados isoladamente, sendo que a ação destes fatores dá-se de forma conjunta. Descreve-se aspectos institucionais do assunto e informa-se sobre o andamento e conclusões de estudos e pesquisas desenvolvidos no país e exterior.

2.1 Carga Rodoviária

2.1.1 Ação do Tráfego

Nas rodovias circulam veículos de passeio e comerciais. Os veículos comerciais são os caminhões e ônibus, cujo efeito sobre os pavimentos é mais pronunciado devido à maior carga deslocada. As cargas são transmitidas aos pavimentos por rodas pneumáticas simples ou duplas arranjadas em eixos simples e tandem, duplos ou triplos.

A ação do tráfego, não só pelo peso transportado, mas também pela frequência com que solicita o pavimento, provoca a deterioração do mesmo.

Os defeitos nos pavimentos flexíveis podem assumir várias formas. Segundo CERATTI (1997), os maiores danos podem ser listados como sendo:

- a) desgaste da superfície de rolamento, com a exposição dos agregados e perda da textura superficial decorrente da abrasão provocada pelos veículos;
- b) envelhecimento do ligante betuminoso por oxidação, fragilizando a mistura alfáltica, possibilitando o trincamento e o arrancamento dos agregados;
- c) fissuras que se formam e evoluem nas camadas de concreto asfáltico devido à fadiga provocada pela repetição das cargas;

d) afundamento da trilha de roda ou ondulações na superfície ocasionadas por acúmulo de deformações plásticas em todas as camadas ou somente no revestimento, sob ação das cargas do tráfego.

Os defeitos dos grupos a) e b) ocasionam incômodos aos usuários porém estão localizados superficialmente podendo ser facilmente diagnosticados e recuperados com custos relativamente baixos. Do elenco de danos provocados pela ação do tráfego os mais importantes são os defeitos internos, mais difíceis de detectar e mais abrangentes em termos de efeito pois afetam a estrutura do pavimento. Ambos, o trincamento da superfície de concreto asfáltico - CA, provocado pela fadiga do material e o afundamento da trilha de roda que, além da irregularidade superficial, proporciona o acúmulo de água da chuva, exigem ações mais radicais e de maior custo para correção. Estes defeitos, ocasionados por veículos pesados, ocorrem muitas vezes prematuramente devido a excessos de peso praticados por transportadores.

A deterioração de um pavimento por fadiga caracteriza-se pelo rompimento da camada de CA quando esta é solicitada continuamente por cargas que provocam tensões menores do que a resistência à tração do revestimento (CERATTI, 1997). As trincas surgem inicialmente na fibra inferior da camada de CA e propagam-se progressivamente para a superfície, dando a impressão final de couro de crocodilo.

KIM *et al.* (1989) descrevem que o número N_f de repetições de uma carga necessária para produzir ruptura por fadiga é dada pela equação

$$N_f = k \left(\frac{1}{\varepsilon_t} \right)^m \quad (2.1)$$

onde

k: é coeficiente e m expoente;

ε_t : é a deformação específica horizontal produzida por tensões de tração na fibra inferior do CA.

Com relação à formação de trilha de rodas, os citados autores apresentam a equação:

$$N_c = a \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_c} \right)^b \quad (2.2)$$

onde

N_c : número de aplicações de uma carga;

ϵ_c : é a deformação vertical específica ocasionada por tensões verticais de compressão que ocorrem no topo do subleito;

a: coeficiente e,

b: expoente.

A publicação *Truck Weight Limits* (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1990), contém uma análise do efeito de veículos pesados sobre pavimentos. Esse trabalho destaca que as condições e o desempenho dos pavimentos não dependem unicamente do número de veículos pesados e da carga por eixo que os pavimentos estão sujeitos. Outros fatores também devem ser considerados:

- espessuras das diversas camadas constituintes do pavimento,
- qualidade dos materiais empregados na construção,
- procedimentos construtivos adotados,
- condições de manutenção da rodovia,
- propriedades do subleito existente e,
- condições ambientais, destacando-se a precipitação pluviométrica e o valor e variação da temperatura.

Pelo número e severidade dos fatores intervenientes, pode-se deduzir que a durabilidade de um pavimento é limitada. Logo, após transcorrido algum tempo de uso, o pavimento deverá sofrer um recapeamento ou mesmo uma restauração. WATSON (1989) explica que, segundo pesquisas desenvolvidas na Inglaterra, o melhor momento para a intervenção ocorre quando são detectadas trilhas de roda com profundidade de 10 mm ou

fissuras sobre as trilhas de roda, mesmo antes de ocorrer esta profundidade. Define que a *vida útil*, para um projeto de pavimento novo, é o período de tempo provável no qual deverá ocorrer esta condição crítica. Conclui relatando que quando são considerados os custos de construção e manutenção, um período de vida útil de 20 anos é o de adoção mais adequada.

A consideração de vida útil como sendo o tempo de uso transcorrido até a restauração ou entre duas restaurações, foi ampliada pela AASHTO (1993). Por recomendação do Guide for Design of Pavement Structures o que era chamado de período de projeto (expectativa da vida útil) é agora entendido como *período de análise*, ou seja, o tempo transcorrido coberto pela estratégia de projeto do pavimento. Atualmente, com base em estudos de custos totais e estratégias de manutenção eficientes recomenda-se a adoção de períodos de análise de maior duração, incluindo uma ou mais restaurações. Como orientação geral são indicados 30 a 50 anos para vias urbanas de alto volume diário médio de veículos - VDM (± 50.000), 20 a 50 anos para rodovias rurais com alto VDM (> 10.000) e 15 a 25 anos para rodovias rurais pavimentadas com baixo VDM (± 2.000).

No Brasil, o Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis do DNER (BRASIL. DNER, 1979) considera que um pavimento será dimensionado em função do número equivalente N de operações de um eixo padrão, durante um período de projeto escolhido. Em geral, os órgãos rodoviários definem períodos de projeto de 10 anos. No caso de dimensionamento de camadas de reforço também há uma relação entre vida útil do pavimento e o decorrente número N. Por exemplo, a norma rodoviária DNER-PRO 11/79 (BRASIL. DNER, 1994e) fornece elementos para o cálculo da espessura do reforço necessário para um novo número de solicitações de eixos equivalentes ao eixo padrão durante o período considerado (um novo N). O procedimento DNER-PRO 269/94 (BRASIL. DNER, 1995) evolui para a definição de vida de fadiga N_f , que é o número de solicitações do eixo padrão simples de 80,12 kN, que leva o revestimento asfáltico à fase de trincamento por fadiga.

As rodovias, principalmente por ação do tráfego, passam por um ciclo de contínua deterioração. SCHLIESSER e BULL (1994) ilustram no gráfico da Fig. 2.1, para uma estrada

típica da América Latina, o ciclo de vida de uma rodovia pavimentada revestida com CA, muitas vezes considerado normal, face à pouca atenção que é dada à manutenção.

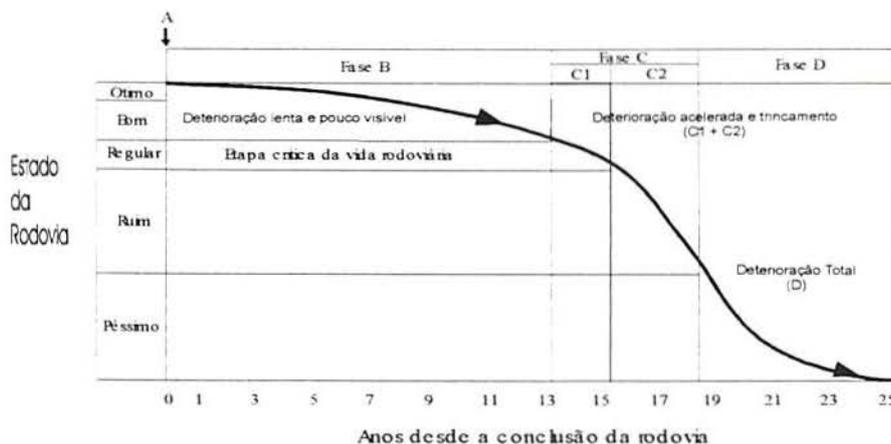


FIGURA 2.1 - Ciclo de Vida de uma Rodovia Pavimentada

Fonte: SCHLIESSER e BULL, 1994

Fase A - *Construção*: a rodovia está em estado considerado ótimo somente do dia da entrega ao tráfego, satisfazendo plenamente ao usuário,

Fase B - *Deterioração Lenta*: a rodovia sofre, pela passagem do tráfego, um processo de debilitação lento e pouco visível. Quando não há manutenção preventiva, este período dura aproximadamente de seis a oito anos,

Fase C - *Deterioração Acelerada*: os efeitos da fadiga do revestimento começam a surgir. A rodovia resiste cada vez menos ao tráfego. No início não há repercussão estrutural e as trincas não são visíveis a um observador comum. Com o passar do tempo pode-se observar mais falhas, agora visíveis, estando a rodovia próxima ao final da fase, com a estrutura danificada. Um esquema consciente de manutenção deve ser desencadeado no início desta fase e,

Fase D - *Deterioração Total*: observa-se a perda do pavimento e o tráfego de veículos torna-se difícil, a velocidade média de percurso diminui e a capacidade da rodovia torna-se reduzida.

Afirmam os citados autores que ao fim da fase C e durante a fase D, cabe somente reconstruir completamente o pavimento, a um custo que pode equivaler entre 50 a 80% do valor de um pavimento completamente novo.

2.1.2 Limites Legais

Em 23 de setembro de 1997, após longa tramitação no Congresso Nacional, foi sancionada pelo Presidente da República a Lei que institui o novo Código de Trânsito Brasileiro - CTB. O mesmo entrou em vigor em 22 de janeiro de 1998, transcorridos 120 dias de sua publicação no Diário Oficial da União (BRASIL, LEI N.º 9.503, 1997).

Esta alteração da configuração legal que ordena as relações e regras de trânsito no país, enseja a atual vivência de mudanças, seguramente direcionadas no sentido da evolução do Sistema.

No que se refere a limitações na área de atuação do transporte de cargas, os elementos de maior interesse são os seguintes:

“Art. 99. Somente poderá transitar pelas vias terrestres o veículo cujo peso e dimensões atenderem aos limites estabelecidos pelo CONTRAN.

§ 1º O excesso de peso será aferido por equipamento de pesagem ou pela verificação de documento fiscal, na forma estabelecida pelo CONTRAN.

§ 2º Será tolerado um percentual sobre os limites de peso bruto total e peso bruto transmitido por eixo de veículos à superfície das vias, quando aferido por equipamento, na forma estabelecida pelo CONTRAN.

Art. 100. Nenhum veículo ou combinação de veículos poderá transitar com lotação de passageiros, com peso bruto total, ou peso bruto total combinado com peso por eixo, superior ao fixado pelo fabricante, nem ultrapassar a capacidade máxima de tração da unidade tratora.

Art. 101. Ao veículo ou combinação de veículos utilizado no transporte de cargas indivisível, que não se enquadre nos limites de peso e dimensões estabelecidos pelo CONTRAN, poderá ser concedida, pela autoridade com circunscrição sobre a via, autorização especial de trânsito, com prazo certo, válida para cada viagem, atendidas as medidas de segurança consideradas necessárias.

Art. 231. Transitar com o veículo:

V - Com excesso de peso, admitido percentual de tolerância quando aferido por equipamento, na forma a ser estabelecida pelo CONTRAN:

Infração - média;

Penalidade - multa acrescida a cada duzentos quilogramas ou fração de excesso de peso apurado, constante na seguinte tabela:

- a) até seiscentos quilogramas - 5 (cinco) UFIR;
- b) de seiscentos e um a oitocentos quilogramas - 10 (dez) UFIR;
- c) de oitocentos e um a mil quilogramas - 20 (vinte) UFIR;

- d) de um mil e um a três mil quilogramas - 30 (trinta) UFIR;
- e) de três mil e um quilogramas a cinco mil quilogramas - 40 (quarenta) UFIR;
- f) acima de cinco mil e um quilogramas - 50 (cinquenta) UFIR;

Medida administrativa - retenção do veículo e transbordo da carga excedente;

Art. 275. O transbordo da carga com peso excedente é condição para que o veículo possa prosseguir viagem e será efetuado às expensas do proprietário do veículo, sem prejuízo da multa aplicável.

Art. 278. Ao condutor que se evadir da fiscalização, não submetendo o veículo à pesagem obrigatória nos pontos de pesagem, fixos ou móveis, será aplicada a penalidade prevista no art. 209, além da obrigação de retornar ao ponto de evasão para fim de pesagem obrigatória.

Art. 323. O CONTRAN, em cento e oitenta dias, fixará a metodologia de aferição de peso dos veículos, estabelecendo percentuais de tolerância, sendo durante este período suspensa a vigência das penalidades previstas no inciso V do art. 231, aplicando-se a penalidade de 20 UFIR por duzentos quilogramas ou fração de excesso.”

Atualmente o CTB está em fase de regulamentação, tendo o CONTRAN aprovado 63 Resoluções até o final de maio de 1998, dentre as quais destacam-se duas relativas ao tema da dissertação:

- Resolução N.º 12 de 6 de fevereiro de 1998. Estabelece limites de peso e dimensões para veículos que transitam por vias terrestres (CONTRAN, 1998a) e,
- Resolução N.º 62 de 21 de maio de 1998. Regulamenta o uso de pneus extralargos em eixos tandem de semi-reboques e reboques dotados de suspensão pneumática (CONTRAN, 1998b).

Os quesitos ainda não regulamentados continuam regidos pela legislação anterior, particularmente, destaca-se a Lei N.º 7.408 de 25 de novembro de 1985 que fixa a tolerância máxima sobre os limites de peso bruto total e peso bruto transmitido por eixo de veículos à superfície das vias públicas

A legislação aponta os seguintes conceitos e limites com interesse para o presente trabalho:

- Peso Bruto Total - PBT é o peso máximo que o veículo pode transmitir ao pavimento, considerando a tara mais a lotação (carga máxima útil);
- Peso Bruto Total Combinado - PBTC e/ou Capacidade Máxima de Tração - CMT é o peso máximo que pode ser transmitido ao pavimento pela combinação de um caminhão trator mais seu semi-reboque ou de caminhão trator mais seu reboque;
- são considerados eixos tandem, dois ou mais eixos que constituam um conjunto integral de suspensão, podendo ou não qualquer deles ser motriz;
- o limite máximo do PBT ou PBTC é de 450 kN (45 tf);
- o limite máximo de peso bruto por eixo simples isolado, equipado com rodado duplo é de 100 kN (10 tf);
- o limite máximo de peso bruto por eixo simples isolado, equipado com rodado simples é de 60 kN (6 tf);
- o limite máximo de peso bruto por eixo tandem duplo, quando a distância entre dois planos verticais que contenham os centros das rodas for superior a 1,20 m ou inferior (ou igual) a 2,40 m é de 170 kN (17 tf);
- o limite máximo do peso bruto por eixo tandem triplo (aplicável somente para semi-reboques), quando a distância entre os três planos verticais que contenham os centros das rodas for superior a 1,20 m e inferior (ou igual) a 2,40 m é de 255 kN (25,5 tf);
- os limites máximos de carga por eixo tandem equipado com *pneu extralargo* são de 170 kN e 255 kN , respectivamente para eixos em tandem duplo e triplo;
- nenhum veículo ou combinação de veículo poderá transitar com PBT ou PBTC superior ao fixado pelo fabricante, nem ultrapassar a capacidade máxima de tração da unidade tratora;
- Está autorizada a tolerância máxima de 5% sobre os limites de PBT, PBTC ou peso bruto transmitido por eixo de veículo às superfícies das vias públicas.

Tem-se a expectativa de que as próximas Resoluções do CONTRAN possam aperfeiçoar a base legal existente. Até o momento, no que se refere especificamente ao transporte de carga, o novo CTB e a sua posterior regulamentação, não apresentaram alterações importantes nos limites existentes. As maiores novidades introduzidas são a hierarquização das infrações, a elevação no valor das multas e as penalidades mais severas.

O Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem, através de sua Comissão de Circulação Viária (DAER, 1992), divulgou uma tabela com o resultado de um trabalho de levantamento de dados junto aos fabricantes, contendo os limites de peso por marca e modelo de veículos de carga como instrumento de apoio nas operações de fiscalização.

A seguir apresenta-se a configuração gráfica dos principais veículos ou combinação e os limites legais máximos de peso vigentes no Brasil.

QUADRO 2.1 - Classificação e Limites de Carga dos Principais Veículos da Frota Brasileira

Configuração do Veículo	Classificação DNER	Limite por Eixo (kN)	PBT (kN)
 	2C	60 + 100	160
	3C	60 + 170	230
 	3C	60 + 135	195
 	2S1	60+100+100	260
	2S2	60+100+170	330
	3S2	60+170+170	400
	2S3	60+100+255	415
	2C2	60+100+100+100	360
	3C2	60+170+100+100	430

Fonte: (GODOY e MACHADO, 1993); (MEDINA, 1997)

As limitações e o controle do peso por eixo e do peso total dos veículos não são muito fiscalizados no Brasil, principalmente devido à estagnação do DNER e à falta de uma

cultura de preservação do patrimônio rodoviário por parte dos DER's. Por outro lado, em muitos países da Europa, nos Estados Unidos e no Canadá esta questão é levada muito a sério.

Apresenta-se, a seguir, (Quadro 2.2) as limitações de carga existentes em alguns países da Europa.

QUADRO 2.2 - Limites de Carga na Europa

País	Carga por Eixo (kN)			PBT ou PBTC (kN)			
	eixo dianteiro	eixo simples	eixo tandem duplo	2 eixos	3eixos	semi-reboque	trator e reboque
Alemanha	100	100	110-200	170	240	400-440	400
Áustria	100	100	160	160	220	380	380
Bélgica	100	100	190-200	190	260	440	440
Bulgária	60	100	130-200	160	260	380	420
Dinamarca	100	100	160-200	180	240	480	480
Finlândia	80	100	180	170	250	440	560
França	130	130	210	190	260	400-440	400
Grécia	70	100-130	200	190	260	380	380
Holanda	100	110	115-190	200	300	500	500
Hungria	100	100	160	200	240	400	400
Inglaterra	92	105	105-203,4	170	243,9	380	352,2
Itália	120	120	200	180	240	400-440	400-440
Iugoslávia	100	100	160	180	240	400	400
Suécia	100	100	160	170	290	375-514	375-514
Suíça	100	100	180	160	190	280	280

Fonte: GÖKTAN E MITSCHKE, 1995.

Nos Estados Unidos, controla-se os limites de carga de eixos tandem, duplos ou triplos desde a publicação, em 1964, através da *Secretary of Commerce*, da tabela de cargas brutas permissíveis para proteger as estruturas de pontes. A referida tabela foi confeccionada

com base na chamada Fórmula B (Federal Bridge Formula) que considera o limite de peso em função das tolerâncias admissíveis, da distância entre grupos de eixos consecutivos e ainda do número de eixos. A limitação para eixos simples é definida pelo efeito provocado pelas cargas sobre a estrutura dos pavimentos (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1990). Em alguns Estados, os limites estabelecidos são os seguintes:

QUADRO 2.3 - Alguns Limites Estaduais de Cargas desde Janeiro de 1988 nos EUA

Estado	Carga Máxima por Eixo (kN)			Carga Bruta Total (kN)
	Simples	Duplo	Triplo	
California	89	151,3	151,3	356
Florida	97,9	195,8	293,7	356
Georgia	99,4	151,3	189,1	356
New York	89	151,3	189,1	356
Oregon	89	151,3	186,9	356
Texas	89	151,3	186,9	356
Wisconsin	89	151,3	186,9	356

Fonte: NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1990.

No Quadro 2.4, montado a partir dos Quadros 2.1, 2.2 e 2.3, apresenta-se uma comparação entre os limites de carga autorizados nos EUA e Europa com os do Brasil.

QUADRO 2.4 - Comparação entre os Limites de Carga do Brasil com EUA e Europa

Situação	Brasil (kN)	EUA* (kN)	Europa** (kN)
Eixo Simples Dianteiro	60	-	100
Eixo Simples c/Rodado Duplo	100	89	100
Eixo Tandem Duplo	170	151,3	160
PBT	450	356	440

* Limites praticados na maioria dos Estados.

** Limites praticados na maioria dos países.

A importância da existência e do controle dos limites é evidente. A indústria de veículos pesados, as normas que regulamentam o transporte de carga e ainda os métodos de dimensionamento de pavimentos consideram os efeitos do tráfego em termos de PBT, das cargas por eixo e dos tipos de eixos.

Com a evolução da fabricação dos veículos de carga, no Brasil e em outros países, tem ocorrido muita pressão dos operadores no sentido da elevação dos limites de carga. De acordo com FERNANDES JR. *et al.* (1995), há vantagens financeiras imediatas para quem trafega sobrecarregado e, conseqüentemente, a deterioração dos pavimentos torna-se acentuada e os custos de operação crescem. No caso do Brasil, os maiores custos operacionais decorrentes da sobrecarga são repassados ao valor dos fretes sem maiores dificuldades pois não há nível de competição intermodal nem intramodal como ocorre em outros países do primeiro mundo. Esta questão envolve também o comprometimento do conforto e da segurança do usuário da rede viária.

Os limites de PBT e da carga por eixo foram revisados no Brasil em 1985 através da Lei n.º 7.408. Foi concedida uma tolerância de 5,0%, alegando-se falta de precisão das balanças.

No outro lado da questão visualiza-se que o aumento dos limites de carga, além de ensejar o acréscimo da produtividade da indústria de transporte, possibilita um consumo menor de energia por unidade de carga transportada. Deve ser considerado também que o menor consumo de combustível é importante do ponto de vista da redução de poluentes, melhorando a qualidade do ar. O aumento dos limites de carga também colabora com a redução de veículos pesados no fluxo de tráfego (GÖKTAN e MITSCHKET, 1995).

Na verdade, esta questão não pode prosperar sem um bom equilíbrio entre interesses que envolvem custos de manutenção e adaptação da rede rodoviária, custos de transporte e condições do meio ambiente.

O Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR, 1979) desenvolveu uma pesquisa intitulada *Influência da Carga por Eixo nas Rodovias*. Este trabalho investigou as conseqüências de mudanças nos limites legais de carga por eixo e PBT de caminhões com base em estatísticas e na experiência nacional e internacional. FERNANDES JR. (1994) desenvolveu um estudo conclusivo sobre os impactos econômicos que a sobrecarga e os fatores de tráfego em geral acarretam à economia do país. Nos Estados Unidos, o NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1990), apresenta uma ampla análise sobre os efeitos de possíveis alterações nos regulamentos dos limites de cargas rodoviárias. Todos os trabalhos mencionados concluem amplamente sobre a nocividade da elevação dos limites de peso estabelecidos e sobre o excesso de carga na rede pavimentada.

2.1.3 *Excesso de Carga*

Por tudo que já se pesquisou sobre o assunto, sabe-se que o excesso de carga por eixo é a maior causa de defeitos em pavimentos.

A dimensão dos danos causados pelo excessivo carregamento de veículos pode ser avaliada pelo Fator de Equivalência de Cargas - FEC. Uma abordagem mais detalhada do FEC será desenvolvida no Capítulo 6. Por ora importa saber que, com base nos estudos desenvolvidos pela AASHO Road Test no final dos anos 1950, os efeitos de cargas por eixo sobre pavimentos podem ser referidos, comparativamente, aos provocados por uma carga padrão de eixo simples com rodado duplo de 82 kN (18.000 lb), a qual possui um FEC unitário. Os estudos desenvolvidos pela AASHO definiram que o FEC varia entre outros fatores, em função da carga por eixo, segundo uma relação elevada a expoentes próximos de quatro (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1990). Outras organizações, como o CE, adotam expoentes ainda maiores:

$$FEC_i = \left(\frac{W_i}{W_p} \right)^b \quad (2.3)$$

sendo:

W_i : carga por eixo genérica;

W_p : carga por eixo tomada como padrão 82 kN (18.000 lb) e,

b: expoente, definido pela AASHO como próximo de 4.

Por exemplo, um eixo simples com rodado duplo carregado com 90,6 kN (20.000 lb) possui um FEC aproximado de 1,5, uma vez que $(90,6/81,6)^4 \cong 1,5$. Um FEC de 1,5 significa que 100 passagens de um eixo com 90,6 kN sobre um pavimento tem o mesmo efeito (dano) sobre o período de vida do que 150 passagens sobre o mesmo pavimento do eixo padrão carregado com 82 kN.

Se por um lado o excesso de carga por eixo aumenta a produtividade e os lucros da indústria de transporte, por outro lado, produz, como se viu, um efeito indesejável, qual seja o de deteriorar aceleradamente a camada de revestimento e a estrutura dos pavimentos.

Ultrapassar os limites legais de carga por eixo ou PBT constitui uma ação criminosa que obriga o Governo a desviar pesados recursos de outros setores para manutenção e restauração viária. Privam-se os usuários do uso de rodovias em boas condições, diminuindo o conforto, a segurança e aumentando o tempo médio de viagem. Por último, são ainda afetados os próprios transgressores pois nem sempre o lucro imediato é compensado pelo alto risco de acidentes, pela depreciação rápida do veículo e por multas cobradas pela fiscalização das rodovias.

MARTINS e MIRANDA (1995) referem que a conseqüência imediata da destruição da rede pavimentada, com base em levantamentos no Estado de Mato Grosso, é o aumento imediato dos custos de transporte, estimado em até 58% no excesso do consumo de combustível, 30% no desgaste da frota e 100% no tempo de percurso. Os autores exemplificam o excesso de carga com dados colhidos no posto de pesagem dinâmica da BR/174 em Cáceres e na BR/163, em junho de 1995. No primeiro identificou-se um excesso de carga em 20% dos eixos pesados e no segundo 30% dos eixos apresentavam excesso em valores variados.

No Rio Grande do Sul não existem dados estatísticos consistentes de excesso de carga praticada na rede estadual. Entrevistas realizadas com engenheiros coordenadores de Unidades de Conservação do DAER revelaram que em operações de pesagem com balanças portáteis, a quantidade de veículos com excesso de peso, em certas ocasiões, chegava a 100%. Após algumas horas de pesagens, por efeito de facilidades de comunicação, esta percentagem caía drasticamente.

FERNANDES JR. (1994), referindo a Pesquisa sobre o Interrelacionamento dos Custos Rodoviários desenvolvida entre 1976 e 1981 pela Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes - GEIPOT, relata que foram levantados os seguintes dados:

QUADRO 2.5 - Excesso de Peso por Eixo Praticado no Brasil

Tipo de Eixo	Veículos com Excesso de Peso (%)	Valor da Sobrecarga	
		Excesso/Limite Legal (kN)	% de Excesso
Dianteiro	3,0	3,0 /60,0	5,0
Simplex (roda dupla)	25,0	20,0 /100,0	20,0
Tanden Duplo	15,0	85,0 /170,0	50,0
Tanden Triplo	30,0	115,0 /225,0	45,0

Fonte: FERNANDES JR., 1994.

De acordo com dados obtidos em outras pesquisas executadas pelo GEIPOT e publicados em 1994, sabe-se que nas rodovias brasileiras os caminhões trafegam com sobrecarga de 10 a 30% (FERNANDES JR. *et al.*, 1995).

Quando as rodovias são submetidas a um controle sistemático do tráfego pesado, chega-se a ciclos de recapeamento (em média de quatro anos) três vezes maior do que rodovias sem controle de peso, de acordo com os padrões do DERSA. OLIVEIRA JR. *et al.* (1995) informam que a Rodovia dos Bandeirantes, inaugurada em 1978, teve seu primeiro recapeamento no ano de 1992, com 14 anos de vida útil sem manutenção corretiva. Citam também a Rodovia dos Trabalhadores, inaugurada em 1981 com o primeiro recapeamento em 1994, resultando um período de 13 anos.

O excesso de carga não é só um problema brasileiro e latino-americano. Os Estados Unidos, onde as punições dos delitos são mais rigorosas, também sofre as conseqüências da burla à fiscalização. FERNANDES JR. (1994) pesquisando autores norte-americanos refere que 20% dos veículos de carga operam nas rodovias interestaduais com excesso de carga por eixo. Chega-se a estimar que apenas uma em 400 violações é detectada na maioria dos estados americanos e que os custos provocados por veículos sobrecarregados chegam a 1 bilhão de dólares por ano!

O encaminhamento da solução deste problema é, sem dúvida, o binômio legislação - fiscalização. Há grandes esperanças que o novo CTB possa cumprir a sua parte no que se refere à legislação. Por seu turno é importante que no Brasil, desenvolva-se a consciência da importância de que o controle de cargas é vital na durabilidade dos pavimentos. Balanças fixas, móveis e sistemas de pesagem em movimento são equipamentos que, quando bem operados, produzem consideráveis resultados. Os equipamentos existentes estão cada vez mais sofisticados e disponíveis. Sistemas automatizados de pesagem conjugados com contagem de veículos como o descrito por VIEIRA *et al.* (1993) são importantes para, antes de tudo, preservar o patrimônio rodoviário implantado. A localização dos postos de pesagem também deve ser judiciosa e definida no sentido de inibir a fraude. OLIVEIRA JR. e LIMA (1994), em um estudo de pesagem para o Estado do Ceará, estabeleceram dois critérios básicos para localização de postos fixos: cobrir o maior número possível de rotas de tráfego pesado e interceptar o caminhão na maior proximidade possível da origem.

Esta questão não é nova. MEDINA (1991) relata que o engenheiro *F. N. Hveem* da Califórnia - USA, considerado um dos precursores da Mecânica dos Pavimentos, recomendou ao Diretor Geral do DNER em maio de 1961, entre outros itens, a valorização da conservação de pavimentos e o controle de cargas excessivas dos caminhões.

A imperiosa necessidade de um melhor gerenciamento de pavimentos e uma adequada sistemática de pesagens de veículos de carga são indispensáveis para otimizar os recursos investidos pelo Governo e seus concessionários além de preservar as condições de trafegabilidade e segurança da rede viária.

2.2 Pressão de Enchimento

2.2.1 Valores Normalmente Praticados

Os pneus utilizados no AASHO Road Test eram representativos daqueles que estavam em uso no final dos anos 50. Eram os tradicionais pneus de lonas com pressões de enchimento da ordem de 517 a 552 kPa (75 a 80 psi). Desde então os construtores de pneus estão introduzindo no mercado os pneus radiais com melhores condições de suportar maiores pressões e cargas (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1990). A citada fonte refere um levantamento de campo desenvolvido por C. A. Bartholomew, realizado entre 1984 e 1986 em sete Estados dos EUA, no qual constatou-se que de 75 a 80% dos pneus usados em caminhões eram do tipo radial e que a pressão de enchimento média era de 689 kPa (100 psi).

A evolução do uso de pneus radiais e de maiores pressões de enchimento nos EUA também foi constatada por KIM *et al.* (1989) na rodovia interestadual n.º 5 em Oregon. Os dados mostram que 87% dos pneus eram radiais com média de pressão de 703 kPa (102 psi) nos radiais e 565 kPa (82 psi) para os de lonas.

Por seu turno, MIDDLETON *et al.* (1986) realizaram um levantamento de dados em rodovias do Texas. Os autores relacionaram uma série de variáveis independentes com a pressão dos pneus. Como resultado, concluíram que o tipo de construção de pneu foi o item mais significativo. Observaram também que os pneus radiais tem, em média, uma pressão de 83 a 145 kPa (12 a 21 psi) mais elevada do que os pneus de lonas. Por ordem, os outros fatores mais significativos foram tipo de veículo e a profundidade dos sulcos na banda de rodagem.*

FERNANDES JR. *et al.* (1995) indicam que na Europa pneus extralargos trafegam com uma pressão de enchimento da ordem de 986 kPa (140 psi). De acordo com a mesma referência, no Brasil, apesar das escassas informações disponíveis, admite-se que a pressão de enchimento média oscila em torno de 844 kPa (120 psi).

* A carga por eixo não foi considerada, sendo avaliada isoladamente somente para a classe 3S2.

De acordo com o escopo da dissertação, executou-se uma pesquisa de campo junto ao posto do Pedágio da RS/240, no município de Portão, Rio Grande do Sul. Levantou-se uma série de dados dentre os quais a pressão de enchimento dos pneus integrantes de uma amostra representativa com 275 caminhões. Os valores obtidos confirmam as tendências de aumento da pressão de inflação. Os principais resultados são os seguintes: pressão média da amostra de pneus dianteiros 655 kPa (95 psi) e 717 kPa (104 psi) da amostra de pneus não-dianteiros.

Constatou-se na amostra estudada uma incidência de 62% de pneus de construção radial, valor considerado alto pelos fabricantes para o caso do Brasil, cuja expectativa é de 50%*. No Cap. 4 do presente trabalho descreve-se com detalhes a pesquisa de campo realizada.

Vários autores consideram que a substituição dos pneus de lonas por radiais e a adoção de maiores pressões de inflação deu-se de forma gradual, atingindo maiores proporções ao final da década de 80. A maioria das referências consultadas são trabalhos elaborados nos anos 80 e 90. Publicações antes de 1980 são escassas. Pode-se pinçar citações de pesquisas pioneiras como a de J. Y. Wong, referida por KIM *et al.* (1989), que em 1978 indicou que pneus radiais sobre pisos pavimentados tem uma superfície de contato mais uniforme do que os pneus de lonas. MARSHEK *et al.* (1986a,b) referem estudos desenvolvidos por E. W. O'Neil em 1969, S. K. Clark em 1971 e S. A. Lippmann e Oblizajek em 1974, todos versando sobre distribuição de pressões e interface pneu-superfície de rolamento.

Como se observa, o assunto em pauta não é uma novidade mas, parece, que não está totalmente desvendado. As investigações sobre o efeito do incremento da pressão de inflação no desempenho de pavimentos aprofundaram-se nos últimos 15 anos, principalmente em função do desenvolvimento de equipamentos de maior precisão tais como transdutores, medidores piezo-elétricos de deformações e tensões, células de carga, microcomputadores, bem como da utilização de simuladores de tráfego em pistas experimentais. Atualmente, no

* Informação prestada pelo Sr. Wilson Bisacchi, gerente regional de Pneumáticos Michelin no RS.

Brasil, destacam-se os estudos sobre a interação veículo-pavimento desenvolvidos na Escola de Engenharia de São Carlos da USP.

O Guia da AASHTO (1993) comenta que a pressão de inflação, utilizada em veículos pesados, está aumentando na medida que os construtores de pneus estão melhorando a tecnologia de fabricação. Destaca também que as montadoras estão avaliando as potenciais vantagens da adoção de maiores pressões de inflação nos pneus. Conclui, de forma conservadora, afirmando que ainda não se conhece qual o efeito concreto das maiores pressões de enchimento dos pneus sobre os pavimentos.

KIM *et al.* (1989) sustentam que o transporte de carga tem apresentado uma tendência de crescimento do PBT dos caminhões. Assim, com o aumento da carga por eixo, o uso de maiores pressões nos pneus tem tornado-se mais popular no âmbito do transporte pesado. Na verdade, de um conjunto de circunstâncias, destacam-se dois fatores simultâneos: a atração pelo aumento de carga por eixo é respaldada pelas melhores características dos pneus radiais. Sendo assim, o transportador encoraja-se e aumenta a pressão de enchimento dos pneus.

Os fabricantes de pneus fornecem tabelas com o valor da pressão recomendado em função da carga atuante por roda simples e dupla e para cada tamanho de pneumático. SOUZA (1980), exemplifica com a recomendação de pressões de inflação para pneus de lonas indicadas para cargas máximas de rodado simples e duplo.

QUADRO 2.6 - Cargas Máximas e Pressões de Enchimento

Tamanho do Pneu	Número de Lonas	Carga Máx. - kN (kgf)	Pressão - kPa (psi)
9.00x20	10	18,00 (1.800)	482 (70)
9.00x20	12	20,35 (2.035)	586 (85)
10.00x20	12	20,80 (2.080)	517 (75)
10.00x20	14	23,70 (2.370)	620 (90)
10.00x22	12	22,15 (2.215)	517 (75)
10.00x22	14	23,80 (2.380)	586 (85)

Fonte: SOUZA, 1980

Com base em medidas da pressão de inflação tomadas de caminhões em trânsito (a quente), durante pesquisa na BR/277, PEREIRA (1985) apresenta, tanto para rodado simples como para duplo e para cada tamanho de pneu, uma função linear relacionando a pressão de enchimento p_i (psi) com a carga incidente em uma roda w (kgf).

QUADRO 2.7 - Relação entre Pressão de Inflação e Carga Atuante por Cada Roda

Tamanho do Pneu	Rodado	$p_i = f(w)$
9.00x20	simples	$p_i = 0,042w - 15,0$
10.00x20	simples	$p_i = 0,041w - 19,3$
11.00x22	simples	$p_i = 0,035w - 18,2$
9.00x20	duplo	$p_i = 0,050w - 17,4$
10.00x20	duplo	$p_i = 0,048w - 28,8$
11.00x22	duplo	$p_i = 0,041w - 19,6$

Fonte: PEREIRA, 1985.

No que se refere à forma da área de contato do pneu com a superfície e à distribuição da pressão, antigas hipóteses simplificadoras ainda hoje são consideradas e adotadas.

Burmister e outros autores de trabalhos sobre a teoria das camadas elásticas, seguindo os estudos iniciados por Bousinesq no final do século passado, modelaram que a pressão de contato tem valor igual à pressão de enchimento e distribui-se uniformemente sobre uma área de contato de formato circular. A base desta concepção foi a teoria das membranas, segundo a qual uma estrutura sem rigidez à flexão, ao ser inflada e colocada em contato com uma superfície plana, produz uma pressão de contato igual à de inflação, uniformemente distribuída numa superfície circular (FERNANDES JR., 1994). O Highway Engineering Handbook, organizado por K. B. Woods em 1960, também indica que é consenso comum de que a pressão de contato é uniforme e igual em valor à pressão de inflação e que a mesma atua sobre uma área circular (MARSHEK *et al.*, 1986a).

Muitos pesquisadores dedicaram-se ao estudo da distribuição da pressão de contato. Um dos estudos mais importantes foi desenvolvido na Universidade do Texas através do qual obteve-se experimentalmente a distribuição de pressões de pneus de caminhões carregados em vários níveis de carga e pressão de inflação, com o uso de um filme sensível à pressão. Estes dados foram utilizados para melhor determinar os efeitos, o valor e a forma da área de contato bem como a distribuição de pressões, tensões, deformações e deslocamentos em pavimentos (MARSHEK *et al.*, 1986b).

Vários estudos teóricos e experimentais desenvolvidos nos últimos anos tem confirmado que a pressão de contato não é igual à pressão de enchimento nem se distribui uniformemente sobre uma superfície circular. FERNANDES JR. (1994) informa que a superfície de contato aproxima-se da elipse (pneus de lonas) ou retângulo (pneus radiais) a medida que a carga por eixo aumenta ou a pressão diminui. Segundo SOUZA (1980), a área de contato entre um pneu carregado e uma superfície pavimentada é aproximadamente elíptica para pneus novos com pressão de enchimento e carga máximas recomendadas e, para pneumáticos usados com cargas além da máxima recomendada, a área de contato é aproximadamente retangular.

MEDINA (1997) relata que D. J. Van Vuuren realizou em 1974 ensaios de compressão em 6 tipos de pneus, obtendo uma relação média entre a pressão de contato q e a pressão de inflação p em kPa.

$$q = 0,66p + 145 \quad (2.4)$$

Observa também que acima de 393 kPa (57 psi) as pressões de contato são menores do que as de inflação.

A forma, o valor e a distribuição da pressão de contato é uma questão com certo grau de complexidade e de difícil generalização. Muitos fatores influenciam as determinações: carga por eixo, pressão de enchimento, tipo, tamanho e estado do pneu, velocidade, etc.

No Cap. 5 apresentam-se os resultados de determinações experimentais de pressões de contato e a relação obtida com a pressão de enchimento.

2.2.2 Principais Efeitos

A maioria dos autores pesquisados adotam o Fator de Equivalência de Cargas - FEC para medir os efeitos da variação da pressão de enchimento sobre o desempenho dos pavimentos. Via de regra, quando se utiliza o critério do trincamento da camada de revestimento por fadiga, deve-se considerar como resposta estrutural a deformação específica na fibra inferior do CA provocada por tensões de tração. No critério da deformação permanente devido às trilhas de rodas, a resposta do pavimento é a deformação vertical no topo do subleito provocada por tensões de compressão.

Considerando a fadiga do revestimento asfáltico, ao aumentar-se a pressão de inflação de 563 kPa (80 psi) para 844 kPa (120 psi), pode haver uma variação de até duas vezes no FEC, ou seja, a vida de um pavimento reduz-se à metade (FERNANDES JR., 1994). Outros estudos desenvolvidos pelo citado autor revelam que o mesmo acréscimo de pressão de enchimento ocasiona uma elevação da ordem de 6,0% nos custos de manutenção e construção de pavimentos.

O periódico *Truck Operating Characteristics*, publicado pelo TRB, comenta que elevadas pressões de inflação contribuem com a redução da vida de um pavimento. Em pavimentos rígidos o efeito da pressão de inflação sobre a fadiga é muito pequeno, porém nos flexíveis o efeito é muito grande. Um acréscimo de 140 kPa (20 psi) na pressão de enchimento pode aumentar os danos devido à fadiga em torno de 200 a 300% (TRB, 1997).

Pesquisas desenvolvidas entre 1987 e 1988 indicam que para um eixo simples com rodado duplo, carregado com 89 kN (20.000 lb) atuando sobre um pavimento espesso, característico da maioria das rodovias dos EUA, há um aumento de 15% no FEC quando varia somente a pressão de inflação de 517 kPa (75 psi) para 689 kPa (100 psi) (Fig. 2.2) (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1990).

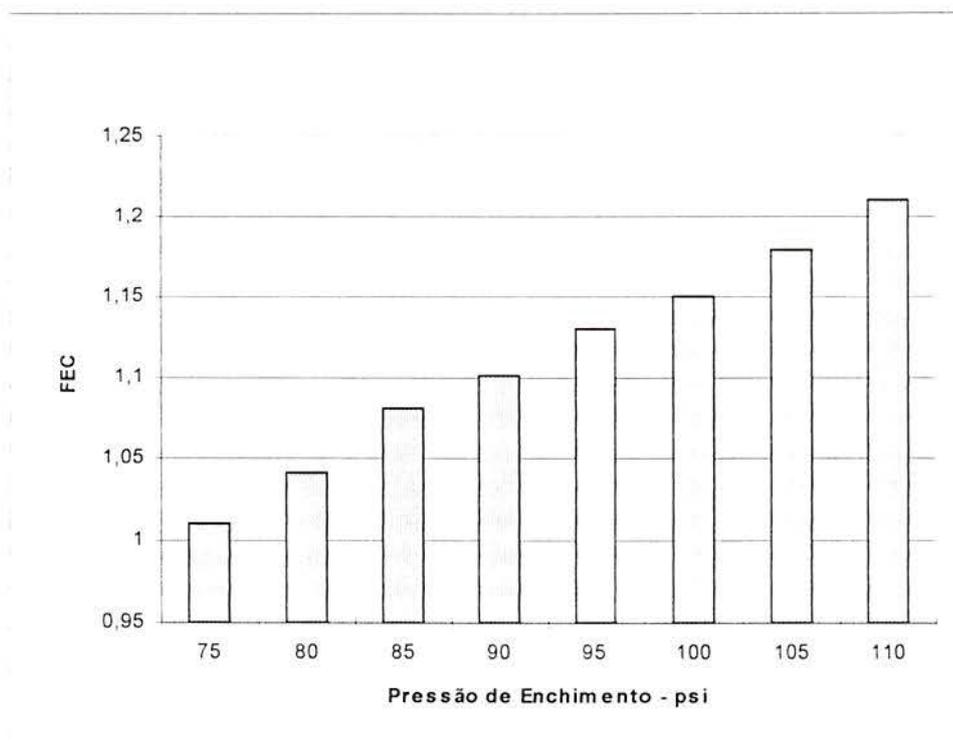


FIGURA 2.2 - Variação do FEC em Função dos Diferentes Níveis de Pressão de Enchimento

Fonte: NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1990

SEBAALY (1992) ao comparar os efeitos de um rodado duplo (11R22,5) com um simples extralargo (385/65R22,5), considerando distribuição não-uniforme de pressão de contato, concluiu que a mais significativa deformação devido a tensões de tração na base do revestimento ocorre juntamente com o maior nível de carga por eixo. Os incrementos máximos das referidas deformações específicas foram de 5 e 10% para eixos com pneus duplos e simples, respectivamente, quando a pressão aumenta de 724 kPa (105 psi) para 896 kPa (130 psi) em um típico pavimento delgado.

A pressão de inflação tem efeito significativo no valor crítico da deformação de tração na base do CA, sendo a mesma determinante não só para o valor mas também na localização da deformação máxima de tração relativa à largura da área de contato do pneu com o piso. Pneus inflados ao máximo produzem maiores deformações próximas ao eixo do pneu e pressões baixas provocam deformações máximas junto às bordas laterais. Nos revestimentos espessos (de 5 a 10 cm) o efeito da pressão de enchimento não é significativo

na deformação por compressão no topo do subleito e, conseqüentemente, na formação da trilha de roda (MARSHEK *et al.* 1986b).

GÖKTAN e MISTSCHKE (1995) concluem em seus estudos que, quanto maior for a pressão de contato, mais rapidamente configuram-se as trilhas de rodas provocadas por veículos pesados.

Por seu turno, KIM *et al.* (1989) determinaram que o maior defeito em pavimentos provocado pelo aumento da pressão de inflação é o trincamento por fadiga. Os autores calculam que um aumento na pressão de inflação de 552 kPa para 690 kPa (80 para 100 psi) pode representar um acréscimo de 40 a 60% no FEC. Referem também que a percentagem de aumento na deformação permanente da camada asfáltica é aproximadamente a mesma do aumento da pressão de inflação nos pneus dos veículos pesados.

HUHTALA *et al.*(1989) em pesquisa sobre os efeitos da pressão de inflação de pneus radiais informam que, ao aumentar a pressão de inflação em 20%, os efeitos danosos, avaliados por medidas de deformações específicas, experimentam um incremento de 1,1 a 1,4 vezes.

Entretanto, pesquisa desenvolvida na Federal Highway Administration - FHWA, Pavement Testing Facility, mostra que a pressão de enchimento tem pequeno efeito nas respostas do pavimento ensaiado em vários níveis. O aumento da pressão de 524 kPa (76 psi) para 965 kPa (140 psi) repercute somente em 2 a 10% de aumento na deflexão superficial e deformação de tração na base da camada de CA (BONAQUIST *et al.*, 1989).

Existe um consenso entre os construtores de pneus e engenheiros rodoviários de que a alta pressão nos pneus reduz a área de contato com o revestimento, de modo que o peso por roda é distribuído sobre uma área menor. O incremento das pressões de inflação ajuda a reduzir a vida do pavimento, aumentando a incidência de trincas e de deformações permanentes provocadas por trilhas de roda.

Durante o uso, o rolamento dos pneus sobre o revestimento e outros atritos provocados por ação dos freios ocasionam a elevação da temperatura que, por sua vez, eleva a

pressão de inflação. Pneus de lonas aquecidos podem ter pressões de 69 kPa a 138 kPa (10 a 20 psi) maiores do que a normal. Para pneus radiais quentes, a pressão pode elevar-se de 35 kPa a 104 kPa (5 a 15 psi) (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1990).

Atualmente, estão em andamento pesquisas para avaliar o desempenho do uso de um sistema embarcado para regulagem da pressão dos pneus (Central Tire Inflation - CTI), e adoção de baixas pressões nos pneus, principalmente no transporte de madeira no Canadá em rodovias não-troncais (DAVIES *et al.*, 1997 e DOUGLAS, 1997a). Estudos similares foram desenvolvidos entre 1987 e 1991 nos EUA, sendo os resultados significativos: não houve acréscimo sensível no consumo de combustível, foram reduzidos os desgastes nos pneus e a deterioração de rodovias não-pavimentadas, o conforto e a dirigibilidade aumentaram e os impactos sobre os caminhões e cargas diminuíram. (FERNANDES JR., 1994).

A bibliografia examinada permite constatar que há um acréscimo generalizado na pressão de enchimento dos pneus praticada por transportadores. Por este motivo, os Fatores de Equivalência de Cargas - FEC, derivados do AASHO Road Test, com valores de pressão de inflação de 517 a 552 kPa (75 a 80 psi), adotados nos EUA e Brasil estão, provavelmente, inadequados e necessitando de uma adaptação.

2.3 Tipo de Pneu

Pneus são estruturas fabricadas com borracha natural ou sintética, cuja finalidade é suportar e distribuir o PBT e viabilizar a tração e a frenagem de veículos rodoviários através de forças que se desenvolvem na interface de contato com a superfície de rolamento.

Os pneus, também designados como pneumáticos, são montados em aros metálicos formando a roda. Os pneus desmontáveis foram produzidos a partir de 1895 pelos irmãos Michelin, na França.

As principais partes componentes de um pneu bem como a função e a nomenclatura de cada uma estão descritas e ilustradas de acordo com a Fig. 2.3.

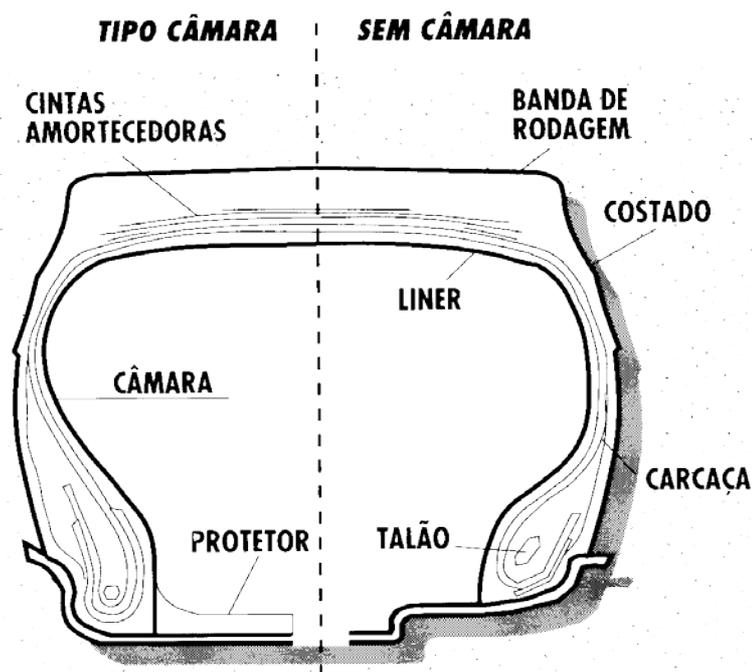


FIGURA 2.3 - Corte Transversal em um Pneu Típico

Fonte: Goodyear, 199-a

BANDA DE RODAGEM é a parte do pneu que entra em contato com o piso. É constituída por um composto especial de borracha cuja função principal é proporcionar capacidade de tração e resistência ao desgaste,

CINTAS AMORTECEDORAS são cordonéis de aço que aumentam a robustez do pneu radial, estabilizam a banda de rodagem e a protegem contra furos,

COSTADOS ou Flancos são construídos para flexionar e evitar quebras provocadas pelo esforço que são submetidos durante a operação. Devem resistir à temperatura e proteger a lona,

LINER em pneus com câmara isola os cordonéis da lona, protegendo-os da oxidação. Nos pneus sem câmara tem também a função de substituir a câmara, impedindo a fuga do ar,

TALÃO os talões são feitos com arame de aço de alta resistência, enrolados em forma contínua. O talão é o principal elemento estrutural no plano de rotação do pneu, sua função é assegurar a fixação do conjunto no aro e,

CARCAÇA é formada por lonas de tecido sintético impregnado em borracha. Esta parte do pneu deve ser bastante resistente para amortecer os golpes e suportar a pressão de inflação. Cada lona é colocada sobre a outra com os cordonéis em sentido diagonalmente oposto à lona anterior. A carcaça, em pneus radiais está constituída por uma única lona, composta de cordonéis de aço dispostos transversalmente, de talão a talão.

As características de segurança dos pneus, particularmente para caminhões e ônibus devem atender às normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT: NBR N.º 6088 (EB-932-Parte II) - Pneus Novos de Camionetas, Micro-ônibus, Caminhões, Ônibus e Seus Rebocados e NBR N.º 6089 (EB-932-Parte III) - Pneus Reformados para Automóveis, Camionetas de Uso Misto, Camionetas, Micro-ônibus, Caminhões, Ônibus e

Seus Rebocados e NBR N.º 6089 (EB-932-Parte III) - Pneus Reformados para Automóveis, Camionetas de Uso Misto, Camionetas, Micro-ônibus, Caminhões, Ônibus e Seus Rebocados. Deve-se atender também a Resolução N.º 558/80, de 15 de abril de 1980, do CONTRAN (1980) que trata da Fabricação e Reforma de Pneumático com Indicadores de Profundidade.

Um dos itens mais importantes para preservar a segurança e as características de tração e aderência do pneu sobre a pista é a definida pelo Art. 4º da citada Resolução: “Fica proibida a circulação de veículo automotor equipado com pneu cujo desgaste da banda de rodagem tenha atingido os indicadores ou cuja profundidade remanescente da banda de rodagem seja inferior a 1,6 mm.”

Dois tipos de pneus são usados por veículos rodoviários: os pneus de lonas e os radiais. O pneu de lonas também é chamado de *convencional* ou ainda *diagonal*. A diferença básica entre um pneu convencional e um radial está principalmente na disposição dos cordões das lonas da estrutura e na existência de cinturas que envolvem toda periferia dos radiais. O pneu diagonal, possui uma estrutura constituída de lonas têxteis cruzadas, umas em relação às outras, cujos cordões formam ângulos que variam em função das deformações. No pneu radial, a estrutura resistente é constituída de lonas cujos cordões de aço estão dispostos paralelamente e no sentido radial. Esta estrutura é complementada por um conjunto de cintas amortecedoras que envolvem toda periferia do pneu sob a banda de rodagem e que mantém inalterada a circunferência externa durante a operação.

O termo CAP Lonas, inscrito nos flancos dos pneus de lonas indica a capacidade de carga do pneu e não necessariamente o seu número de lonas (FRAENKEL, 1980).

Na Fig. 2.4 pode-se observar as diferenças entre o arranjo de lonas de pneus convencionais e radiais e ainda a presença de cinturas nos radiais.

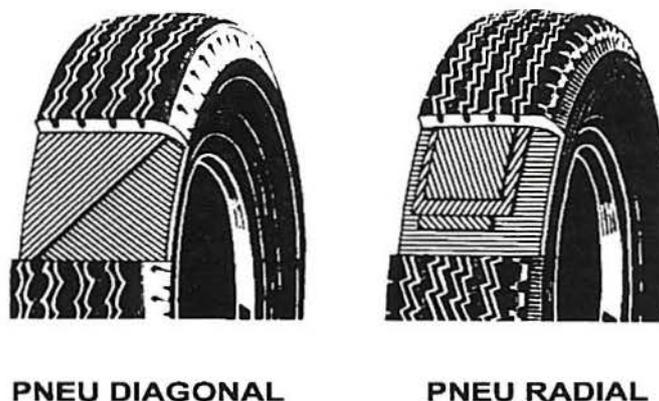


FIGURA 2.4 - Configuração de Pneus Diagonais e Radiais
 Fonte: PIRELLI, 199-

De acordo com o que foi visto na Seção 2.2, observa-se um crescimento no uso de pneus radiais. Esta tendência é importante para pavimentos e transportadores. Estudos desenvolvidos por Roberts e Rosson em 1985 indicam que pneus convencionais tem uma superfície de contato muito desuniforme e, por este motivo, altas concentrações de tensões podem ocorrer, atingindo até 1378 kPa (200 psi) (KIM *et al.*, 1989). Estas considerações permitem concluir que danos provocados por pneus radiais são menores do que os ocasionados por convencionais, para uma mesma pressão de inflação.



FIGURA 2.5 - Efeitos da Força Lateral Aplicada ao Pneu
 Fonte: GOODYEAR, 199-b

Os costados dos pneus convencionais são relativamente rígidos e não flexionam o suficiente para absorver o esforço lateral. O pneu radial adere melhor a superfície da rodovia porque a atuação da banda é independente da movimentação dos costados.

A evolução tecnológica aplicada na fabricação de pneus radiais permite destacar as seguintes vantagens em relação aos convencionais: maior quilometragem; menor resistência

ao rolamento, resultando em economia de combustível; carcaça mais flexível o que oferece mais estabilidade e controle. Em contrapartida o preço do pneu radial é maior. A maior estabilidade apresenta uma redução da largura da faixa das trajetórias de rodas fazendo com que as cargas repetidas fiquem mais concentradas (FERNANDES JR., 1994).

Segundo informações levantadas junto aos fabricantes de pneus no Brasil, recentes avanços tecnológicos tem viabilizado o uso de pneus radiais sem câmara com vantagens sobre os radiais com câmara: menor temperatura e peso, eliminação dos anéis removíveis e menor número de itens para estocar (GOODYEAR, 199-a). Normalmente os pneus sem câmara são construídos com os flancos rebaixados numa relação altura/largura do pneu entre 0,65 e 0,90, condição que confere ao veículo melhor estabilidade nas curvas e desgaste mais uniforme.

O tamanho e o tipo de fabricação do pneu estão caracterizados por uma convenção internacionalmente praticada. O primeiro número designa a largura do pneu em polegadas. A presença da letra R caracteriza o tipo de construção radial e o último número é o diâmetro do aro ou o diâmetro interno do pneu em polegadas. Para pneus com relação altura/largura menor do que 1,0 substitui-se a largura em polegadas pelo mesmo valor em milímetros mais um travessão seguido de um número variável de 65 a 90, indicador da percentagem do rebaixamento (HUHTALA, *et al.*, 1989). Por exemplo:

9.00x20	pneu convencional com 9 polegadas de largura nominal da seção e aro com diâmetro nominal de 20 polegadas;
10.00R22,5 ou 10R22.5	pneu radial com 10 polegadas de largura nominal da seção e aro com diâmetro de 22,5 polegadas e,
295/80R22,5	pneu radial com 295 milímetros de largura nominal da seção, com 80 de quociente percentual entre altura e largura da seção e aro com diâmetro nominal de 22,5 polegadas.

PEREIRA (1985), em levantamento efetuado na BR/277, trecho Curitiba - Paranaguá em 1979, constatou que os tamanhos predominantes de pneus eram: 9.00x20 (36,8%), 11.00x22 (35,7%) seguindo-se o 11.00x20 (10,5%). A tendência atual é a utilização de pneus radiais com maior tamanho, principalmente em função do crescimento da quantidade de veículos do tipo semi-reboque, equipados com eixo tandem duplo e triplo.

Pneus de tamanho 8,25R15 foram comparados com o 12R22,5 (GÖKTAN e MITSCHE, 1995). Para uma mesma carga por eixo o pneu maior pode ser inflado com uma pressão menor e, nestas condições, provoca menor pressão média de contato e deformações permanentes de forma mais lenta. Quando a pressão de enchimento e a carga são aumentadas os piores efeitos na formação de trilha de roda são provocados por pneus menores.

A Associação Nacional dos Fabricantes de Implementos Rodoviários - ANFIR tem defendido nos últimos anos a introdução no Brasil das rodas simples dotadas de pneus extralargos, em substituição às rodas duplas convencionais (FERNADES JR. *et al.*, 1994). Por definição, pneu extralargo tem aro com largura de 356 mm (14") ou mais e diâmetro nominal do aro entre 560 e 610 mm (22 a 24"). Os mais usuais são os pneus 16R22.5 e o 18R22.5 (PERDOMO e NOKES, 1993). Recentemente, no Brasil, o CONTRAN (1998b), através da Resolução N.º 62 de 21 de maio de 1998, autoriza a circulação do pneu extralargo do tipo 385/65R22,5.

Muitos estudos comparativos com os pneus de rodado duplo foram desenvolvidos para relacionar os efeitos dos pneus extralargos. Um dos trabalhos mais interessantes foi o desenvolvido na Pennsylvania State University Pavement Durability Facility, patrocinado pela Goodyear Tire & Rubber Company que concluiu que os pneus simples extralargos são mais nocivos do que os de rodado duplo quando se analisa o efeito da fadiga em pavimentos flexíveis (SEBAALY, 1992).

Não existem muitos trabalhos conclusivos de comparação entre efeitos provocados por pneus radiais e convencionais. BELL *et al.* (1996) reconhecem que pneus radiais e de lonas possuem diferentes distribuições de pressões de contato porém afirmam que os efeitos sobre pavimentos, decorrentes desta diferença são incertos. Relatam que alguns engenheiros acreditam que pneus radiais produzem melhor distribuição da pressão de contato e causam menores danos do que os pneus diagonais, quando inflados com a mesma pressão.

Por seu turno, BONAQUIST *et al.* (1989), que mediram e avaliaram os efeitos da pressão de inflação e da carga por eixo, concluem que não foi constatada nenhuma tendência

importante no que se refere à influência do tipo de pneu sobre as respostas do pavimento. FERNANDES JR.(1994) também considera que, embora havendo diferentes distribuições de pressões de contato entre pneus radiais e convencionais, os efeitos sobre o desempenho dos pavimentos são praticamente os mesmos, com alguma vantagem para os radiais, em termos de menor deterioração, para níveis mais elevados de pressão de enchimento.

Em recente estudo dos mecanismos de interação entre veículos pesados e pavimentos GILLESPIE e KARAMIHAS (1994), entre outras conclusões interessantes, referem que há indicações de que o tipo de construção do pneu tem influência sobre a formação de trilhas de roda e, desta forma, poderiam explicar recentes problemas ocorridos com o surgimento acelerado destas.

De fato, as opiniões sobre os efeitos que pneus radiais e convencionais exercem sobre pavimentos não são muito convergentes. Muitas conclusões são contraditórias e estão vinculadas ao tipo de resposta estrutural do pavimento que foi considerada em cada estudo.

2.4 Conclusões

A bibliografia referenciada oferece importantes informações de efeitos dos fatores carga por eixo, pressão de enchimento e tipo de pneu, sobre o desempenho de pavimentos. As principais indicações são as seguintes:

- I. o excesso de carga por eixo é a maior causa de defeitos em pavimentos;
- II. os levantamentos existentes indicam que no Brasil os caminhões pesados trafegam com sobrecargas entre 10 a 30%;
- III. o novo Código de Trânsito Brasileiro impõe maiores punições aos transgressores dos limites legais de peso;
- IV. o desenvolvimento tecnológico da indústria automotiva e, particularmente, a evolução na fabricação de pneus ensejaram o aumento no valor da pressão de inflação de pneus. O acréscimo é da ordem de 25%;

- V. a pressão de contato não é uniformemente distribuída na interface entre o pneu e a superfície de rolamento do pavimento;
- VI. a maior pressão de inflação também contribui para a deterioração de pavimentos. Estudos indicam que, considerando-se a fadiga, pode ocorrer um aumento de até duas vezes no Fator de Equivalência de Cargas. Ocorre também uma proporcionalidade entre o aumento da evolução da trilha de roda provocada por deformações permanentes e o aumento da pressão de inflação;
- VII. muitos autores advogam a necessidade de revisão nos FEC derivados do AASHO Road Test, desenvolvido com pressões de inflação de 517 e 552 kPa (75 e 80 psi);
- VIII. verifica-se um crescimento generalizado no uso de pneus radiais em substituição aos convencionais. No Brasil esta tendência é mais recente. O pneu radial, apesar do maior custo, apresenta maior durabilidade e segurança;
- IX. estudos comparativos não distinguem significativamente efeitos diferenciados de pneus radiais e lonas, apesar de diferenças na distribuição da pressão de contato;
- X. devido a complexidade da questão não existem conclusões gerais sobre efeitos de pressão e tipos de pneus pois outros fatores (tipo e espessura do pavimento, temperatura ambiente, tamanho de pneu, tipo de rodado, suspensão do veículo, velocidade, etc.) também influenciam de forma singular as diferentes respostas do pavimento (deflexão superficial, deformação específica horizontal na fibra inferior do revestimento, deformação vertical específica no topo do subleito, etc.);
- XI. uma adequada gerência de pavimentos com fiscalização dos excessos de carga e pressão de pneus é uma necessidade importante para preservação do patrimônio viário implantado.

3 ÁREA DE TESTES E O SIMULADOR DE TRÁFEGO UFRGS/DAER

A concepção da presente dissertação foi inspirada, entre outros fatores, nas facilidades de execução de experimentos proporcionadas pela Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos, com a utilização do equipamento conhecido como simulador de tráfego UFRGS/DAER. O presente Capítulo procura descrever e apresentar os recursos disponíveis deste promissor centro de pesquisas em pavimentação.

3.1 Área de Testes

No início desta década, com a finalidade de aprofundar e ampliar o horizonte de melhores alternativas econômicas para a pavimentação de rodovias coletoras, a Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS e o DAER celebraram um Protocolo de Colaboração Técnico-Científica. A viabilidade de uso do basalto alterado ou decomposto, conhecido como BD, na pavimentação de rodovias secundárias foi o alvo da primeira pesquisa (NÚÑEZ, 1997).

Esta pesquisa resultou na tese de doutoramento do Prof. W. P. Núñez, intitulada *Análise Experimental de Pavimentos Rodoviários Delgados com Basaltos Alterados*, cujo teor está focado na previsão de desempenho quanto às solicitações mecânicas e no desenvolvimento de um método de dimensionamento baseado nas especificidades do material e do tráfego.

O Protocolo foi inicialmente implementado através da transformação de uma gleba de 5.000,0 m², localizada no Campus do Vale da UFRGS em Porto Alegre, constituindo-se a atual Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos.

O empreendimento, além da parceria UFRGS/DAER, contou com apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio Grande do Sul - FAPERGS, da empresa Ipiranga Asfaltos S.A. e da Associação Rio-Grandense de Empreiteiros de Obras Públicas - AREOP.

Durante os anos de 1995 e 1996 foi implantada uma infra-estrutura que comporta a construção de até doze pistas experimentais com dimensões de 20,0 m de comprimento por 3,5 m de largura. As instalações visualizadas na Fig. 3.1, estão complementadas por uma edificação de alvenaria com área de 90,0 m² utilizada no controle das operações, processamento dos dados e informações, armazenamento de materiais e manutenção dos equipamentos.

A Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos, com todos seus recursos materiais e humanos, foi o local onde desenvolveu-se a fase experimental da presente dissertação. Inaugurada em 12 de julho de 1996, com menos de dois anos de operação, a Área de Testes já apresentou boas contribuições decorrentes de estudos desenvolvidos e possui amplas possibilidades de expansão física para a construção de laboratório, oficinas e salas de aula equipadas.



FIGURA 3.1 - Visão Panorâmica da Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos

3.2 Simulador de Tráfego

Nada melhor para o estudo do desempenho dos pavimentos e aperfeiçoamento dos métodos de dimensionamento do que a obtenção de dados e informações a partir de experiências em verdadeira grandeza.

Os primórdios da análise experimental de pavimentos remontam ao ano de 1840 quando, no Reino Unido, foi construído um equipamento para testar o desgaste de paralelepípedos de pedra. Porém a primeira pesquisa equipada configurou-se em 1912 através de uma máquina precursora do simulador de tráfego, executada no National Physical Laboratory, também na Inglaterra. O equipamento possuía 8 braços radiais dotados de rodas nas extremidades através das quais eram aplicadas cargas de até 13 kN (NÚÑEZ, 1997).

As pistas experimentais e os simuladores desenvolveram-se, principalmente, nos EUA. As pioneiras estão relacionadas no Quadro 3.1:

QUADRO 3.1 - Primeiras Pistas Experimentais nos EUA

Ano	Local	Revestimento
1920/23	Bates	Placas de Concreto
1930/33	Arlington	Placas de Concreto
1950/51	Maryland	Placas de Concreto
1952/54	WASHO	Asfalto
1958/60	AASHO, Ottawa	Concreto e Asfalto

Fonte: MEDINA, 1997

O teste da AASHO, o mais conhecido e referido experimento, era constituído por 6 circuitos, cada um contendo 2 retas paralelas unidas por segmentos circulares. Cada circuito possuía 2 faixas de tráfego, sujeitas ao mesmo carregamento, desde eixos simples de 9 kN até eixos tandem com 220 kN. Foi um megaexperimento ao custo de 27 milhões de dólares referidos ao ano de 1960, cujos resultados influenciam até hoje o mundo rodoviário (SENÇO, 1997).

MEDINA (1997) destaca o uso de simuladores de tráfego, do tipo transportáveis como o “Heavy Vehicle Simulator” - HVS, do Instituto de Pesquisa Rodoviária da África do Sul. É um simulador que vai à estrada e aplica cargas de 60 a 150 kN até a ruptura do pavimento perfazendo um contínuo movimento de vaivém.

No Brasil, foi construída nos anos de 1974/75, a pista experimental do IPR/DNER. O formato desta pista é de um anel com 80 m de perímetro e 4 m de largura. O trem-de-prova do carregamento é uma treliça metálica dotada de uma armadura central de forma hexagonal com 2,4 m de lado a qual estão fixados 3 braços com 10,29 m cada. Na extremidade de cada braço há um conjunto de rodas duplas que podem deslocar-se lateralmente (NÚÑEZ, 1997).

Basicamente, simuladores de tráfego para ensaios em verdadeira grandeza são concebidos em dois tipos de instalações que reproduzem as solicitações impostas aos pavimentos por veículos:

- a) pistas circulares solicitadas por simuladores de tráfego radiais e,
- b) pistas retilíneas solicitadas por simuladores de tráfego lineares.

O simulador de tráfego UFRGS/DAER (Fig. 3.2), utilizado no presente trabalho, é do tipo linear e semelhante ao “Accelerated Loading Facility” - ALF, de origem australiana e atualmente fabricado nos EUA. É também similar ao modelo em funcionamento no Transport Research Laboratory, localizado em Crowthorne, Berkshire, Inglaterra (DOUGLAS, 1997b). O equipamento utilizado na dissertação é o primeiro simulador do *tipo linear* a ser inteiramente projetado e construído em um país em desenvolvimento, sendo todos os componentes elétricos, eletrônicos e mecânicos de fabricação nacional. O projeto, inclusive dos dispositivos eletrônicos de comando e controle, foram desenvolvidos pelo Grupo de Projeto Mecânico e Automação Industrial do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS e a construção deu-se entre 1992 e 1994 pelo DAER na sua Oficina Central, sob supervisão dos projetistas e da coordenação do Protocolo de Colaboração.



FIGURA 3.2 - O Simulador de Tráfego UFRGS/DAER

O simulador de tráfego UFRGS/DAER mede aproximadamente 15 m de comprimento, 2,5 m de largura e 4,3 m de altura e apresenta as seguintes especificações básicas (NÚÑEZ, 1997):

- curso de atuação da carga sobre o pavimento: 8 m, regulável até 9 m;
- curso de aceleração e desaceleração: 3 m;
- carga sobre o pavimento: regulável até 65 kN;
- princípio de aplicação da carga: hidráulico;
- aplicação da carga: linear, unidirecional e não tracionada;
- sistema de rodado: simples ou duplo, articulado e regulável. No caso do experimento, utilizou-se o rodado duplo;
- velocidade de deslocamento: regulável até 20 km/h;
- princípio de acionamento geral: elétrico

Na operação de carregamento o rodado parte do repouso e, após breve aceleração, desloca-se em velocidade constante até ser freado e erguido. O retorno à posição inicial dá-se com o rodado suspenso sem atuação da carga sobre o pavimento. O ciclo dura 16 s, possibilitando a aplicação de 225 cargas por hora e cerca de 2.500 por dia. As operações são comandadas a partir de um quadro eletrônico e estão completamente automatizadas.

NÚÑEZ *et al.*(1997) explicam que a aplicação de cargas superiores à padrão permite acelerar a degradação dos pavimentos experimentais. Cargas de 100 kN e 130 kN equivalem, respectivamente, do ponto de vista destrutivo, a 3,53 e 17,6 passagens do eixo padrão de 82 kN, de acordo com o US Corps of Engineers. No Quadro 3.2 apresentam-se os tempos que o simulador leva para degradar um pavimento previsto para $N = 10^6$:

QUADRO 3.2 - Tempo Transcorrido para Degradar um Pavimento

Tempo para $N = 10^6$	Carga de Eixo Aplicada pelo Simulador (kN)		
	82	100	130
em horas	4.444	1.259	253
em dias	400	113	23

Fonte: NÚÑEZ *et al.*, 1997

De uma maneira geral, mesmo descontando-se os períodos em que o simulador pára para realizações de medições de respostas do pavimento, em manutenções ou fins de semana, é possível reproduzir em dois meses o dano que uma rodovia, com tráfego médio, experimentaria durante sua vida útil ou período de projeto.

As solicitações de cargas em cada pista experimental da Área de Testes são procedidas pelo simulador sobre dois setores com dimensões de 7,0 m de comprimento por 0,75 m de largura. Durante a operação o rodado do simulador de tráfego sofre um deslocamento transversal coordenado com o longitudinal para impedir a formação irreal de trilhas de rodas por passagem do rodado sempre sobre o mesmo lugar. Então, um deslocamento lateral de 0,5 cm ocorre toda vez que o sistema de rodagem retorna suspenso

para início de um novo ciclo, simulando, desta forma, o que ocorre de fato sobre uma faixa de tráfego. Percentualmente, a distribuição transversal das cargas dá-se conforme está demonstrado na Fig. 3.3.

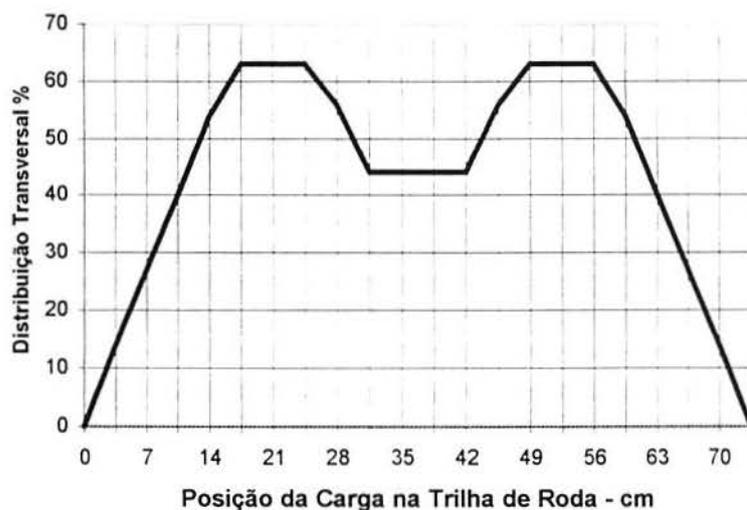


FIGURA 3.3 - Distribuição Transversal de Cargas Sobre Cada Setor
Fonte: Núñez *et al.*, 1996a

As potencialidades de uso da Área de Testes e do simulador UFRGS/DAER são numerosas. Além do presente trabalho que investiga as influências dos fatores carga por eixo, pressão de inflação e tipo de pneu sobre a deflexão de pavimentos, há outras pesquisas que poderão ser desenvolvidas, tais como as relacionadas no Cap. 7 e as recomendadas por NÚÑEZ *et al.* (1997): atualização de métodos de dimensionamento e reforço de pavimentos; medidas de tensões e deformações para calibrar equações de desempenho e modelos de análise estrutural, estudo dos efeitos da alteração dos limites permitidos de carga por eixo; testes dos efeitos das suspensões e de pneus extralargos, testes de novos materiais para pavimentação, etc.

4 PESQUISA DE CAMPO

O Cap. 4 descreve o planejamento, a execução e apresenta os resultados de uma pesquisa de campo realizada junto ao Posto de Pedágio da rodovia RS/240. Os levantamentos foram executados com a finalidade de constatar os valores da pressão de inflação de pneus praticados em uma amostra de veículos pesados, bem como avaliar o percentual de pneus radiais e convencionais circulando no mercado. Investigou-se também dados sobre o tamanho dos pneus, tipo de veículos, profundidade dos sulcos da banda de rodagem, marcas de pneus e veículos e situação dos motoristas, se autônomos ou frotistas. Ao final, apresenta-se uma análise das informações obtidas.

4.1 Descrição da Pesquisa

As informações sobre pressão de enchimento e tipos de pneus da frota de veículos pesados obtidos na literatura consultada não foram considerados suficientes para subsidiar a dissertação na forma pretendida. FERNANDES JR. (1994) também comenta a inexistência de maiores informações sobre o assunto.

PEREIRA (1985), com base em estudo de sua autoria, publicado em 1962 pelo IPR, estabelece uma relação linear entre pressão de inflação e carga incidente sobre uma roda, a partir de pesagens e medições de pressões em pneus executadas na BR/277, trecho Curitiba - Paranaguá (Quadro 2.7).

Também no exterior, a quantidade de levantamentos de dados de pressões e tipo de pneus ainda é pequena. Destacam-se as pesquisas realizadas nos EUA por MIDDLETON *et al.* (1986) no Texas, KIM *et al.* (1989) e BELL *et al.* (1996) no Oregon.

Por este motivo, diante dos escassos elementos disponíveis, definiu-se a realização de uma pesquisa de campo para coleta das informações desejadas.

Os objetivos básicos da pesquisa programada foram duplos e direcionados no sentido da obtenção de respostas às seguintes questões:

- a) De uma maneira geral, qual a pressão de enchimento de pneus que os veículos de carga estão praticando quando efetivamente em circulação?
- b) Qual a distribuição percentual do universo de pneus relativamente ao tipo de fabricação?

O primeiro passo foi a definição da escolha do local mais adequado para a pesquisa. Estabeleceu-se que o mesmo deveria atender os seguintes requisitos mínimos:

- rodovia com VDM acima de 10.000 veículos/dia, com tráfego heterogêneo e o mais representativo possível da atividade econômica de determinada região;
- local com facilidades para parada de veículos pesados sem ocasionar congestionamentos e,
- proximidade de bases do DAER e da Polícia Rodoviária Estadual para apoio aos trabalhos de coleta de dados.

A consideração das condicionantes levou à escolha do Posto de Pedágio localizado no km 12 da RS/240, como o local mais adequado (ver Fig. 4.1). O referido posto está posicionado no extremo oeste do segmento Vila Scharlau - Rincão do Cascalho, no município de Portão, Região Metropolitana de Porto Alegre, RS. Trata-se de uma rodovia com obras de duplicação em fase de conclusão. O trecho possui um VDM em torno de 16.000 veículos/dia dos quais, aproximadamente, 30% são de carga. A RS/240 integra a principal ligação da serra gaúcha com a capital do Estado e constitui-se na melhor alternativa para veículos que demandam à região sudeste do país, via BR/101.

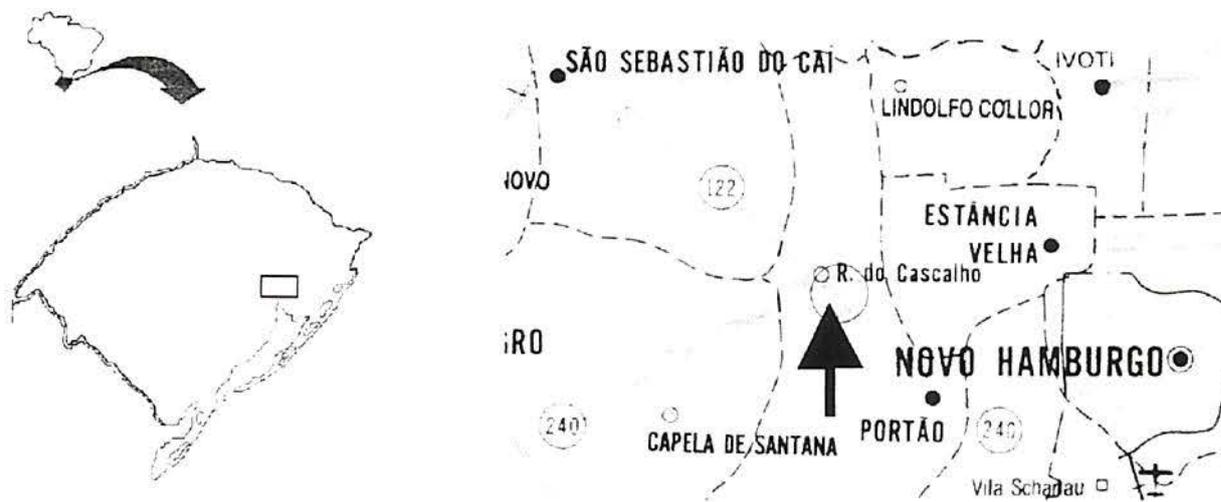


FIGURA 4.1 - Local da Pesquisa: o Posto de Pedágio da Rodovia RS/240

Fonte: DAER, 1997

O local escolhido oferece a vantagem da disponibilidade de uma faixa de tráfego, utilizada somente em ocasiões de maior pico de veículos no posto. Há também agregado um núcleo da Polícia Rodoviária Estadual que opera no local, cuja colaboração foi indispensável para o desenvolvimento dos trabalhos. A 100 m de distância contou-se com o apoio de um Escritório de Fiscalização de obras do DAER onde foi recrutada parte do pessoal complementado com funcionários da empresa Serviços Técnicos de Engenharia - STE, operadora do Pedágio.

Na foto da Fig. 4.2 observam-se as instalações do Pedágio e os serviços de coleta de dados, realizados na faixa da direita, no sentido São Sebastião do Caí - Portão.



FIGURA 4.2 - Coleta de Dados em Veículos de Carga junto ao Posto do Pedágio da RS/240

Em função das características do rodado e de carregamento diferenciado, programou-se dividir a amostra de pneus em duas: os pneus dianteiros em eixos simples de rodado simples e os pneus dos eixos não-dianteiros, simples e tandem de rodado duplo.

Além dos citados objetivos básicos do levantamento, definiu-se, também, desenvolver uma análise estatística com a finalidade de identificar fatores com significância no valor da pressão de enchimento. Assim, foram anotados dados adicionais referentes ao tipo de veículo, tamanho e fabricante de pneus.

Marginalmente, julgou-se útil registrar o tipo de mercadoria transportada, a profundidade do sulco da banda de rodagem e a relação de trabalho do motorista do veículo (se empregado ou proprietário).

Com o objetivo de reter o veículo pesquisado o mínimo tempo, decidiu-se pela facilidade de colher e anotar somente elementos relativos aos pneus dianteiros e pneus

externos dos eixos não-dianteiros, atuando simultaneamente com duas turmas de pesquisadores.

Diante dos pressupostos delineados, criou-se uma planilha para registro dos dados, individualizada para cada veículo. A planilha, reproduzida na Fig. 4.3, está composta por três blocos. O primeiro contém informações gerais: discriminação do local da pesquisa, data, horário, nome dos pesquisadores e condições do clima. O segundo bloco refere-se a elementos pertinentes ao veículo: placas, marca, código da classificação (ver Quadro 2.1), mercadoria transportada e relação de trabalho do motorista. Terceiro bloco, reservado somente para os dados de pneus, com o registro da: pressão de inflação, tipo de construção e rodagem, profundidade do sulco e fabricante (marca). Por último, reservou-se um espaço destinado a anotações de alterações na rotina de trabalho e à situações especiais.

Com relação ao tamanho da amostra a ser pesquisada, o autor baseou-se nos estudos e cálculos estatísticos desenvolvidos por BELL *et al.* (1996) para levantamentos similares executados em cinco rodovias do Estado do Oregon, EUA. Aqueles pesquisadores utilizaram parâmetros de apoio obtidos em levantamentos anteriores para um tamanho de amostra grande ($n > 30$) e a distribuição normal como modelo do processo. Para um nível de confiança de 95%, os cálculos indicam que:

TABELA 4.1 - Estimativas de Tamanho da Amostra

% de Erro	Possibilidade % de Veículos Fora da Amostra	Tamanho da Amostra
1	6,3 - 7,3	2.617
2	5,3 - 9,3	654
3	4,3 - 10,3	291
4	3,3 - 11,3	164
5	2,3 - 12,3	105

Fonte: BELL *et al.*, 1996

No presente trabalho, julgou-se conveniente estabelecer a meta de 291 caminhões como ótima em termos de dimensionamento do tamanho da amostra. Porém, ao final do segundo dia da Pesquisa atingiu-se o número de 275 veículos, avaliado como de bom

tamanho tendo em vista os objetivos do trabalho e o alto custo da mobilização do pessoal envolvido. Para o nível de confiança considerado, a amostra inspecionada dá uma margem de erro próxima a 3,5%, avaliada como satisfatória.

4.2 Coleta de Dados

A equipe de trabalho da pesquisa esteve constituída por duas turmas, cada uma integrada por três pesquisadores. Contou-se com um inspetor, que auxiliou o autor da dissertação na coordenação geral. A segurança de tráfego e a captação dos caminhões esteve a cargo de dois policiais militares do Batalhão da Polícia Rodoviária Estadual, que revezaram-se em turnos de duas horas.

Precedendo a coleta de dados oficial, realizou-se na manhã do dia 29 de agosto de 1997 um treinamento com as turmas de pesquisadores. O treinamento mostrou-se indispensável, pois encaminhou uma série de soluções para questões não previstas. Acertou-se também uma mecânica de atuação do pessoal na abordagem e diálogo com cada motorista. O desempenho da equipe em termos de produção foi crescente: preenchimento de 11 planilhas/hora no treinamento, média de 15,9 planilhas hora no dia 3 de setembro, encerrando com 18,5 planilhas/hora no dia 4 de setembro de 1997. Atuou-se no horário das 8 às 12 h e das 14 às 18 h, informado como o de maior volume de tráfego, em dias úteis.

Explicou-se a cada motorista de veículo da amostra as razões da pesquisa, obtendo-se, de forma praticamente unânime, autorização para coleta e anotações dos dados. As raras negativas de colaboração deram-se por atrasos acumulados no tempo de viagem.

As informações relativas a cada veículo de carga foram colhidas por observações diretas e entrevistas com motoristas. Os dados de pneus foram obtidos por leitura nas inscrições nos costados. A pressão de inflação foi medida a quente, ou seja na temperatura do pneu, por manômetros calibradores com as seguintes especificações: tipo 66/1, rosca 1/8 BSP, escala 0 - 170 psi, marca Schrader, devidamente aferidos por bomba de pressão estática. A

profundidade do sulco foi medida sempre na metade da largura da banda de rodagem, através de um paquímetro de profundidade, conhecido comercialmente como calibrador da rodagem, com precisão de 0,5 mm.

A temperatura ambiente foi lida e anotada a cada hora em um termômetro posicionado no sol a uma altura de 40 cm do pavimento, simulando-se posição do pneu. A variação da temperatura foi de 23 a 31° C no dia 03/9/97 e de 22 a 35° C no dia 04/9/97. As temperaturas estavam elevadas para a época, no Rio Grande do Sul.

As alterações de rotina de maior porte foram: em alguns casos a existência de calotas nos pneus dianteiros impedindo a tomada da pressão de enchimento e 25,5% da amostra de veículos contendo Central de Inflação de Pneus. Nestes casos procedeu-se a verificação da pressão nos manômetros localizados nas cabinas, adotando-se estes valores como corretos.

Foram inspecionados **275** veículos de carga que trafegavam no sentido São Sebastião do Cai - Portão, coincidente com o funcionamento das cabinas de cobrança de pedágio e colhidos dados de **1.815** pneus.

UFRGS - DAER

PESQUISA	PRESSÃO DE PNEUS	PPGEP
-----------------	-------------------------	--------------

Eng. João Fortini Albano

Fl. n:.....

DADOS GERAIS	Data:	Pesquisadores:
Clima: Sol <input type="checkbox"/>	Nublado <input type="checkbox"/>	Temp. Ambiente:
Local:	Chuva <input type="checkbox"/>	Hora:

VEÍCULO	Placas:	Classificação:
Marca:	Mercadoria:	Frotista <input type="checkbox"/> Autônomo <input type="checkbox"/>

PNEUS EXTERNOS												
Lado	Esquerdo						Direito					
Eixo n°	Pressão	Tamanho	S/D	R/L	Sulco	Fabricante	Pressão	Tamanho	S/D	R/L	Sulco	Fabricante
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												

Observações:.....

FIGURA 4.3 - Planilha Utilizada na Pesquisa de Campo

4.3 Resultados Obtidos

Nesta seção apresentam-se os dados coletados após tabulação e tratamento estatístico básico. Os produtos estão relacionados por ordem de prioridade, de acordo com os objetivos da pesquisa. No Anexo C da dissertação consta uma visualização gráfica mais detalhada.

a) Pressão de Inflação

TABELA 4.2 - Pressão de Inflação na Amostra de Pneus Dianteiros

Amostra	Pressão Média kPa (psi)	Desvio Padrão	Tamanho da Amostra	Maior Pressão kPa (psi)	Menor Pressão kPa (psi)
Pneus de Lonas	620 (90)	84(12,3)	226	868 (126)	262 (38)
Pneus Radiais	689 (100)	68(9,9)	228	875 (127)	510 (74)
Total de Pneus	655 (95)	84(12,2)	454	875 (127)	262 (38)

TABELA 4.3 - Pressão de Inflação na Amostra de Pneus Não-Dianteiros

Amostra	Pressão Média kPa (psi)	Desvio Padrão	Tamanho Amostra	Maior Pressão kPa (psi)	Menor Pressão kPa (psi)
Pneus de Lonas	668 (97)	101 (14,7)	393	854 (124)	208 (30)
Pneus Radiais	744 (108)	81 (11,7)	844	978 (142)	303 (44)
Total de Pneus	717 (104)	94 (13,6)	1237	978 (142)	208 (30)

b) Tipo de Construção do Pneu

TABELA 4.4 - Tipos de Pneus

	Radial	Convencional	Total
Quantidade	1129	686	1815
%	62,2	37,8	100

c) Tamanho do Pneu

TABELA 4.5 - Composição da Amostra por Tamanho e Tipo de Pneus

Tamanho	Radial	Convencional	Total	%
8.25x20		6	6	0,3
9.00x20		283	283	15,6
9.00R20	145		145	8,0
10.00x20		205	205	11,3
10.00R20	402		402	22,1
11.00x22		192	192	10,6
11.00R22	496		496	27,3
12.00R22.5	10		10	0,6
11.00R24.5	22		22	1,2
275/80R22.5*	16		16	0,9
295/80R22.5**	38		38	2,1
Total	1129	686	1815	100

d) Tipo de Veículos (MEDINA, 1997)

TABELA 4.6 - Composição da Amostra por Tipo de Veículo

Classificação	Número de Veículos	%
2C	73	26,5
3C	124	45,1
2S1	1	0,4
2S2	4	1,4
2S3	64	23,3
3S3	9	3,3
Total	275	100

* Pneu sem câmara equivalente ao de 9.00"

** Pneu sem câmara equivalente ao de 10.00"

e) Profundidade dos Sulcos da Banda de Rodagem

TABELA 4.7 - Distribuição das Profundidades dos Sulcos da Rodagem dos Pneus Dianteiros

Intervalo (mm)	Número de Pneus	%	% Acumulada
0 - 2	15	2,7	2,7
2,1 - 4	47	8,6	11,3
4,1 - 6	84	15,3	26,6
6,1 - 8	117	21,4	48,0
8,1 - 10	118	21,5	69,5
10,1 - 12	92	16,8	86,3
12,1 - 14	73	13,3	99,6
14,1 - 16	2	0,4	100,0
Total	548	100	

TABELA 4.8 - Distribuição das Profundidades dos Sulcos da Rodagem dos Pneus Não - Dianteiros

Intervalo (mm)	Número de Pneus	%	% Acumulada
0 - 2	92	7,3	7,3
2,1 - 4	150	11,9	19,2
4,1 - 6	230	18,2	37,4
6,1 - 8	214	17,0	54,4
8,1 - 10	201	15,9	70,3
10,1 - 12	182	14,4	84,7
12,1 - 14	133	10,6	95,2
14,1 - 16	52	4,1	99,3
> 16	7	0,6	100,0
Total	1261	100	

f) Fabricante de Pneus

TABELA 4.9 - Divisão da Amostra por Fabricante de Pneus

Fabricante	Número de Pneus	%
Goodyear	552	30,4
Michelin	392	21,6
Firestone	307	16,9
Pirelli	240	13,2
Kumho	106	5,8
Fate	42	2,3
Hankook	29	1,6
Dunlop	27	1,5
FUNSA	18	1,0
Taurus	17	1,0
Continental	15	0,8
Marshal	14	0,8
Outros*	55	3,1
Total	1814	100

g) Relação de Trabalho do Motorista

TABELA 4.10 - Divisão da Amostra por Relação de Trabalho do Motorista

Espécie	N.º de Veículos	%
Frotista	157	57,1
Autônomo	118	42,9
Total	275	100

* No item Outros estão agrupadas as seguintes marcas: CEATVG, Double, General, Jet Star, Tauser, Toyo, Tube Bype, Wallo, Wanli, Yelow, Yokohama.

h) Marcas dos Veículos de Carga

TABELA 4.11 - Marcas dos Veículos da Amostra

Marcas	Número de Veículos	%
Mercedes	181	65,8
Scania	52	18,9
Volkswagem	16	5,8
Volvo	11	4,0
Ford	9	3,3
Chevrolet	5	1,8
Fiat	1	0,4
Total	275	100

4.4 Análise dos Resultados

Preliminarmente é importante destacar que a presente análise está limitada ao âmbito da amostra constituída por veículos pesados que servem à região da serra gaúcha, caracterizada por uma economia centrada em atividades industriais e agricultura de minifúndios.

As pressões médias de enchimento de 655 kPa (95 psi) e 717 kPa (104 psi) obtidas nas amostras de pneus dianteiros e não-dianteiros, respectivamente, enquadram-se na ordem de grandeza das pressões medidas em pesquisas similares nos EUA. Ficou, portanto, constatada a elevação da pressão média dos pneus em relação àquela praticada nas décadas de 60 que oscilava em torno de 552 kPa (80 psi) (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1990).

Os resultados também confirmaram observações anteriores, constantes na Seção 2.2 de que pneus radiais tem pressões de inflação maiores. A incidência de 62,2% de pneus com

fabricação radial na frota de caminhões demonstra o crescimento deste tipo de pneu no mercado.

A constatação de pressões de inflação maiores do que as previstas nos procedimentos de dimensionamento e análise de pavimentos indica necessidades de atualização destes métodos. O atual Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis (BRASIL. DNER, 1979) considera a pressão de enchimento de 552 kPa (80 psi). MATTOS (1991) ao comentar este método indica também a necessidade revisão dos precursores (AASHTO e Corpo de Engenheiros).

Por razões similares, os procedimentos DNER - PRO 11/79 (BRASIL. DNER, 1994e) e DNER - PRO 10/79 (BRASIL. DNER, 1994d) deveriam ser reavaliados. As determinações de deflexões com a Viga Benkelman, executadas de acordo com o Método de Ensaio DNER-ME 24/94 (BRASIL. DNER, 1994a), discrimina que os pneus tipo 10.00x20 ou 9.00x20, do veículo de ensaio, devem ser calibrados à pressão de 552 kPa (80 psi). Como se observa, os pneus especificados são do tipo convencional e a pressão de enchimento é inferior às médias determinadas nas amostras da pesquisa.

Com a finalidade de constatar a significância do tamanho do pneu, do tipo de veículo e da marca do pneu sobre a pressão de inflação executou-se, com a amostra de pneus não-dianteiros, três análises de variâncias (RIBEIRO, 1995) do tipo "one-way", Comparação de Vários Grupos, tendo-se, para cada situação:

- a) Fator Controlável: *tamanho do pneu*. Níveis do fator: pressões em pneus de maior tamanho da amostra 11.00R22 (27,3%), 10.00R20 (22,1%) e 9.00x20 (15,6%);
- b) Fator Controlável: *tipo de veículo*. Níveis do fator: pressões em pneus dos tipos de veículos com maior incidência na amostra 3C (45,1%), 2C (26,6%) e 2S3 (23,7%);
- c) Fator Controlável: *marca do pneu*. Níveis do fator: pressões em pneus de fabricantes com marcas preponderantes na amostra Goodyear (30,4%), Michelin (21,6%), Firestone (16,9%) e Pirelli (13,2%).

O Teste de comparação da estatística F, desenvolvido por intermédio da Tabela ANOVA (Anexo B) indicou, por ordem, que os níveis dos fatores *tamanho do pneu* e *tipo de veículo* têm significância no valor da variável de resposta pressão de enchimento. Por outro lado, os cálculos indicaram que a marca do pneu não tem efeito significativo sobre a pressão de inflação.

Sob o ponto de vista do tamanho dos pneus, destacam-se na amostra os tamanhos 11.00R22 (27,3%) e 10.00R20 (22,1%), confirmando as informações obtidas na entrevista com um frotista* quanto a tendência atual de uso de pneus de maior tamanho e do tipo radial. A mesma fonte acusa um decréscimo nas compras de pneus tamanho 9.00x20 e 10.00x20. GÖKTAN e MITSCHE (1995) indicam que pneus de maior tamanho, em rodado duplo produzem, menos danos aos pavimentos do que pneus menores, quando submetidos ao mesmo carregamento.

As medições de profundidade dos sulcos da rodagem permitiram avaliar como boas as condições de segurança referentes ao desgaste da banda de rodagem dos pneus referida ao valor mínimo de 1,6 mm previsto na Resolução N.º 558/80 do CONTRAN (1980).

Reitera-se o destaque quanto à ocorrência do veículo tipo 3C (45,1%), conhecido popularmente como “truque”, à marca da montadora Mercedes (65,8%) e aos fabricantes de pneus Goodyear (30,4%) e Michelin (21,6%), este último produzindo somente pneus do tipo radial. Detectou-se também uma grande variedade de marcas de pneus importados disputando um espaço no mercado.

Por último, a relação de trabalho do motorista revelou um percentual alto de autônomos (42,9%). Este dado é interessante sob o ponto de vista econômico pois revela um alto número de agentes empreendedores mas não pode ser generalizado sem maiores estudos.

* Informação fornecida pelo Sr. Odairton dos Santos, Gerente de Manutenção de NORTRAN - Transportes Coletivos Ltda., de Porto Alegre, RS.

4.5 Conclusões

- I. organizou-se uma pesquisa de campo na RS/240 para colher dados e informações de pneus em veículos de carga. Foram inspecionados 275 veículos e um total de 1.815 pneus. A amostra investigada apresentou 25,5% dos caminhões contendo Central de Inflação de Pneus com manômetros localizados na cabina;
- II. a amostra de pneus dianteiros, com 454 pneus, apresentou média aritmética da pressão de enchimento de 655 kPa (95 psi). Nesta amostra, os pneus radiais e os de lonas estavam com média de pressão de inflação de 689 kPa (100 psi) e 620 kPa (90 psi), respectivamente;
- III. a amostra de pneus não-dianteiros, com 1237 pneus, apresentou média aritmética da pressão de inflação de 717 kPa (104 psi). Na mesma amostra, pneus radiais e de lonas apresentaram, respectivamente, pressões médias de enchimento de 744 kPa (108 psi) e 668 kPa (97 psi);
- IV. a composição percentual da amostra de todos pneus examinados foi de 62,2% com pneus de fabricação radial e 37,8% com pneus do tipo convencional;
- V. cálculos estatísticos desenvolvidos somente sobre a amostra de pneus não-dianteiros demonstram que os fatores *tamanho do pneu* e *tipo do veículo* tem significância sobre a *pressão de enchimento* dos pneus. Por outro lado, verificou-se que a *marca de pneu* não tem significância sobre a pressão de inflação.

5 EXPERIMENTO FATORIAL

Apresenta-se, neste Capítulo, a descrição, a organização e a execução do experimento programado. Define-se os níveis dos fatores intervenientes e a ordem de realização das leituras da deflexão superficial. Relata-se as condições da coleta de dados e a disposição dos resultados das medições de deflexões recuperáveis e áreas de contato. Aplica-se aos resultados instrumentos de análise de variância e regressão. Por fim, apresenta-se uma interpretação dos resultados obtidos.

5.1 Descrição do Experimento

A idéia central da dissertação, apresentada no XI Congresso da ANPET (ALBANO e LINDAU, 1997), foi a execução de um experimento fatorial para testar a significância dos fatores carga por eixo, pressão de inflação e o tipo de pneu na resposta elástica de um pavimento típico, existente na Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos da UFRGS. Em função dos recursos disponíveis na Área de Testes, escolheu-se a deflexão superficial como medida do desempenho do pavimento.

Com o desdobramento do estudo sobre o assunto, julgou-se conveniente também medir e avaliar a pressão de contato entre o pneu e a superfície do pavimento.

Assim, os objetivos do experimento foram programados em duas partes:

- a) determinar a significância dos fatores carga por eixo, pressão de enchimento e tipo de pneu nas deflexões superficiais de um pavimento,
- b) determinar as pressões de contato para subsidiar o estudo das deflexões.

A presente análise experimental foi viabilizada com a utilização do simulador de tráfego UFRGS/DAER, descrito no Cap. 3. A carga sobre um semi-eixo, representado pelo

rodado duplo do equipamento, foi produzida pela Unidade Hidráulica, aferida de acordo com o procedimento descrito no Anexo A.

A variação da pressão de inflação foi executada com o auxílio de um compressor de ar de 10 CV, marca Schulz, modelo MSV 40/380 acionado por um motor elétrico trifásico de 10 CV, marca Kolbach, modelo KT 132M10N.

Para a calibragem dos pneus nos diferentes níveis estabelecidos foram utilizados os mesmos manômetros usados na pesquisa de campo, descritos na Seção 4.2.

A determinação das deflexões deu-se através de uma viga Benkelman, operada por pessoal especializado da Unidade de Normas e Pesquisas - UNP do DAER, de acordo com Método de Ensaio DNER - ME 24/94 (BRASIL. DNER, 1994a), adaptado para o simulador.

Compatibilizando os trabalhos em andamento na Área de Testes com os objetivos da dissertação, julgou-se conveniente executar o experimento sobre a Pista n.º 3, considerada pouco espessa e capaz de produzir deflexões maiores.

QUADRO 5.1 - Constituição do Pavimento da Pista 3

Camada	Tipo	Espessura (cm)
Revestimento	TSD com Capa Selante	2,5
Base	Macadame à Seco com BD	21,0
Subleito	Argila Vermelha de Comportamento Laterítico	67,0

Cada pista da Área de Testes está dividida em dois Setores, sobre os quais o rodado do simulador desloca-se com determinado carregamento. A Pista 3 está dividida nos Setores 11 e 8 (ver Fig. 5.1). Por sua vez, cada Setor está subdividido em oito Seções sobre as quais eram procedidas as medições da tese do Prof. Washington P. Núñez, na época, em andamento.

Programou-se, para o presente estudo, utilizar a Seção 5 do Setor 8, no início do carregamento, quando o comportamento elástico do pavimento não tinha sido afetado pelo

tráfego. A Fig. 5.1 ilustra a configuração da Pista 3 e a localização definida para a coleta de dados.

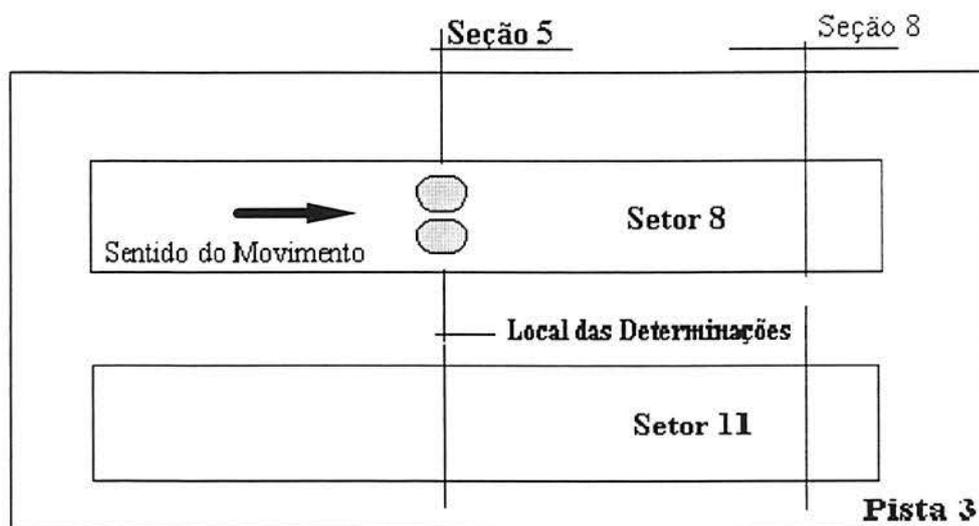


FIGURA 5.1 - Planta Baixa da Pista 3 (sem escala)

Desenvolveu-se, então, o experimento fatorial cruzado com três fatores de acordo com procedimentos estatísticos descritos em RIBEIRO (1995), cujos elementos estão detalhados a seguir:

Fatores Controláveis:

a) Carga por Eixo - Para análise de uma possível não-linearidade, definiu-se três níveis obtidos por regulagem da Unidade Hidráulica - UH do simulador de tráfego:

$C_1 = 82 \text{ kN}$ (8,2 tf): Carga correspondente ao eixo padrão de 18.000 lb. Regulou-se a UH para obter 41 kN (4,1 tf) sobre o rodado duplo do simulador. Carga considerada BAIXA,

$C_2 = 100 \text{ kN}$ (10 tf): Carga máxima por eixo simples equipado com rodado duplo permitida pela legislação. Regulou-se a UH para obter 50kN (5,0 tf). Carga NORMAL,

$C_3 = 120 \text{ kN}$ (12 tf): Carga 20% acima da máxima permitida. Regulou-se a UH para 60 kN (6,0 tf). Carga ALTA.

b) Pressão de Enchimento dos Pneus - Da mesma forma, decidiu-se utilizar três níveis de pressão de inflação. Os valores dos níveis foram escolhidos com base nos dados da pesquisa de campo [pneus dianteiros 655 kPa (95 psi) e não-dianteiros 717 kPa (104 psi)] e recomendações constantes em catálogos de fabricantes. A inflação dos pneus foi obtida através de um compressor de ar, descrito anteriormente. Os níveis foram os seguintes:

- $p_1 = 552$ kPa (80 psi): Pressão padrão utilizada nas pistas da AASHO e normalizada para determinação da deflexão, conforme o ME 24/94 do DNER (BRASIL. DNER, 1994a). Pressão BAIXA,
 $p_2 = 620$ kPa (90 psi): Pressão considerada MÉDIA,
 $p_3 = 689$ kPa (100 psi): Pressão ALTA..

Devido ao menor tamanho dos pneus utilizados no experimento e atendendo recomendações dos fabricantes, quanto ao risco de possíveis rupturas, optou-se por não usar níveis mais altos da pressão de inflação, garantindo assim a segurança dos operadores..

c) Tipo de Pneu - Utilizou-se no experimento dois níveis para o fator tipo de pneu. O pneu de lonas ou convencional e o radial cujo uso é crescente. As características dos pneus são as seguintes:

- Lonas (convencional): Tamanho 9.00x20, CAP 14 Lonas, profundidade do sulco da banda de rodagem 12 mm, marca Firestone,
 Radial: Tamanho 9,00R20, 14 Lonas, profundidade do sulco da banda de rodagem 14 mm, marca Firestone.

Fatores Constantes:

a) Umidade do Subleito - Para evitar que possíveis períodos de saturação do subleito durante a execução do experimento pudessem provocar interferências nos resultados, decidiu-se não solicitar o pavimento com o subleito saturado. O monitoramento indireto do teor de umidade e do grau de saturação do subleito foi feito por três dispositivos de medição de sucção, conhecidos como tensiômetros, instalados junto à Pista 3. Maiores detalhes sobre este procedimento foram discutidos por NÚÑEZ *et al.* (1996b).

- b) Clima - Devido à natureza do revestimento do pavimento ensaiado (TSD revestido com capa selante, 2,5 cm), a influência da temperatura ambiental é insignificante. Decidiu-se também não executar medições com ocorrências de chuvas.
- c) Pavimento - O experimento foi executado somente sobre a estrutura da Pista 3, constituída conforme descrição anterior, cuja origem do basalto alterado é a jazida F, localizada no município de Frederico Westphalen, no norte do Rio Grande do Sul.

Variável de Resposta:

A variável de resposta que define o desempenho do pavimento estudado, de acordo com os objetivos propostos, é a máxima deformação superficial recuperável ou deflexão. Este parâmetro foi medido com uma viga Benkelman.

Para cada combinação dos níveis dos fatores foram feitas quatro determinações de deflexões recuperáveis, quantidade considerada satisfatória. Sendo assim, ocorrem $3 \times 3 \times 2 = 18$ combinações de fatores e $3 \times 3 \times 2 \times 4 = 72$ leituras na viga ou determinações de deflexões.

QUADRO 5.2 - Organização das Leituras da Deflexão no Experimento

	Tipo de Pneu T					
	Radial			Lonas		
Pressão P	Carga C ₁	Carga C ₂	Carga C ₃	Carga C ₁	Carga C ₂	Carga C ₃
p ₁	X ₁ X ₂ X ₃ X ₄	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX
p ₂	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX
p ₃	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX	X ₆₉ X ₇₀ X ₇₁ X ₇₂

As determinações dos valores da deflexão, para cada combinação prevista, foram feitas de forma totalmente aleatória. A aleatorização foi concebida e realizada em dois blocos com igual número de ensaios porém com ordens diferentes de execução das leituras. Em cada

bloco procederam-se duas determinações para cada combinação. A matriz experimental com a ordem de execução dos ensaios para cada bloco foi a seguinte:

1º Bloco

Lonas	Pressão 1	Carga 1	Carga 3	Carga 2
Radial	Pressão 3	Carga 2	Carga 3	Carga 1
Radial	Pressão 2	Carga 3	Carga 1	Carga 2
Lonas	Pressão 3	Carga 2	Carga 1	Carga 3
Lonas	Pressão 2	Carga 3	Carga 2	Carga 1
Radial	Pressão 1	Carga 1	Carga 2	Carga 3

2º Bloco

Radial	Pressão 2	Carga 3	Carga 2	Carga 1
Lonas	Pressão 3	Carga 1	Carga 2	Carga 3
Lonas	Pressão 1	Carga 2	Carga 3	Carga 1
Radial	Pressão 3	Carga 3	Carga 1	Carga 2
Radial	Pressão 1	Carga 2	Carga 1	Carga 3
Lonas	Pressão 2	Carga 1	Carga 3	Carga 2

A determinação da pressão de contato derivou de impressões do rodado sobre folhas de cartolina (Fig. 5.3). Besuntou-se com graxa parte da banda de rodagem do rodado duplo, aplicando-se, após, um carregamento estático sobre a cartolina posicionada entre os pneus e o piso do pavimento. Desta forma, obteve-se nove figuras com as áreas de contato dos pneus para as combinações dos níveis de carga por eixo e pressão de inflação, utilizando-se somente pneus do tipo convencional.



FIGURA 5.2 - Determinação da Deflexão com a Viga Benkelman

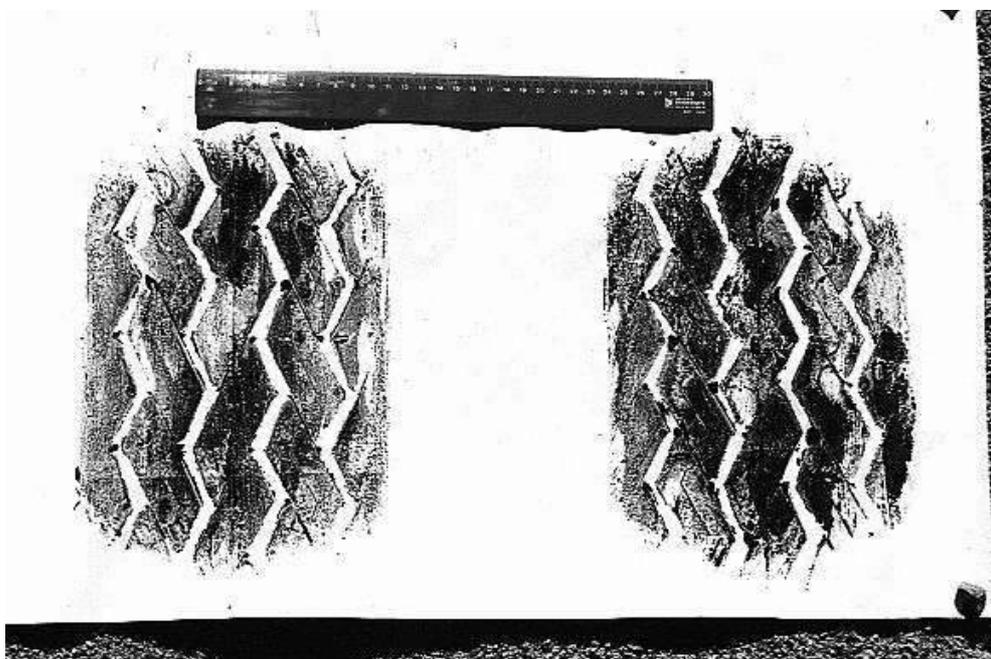


FIGURA 5.3 - Impressões da Área de Contato do Rodado com o Piso

5.2 Coleta de Dados e Resultados

O experimento programado foi executado durante os dias 16, 17 e 18 de setembro de 1997 na Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos no Campus do Vale da UFRGS.

No período não ocorreram chuvas e, a temperatura ambiente tomada no sol a 40 cm da superfície do pavimento, variou de acordo com os valores da Tabela 5.1:

TABELA 5.1 - Variação da Temperatura Ambiente Durante o Experimento

Data	Variação da Temperatura ° C
16/9/97	23,0 a 30,5
17/9/97	22,5 a 33,5
18/9/97	23,5 a 25,0

Durante os trabalhos foram procedidas verificações de possíveis alterações na pressão de enchimento dos pneus devido a elevação da temperatura ambiente. Constatou-se que não houve nenhuma modificação nos valores da pressão nos pneus.

Procurou-se manter a máxima rotina e uniformidade na realização dos procedimentos de determinação das deflexões. Por exemplo, nos limites previstos pelo Método de Ensaio DNER ME-24/94 (BRASIL. DNER,1994a), para permitir a completa acomodação e reacomodação elástica do pavimento, acionava-se o vibrador da viga Benkelman após transcorridos dois minutos de carregamento estático e, feito novo carregamento, somente depois de três minutos da última leitura.

As leituras das deflexões foram anotadas em uma planilha específica para coleta de dados, de acordo com o modelo utilizado, apresentado na Fig. 5.4.

Os dados, após análise de consistência, foram tabulados em uma planilha, especialmente projetada para o trabalho, conforme consta no Quadro 5.3.

Pesquisa Experimental

João Fortini Albano
PPGEP/UFRGS

Dados Gerais

Local: Área de Testes de Pavimentos, Campus do Vale - UFRGS	Data:	Var. da Temp.:
Clima: <input type="checkbox"/> sol <input type="checkbox"/> nublado <input type="checkbox"/> chuva	Pesquisadores: Cledir, Ivo, Newton e Carlo	

1º Bloco - Deflexões em 0,01 mm, Pressão em kPa(psi) e Carga por Semi-Eixo em kN

Pneu	Pressão	Carga/S. Eixo	L ₀	L _r	D ₀	L ₀	L _r	D ₀
Lonas	552(80)	41						
		60						
		50						
Radial	689(100)	50						
		60						
		41						
Radial	620(90)	60						
		41						
		50						
Lonas	689(100)	50						
		41						
		60						
Lonas	620(90)	60						
		50						
		41						
Radial	552(80)	41						
		50						
		60						

FIGURA 5.4 - Modelo de Planilha Adotado para Coleta de Dados

QUADRO 5.3 - Disposição de Dados com o Resultado das Leituras de Deflexões (0,01 mm)

	Tipo de Construção do Pneu					
	Radial			Lonas		
	Carga/Eixo (kN)			Carga/Eixo - (kN)		
Pressão	82	100	120	82	100	120
552 kPa (80 psi)	56	61	73	55	71	73
	53	66	76	56	69	76
	54	69	73	52	67	75
	54	68	72	54	70	77
620 kPa (90 psi)	58	68	77	53	72	82
	58	65	79	57	70	79
	54	64	76	56	73	76
	57	67	78	54	70	74
689 kPa (100 psi)	53	63	75	50	62	77
	56	64	76	54	65	80
	52	65	80	51	63	71
	56	64	76	51	62	76

A variação dos valores medidos da deflexão indicaram a necessidade de um estudo adicional sobre a pressão de contato. Por este motivo, em 2 de outubro de 1997, 14 dias após as determinações das deflexões, executou-se a impressão das marcas das áreas de contato dos pneus e o cálculo da pressão de contato.

Apresenta-se na Tab. 5.2, as áreas da banda de rodagem do rodado duplo, carimbadas sobre folhas de cartolina. Mediu-se a área de contato somente de pneus convencionais, para cada combinação dos níveis de carga e pressão de inflação estabelecidos no experimento. As áreas foram calculadas por associação da impressão a figuras geométricas conhecidas. Utilizou-se também papel milimetrado vegetal para auxílio na determinação das áreas nas extremidades menores da figura, com contornos curvilíneos.

Da mesma forma que SEBAALY (1992) e outros estudiosos do assunto, no presente trabalho subtraiu-se as superfícies dos sulcos da banda de rodagem do valor da área de contato. Portanto, a área medida é o valor líquido da interface pneu/pavimento.

Na Tab. 5.2 consta também a pressão de contato, calculada dividindo-se a carga atuante no sistema de rodagem pela área de contato, para cada nível de fator discriminado.

TABELA 5.2 - Área de Contato Medida e Pressão de Contato Calculada para o Tipo de Pneu Convencional

Carga kN/eixo	Pressão de Enchimento		Área de Contato cm ²	Pressão de contato		
	kPa	psi		kgf/cm ²	psi	kPa
120	689	100	857,15	6,999	99,749	687,3
100	689	100	814,35	6,139	87,499	602,8
82	689	100	767,75	5,340	76,098	524,3
120	620,1	90	852,45	7,038	100,299	691,1
100	620,1	90	801,70	6,236	88,873	612,3
82	620,1	90	764,75	5,361	76,397	526,4
120	551,2	80	936,05	6,409	91,341	629,3
100	551,2	80	864,85	5,781	82,384	567,6
82	551,2	80	801,50	5,115	72,894	502,2

5.3 Análise das Deflexões, Área e Pressão de Contato

5.3.1 Deflexões

Com base no resultado das medidas de deflexões apresentadas no Quadro 5.2, executou-se uma análise de variância para constatar a significância dos fatores e suas interações sobre a variável de resposta.

As seguintes hipóteses foram testadas:

Fator Pressão P:	H_0 efeito de P não existe, H_1 existe efeito significativo para algum valor de P,
Fator Tipo de Pneu T:	H_0 efeito de T não existe, H_1 existe efeito significativo para algum valor de T,
Fator Carga C:	H_0 efeito de C não existe, H_1 existe efeito significativo para algum valor de C,
Interação PT:	H_0 efeito da interação PT não existe, H_1 existe efeito significativo para algum valor combinado de P e T,
Interação PC:	H_0 efeito da interação PC não existe, H_1 existe efeito significativo para algum valor combinado de P e C,
Interação TC:	H_0 efeito da interação TC não existe, H_1 existe efeito significativo para algum valor combinado de T e C,
Interação PTC:	H_0 efeito da interação PTC não existe, H_1 existe efeito significativo para algum valor combinado de P, T e C.

Os cálculos estatísticos de soma dos quadrados, graus de liberdade e médias quadradas foram desenvolvidos para montagem da tabela ANOVA, através da qual determinou-se a significância dos fatores e suas interações, comparando-se o valor da estatística F calculada com o valor de F crítico ou tabelado (RIBEIRO, 1995).

A comparação de F calculado com F crítico indica se o efeito do fator ou interação é significativo, acolhendo-se a hipótese H_1 rejeitando-se, por consequência, H_0 . A Tab. 5.3

apresenta os valores de F calculados e críticos (tabelados), sua relação e a interpretação do autor sobre a significância de cada situação.

TABELA 5.3 - Teste F

Fatores e Interações	F calculado	F crítico	$F_{calc}/F_{crit.}$	Efeito
Pressão P	13,258	3,174	4,177	Significante
Tipo de Pneu T	0,889	4,024	0,221	Não é significativo
Carga / Eixo C	634,471	3,174	199,896	Muito significativo
Interação PT	3,935	3,174	1,240	Insignificante
Interação PC	4,291	2,554	1,680	Insignificante
Interação TC	5,320	3,174	1,676	Insignificante
Interação PTC	1,069	2,554	0,418	Não é significativo

A comparação entre os valores de F_{calc} permite a caracterização de como *muito significativa* o efeito da carga por eixo sobre a deflexão superficial diante dos outros fatores e interações. Os valores de F_{calc}/F_{crit} reforçam esta interpretação.

A Tab. 5.4 fornece a dimensão da menor variação da deflexão decorrente do aumento da pressão de inflação. Apresenta-se, respectivamente, a variação percentual quando a pressão de enchimento aumenta de 552 kPa (80 psi) para 620 kPa (90 psi) e para 689 kPa (100 psi), em cada nível de carga por eixo.

TABELA 5.4 - Efeito da Pressão de Inflação na Deflexão (0,01 mm)

Carga/Eixo (kN)	Pressão de Enchimento - kPa (psi)				
	552 (80)	620 (90)	Variação %	689 (100)	Variação %
82	54,25	55,88	+ 1,16	52,88	- 2,52
100	67,63	68,63	+ 1,48	63,50	- 6,11
120	74,38	77,63	+ 4,34	76,38	+ 2,69

Na maioria das situações, quanto maior é o nível de carga por eixo, mais pronunciado é o acréscimo na variação da deflexão para os níveis de pressão de inflação considerados.

Vários pesquisadores chegaram a conclusões semelhantes, particularmente SEBAALY e TABATABAEE (1989), do Pennsylvania Transportation Institute. Os citados autores, estudando os efeitos de pneus radiais e convencionais, rodado duplo e banda extralarga para diversos níveis de carga por eixo e pressão de enchimento, indicam que “a pressão de inflação tem efeito mínimo sobre a deflexão superficial para camadas asfálticas com espessuras de 5 e 20 cm”.

O presente estudo da variação da deflexão devido a pressão de inflação constata um aspecto intrigante qual seja o de que, para todos os níveis de carga por eixo, há um crescimento no valor da deflexão até 620 kPa (90 psi) e, após um decréscimo para o nível de 689 kPa (100 psi) da pressão de enchimento. O gráfico de dois fatores da Fig. 5.5 permite a visualização da variação da deflexão em função da pressão de enchimento dos pneus.

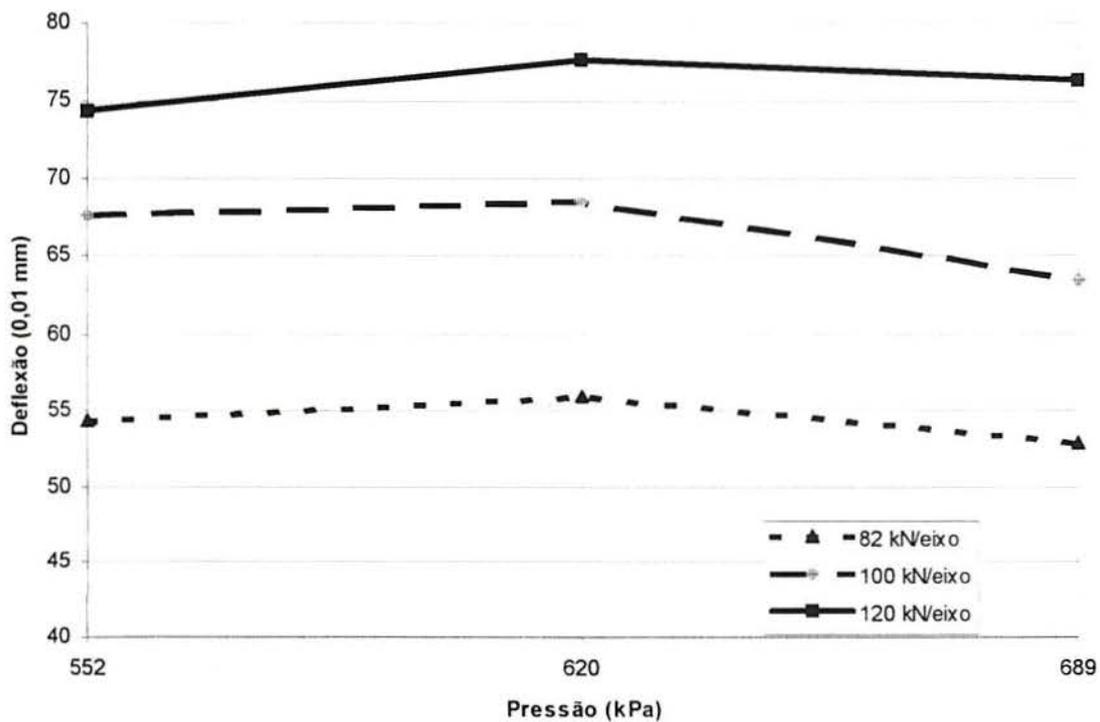


FIGURA 5.5 - Deflexão x Pressão de Enchimento

Pesquisas semelhantes desenvolvidas por BONAQUIST *et al.* (1989) no Turner-Fairbank Highway Research Center em McLean, Virginia, nas quais foram adotadas como respostas do pavimento a deflexão medida com um equipamento conhecido como Linear Variable Differential Transformer - LVDT e a deformação específica na fibra inferior da camada de CA, medida com "strain gauges", apresentaram curvas de variação da deflexão superficial similares, de acordo com a Fig. 5.6.

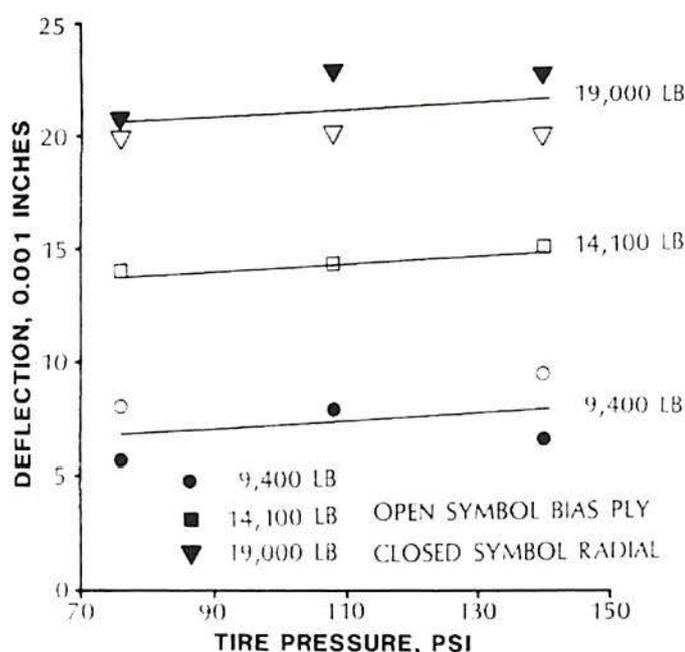


FIGURA 5.6 - Efeito da Pressão de Inflação Sobre a Deflexão Superficial

Fonte: BONAQUIST *et al.*, 1989

Uma abordagem mais aprofundada sobre esta questão será desenvolvida no Item 5.3.2, em conjunto com o estudo da pressão de contato.

A presente análise de variância demonstra que, sob o ponto de vista estatístico e para as condições do experimento, o *tipo de pneu* não influencia de forma significativa o valor da deflexão. BONAQUIST *et al.* (1989), na citada pesquisa, também concluem quanto a inexistência de efeitos significantes nas respostas do pavimento, provocados pelo tipo de pneu.

Outros autores como BELL *et al.* (1996) e FERNANDES JR. (1994), mesmo reconhecendo as diferentes distribuições de pressões de contato para cada tipo de pneu, ressaltam que os efeitos produzidos por pneus de lonas e radiais são semelhantes.

A relação determinada de $F_{\text{calc.}}/F_{\text{crit.}}$ para o fator *carga por eixo* é alta, condição que consagra a significância deste fator. Esta situação não acrescenta nenhum fato novo ao conhecimento existente. A nocividade dos excessos de carga por eixo, avaliada através da deflexão e demais respostas do pavimento, considerando-se a revisão do Cap. 2, é um lugar comum. A contribuição que o experimento apresenta, neste particular, é a ratificação da grande influência da carga por eixo e a dimensão relativa do efeito deste fator, face ao alto valor de $F_{\text{calc.}}$.

O conjunto de medidas da deflexão superficial permite observar que ao aumentar-se a carga de 82 kN/eixo para 120 kN/eixo, para um mesmo nível de pressão de inflação, a deflexão medida aumenta na ordem de 40%, conforme dados da Tabela 5.5:

TABELA 5.5 - Efeito da Carga/Eixo Sobre a Deflexão

Pressão	Deflexão (0,01 mm)		
	82 (kN)	120 (kN)	Aumento %
552 kPa (80 psi)	54,25	74,38	37,11
620 kPa (90 psi)	55,88	77,63	38,92
689 kPa (100 psi)	52,88	76,38	44,44

As Fig. 5.7 e 5.8 ilustram por vários ângulos os efeitos dos fatores pressão de inflação e carga por eixo sobre a variável de resposta deflexão superficial.

Resta destacar que a análise de variância indica ainda que as *interações* entre os fatores não afetam significativamente a variação da deformação superficial.

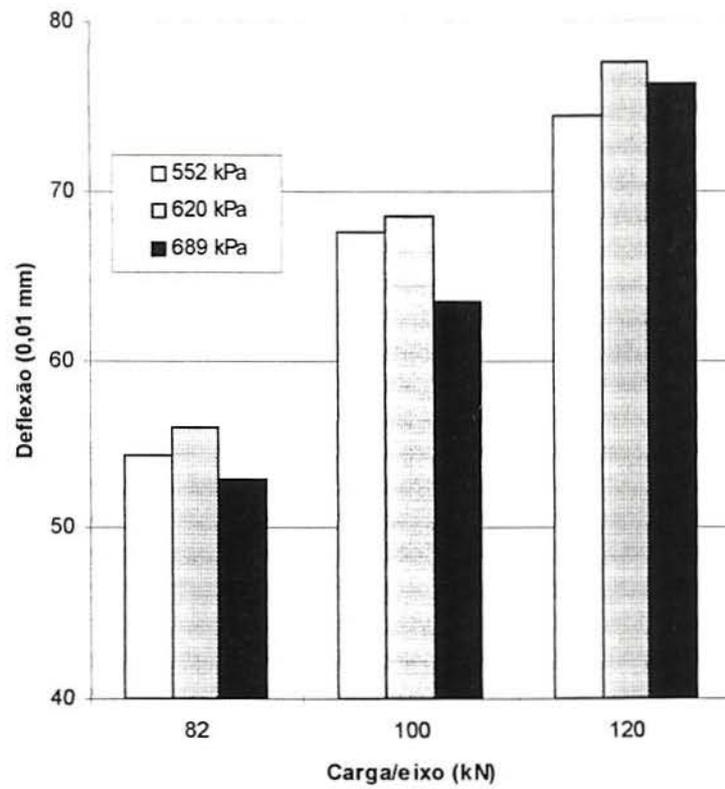


FIGURA 5.7 - Diagrama de Colunas: Deflexão x Carga/Eixo

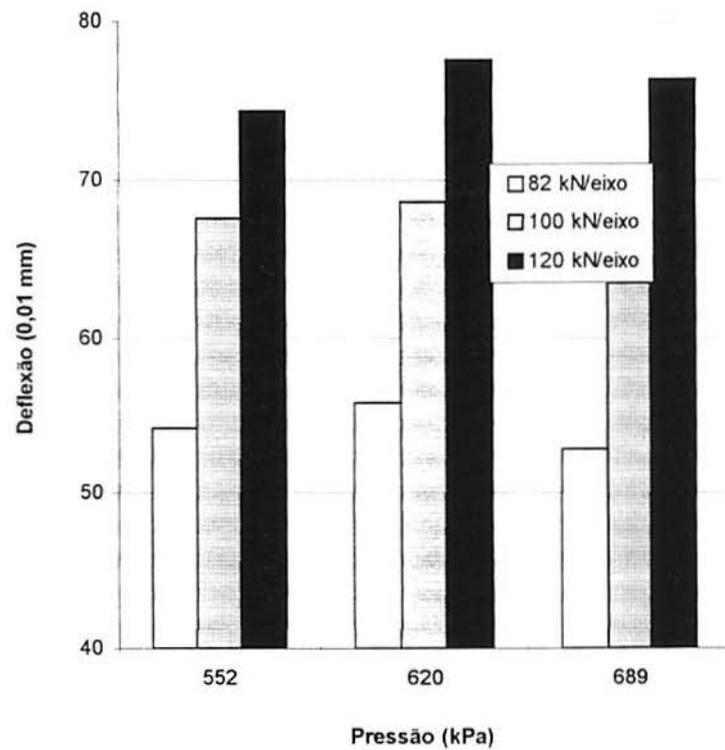


FIGURA 5.8 - Diagrama de Colunas: Deflexão x Pressão de Enchimento

5.3.2 Área e Pressão de Contato

Os valores da área de contato - A_c medidos na forma descrita na Seção 5.1, estão relacionados na Tab. 5.2. As áreas medidas correspondem à interface do pavimento da Pista 3 com o rodado duplo do simulador de tráfego utilizado.

Uma investigação nas formas impressas permite informar que quanto maior a carga por eixo e a pressão de inflação, a forma da figura impressa aproxima-se de um retângulo com cantos arredondados. Por outro lado, quanto menor a carga e a pressão, a forma configura-se como constituída por um retângulo central, delineado por curvas nas extremidades, lembrando uma elipse. Constatou-se também que as larguras das marcas dos pneus mantiveram-se praticamente constantes, variando apenas o comprimento a cada nova composição dos níveis dos fatores.

HUANG (1993), em estudo desenvolvido sobre fatores que intervêm no projeto de um pavimento, descreve que a forma geométrica da A_c mais próxima da realidade é um retângulo completado por dois semi-círculos nas extremidades menores. Sendo L o comprimento da figura e $0,6L$ sua largura, a A_c bruta será:

$$A_c = 0,5227 \cdot L^2 \quad (5.1)$$

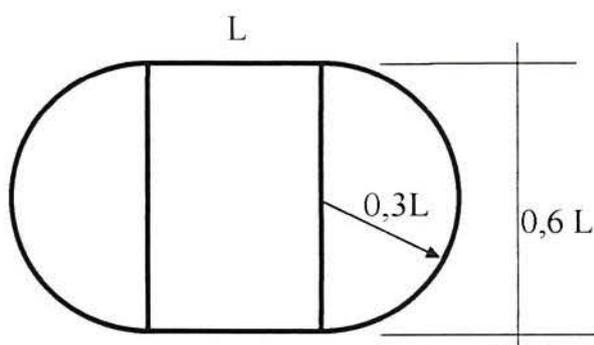


FIGURA 5.9 - Dimensões e Forma da Área de Contato
Fonte: HUANG, 1993

O citado autor informa que esta configuração foi utilizada entre 1966 e 1984 pela Portland Cement Association - PCA em projetos de pavimentos rígidos. Após 1984 a PCA

evoluiu para a adoção da forma de um retângulo com as dimensões de $0,8712L$ e largura de $0,6L$, mantendo a mesma área de $0,5227.L^2$.

Não se pode deixar de mencionar que os modelos clássicos de pavimentos flexíveis constituídos por um meio homogêneo, apresentados por Boussinesq ou por meios estratificados, formulado por Burmister, consideram as áreas de contato *circulares* e as pressões *uniformemente distribuídas*.

MEDINA (1997) relata que C. A. Queiroz, em sua dissertação apresentada à COPPE em 1972, mediu a área de contato de pneus 9.00×20 carregados com 80 kN/eixo , elevando o eixo traseiro de um caminhão com macacos. A A_c obtida para um rodado duplo foi de $814,0 \text{ cm}^2$, semelhante ao valor de $801,50 \text{ cm}^2$, medido no presente experimento para as condições similares de 82 kN/eixo e 552 kPa (80 psi) de pressão nos pneus.

Apresenta-se a seguir, uma comparação entre a A_c de cada impressão de pneu medida no experimento e a área de contato modelada como circular, correspondente à mesma combinação de níveis dos fatores (ver Seção 2.2.1), usual em vários procedimentos de dimensionamento de pavimentos, inclusive no Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis do DNER (BRASIL. DNER, 1979).

QUADRO 5.4 - Área de Contato x Área Circular

Carga/Eixo (kN)	Pressão de Inflação kPa (psi)	Ac medida p/rodado duplo (cm ²)	Área Contato de um pneu A_c (cm ²)	Área Circular de um pneu - A_{circ} (calculada) (cm ²)
120	689 (100)	857,15	428,58	427,35
100	689 (100)	814,35	407,18	356,13
82	689 (100)	767,75	383,88	292,02
120	620 (90)	852,45	426,23	474,68
100	620 (90)	801,70	400,85	395,57
82	620 (90)	764,75	382,38	324,37
120	552 (80)	936,05	468,03	534,76
100	552 (80)	864,85	432,43	445,63
82	552 (80)	801,50	400,75	365,42

Para uma perfeita visualização e entendimento desta relação, apresentam-se, a seguir, as Fig. 5.10, 5.11 e 5.12 com as curvas de variação de A_c e da área circular - A_{cir} para as pressões de enchimento utilizadas no experimento. A A_{cir} , em cada combinação dos níveis dos fatores, foi calculada dividindo-se a carga por roda pela pressão de inflação.

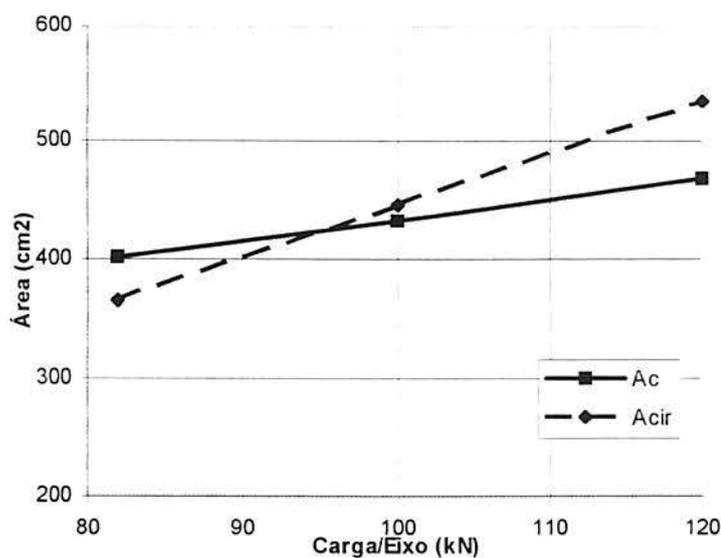


FIGURA 5.10 - Área de Contato x Área Circular para uma Pressão de Inflação de 552 kPa (80 psi)

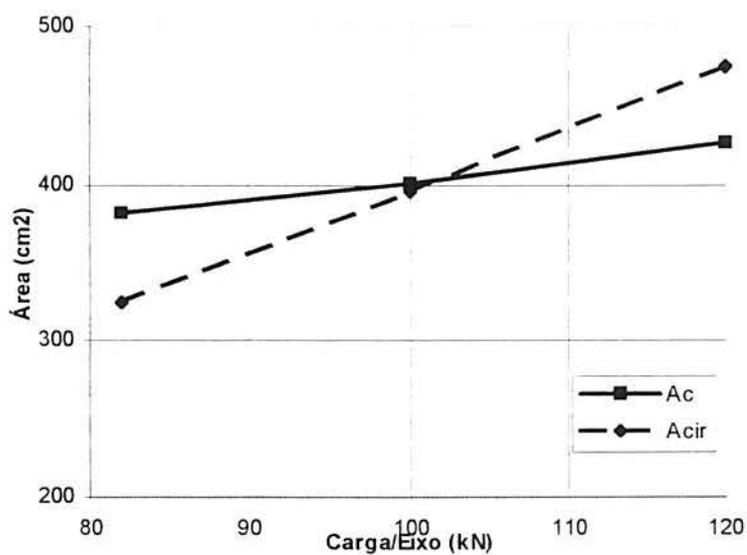


FIGURA 5.11 - Área de Contato x Área Circular para uma Pressão de Inflação de 620 kPa (90 psi)

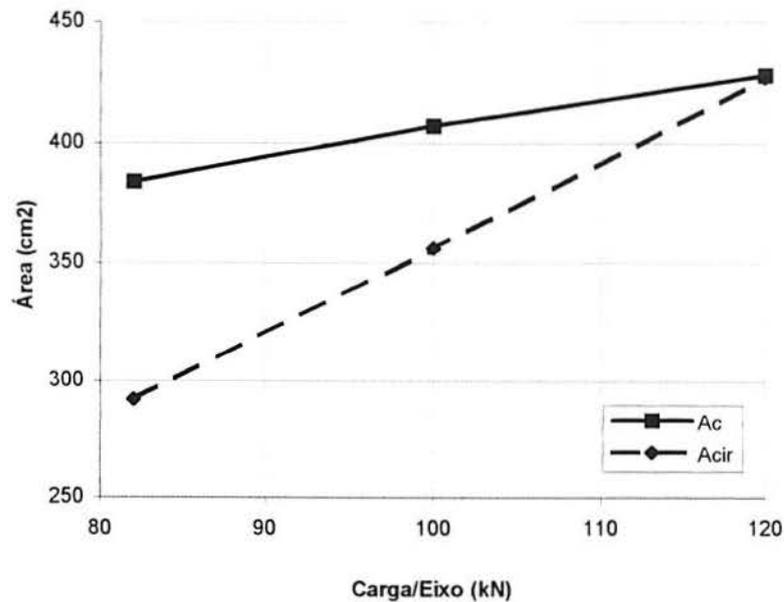


FIGURA 5.12 - Área de Contato x Área Circular para uma Pressão de Inflação de 689 kPa (100 psi)

Modelou-se, por regressão linear simples (ver Anexo B), a relação de A_c com $A_{c\text{irc}}$. Para um nível de confiança de 95%, obteve-se a seguinte equação, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,9057$:

$$A_c = 278,851 + 0,3376 A_{c\text{irc}} \quad (5.2)$$

Sendo A_c e $A_{c\text{irc}}$ expressas em cm^2 .

FERNANDES JR. (1994), refere em sua tese de doutorado, o trabalho desenvolvido por Hansen *et al.* na Universidade do Texas, no qual, determinou-se um modelo estatístico para a previsão da área de contato de pneus **convencionais e radiais** a partir da área circular correspondente. As A_c foram determinadas experimentalmente e as $A_{c\text{irc}}$ calculadas. O modelo obtido alcançou $R^2 = 0,94$ e tem a seguinte formulação:

$$A_c = 0,289 + 1,063(A_{c\text{irc}}) - 0,002(A_{c\text{irc}})^2 \quad (5.3)$$

Sendo A_c e $A_{c\text{irc}}$ expressas em polegadas quadradas (1 polegada quadrada = 6,4516 cm^2).

O modelo referido indica que para os valores usuais de carga por eixo e pressão de enchimento, as áreas de contato são menores que as áreas circulares consideradas. Nas determinações experimentais da presente dissertação, advindas somente de áreas de contato de pneus **convencionais**, observa-se que a A_c é maior que a A_{circ} até a interseção das curvas, de acordo com os gráficos apresentados, significando condições a favor da segurança. Respectivamente, acima das interseções correspondentes aos níveis de cargas por eixo de 95, 102 e 120 kN, para pressões de inflação de 552, 620 e 689 kPa (80, 90 e 100 psi), a A_c é menor do que a A_{circ} , correspondendo a pressões de contato maiores, maiores deflexões recuperáveis e uma conseqüente deterioração mais severa do pavimento.

A Tab. 5.2 também apresenta os valores da pressão de contato - P_c (em kPa e psi), calculados a partir das A_c , para as nove combinações de cargas por eixo e pressões de enchimento obtidas com pneus tipo convencional. Os valores de P_c podem ser melhor avaliados na matriz configurada na Tab. 5.6:

TABELA 5.6 - Valores da Pressão de Contato Calculados - kPa (psi)

Pressão de Enchimento	Carga/Eixo - kN			
	kPa (psi)	82	100	120
552 (80)		502,2 (72,9)	567,6 (82,4)	629,3 (91,3)
620 (90)		526,4 (76,4)	612,3 (88,9)	691,1 (100,3)
689 (100)		524,3 (76,1)	602,8 (87,5)	687,3 (99,7)

Na Fig. 5.13, pode-se visualizar a variação da pressão de contato em função da pressão de inflação, para cada nível de carga por eixo.

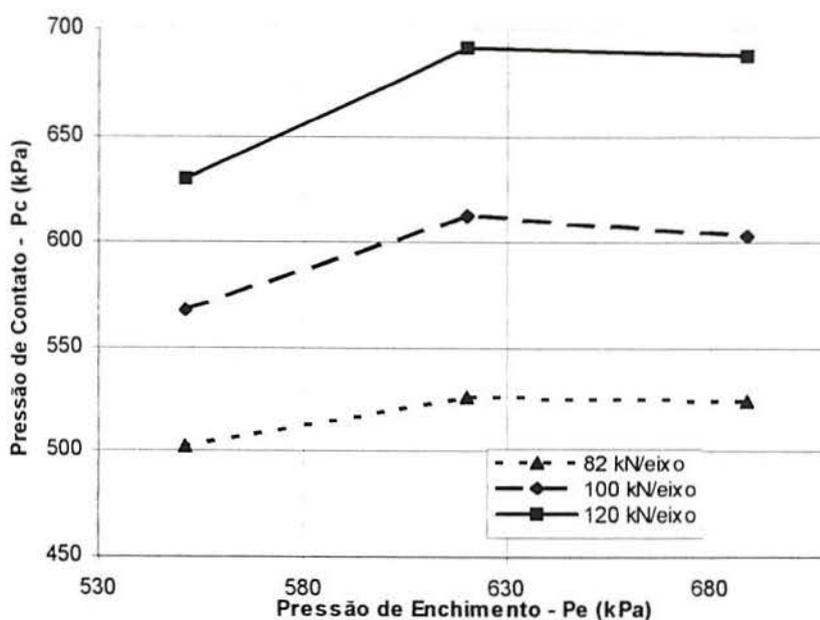


FIGURA 5.13 - Pressão de Contato x Pressão de Inflação

A Tab. 5.6 em conjunto com a Fig. 5.13 ensejam a observação da variação da Pc em função da pressão de enchimento - Pe. Nota-se que quando a Pe aumenta de 552 kPa (80 psi) para 620 kPa (90 psi) a Pc eleva-se, respectivamente, em 4,8; 7,9 e 9,9% para níveis de carga por eixo de 82, 100 e 120 kN. Ao aumentar a Pe de 620 kPa (90 psi) para 689 kPa (100 psi), há pequenos decréscimos de Pc de 0,4; 1,6 e 0,6%, respectivamente, para os mesmos níveis de carga por eixo considerados.

Esta singular constatação de pequenos decréscimos dos valores de Pc para Pe maiores do que 620 kPa (90psi), pode ser entendida pela condição de que Pe mais altas provocam o desenvolvimento de tensões de tração nos flancos dos pneus, aliviando as pressões de contato da banda de rodagem sobre o piso do pavimento (HUANG, 1993). MEDINA (1997), em seu recente livro Mecânica dos Pavimentos, também refere que para pressões de inflação altas (> 394 kPa ou 57 psi), a pressão de contato é inferior à pressão de enchimento devido à tração nas paredes dos pneus.

Ora, a deflexão é uma função direta da Pc e, ocorrendo um decréscimo desta, haverá, por consequência, um decréscimo na deformação superficial correspondente. Sendo assim,

parecem estar esclarecidos os motivos do decréscimo dos valores de deflexão, obtidos no experimento, no nível de P_e de 689 kPa (100 psi) para todos os níveis de carga por eixo - C_e , apontados anteriormente e visualizados na Fig. 5.5.

A Fig. 5.13 permite ainda uma análise isolada da variação da P_c em relação a P_e , para cada curva de C_e . A análise comparativa considera como referência a condição de $P_c = P_e$, adotada nos métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis vigentes, inclusive o do DNER (BRASIL, DNER, 1979). Pode-se sintetizar a interpretação da seguinte forma:

Carga/Eixo (kN)	Pressão de Enchimento	Comparação P_c com P_e	Comentários
82	552 kPa (80 psi)	$P_c < P_e$	Em todos os níveis de pressão $P_c < P_e$. A hipótese $P_c = P_e$ está a favor da segurança.
	620 kPa (90 psi)	$P_c < P_e$	
	689 kPa (100 psi)	$P_c < P_e$	
100	552 kPa (80 psi)	$P_c > P_e$	Para pressão de enchimento de 552 kPa (80 psi) subestima-se o efeito da P_e e da C_e . Os demais níveis estão a favor da segurança.
	620 kPa (90 psi)	$P_c < P_e$	
	689 kPa (100 psi)	$P_c < P_e$	
120	552 kPa (80 psi)	$P_c > P_e$	É a situação mais crítica. Nos níveis de P_e 552 kPa (80 psi) e 620 kPa (90 psi) subestimam-se os efeitos de P_e e C_e .
	620 kPa (90 psi)	$P_c > P_e$	
	689 kPa (100 psi)	$P_c \cong P_e$	

Ressalte-se que os comentários apresentados estão circunscritos às limitações do experimento, ou seja, válidos para o pavimento da Pista 3 da Área de Testes da UFRGS/DAER, pneus de lonas tamanho 9.00x20 nos níveis dos fatores combinados.

5.4 Conclusões

Para as condições e limitações do experimento descrito no presente capítulo, as principais conclusões são as seguintes:

- I. a análise de variância realizada indicou que o efeito da pressão de inflação é significativo sobre a deflexão superficial, utilizada como resposta do pavimento. Verificou-se que o efeito da pressão de enchimento é menor do que o provocado pelo fator carga por eixo, confirmado como o mais significativo na variação da deflexão recuperável. Ao aumentar-se a Carga por eixo de 82 kN para 120 kN, num mesmo nível de P_e , a deflexão cresce em média 40%;
- II. não se verificou significância sobre a deflexão recuperável provocada especificamente pelo tipo de pneu, radial ou convencional. Constatou-se também que as interações entre os fatores não interferem significativamente na variação da variável de resposta considerada;
- III. quando a $C_e > 95$ kN para $P_e = 552$ kPa (80 psi), $C_e > 102$ kN para $P_e = 620$ kPa (90 psi) e $C_e > 120$ kN para $P_e = 689$ kPa (100 psi), observou-se que a *área de contato* entre os pneus e a superfície do pavimento é *menor* do que a área circular correspondente, considerada nos métodos de dimensionamento e avaliação de pavimentos vigentes. Esta condição impõe possibilidades mais severas de deterioração dos pavimentos;
- IV. nas combinações testadas dos fatores C_e e P_e de 100 kN e 552 kPa (80 psi), 120 kN e 552 kPa (80 psi) e, 120 kN e 620 kPa (90 psi) constatou-se que a pressão de contato é *maior* do que a pressão de enchimento, contrariando a hipótese da mecânica dos pavimentos na qual $P_c = P_e$, subestimando-se, desta forma, os efeitos da carga por eixo e da pressão nos pneus;
- V. a comparação entre pressão de contato e pressão de inflação indica que ao aumentar-se a pressão de enchimento de 620 kPa (90 psi) para 689 kPa (100 psi) ocorrem decréscimos variáveis 0,4 a 1,6% na pressão de contato, nos níveis de carga por eixo considerados. Pode-se entender esta constatação admitindo-se que em níveis mais altos de pressões de inflação há o desenvolvimento de tensões de tração nas paredes verticais dos pneus, aliviando assim, a pressão de contato entre a banda de rodagem e a superfície do pavimento. Desta forma, menores pressões de contato explicam as menores deflexões recuperáveis medidas nos níveis de carga por eixo e pressão de inflação de 689 kPa (100 psi).

6 ESTUDO DO DESEMPENHO DO PAVIMENTO

No Cap. 6 procura-se responder à seguinte indagação: sendo a carga por eixo e a pressão de enchimento significantes na determinação da deflexão recuperável, quais as conseqüências mais importantes relativas ao comportamento do pavimento utilizado no experimento quando ocorrem combinações críticas de carga e pressão? Inicialmente, com base no critério da deformabilidade apresenta-se alguns modelos de desempenho que relacionam a deflexão recuperável com a duração do pavimento. Construiu-se um modelo de regressão que relaciona a máxima deflexão recuperável com a carga por eixo e a pressão de inflação. A partir dos dados do experimento pode-se verificar, via variação da deflexão recuperável, o efeito dos fatores sobre o valor da vida restante do pavimento. Em seqüência, define-se desempenho de um pavimento e apresenta-se o FEC como um de seus medidores. Em função de situações críticas de carregamento determina-se a variação dos FEC e a correspondente redução percentual da vida útil do pavimento segundo enfoques oriundos da mecânica dos pavimentos e do experimento da AASHO. As conclusões apontam uma parcela dos custos pagos pela sociedade devido aos excessos que são praticados.

6.1 A Deflexão Recuperável como Resposta Estrutural

Os principais procedimentos de análise normatizados pelo DNER levam em conta o *critério da deformabilidade*, o qual define as características estruturais de um pavimento exclusivamente através da interpretação dos valores individuais das deflexões recuperáveis máximas. A justificativa para aceitação desta hipótese, pelas metodologias em vigor, baseia-se na admissão de uma correlação quase perfeita entre a magnitude das deflexões e o surgimento de falhas no pavimento (GONTIJO *et al.*, 1994).

As normas vigentes, principalmente as DNER PRO 10/79 (BRASIL. DNER, 1994d) e DNER PRO 11/79 (BRASIL. DNER, 1994e), admitem que a evolução das deflexões em um

pavimento devidamente projetado e construído dá-se, devido a ação do tráfego e do intemperismo, em três fases distintas:

- a) *fase de consolidação* - após a construção, há um decréscimo desacelerado no valor da deflexão devido a consolidação dos materiais decorrente da ação do tráfego. No final desta fase a deflexão tende a uma estabilização,
- b) *fase elástica* - ao longo desta fase, a deflexão mantém-se aproximadamente constante, podendo ocorrer um moderado acréscimo. A duração da fase elástica define a vida útil do pavimento, sendo tanto maior quanto a deflexão suportada pelo pavimento for menor do que a deflexão admissível. Os levantamentos defletométricos executados de forma continuada por NÚÑEZ (1997) nas pistas experimentais da UFRGS/DAER, para diferentes valores de N , delinearam de forma nítida a fase elástica das pistas ensaiadas,
- c) *fase de fadiga* - está caracterizada por um crescimento acelerado no valor das deflexões do pavimento. Surgem os efeitos da fadiga representados por fissuras, trincas e deformações permanentes.

O DNER PRO 10/79 (BRASIL. DNER, 1994d) admite que, em pavimentos bem projetados e construídos, as deformações permanentes decorrem do acúmulo de deformações verticais específicas provocadas por tensões verticais no topo do subleito, suposto homogêneo.

O citado procedimento valoriza a consideração de que, para que não surjam trincas por fadiga no revestimento, é necessário manter a deflexão abaixo de um valor máximo - D_{adm} e o raio de curvatura - R da bacia de deflexão do pavimento acima de um certo valor mínimo. Estas condições garantem que a tensão de tração σ_t , causadora da deformação ϵ_t , na face inferior do revestimento, não ultrapasse um determinado valor, acima do qual a camada de CA romperá por fadiga.

Dado às limitações da deflexão, para o entendimento completo do comportamento estrutural e da distribuição de tensões e deformações no interior do pavimento, o raio de curvatura R surgiu como elemento complementar dos levantamentos defletométricos para indicar a capacidade de um pavimento em distribuir as tensões e cargas do tráfego (BRASIL. DNER PRO 10/79, 1994d).

O DNER PRO 11/79 (BRASIL. DNER, 1994e) define que, para pavimentos flexíveis com revestimento de concreto betuminoso sobre base granular, o valor da D_{adm} em 0,01 mm é dado pela expressão apresentada a seguir, correspondente a deflexões medidas com carga padrão de 82 kN por eixo:

$$\log D_{adm} = 3,01 - 0,176 \log N \quad (6.1)$$

Muitos autores, particularmente KIM *et al.* (1989) referidos no Item 2.1.1, indicam que o número de repetições N_f de uma carga necessária para produzir ruptura por fadiga é dada pela equação (2.1), reproduzida a seguir:

$$N_f = k \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_f} \right)^m$$

FERNANDES JR (1994), em sua tese de doutorado, relata que E. Zube e R. Forsyth propuseram em 1966 um modelo de desempenho empírico que fornece a vida de fadiga em função da deflexão superficial δ_1 (em 0,01 mm) e da espessura do revestimento asfáltico H_1 (em cm):

$$N = (19,33/\delta_1)^{5,96} \cdot (H_1)^{-3,28} \quad (6.2)$$

A mesma fonte informa que A. M. Pereira e D. R. M. Pereira, em 1989, adaptaram esse modelo às condições brasileiras no DNER PRO 10/79 (BRASIL. DNER, 1994d), mediante a correção da temperatura e do método de ensaio para determinação da deflexão superficial.

MEDINA *et al.*(1994) informam que há cerca de 30 anos os serviços de avaliação estrutural têm sido feitos com o auxílio da Viga Benkelman. Ultimamente, um equipamento de impacto, conhecido como Falling Weight Deflectometer - FWD, tem tido boa aceitação no meio rodoviário brasileiro. Os autores recomendam que cuidados devem ser tomados na generalização da correlação entre valores da Viga e do FWD pois há uma dependência da estrutura em análise. Sobre a mesma questão, DUARTE *et al.* (1996), apresentaram uma

correlação entre valores de deflexão recuperável medidos através dos dois processos e recomendam os valores apresentados na aplicação dos métodos de projeto de restauração de pavimento do DNER e no modelo HDM - Highway Design and Maintenance Standards Model, do Banco Mundial.

Com base no critério da deformabilidade e com os dados do experimento, obtidos de 72 determinações da deflexão recuperável para diferentes combinações de carga por eixo, pressão de inflação e tipo de pneu, construiu-se um modelo de regressão (memória de cálculo no Anexo B) para previsão da variação da deflexão, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,91$:

$$D_{ij} = 0,5689 C_e + 0,0373 P_e - 0,38.10^{-4} P_e^2 \quad (6.3)$$

Onde D_{ij} é a deflexão recuperável em 0,01 mm para uma carga por eixo i e uma pressão de inflação j ; C_e a carga por eixo em kN e P_e a pressão de enchimento dos pneus em kPa. O fator tipo de pneu não foi considerado por não apresentar efeito significativo sobre a variável de resposta.

As medidas das deflexões obtidas no experimento (Tabela 5.4), dentro das limitações inerentes, permitem apresentar valores médios da deflexão recuperável para situações típicas de carregamento.

TABELA 6.1 - Valor da Deflexão em Função de C_e e P_e

Condições de Carregamento	C_e - kN/eixo	P_e - kPa (psi)	D_{ij} - 0,01 mm
Eixo Padrão (<i>leve</i>)	82	552 (80)	54,25
Carga Máxima/eixo (<i>normal</i>)	100	620 (90)	68,63
Excesso (<i>alta</i>)	120	689 (100)	76,38

A instrução contida no item 6 do DNER-PRO 11/79 (BRASIL. DNER, 1994e) viabiliza o cálculo de N_r - número de solicitações correspondentes às cargas por eixo a serem suportadas pelo pavimento desde a data da avaliação até o final do período de vida restante. O N_r pode ser calculado desde que a deflexão de projeto D_p seja menor do que D_{adm} e $R \geq 100$

m, condições existentes na Pista 3, ensaiada no início da fase elástica, onde foram colhidos os dados do experimento.

Sendo N_s o número de solicitações correspondentes às cargas por eixo suportadas pelo pavimento desde o início das operações até a data da avaliação, avaliado em 10^3 , pode-se determinar o N_r com base no valor de N_t que é o número de solicitações correspondentes a deflexão característica de projeto - D_p :

$$N_r = N_t - N_s \quad (6.4)$$

Calcula-se D_p a partir dos D_{ij} da Tabela 6.1 para cada situação típica de carga por eixo e pressão de inflação, corrigindo-se estes pelo fator 1,2 assumido como correção sazonal prevista no DNER PRO 11/79 (BRASIL. DNER, 1994e), adequada para a época em que foram executadas as determinações. Assim, pode-se calcular N_t com auxílio da fórmula $\log D_p = 3,01 - 0,176 \log N_t$, advinda de (6.1).

TABELA 6.2 - Número de Solicitações até o Final da Vida Restante

Condições de Carregamento	$D_p - 0,01$ mm	N_r
Eixo Padrão (<i>leve</i>)	65,1	$6,28 \cdot 10^6$
Carga Máxima/eixo (<i>normal</i>)	82,4	$1,65 \cdot 10^6$
Excesso (<i>alta</i>)	91,7	$8,96 \cdot 10^5$

No caso da Pista 3 e das demais Pistas da Área de Testes da UFRGS/DAER, não existem curvas de variação do número N acumulado em função do tempo de exposição do pavimento ao tráfego pois um dos objetivos da pesquisa em andamento na época era a elaboração de um método de dimensionamento para viabilidade de uso de BD. Por este motivo não se pode determinar o tempo de vida restante do pavimento em dias ou anos porém o valor N_r , associado ao uso restante do pavimento pode dar uma boa noção da duração futura do pavimento testado. A Fig. 6.1 fornece uma visualização desta variação.

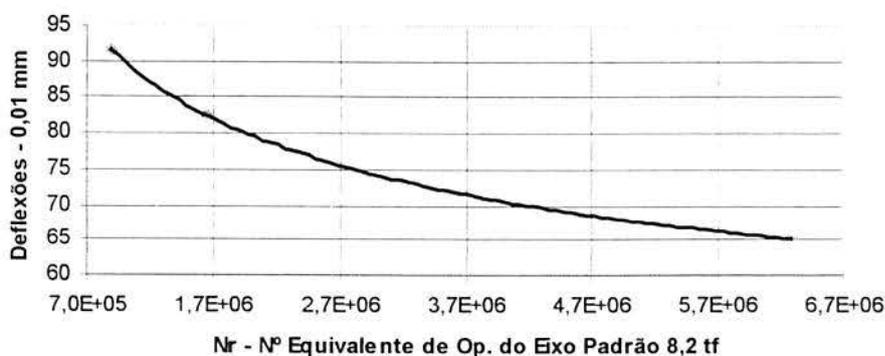


FIGURA 6.1 - Nr Até o Final de Vida Restante do Pavimento

Desta forma, variando-se a carga por eixo e a pressão dos pneus de condições leves para uma situação de excesso (ver Tab. 6.2), muito comum nas rodovias brasileiras, a deflexão D_p aumenta cerca de 40% e o **Nr** - número de solicitações equivalentes ao eixo padrão de 82 kN, correspondente ao uso da Pista 3 até o final de vida restante, sofre uma significativa redução de 85%.

6.2 Desempenho do Pavimento

6.2.1 *Serventia e Fator de Equivalência de Cargas*

O conceito de desempenho de um pavimento está ancorado na possibilidade de atendimento das demandas do tráfego em condições de conforto, segurança e economia. Este contexto é designado por *serventia*. Portanto, a *medida da serventia*, ao longo do tempo é a quantificação do desempenho de um pavimento. A medida da serventia pode ser expressa através do *Índice de Serventia Atual* que mede numericamente a habilidade de uma extensão de pavimento em servir a um tráfego misto de alta velocidade e elevado volume, desenvolvido a partir de correlações entre avaliações subjetivas e medidas características da superfície de rolamento. Segundo FERNANDES JR. (1994), esta base conceitual é derivada dos relatórios do AASHO Road Test. Atualmente o desempenho dos pavimentos tem sido avaliado por uma visão conjunta de dois enfoques:

- a) *características funcionais* que referem-se especificamente sobre as condições de degradação superficial e deformações em perfil, medidas, por exemplo, pelo Índice de Serventia Atual, retro referido. No Brasil, são utilizados os métodos DNER PRO 07/94 - Avaliação Subjetiva da Superfície do Pavimento (BRASIL. DNER, 1994b), DNER PRO 08/78 - Avaliação Objetiva da Superfície de Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos (BRASIL. DNER, 1994c) e também, segundo GONTIJO *et al.* (1994) pela DNER ES 128-83 - Levantamento da Condição de Superfície de Segmentos Testemunha de Rodovias de Pavimentos Flexíveis ou Semi-Rígidos para Gerência de Pavimentos a Nível de Rede e,
- b) *características estruturais* que dependem da maneira como o pavimento responde aos esforços impostos pela ação do tráfego. A avaliação mecânica de um pavimento requer, necessariamente, o conhecimento de praticamente todas variáveis intervenientes (cargas por eixo, respostas estruturais, espessuras, materiais etc.).

O Fator de Equivalência de Cargas tem sido largamente utilizado como medida de desempenho de pavimentos porque, comparativamente, mede os efeitos que os excessos de carga por eixo provocam nos pavimentos flexíveis. No Item 2.1.3 do presente trabalho apresentou-se uma visão sintética do conceito de FEC decorrente do experimento da AASHO (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1990).

PEREIRA (1985) explica que o número genérico N_i de solicitações de uma carga de eixo W_i é equivalente a um número N_p de solicitações de outra carga de eixo W_p tomada como referência, quando as N_i solicitações da carga W_i provocam a mesma deterioração que as N_p solicitações da carga W_p , sobre a mesma estrutura de um pavimento. Desta forma, a relação:

$$FEC = \frac{N_p}{N_i} \quad (6.5)$$

representa o *fator de equivalência* da carga W_i , referido a carga de eixo W_p , assumida como padrão.

O citado autor ressalta que os números de solicitações comparadas acarretam a mesma deterioração ou falha na estrutura, sendo que, em cada caso, o conceito de falha está implícito na equação de dimensionamento adotada. Demonstra ainda que, para certas equações de

dimensionamento como é o caso da utilizada na Califórnia, a razão N_p/N_i é invariável e independente das características do pavimento e do subleito, definindo-se FEC como:

$$FEC = \frac{N_p}{N_i} = \left(\frac{W_i}{W_p} \right)^{m/n} \quad (6.6)$$

onde m e n são constantes. Por outro lado, FEC obtidos de outras equações de dimensionamento tais como a equação geral de comportamento das pistas da AASHO e a do CE, são influenciados pela estrutura do pavimento, no caso da primeira, e pela estrutura do pavimento e o suporte do subleito no segundo caso. Os fatores de equivalência derivados dos procedimentos citados têm sido utilizados em métodos oficiais adotados no Brasil pelo DNER:

- Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis do DNER, versão de 1966 com FEC do U.S. Corps of Engineers;
- Método DNER PRO 159/85 com FEC baseados na equação geral de comportamento da AASHO e,
- Método DNER PRO 10/79 com FEC californianos.

O eixo padrão arbitrado, geralmente aceito, é o eixo simples equipado com rodado duplo com a carga de 8.165 kgf (18.000 lb), normalmente arredondada para 82 kN no Sistema Internacional. A pressão de inflação dos pneus do eixo padrão considerada por PEREIRA (1985) foi de 531 kPa (77 psi). A exemplo de vários autores norte americanos, tais como KIM *et al.* (1989), considerou-se na presente dissertação, a pressão padrão de enchimento dos pneus de 552 kPa (80 psi).

Com a evolução das ferramentas da informática, tem se tornado mais usual, nos meios rodoviários brasileiros, o emprego de métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis baseados na análise de tensões, deformações e deslocamentos originados da evolução da Mecânica dos Pavimentos. Estes métodos requerem a utilização de FEC mecanísticos, derivados de equações que expressam o número de solicitações de carga por eixo necessárias para produzir falha no pavimento. Geralmente a equação básica é uma função potencial do

inverso da resposta elástica da estrutura associada ao critério de falha considerado (PEREIRA, 1992). De uma maneira geral, o modelo apresentado a seguir representa esta visão:

$$N_{falha} = a \cdot \left(\frac{1}{r_m} \right)^b \quad (6.7)$$

onde N_{falha} é o número de solicitações de uma carga de eixo necessária para provocar ocorrência de falha na estrutura do pavimento, r_m é a resposta mecânica da estrutura à ação da carga por eixo e a e b são coeficientes determinados através de ensaios de laboratório ou de levantamentos de dados experimentais em pavimentos.

Com base na conhecida lei de MINER (1945) e nas fórmulas (6.5) e (6.7), PEREIRA (1992) apresenta a seguinte expressão para o fator de equivalência de cargas:

$$FEC = \left[\frac{(r_m)_i}{(r_m)_p} \right]^b \quad (6.8)$$

que é o fator de equivalência mecânico de uma carga de eixo genérica i em relação à carga de eixo padrão p , definido por uma potência da razão entre as respostas mecânicas da estrutura do pavimento às referidas cargas de eixo.

Os FEC mecânicos aplicáveis a pavimentos flexíveis baseiam-se em vários critérios vinculados à resposta estrutural considerada. Os mais usuais são os que adotam:

- critério da máxima deformação específica horizontal de tração na fibra inferior do revestimento de CA,
- critério da máxima deformação específica vertical de compressão no topo do subleito e,
- critério da máxima deflexão recuperável na superfície do pavimento.

Os FEC apresentados e utilizados neste trabalho consideram unicamente o critério da máxima deflexão recuperável, em função dos recursos e equipamentos disponíveis na Área de Testes da UFRGS/DAER na época do experimento. Desde o início de 1998, nas pistas experimentais estão sendo testados sensores de deformação, do tipo “*strain gauges*”, que viabilizarão, rapidamente, o desenvolvimento de pesquisas com outras respostas estruturais.

Em sua dissertação de mestrado, PEREIRA (1992) apresenta uma abordagem ampla sobre fatores de equivalência empíricos e mecânicos e informa que a hipótese de ocorrência de linearidade entre cargas atuantes e deflexão recuperável correspondente foi comprovada na maioria das seções de pavimentos flexíveis estudadas pela CDH - California Division of Highways (atual CALTRANS). A constatação de uma sensível proporcionalidade entre carga de eixo e deflexão recuperável também foi verificada pelo citado autor. Refere ainda, considerando a deflexão recuperável como resposta estrutural e a proporcionalidade entre cargas e deflexões para eixos simples com rodado duplo, que o FEC pode ser expresso como:

$$\text{FEC} = \left(\frac{W_i}{W_p} \right)^{5,959} = \left(\frac{D_i}{D_p} \right)^{5,959} \quad (6.9)$$

sendo D_i a deflexão recuperável devido a ação de uma carga genérica W_i e D_p a deflexão recuperável provocada por uma carga padrão W_p , de 82 kN.

SCHMIDT e CERATTI (1987), com base na proposição da linearidade entre cargas por eixo e deflexões recuperáveis correspondentes e com apoio em indicações intrínsecas aos procedimentos PRO-10 e PRO-11 do DNER, sugerem a adoção de expoentes próximos a 6. Os autores reconhecem que o assunto é controvertido pois muitas entidades conceituadas preconizam valores em torno de 4,2. Os expoentes sugeridos são intermediários entre os da AASHTO e os do CE, estando mais próximos destes. Alguns insucessos verificados após 1984, quando o DNER substituiu o emprego dos fatores do CE pelos da AASHTO no projeto de reforço, estimularam esta recomendação, mais cautelosa e conservadora.

Assim, diante dos estudos de SCHMIDT e CERATTI (1987), confirmados por PEREIRA (1992), resolveu-se desenvolver a abordagem dos FEC a partir da formulação mecânica de D. Pereira, ampliada para o estudo em pauta que pretende verificar o desempenho de pavimentos em função da variação conjunta da carga por eixo - C_e e da pressão de inflação - P_e . Propõe-se, então, a seguinte expressão para o FEC:

$$FEC = \left(\frac{D_{ij}}{D_{pp}} \right)^{5.959} \quad (6.10)$$

onde:

D_{ij} é a deflexão máxima recuperável provocada por uma carga de eixo (Ce)_i e uma pressão de inflação (Pe)_j e,

D_{pp} é a deflexão máxima recuperável provocada por uma carga padrão de 82 kN e uma pressão de inflação padrão de 522 kPa (80 psi).

6.2.2 Medida do Desempenho do Pavimento

Inicialmente, com os dados obtidos no experimento procedeu-se à verificação da proporcionalidade entre cargas por eixo e deflexões recuperáveis correspondentes, considerada por vários autores antes referidos, para eixos simples com rodados duplos.

Dividiu-se a carga por eixo (kN) por cada uma das 72 medidas de deflexões recuperáveis (0,01 mm) decorrentes. Obteve-se uma média de 1,53 com desvio padrão de 0,073, considerado baixo apesar da variação na pressão de inflação dos pneus. Segmentando-se a amostra total para valores individualizados de carga por eixo, os resultados por grupo também foram uniformes, conforme Tab. 6.3 e Fig. 6.2.

TABELA 6.3 - Proporcionalidade entre Carga/Eixo e Deflexão

	Ce/Dij			
	82kN	100kN	120kN	Toda Amostra
Média	1,51	1,51	1,58	1,53
Desvio Padrão	0,06	0,08	0,06	0,073
Tamanho Amostra	24	24	24	72
Menor Valor	1,41	1,37	1,46	1,37
Maior Valor	1,64	1,64	1,69	1,69

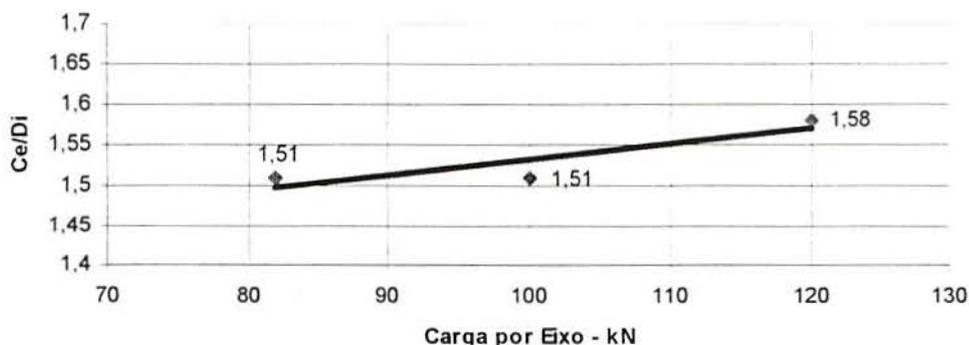


FIGURA 6.2 - Proporcionalidade entre Carga/Eixo e Deflexão

Todas as medições de deflexão recuperável D_{ij} , obtidas no experimento, foram divididas por $D_{pp} = 54,25$ que é a média das deflexões em 0,01 mm decorrentes da combinação dos níveis-padrão dos fatores: carga por eixo de 82 kN e pressão de inflação de 552 kPa (80 psi). O quociente foi elevado à potência de 5,959 (fórmula 6.9) proposta por PEREIRA (1992), obtendo-se, em decorrência, FEC empírico-mecanísticos correspondentes a todas 72 determinações do experimento.

Desconsiderado o fator tipo de pneu, por não apresentar significância sobre a variável de resposta, organizou-se uma matriz com os valores médios de FEC para cada combinação dos níveis de C_e com P_e , de acordo com a Tab. 6.3. Em seqüência, organizou-se também um gráfico de dois fatores (Fig. 6.3) para melhor visualização e interpretação da variação dos FEC em função da carga por eixo e da pressão de inflação:

TABELA 6.4 - FEC Empírico-Mecanísticos Calculados

carga/Eixo kN	Pressão de Inflação - kPa		
	552	620	689
82	1,00	1,21	0,88
100	3,81	4,17	2,57
120	6,61	8,57	7,82

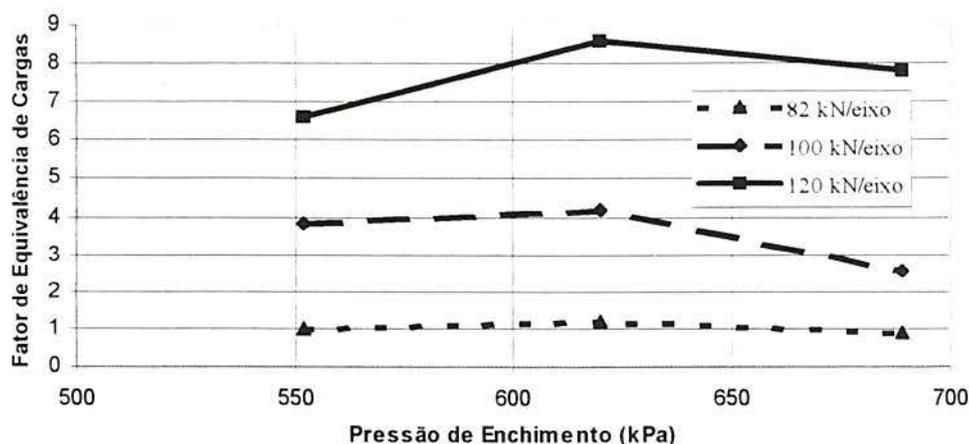


FIGURA 6.3 - Variação dos FEC Empírico-Mecanísticos

O comportamento dos FEC em função dos níveis dos fatores está coerente com os resultados dos estudos anteriores sobre deflexão recuperável (Fig. 5.5 e 5.7) e pressão de contato (Tab. 5.6 e Fig. 5.13).

A análise da variação dos FEC calculados confirma a C_e como sendo a maior causa da deterioração de pavimentos. Indica também a contribuição da P_e de pneus nos danos em pavimentos. Constatou-se, para todos níveis de C_e , valores de FEC máximos próximos a P_e de 620 kPa (90 psi), decrescendo para valores maiores de P_e . Estas reduções na deflexão, pressão de contato e FEC, para valores mais elevados da P_e podem ser interpretadas, conforme abordagem anterior (Cap. 5), como uma dissipação da pressão de contato, pois parte da pressão interna dos pneus atua nos esforços de tração nos flancos dos pneus.

Buscando uma possibilidade de comparação com a variação dos FEC empírico-mecanísticos, calculou-se outro conjunto de valores de FEC utilizando a relação $\left(\frac{D_{ij}}{D_{pp}}\right)$ elevada ao expoente médio de 4,298, calculado de dados apresentados por PEREIRA (1992), oriundos do experimento da AASHO para cargas por eixo de 80 a 120 kN, Índice de Serventia $IS = 2,0$ e Número Estrutural NE entre 2,0 e 3,0, mais indicados para as condições das rodovias brasileiras, segundo o citado autor.

Desta forma, obteve-se novos FEC médios expressos na Tab. 6.4, cuja variação em função dos níveis dos fatores Ce e Pe pode ser observada na Fig. 6.4.

TABELA 6.5 - FEC Calculados segundo a AASHO

carga/Eixo kN	Pressão de Inflação - kPa		
	552	620	689
82	1,00	1,14	0,90
100	2,61	2,78	1,97
120	3,89	4,69	4,38

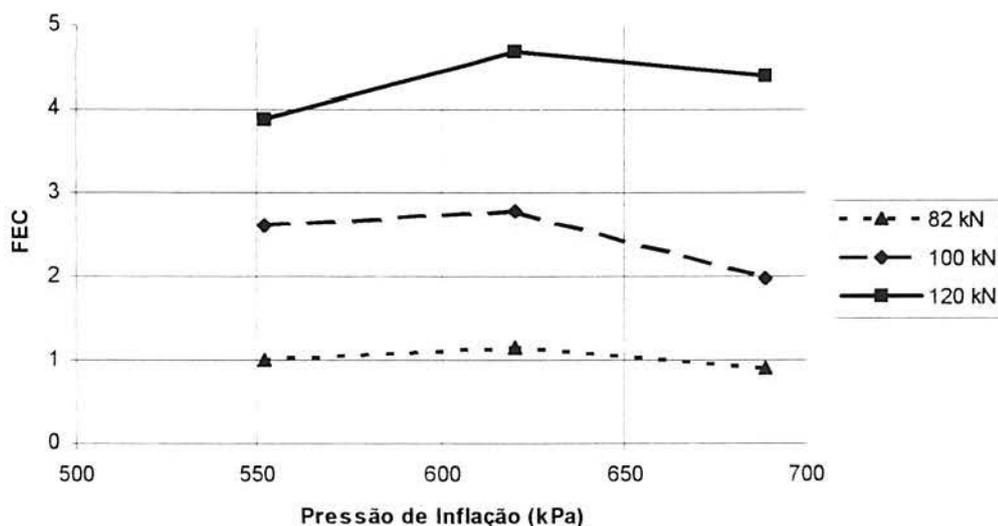


FIGURA 6.4 - Variação dos FEC Calculados segundo a AASHO

Os elementos disponíveis indicam que para as duas abordagens apresentadas a maior nocividade ao pavimento ocorre no nível de $P_e = 620$ kPa (90 psi) para todos os níveis de carga por eixo. A seguir, pode-se visualizar a redução da vida útil de acordo os elementos constantes nas Tab. 6.5 e 6.6, para a condição da pressão crítica de 620 kPa (90 psi).

TABELA 6.6 - Condição Crítica do Pavimento Considerando FEC Empírico-Mecanísticos

Carga por Eixo (kN)	FEC para Pe de 620 kPa (90 psi)	Aumento % do FEC	Vida útil reduz para: (% da prevista)
82	1,21	21,1	83
100	4,17	317,2	24
120	8,57	756,7	12

TABELA 6.7 - Condição Crítica do Pavimento considerando FEC derivados da AASHO

Carga por Eixo (kN)	FEC para Pe de 620 kPa (90 psi)	Aumento % do FEC	Vida útil reduz para: (% da prevista)
82	1,14	14,0	88
100	2,78	178,0	36
120	4,69	369,0	21

Na situação mais desfavorável (Tab. 6.5), para uma combinação dos níveis $C_e = 120$ kN e $P_e = 620$ kPa (90 psi), pode-se concluir que a vida útil do pavimento ensaiado, suposta como de 10 anos terá uma duração de apenas 1,2 anos, sendo a antecipação da restauração do pavimento em 8,8 anos, um dos custos pago pela sociedade, devido a estes excessos. Por exemplo, tratando-se de um trecho rodoviário de 1ª classe com 20 km de extensão, o custo do primeiro recapeamento com 5 cm de CA será da ordem de *RS 700.000,00* (setecentos mil reais)*.

Seguindo o mesmo critério da Seção 6.1, segundo o qual relacionou-se deflexão recuperável com vida do pavimento, apresenta-se nas Tab. 6.7 e 6.8 e nas Fig. 6.5 e 6.6 o desempenho do pavimento com base na evolução dos FEC e na redução da vida útil.

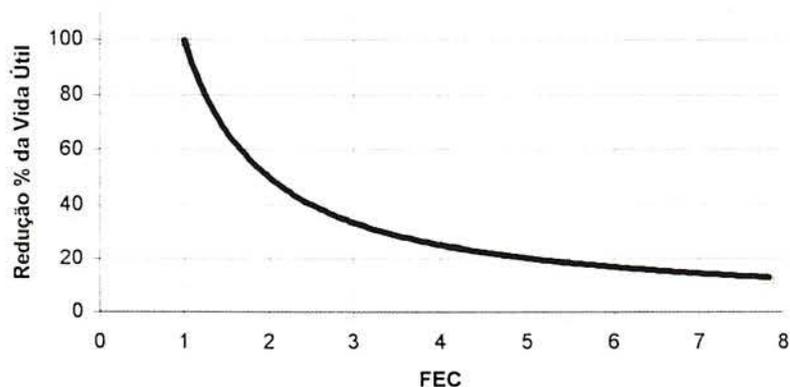
* Comunicação pessoal fornecida pela engª Margarete V. D. L. da Fonseca, Dirigente da Equipe de Economia Rodoviária da Superintendência de Programação do DAER/RS.

TABELA 6.8 - Evolução dos FEC (empírico-mecanísticos) e Redução da Vida Útil

Condições de Carregamento (kN/Eixo)	Pressão de Enchimento kPa (psi)	FEC	Vida útil reduz para: (% da prevista)
Padrão 82 kN (<i>leve</i>)	552 (80)	1,00	100
Máxima 100 kN (<i>normal</i>)	620 (90)	4,17	24
Excesso 120 kN (<i>alta</i>)	689 (100)	7,82	13

TABELA 6.9 - Evolução dos FEC (derivados da AASHO) e Redução da Vida Útil

Condições de Carregamento (kN/Eixo)	Pressão de Enchimento kPa (psi)	FEC	Vida útil reduz para: (% da prevista)
Padrão 82 kN (<i>leve</i>)	552 (80)	1,00	100
Máxima 100 kN (<i>normal</i>)	620 (90)	2,78	36
Excesso 120 kN (<i>alta</i>)	689 (100)	4,38	23

**FIGURA 6.5** - FEC Empírico-Mecanísticos x Redução % da Vida Útil

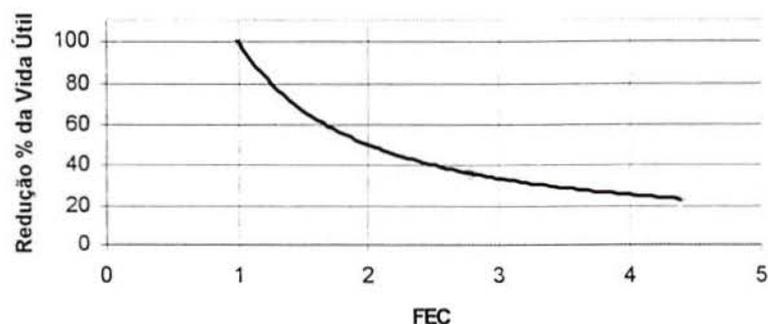


FIGURA 6.6 - FEC (derivados da AASHO) x Redução % da Vida Útil

6.3 Conclusões

- I. no âmbito de seus limites, os dados oriundos do experimento que relacionam deflexão recuperável com carga por eixo e pressão de enchimento, viabilizam, para situações típicas de carregamento, a determinação da variação do número de solicitações do eixo padrão até o final da vida restante do pavimento ensaiado. Os elementos disponíveis permitem concluir que ao aumentar-se o carregamento de condições normais $C_e = 82 \text{ kN}$ e $P_e = 552 \text{ kPa}$ (80 psi) para uma situação de excesso $C_e = 120 \text{ kN}$ e $P_e = 689 \text{ kPa}$ (100 psi), a deflexão recuperável aumenta cerca de 40% e o número de solicitações do eixo padrão correspondente à duração do pavimento, sofre uma sensível redução de 85%;
- II. Apresenta-se em (6.3) um modelo de regressão múltipla, decorrente dos dados do experimento, que relaciona a máxima deflexão recuperável com as variáveis independentes carga por eixo e pressão de inflação;
- III. os resultados do experimento também indicam uma boa proporcionalidade linear entre carga por eixo e deflexão recuperável correspondente;
- IV. o desempenho do pavimento ensaiado foi avaliado através da variação dos valores dos FEC, com base no critério da máxima deflexão recuperável na superfície. Os FEC calculados reforçam as conclusões apresentadas no Cap. 5 a respeito da variação da deflexão e da pressão de contato;
- V. confirmou-se, via análise da variação da máxima deflexão recuperável e dos FEC, que a carga por eixo representa o fator mais importante na deterioração do pavimento. A análise possibilita também a avaliação da influência da pressão de enchimento no desempenho do

pavimento testado. Para uma carga por eixo de 82 kN, quando a pressão de inflação varia de 552 kPa (80 psi) para 620 kPa (90 psi), a vida útil do pavimento pode sofrer uma redução de até 17 %. Pressões de inflação maiores do que 620 kPa (90 psi), dentro de certos limites, provocam redução nos FEC face a menores pressões de contato que são desenvolvidas;

- VI. Utilizando-se FEC calculados com dados do experimento e enfoques empírico-mecanístico e da AASHO, conclui-se que a avaliação com FEC decorrentes de método da AASHO indica maior longevidade para o pavimento analisado. A condição mais crítica de carregamento, dentre todas verificadas, é a combinação de $C_e = 120$ kN e $P_e = 620$ kPa (90 psi) com FEC empírico-mecanísticos. Neste patamar $FEC = 8,57$, aumentando cerca de 750% em relação ao tomado como padrão. Nestas condições a vida útil do pavimento ensaiado diminui 88%, repercutindo em cerca de R\$ 700.000,00 que deverão ser gastos em um recapeamento prematuro para um trecho com 20 km de extensão.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O presente Capítulo constitui o encerramento da análise experimental proposta na dissertação iniciada com o objetivo básico de estudar as influências simultâneas de carga por eixo, pressão de inflação e tipo de pneu sobre pavimentos. O tema abordado é relativamente recente, com maior divulgação nos periódicos internacionais a partir de meados da década de 80. No Brasil, as pesquisas mais abrangentes datam do final da década de 80, com trabalhos desenvolvidos, principalmente, na Escola de Engenharia de São Carlos da USP.

As conclusões serão apresentadas em ordem seqüencial, de acordo com a configuração do trabalho. Apresenta-se também uma série de recomendações enfatizando o potencial de utilização dos resultados obtidos e algumas sugestões para estudos e pesquisas futuras, valorizando as facilidades proporcionadas por ensaios em verdadeira grandeza com o uso do simuladores de tráfego como o da UFRGS/DAER.

7.1 Conclusões da Dissertação

A análise do conteúdo do trabalho desenvolvido permite apresentar as seguintes conclusões:

- I. muitos fatores contribuem para as condições e o desempenho de pavimentos. Pode-se relacionar: qualidade e espessura das camadas da estrutura; características do subleito; procedimentos construtivos e de manutenção e condições ambientais. Porém, o fator excesso de carga por eixo associado ao alto número de veículos pesados, constitui a maior causa de ocorrência de danos em pavimentos. No Brasil, os veículos pesados trafegam com sobrecargas da ordem de 20%. O novo Código de Trânsito Brasileiro, que prevê multas mais elevadas e penalidades mais severas aos transgressores, deverá animar a ação fiscalizadora do Governo e seus agentes concessionários;

- II. desde o final da década de 60 tem-se observado uma evolução no uso de pneus de fabricação radial. Pesquisas e levantamentos executados nos EUA no final dos anos 80 indicam que cerca de 80% dos pneus utilizados em caminhões são do tipo radial. Diante da ausência de maiores informações no Brasil, executou-se uma pesquisa de campo na rodovia RS/240 para coletar dados de pneus, entre as quais qual o tipo de construção dominante. Levantou-se que 62% dos pneus da amostra pesquisada eram do tipo radial, demonstrando que no Brasil segue-se a mesma tendência constatada nos EUA. O pneu radial representa uma evolução técnica de fabricação que oferece algumas vantagens ao usuário, dentre as quais sobressai-se: maior durabilidade e menor consumo de combustível. Pneus radiais também viabilizam o uso de maiores pressões de inflação. A existência de pneus mais resistentes e a busca de maior produtividade no transporte de cargas determinam que os excessos de carga por eixo existentes nas rodovias sejam acompanhados por maiores pressões de inflação. Levantamentos executados no exterior e na pesquisa realizada, indicam que, atualmente, pressões em torno de 689 kPa (100 psi) são comuns na frota de veículos pesados, 25% maiores do que as pressões de enchimento praticadas no AASHO Road Test, ao final dos anos 50, que eram de 517 a 552 kPa (75 a 80 psi);
- III. a pressão de inflação também contribui para a deterioração dos pavimentos. Estudos existentes demonstram que maiores pressões nos pneus manifestam-se de forma mais incisiva na ruptura do revestimento de CA por fadiga. Admite-se, ainda, que a evolução da formação da trilha de roda, decorrente de deformações permanentes, é proporcional à pressão de contato dos pneus com o piso de rolamento. A literatura consultada indica que a intensidade dos danos em pavimentos devido à pressão nos pneus é variável pois depende de muitos fatores, dentre os quais relacionam-se: tipo e espessura das camadas do pavimento, temperatura, tamanho do pneu, tipo de rodado e suspensão do veículo, velocidade, resposta do pavimento selecionada para avaliação do efeito, etc. Assim, dentro deste grau de complexidade, indica-se uma ampla faixa de variação nos FEC decorrentes de alterações na pressão de enchimento, desde 15 até 100% para o caso de eixos simples com rodado duplo. Nos limites do experimento, considerando a deflexão recuperável como resposta, determinou-se que para uma mesma carga de 82 kN, quando a pressão de inflação varia de 552 kPa (80 psi) para 620 kPa (90psi), o FEC correspondente aumenta cerca de 20% e a vida útil do pavimento pode reduzir em até 20 %;

- IV. a pressão entre a banda de rodagem e o pavimento não é uniforme ao longo da área de contato. Estudos indicam que em pneus convencionais podem ocorrer picos de até *1378 kPa (200 psi)*. Acredita-se que pneus radiais produzem menores danos a pavimentos do que os convencionais, principalmente em níveis mais elevados de pressão de enchimento. A maioria dos autores consultados referem que, apesar das diferentes distribuições da pressão de contato, os efeitos dos pneus radiais e convencionais são praticamente os mesmos. Uma análise de variância, executada no presente trabalho, indicou que *não ocorrem efeitos significantes* provocados por pneus radiais 9.00R20 quando comparados com os convencionais 9.00x20, testados sobre o mesmo pavimento;
- V. uma pesquisa de campo, desenvolvida junto ao Posto de Pedágio da rodovia RS/240, no município de Portão - RS, foi executada com a finalidade de colher dados de pneus da frota de veículos pesados. Particularmente, buscou-se informações sobre a pressão de inflação dos pneus. Foram inspecionados *275* veículos e um total de *1.815* pneus. Organizou-se duas amostras: uma com os pneus de eixos dianteiros e a outra com pneus de eixos não-dianteiros. A amostra de todos os pneus dianteiros apresentou uma média da pressão de inflação de *655 kPa (95 psi)*. Na mesma amostra, o grupo de pneus radiais acusou uma pressão média de *689 kPa (100 psi)* e o de lonas *620 kPa (90 psi)*. A pressão de enchimento média na amostra de todos os pneus não-dianteiros foi de *717 kPa (104 psi)*. Nesta amostra, pneus radiais e convencionais, respectivamente, estavam com pressões médias de inflação de *744 kPa (108 psi)* e *668 kPa (97 psi)*. Os resultados da pesquisa confirmam que os veículos de carga estão trafegando com maiores pressões de inflação nos pneus do que as consideradas nos métodos de dimensionamento e avaliação de pavimentos e que os pneus radiais ensejam maiores pressões de enchimento, cerca de *10%* maiores do que a dos pneus convencionais.
- VI. utilizando somente dados da amostra de pneus não-dianteiros, verificou-se a significância dos fatores: tamanho do pneu, tipo de veículo e marca do pneu sobre a pressão de inflação. Utilizou-se, individualmente, para cada fator, uma análise de variância para comparação entre os grupos. Os resultados da análise estatística indicaram que os níveis dos fatores *tamanho do pneu* e *tipo de veículo* são significantes na resposta pressão de enchimento dos pneus. Por outro lado, os cálculos permitem concluir que a *marca de pneu* não tem efeito significativo sobre a pressão de inflação dos pneus;

- VII. a análise de variância do experimento fatorial cruzado descrita na dissertação permite afirmar que o fator pressão de enchimento dos pneus *tem significância* sobre a variável de resposta deflexão recuperável. Este efeito é menor do que o produzido pelo fator carga por eixo, *considerado muito significante*. Os resultados anotados indicam que, para cada nível de carga considerado, ocorrem aumentos de 1,16 a 4,34% na deflexão superficial quando a pressão de inflação cresce de 552 kPa (80 psi) para 620 kPa (90 psi), *decrecendo* após, quando a pressão de inflação aumenta para o nível de 689 kPa (100 psi), nos mesmos níveis de carga por eixo;
- VIII. conforme referido, a análise do experimento demonstra que a carga por eixo é a principal causadora de variação na deflexão recuperável e, por conseqüência, do estado do pavimento. Observa-se que ao aumentar a carga por eixo de 82 kN para 120 kN, as deflexões correspondentes aumentam cerca de 40%, em todos os níveis de pressão de inflação trabalhados;
- IX. os resultados do experimento fatorial indicam também que, além do fator tipo de pneu, as interações entre os fatores utilizados também não têm significância sobre a variável de resposta medida;
- X. as medições das áreas de contato dos pneus convencionais utilizados no experimento para cada uma das combinações dos fatores carga por eixo e pressão de inflação viabilizou uma comparação com a área de contato circular considerada nos métodos usuais de dimensionamento de pavimentos flexíveis, calculada para os mesmos níveis dos fatores. Quando ocorrem as condições: pressão de inflação de 552 kPa (80 psi), 620 kPa (90 psi) e 689 kPa (100 psi), respectivamente para cargas por eixo < 95 kN, <102 kN, e < 120 kN observou-se que as áreas reais de contato são maiores do que as circulares correspondentes, tendo-se, então, circunstâncias a favor da segurança. Entretanto, para os mesmos níveis de pressão de enchimento, quando as cargas por eixo são, respectivamente, maiores do que 95 kN, 102 kN e 120 kN, a área real de contato medida é menor do que a área circular calculada, significando situações de pressão de contato maior, maior deflexão recuperável e deteriorações mais severas do pavimento dimensionado segundo a hipótese de que a área de contato do pneu com

o piso é *circular* e calculada através da relação carga por eixo sobre pressão de inflação;

XI. as comparações entre pressão de contato e pressão de inflação demonstram que a pressão de contato varia de forma similar à deflexão superficial. Em todos os níveis de carga por eixo trabalhados no experimento, quando a pressão de enchimento aumenta de 552 kPa (80 psi) para 620 kPa (90 psi) há um aumento de *4,8 a 9,9%* nos valores da pressão de contato. Aumentando-se a pressão de enchimento de 620 kPa (90 psi) para 689 kPa (100 psi) ocorrem decréscimos variáveis *0,4 a 1,6%* na pressão de contato, nos mesmos níveis de carga por eixo. Pode-se entender esta constatação admitindo-se que até certos limites, em níveis mais altos de pressões de inflação, há o desenvolvimento de *tensões de tração* nas paredes verticais dos pneus, aliviando assim, a pressão de contato entre a banda de rodagem e a superfície do pavimento;

XII. o estudo variação da pressão de contato e a comparação com a pressão de inflação também ensejam conclusões quanto às limitações da hipótese de igualdade entre pressão de enchimento e pressão de contato, adotada em muitos métodos de dimensionamento e avaliação de pavimentos. Para as combinações de carga por eixo e pressão de inflação de 82 kN e 552 kPa (80 psi), 82 kN e 620 kPa (90 psi), 82 kN e 689 kPa (100 psi), 100 kN e 620 kPa (90 psi), 100kN e 689 kPa (100 psi) a pressão de contato é *menor* do que a pressão de inflação correspondente, logo a hipótese pressão de contato igual à pressão de inflação está a *favor da segurança*. Verificou-se que para a combinação dos níveis 120 kN e 689 kPa (100 psi) a pressão de contato é aproximadamente igual à pressão de inflação. Finalmente, nas combinações 100 kN e 552 kPa (80 psi), 120 kN e 552 kPa (80 psi) e 120 kN e 620 kPa (90 psi) observou-se que a pressão de contato é maior do que a pressão de inflação equivalente, *subestimando-se*, por consequência, os efeitos dos fatores intervenientes;

XIII. verificou-se que, quando há uma variação de condições classificadas como de carregamento leve (carga por eixo de 82 kN e pressão de inflação de 552 kPa) para uma situação mais severa (carga por eixo de 120 kN e pressão de enchimento de 689 kPa), calcula-se que há uma redução de *85%* do número Nr de solicitações equivalentes ao eixo padrão de 82 kN/eixo, correspondentes ao uso do pavimento ensaiado até o final da vida restante;

XIV. propõe-se a formulação $FEC = \left(\frac{D_{ij}}{D_{pp}} \right)^{5,959}$ como medidor dos efeitos provocados em

pavimentos por ação simultânea da carga por eixo e da pressão de inflação. D_{ij} é a deflexão máxima recuperável (0,01 mm) decorrente de uma carga por eixo genérica i e uma pressão de enchimento dos pneus j . D_{pp} é a deflexão máxima recuperável (0,01 mm) provocada por uma carga padrão de 82 kN e uma pressão de inflação de 552 kPa. O expoente 5,959 é o proposto nos estudos sobre FEC mecanísticos de D. Pereira, para a resposta estrutural deflexão superficial;

XV. os resultados do experimento apresentaram boa *proporcionalidade linear* entre carga por eixo e deflexão recuperável correspondente, confirmando um importante pressuposto existente em estudos similares;

XVI. o estudo da variação dos FEC empírico-mecanísticos e os determinados de acordo com o experimento da AASHO, calculados para os níveis dos fatores considerados no experimento é coerente e compatível com a variação das deflexões superficiais e da pressão de contato determinadas, ratificando-se as conclusões anteriores na ótica do FEC. Para a condição mais crítica de degradação do pavimento ensaiado, ditada por maiores deflexões recuperáveis (carga por eixo de 120 kN e pressão de inflação igual a 620 kPa), determinou-se que o valor do FEC é 8,57, cerca de 750% maior do que o FEC unitário, equivalente aos níveis dos fatores tomados como padrões. Nestas condições limites de carga por eixo e pressão de pneus, a vida útil do pavimento ensaiado pode sofrer uma redução de até 88% da prevista. O recapeamento prematuro ao valor de R\$ 700.000,00 para uma extensão de 20 km, um tráfego lento com alto custo operacional e ainda o maior risco de acidentes, constituem a síntese do que é pago pela sociedade pelos excessos de carga por eixo e pressão de inflação.

7.2 Recomendações e Sugestões para Trabalhos Futuros

O assunto abordado na presente dissertação, como a *pavimentação*, de uma maneira geral, é amplo e possui algum grau de complexidade, como complexas, muitas vezes, são as soluções encaminhadas. Esta condição, antes de ser um obstáculo, é estimulante e constitui

um bom desafio para quem pretende agir nesta área. No sentido de colaborar com a evolução do estado do conhecimento existente, apresenta-se algumas recomendações e sugestões para pesquisas futuras.

- I. face à dimensão dos efeitos provocados pela ação simultânea da carga por eixo e pela pressão de inflação dos pneus e, ainda, considerando o uso crescente de pneus radiais de maior tamanho, é recomendável uma revisão nos fatores de equivalência de cargas recomendados pelos métodos de dimensionamento e avaliação vigentes que, via de regra, estão baseados em pressões de enchimento de 552 kPa (80 psi) e pneus tamanho 9.00x20;
- II. os danos em pavimentos decorrentes dos excessos de carga por eixo e pressão de inflação também sugerem uma ação mais efetiva e eficaz dos responsáveis no controle, principalmente do peso dos veículos de carga, preservando-se a segurança do usuário e o patrimônio rodoviário implantado. Propõe-se, também, o controle da pressão de inflação através de uma ação conjunta entre Governo e fabricantes, definindo-se clara e objetivamente pressões a frio, divulgando-se ostensivamente os limites recomendados;
- III. a partir da instrumentação das atuais e futuras pistas da Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos da UFRGS/DAER, sugere-se o desenvolvimento de estudos de desempenho de pavimentos através da medição de outras importantes respostas estruturais e a comparação dos resultados experimentais com os obtidos de modelos de análise existentes;
- IV. o potencial de assuntos cuja investigação fica facilitada com o uso de pistas experimentais e simuladores de tráfego é muito amplo. Recomenda-se como temas para futuras pesquisas o estudo dos efeitos de pneus de maior tamanho e do tipo extralargo; avaliação da adoção de níveis menores e maiores de pressões de inflação; comparação entre materiais e diferentes espessuras de pavimentos diante da combinação dos fatores de tráfego; etc.;
- V. finalmente, apela-se ao Governo para que invista em pesquisa nesta área como mecanismo de defesa da sociedade, ao setor privado para que participe de iniciativas que poderão representar desenvolvimento, qualidade e divulgação de seus produtos e serviços e, particularmente, aos responsáveis pela Área de Pesquisas e Testes da UFRGS e do DAER para que não percam o entusiasmo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ALBANO, J. F. ; LINDAU, L. A. Estudo do efeito do aumento da carga, da pressão de inflação e do tipo de pneu na resposta elástica de um pavimento. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 11., 1997, Rio de Janeiro, RJ. *Anais...* Rio de Janeiro: ANPET, 1997. p. 15-19.
- 2 AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. *Guide for design of pavement structures*. Washington, 1993.
- 3 BELL, C. A.; RANDHAWA, S. U.; XU, Z. K. Impact of high-pressure tires and single-tired axles in Oregon. *Transportation Research Record*. Washington, n.1540, p.132-141, 1996.
- 4 BONAQUIST, R.; SURDAHL, R.; MOGAWER W. Effect of tire pressure on flexible pavement: response and performance. *Transportation Research Record*, Washington, n.1227, p.97-106, 1989.
- 5 BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *Coletânea de normas*. Rio de Janeiro, 1994a. 8v. Determinação das deflexões no pavimento pela viga Benkelman: ME 24/94. v.1 6p.
- 6 BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *Coletânea de Normas*. Rio de Janeiro, 1994b. 8v. Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos: PRO 007/94. v.6 6p.
- 7 BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *Coletânea de Normas*. Rio de Janeiro, 1994c. 8v. Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos: PRO 008/94. v.6 10p.
- 8 BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *Coletânea de Normas*. Rio de Janeiro, 1994d. 8v. Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis: Procedimento 010/79. v.6 31p.
- 9 BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *Coletânea de Normas*. Rio de Janeiro, 1994e. 8v. Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis: Procedimento 011/79. v.6, 16p.
- 10 BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *Método de projeto de pavimentos flexíveis*. Rio de Janeiro: DNER - Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1979. 31p.
- 11 BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *Projeto de restauração de pavimentos flexíveis: TECNAPAV*. Brasília: DNER, Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico/IPR, DNER -PRO 269/94, 1995. 17p.
- 12 BRASIL. *Lei N.º 9.503, de 23 de setembro de 1997*. Institui o Código de Trânsito Brasileiro. *Diário Oficial [da República Federativa do Brasil]*, Brasília, p.1-64, 24 set. 1997.
- 13 CERATTI, J. A. P. *Curso de extensão: mecânica dos pavimentos rodoviários flexíveis*. Porto Alegre: Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil,

- UFRGS, 1997. 87p. (Caderno Técnico)
- 14 CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO Resolução N.º 558, de 15 de abril de 1980. Fabricação e reforma de pneumático com indicadores de profundidade. Brasília, 1980.
 - 15 CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO Resolução N.º 12 de 6 de fevereiro de 1998. Estabelece os limites de peso e dimensões para veículos que transitam por vias terrestres. Brasília, 1998a. 4p.
 - 16 CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO Resolução N.º 62, de 21 de maio de 1998. Estabelece o uso de pneus extralargos e define seus limites de peso de acordo com o Parágrafo único do art. 100 do CTB. Brasília, 1998b. 4p.
 - 17 DAVIES, T. L.; WALL, T. F.; CARPENTER, A. Reduced tire pressure initiative. *Saskatchewan Highways and Transportation*. Saskatchewan, Canada, p.1-18, 1997.
 - 18 DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM (RS). *Normas de fiscalização para veículos de carga nas rodovias sob jurisdição do DAER/RS*. Porto Alegre: Comissão de Circulação Viária, out. 1992. 46p.
 - 19 DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM (RS). *Mapa rodoviário do Estado do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, 1997. Escala 1:1.250.000
 - 20 DOUGLAS, R. A. Unbound roads trafficked by heavily loaded tyres with low inflation pressure. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Canada, v. 123, n.3, p.163-173, Aug.1997a.
 - 21 DOUGLAS, R. A. Heavy load, low tire pressure rutting of unbound granular pavements. *Journal of Transportation Engineering*, New York, ASCE, v.123, n.5, p.357-363, Sept./Oct. 1997b.
 - 22 DUARTE, J. C.; SILVA, P. D. E. da; FABRICIO, J. M. Correlação entre deflexões características em pavimentos flexíveis medidos com a viga Benkelman e com o FWD - Falling Weight Deflectometer. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 30., 1996. Salvador. *Anais...* Salvador: ABPv, 1996. p.637-646.
 - 23 FERNANDES JÚNIOR, J. L.; SÓRIA, M. H. A.; WIDMER, J. A. Estudo comparativo dos efeitos do tipo de rodagem e do tipo de suspensão sobre o desempenho dos pavimentos. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 28., 1994, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: ABPv, 1994. p.476-500.
 - 24 FERNANDES JÚNIOR, J. L. *Investigação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos*. São Carlos, 1994. 313p. Tese de Doutorado em Transportes - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
 - 25 FERNANDES JÚNIOR, J.L.; SÓRIA, M. H. A.; WIDMER, J. A. Efeitos das solicitações do tráfego sobre custos de construção, manutenção e utilização de rodovias. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 29., 1995, Cuiabá. *Anais...* Cuiabá: ABPv, 1995. p.267-284.
 - 26 FRAENKEL, B. B. *Engenharia rodoviária*. 3.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1980. 852p.
 - 27 GILLESPIE, T. D.; KARAMIHAS, S. M. Heavy truck properties significant to

- pavement damage. In: CONFERENCE ON VEHICLE-ROAD INTERACTION, 2., 1994, Santa Barbara, CA. *Proceedings...* Philadelphia: ASTM, STP,1225. 1994. p.52-63.
- 28 GODOY, V.; MACHADO V. V. *Transporte rodoviário de cargas: guia prático da Lei da Balança*. Porto Alegre, 1993. 79p.
- 29 GÖKTAN, A.; MITSCHKE, M. Road damage caused by heavy duty vehicles. *Journal of Vehicle Design*, v.16, n.1 p.54-70, 1995.
- 30 GONTIJO, P. R. A.; GUIMARÃES, F. H. R.; NOGUEIRA, C. de L. Metodologias brasileiras para avaliações das características funcionais e estruturais de pavimentos rodoviários - o estado da arte. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 28., 1994, Belo Horizonte, *Anais...* Belo Horizonte: ABPv, 1994. p501-529.
- 31 GOODYEAR. *Pneus de caminhões, ônibus e camionetas: informações ao consumidor*. [São Paulo]: Dpaschoal, 199-a. 68p.
- 32 GOODYEAR. *Manual de serviço para pneus radiais: caminhões e ônibus*. [São Paulo]: 199-b. 39p.
- 33 HUANG, Y. H. *Pavement analysis and design.*, Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1993.
- 34 HUHTALA, M.; PIHLAJAMÄKI, J.; PIENIMÄKI, M. Effects of tires and tires pressures on road pavements. *Transportation Research Record*, Washington, n.1227, p.107-114, 1989.
- 35 INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. *Influência da carga por eixo nas rodovias*. Rio de Janeiro: ABPv, 1979. 25p. Trabalho apresentado no Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projeto de Reforço.
- 36 KIM, O.; BELL, C. A.; WILSON, J. F. Effect of increased truck tire pressure on asphalt concrete pavement. *Journal of Transportation Engineering*, v.115, n.4, p.329-350, July 1989.
- 37 MARSHEK, K. M. et al. Experimental determination of pressure distribution of truck tire-pavement contact. *Transportation Research Record*, Washington, v.1070. p.9-14, 1986a.
- 38 MARSHEK, K. M. et al. Effect of truck tire inflation pressure and axle load on flexible and rigid pavement performance. *Transportation Research Record*, Washington, v.1070. p.14-21, 1986b.
- 39 MARTINS, E. R. C.; MIRANDA, L. M. de. Controle de carga na rede pavimentada de Mato Grosso. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 29., 1995, Cuiabá. *Anais...* Cuiabá: ABPv, 1995. p.141-173.
- 40 MATTOS, A. B. G. de. Ajustagem do Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis do DNER de 1966. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 25., 1991, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABPv, 1991. p.933-1083.
- 41 MEDINA, J. de. *Evolução da mecânica dos pavimentos no Brasil*. Palestra na 25ª Reunião Anual de Pavimentação, São Paulo, 1991. 22p.
- 42 MEDINA, J. de et al. Utilização de ensaios defletométricos e de laboratório para avaliação estrutural de pavimentos. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 28., 1994, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: ABPv, 1994. p.595-625.

- 43 MEDINA, J. de. *Mecânica dos pavimentos*. Rio de Janeiro: UFRJ, 1997. 380p.
- 44 MIDDLETON, D. R.; ROBERTS, F. L.; CHIRA-CHAVALA. Measurement and analysis of truck tire pressures on Texas highways. *Transportation Research Record*, Washington, n.1070, p.1-8, 1986.
- 45 MINER, M. A. Cumulative damage in fatigue. *Journal of Applied Mechanics*, New York, ASME, v.66, Sept. 1945.
- 46 NATIONAL RESEARCH COUNCIL (Estados Unidos). Committee for the Truck Weight Study. *Truck Weight limits: issues and options*. Washington: Transportation Research Board, 1990. 307p. (TRB. Special Report, 225).
- 47 NÚÑEZ, W. P. et al. A influência da sucção no módulo resiliente de um solo de comportamento laterítico - resultados de laboratório e de campo com o emprego do simulador de tráfego UFRGS - DAER/RS. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 30., 1996b, Salvador. *Anais...* Salvador: ABPv, 1996b. 4v. v.2, p.700-720.
- 48 NÚÑEZ, W. P. *Análise experimental de pavimentos rodoviários delgados com basaltos alterados*. Porto Alegre: Escola de Engenharia, 1997. 294p. Tese de Doutorado em Engenharia - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS.
- 49 NÚÑEZ, W. P., CERATTI, J. A. P.; OLIVEIRA J. A. Os primeiros resultados obtidos nas pistas experimentais solicitadas pelo simulador de tráfego UFRGS/DAER. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 30., 1996a, Salvador. *Anais...* Salvador: ABPv, 1996a. 4v. v.2, p.922-952.
- 50 NÚÑEZ, W. P. et al. Um Ano de operação da Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos localizada em Porto Alegre - RS. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 11., 1997, Rio de Janeiro, RJ. *Anais...* Rio de Janeiro: ANPET, 1997. 2v. v.1, p.23-35.
- 51 OLIVEIRA JR, J. A.; LIMA, L. C. Estudo de controle de pesagem de veículos de carga no Estado do Ceará - localização dos postos de pesagem fixos e móveis. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 8., 1994, Recife. *Anais...* Recife: ANPET, 1994. 2v. v.2, p.351-362.
- 52 OLIVEIRA JR, J. A.; LOUREIRO, C. F. G.; LIMA, L. C. Sistema de pesagem de cargas rodoviárias do Departamento de Estradas de Rodagem e Transportes do Estado do Ceará (SPCR/DERT) - um enfoque organizacional. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 9., 1995, São Carlos. *Anais...* São Carlos: ANPET, 1995. 2v. v.2, p.747-753.
- 53 PERDOMO, D; NOKES B. Theoretical analysis of the effects of wide-base tires on flexible pavements using CIRCLY. *Transportation Research Record*, Washington, n. 1388, p.108-119, 1993.
- 54 PEREIRA, A. M. *Análise crítica dos fatores de equivalência adotados pelo DNER e Sua adequação às rodovias de tráfego pesado*. Curitiba: ABPv, 1985. 330p. Tese para concurso de Prof. Titular da Universidade Federal do Paraná.
- 55 PEREIRA, D. R. A. M. *Contribuição ao estudo de fatores de equivalência de cargas*. São Paulo: Departamento de Engenharia de Transportes, 1992. 204p. Dissertação de Mestrado em Engenharia - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

- 56 PIRELLI. *Pneus diagonais para caminhões e ônibus*. São Paulo: Pirelli Pneus S.A., 199-. 5p.
- 57 RAAD, L.; MINASSIAN, G.; SABOUNDJIAN, S. *Mechanistic evaluation of the effect of tire inflation pressure on pavement damage under spring-thaw weakening*. 1998. 26p. Artigo encaminhado para avaliação e publicação no Transportation Research Board Meeting, Jan. 1998.
- 58 RIBEIRO, J. L. D. *Projeto de experimentos na otimização de produtos e processos*. Porto Alegre: Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFRGS, 1995.(Caderno Técnico)
- 59 SCHLIESSLER, A.; BULL, A. *Caminhos: um novo enfoque para a gestão e manutenção rodoviária*. Brasília: CEPAL/Instituto Panamericano de Carreteras, 1994. 246p.
- 60 SCHMIDT, L. A.; CERATTI, J. A. P. Equivalências de cargas de eixos no projeto de restauração de pavimentos flexíveis - uma avaliação baseada em considerações defletométricas. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 22., 1987, Maceió. *Anais...* Maceió: ABPv, 1987. v2, p.347-362.
- 61 SEBAALY, P. E.; TABATABAEE, N. Effect of tire pressure and type on response of flexible pavement. *Transportation Research Record*, Washington, n.1227, p.115-127, 1989.
- 62 SEBAALY, P. E. Pavement damage as related to tires, pressures, axle loads and configurations. In: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Vehicle, tire, pavement interface*. Philadelphia, 1992. p.54-68, (STP,1164J).
- 63 SENÇO, W. de. *Manual de técnicas de pavimentação*. São Paulo: Pini, 1997. 746p.
- 64 SOUZA, M. L. *Pavimentação rodoviária*. 3.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1980. 361p.
- 65 TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, *Truck operating characteristics*. Washington: National Academy Press, 1997. 66p. (National Cooperative Highway Research Program. Synthesis of Highway Practice, 241).
- 66 VIEIRA, H.; FRAINER, V.; SCHATTSCHNEIDER, E. Sistema Automatizado de Pesagem; Classificação e Contagem de Veículos Rodoviários. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 27., 1993, Teresina. *Anais...* Teresina: ABPv, 1993. p.458-468.
- 67 WATSON, J. P. *Highway construction and maintenance*. London: Longman, 1989. 217p.

ANEXO A

Aferição da Unidade Hidráulica

Após uma operação de manutenção na Unidade Hidráulica do simulador, através da qual aplica-se a carga ao pavimento, foi necessário calibrar a mesma para dar início à coleta de dados do trabalho.

Empregou na calibração da Unidade uma célula de carga de 10 tf e uma leitora digital. Posicionou-se a célula de carga entre duas placas metálicas. A superior transmitia a carga do rodado à célula de carga que, por sua vez apoiava-se sobre a segunda placa assentada sobre o pavimento.

Foram executados três ciclos de carregamento, alterando-se a ação (carga) da Unidade Hidráulica através de um registro.

Relacionou-se a carga obtida na leitora com a pressão no manômetro da Unidade Hidráulica. Os pontos foram plotados em um gráfico, obtendo-se a Fig. A.1.

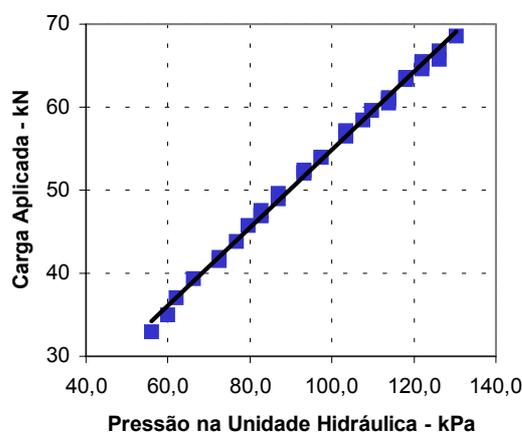


FIGURA A.1 - Leituras para a Equação de Calibração

Obteve-se a equação de aferição por regressão linear simples (memória no Anexo B) com coeficiente de determinação $R^2 = 0,9967$. A expressão matemática é:

$$C = 8,1718 + 0,4674 P$$

Onde:

C é a carga em kN aplicada pelo semi-eixo e,

P a pressão na Unidade Hidráulica do simulador em kPa.

ANEXO B

Análises de Variância e Modelos de Regressão

Apresenta-se no Anexo B a memória de cálculo das análises de variância e dos modelos de regressão desenvolvidos na dissertação. Utilizou-se as ferramentas do programa Excel versão 7.0 da Microsoft para processamento dos dados coletados na pesquisa de campo e no experimento fatorial.

TABELA B.1 - Análise de Variância: Comparação entre **Grupos de Veículos**,
Anova: Fator Único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
2C	140	13438	95,9857143	143,539363
3C	492	50438	102,516260	179,321527
2S3	495	54269	109,634343	1526,11501

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	25010,31055	2	12505,1553	16,307924	1,043E-07	3,0037342
Dentro dos grupos	861899,657	1124	766,814642			
Total	886909,968	1126				

TABELA B.2 - Análise de Variância: Comparação entre Tamanho de Pneus,
Anova: Fator Único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
9.00X20	150	14402	96,01333333	214,9931096
10R20	277	29051	104,8772563	138,4124156
11R22	416	45789	110,0697115	104,7348876

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	22183,25955	2	11091,62977	81,942878	3,09E-33	3,0064413
Dentro dos grupos	113700,7784	840	135,3580695			
Total	135884,038	842				

TABELA B.3 - Análise de Variância: Comparação entre Marcas de Pneus,
Anova: Fator Único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Firestone	213	21527	101,0657277	192,1654708
Goodyear	372	39451	106,0510753	2296,280403
Michelin	279	29857	107,0143369	140,9566282
Pirelli	148	15285	103,277027	147,9431421

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	5259,938485	3	1753,312828	1,8533482	0,1358242	2,6137315
Dentro dos grupos	953592,6939	1008	946,0244979			
Total	958852,6324	1011				

TABELA B.4 - Regressão Linear Simples: Aferição da Unidade Hidráulica do Simulador

RESUMO DOS RESULTADOS

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,99834357
R-Quadrado	0,99668988
R-quad. ajust.	0,9965953
Erro padrão	0,56766842
Observações	37

$$C = 8,1718 + 0,4674P$$

$$R^2 = 0,9967$$

Obs.: C é a carga aplicada pelo semi-eixo em kN
e P, em kPa, é a pressão na Unidade Hidráulica do simulador

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F Crít.</i>
Regressão	1	3396,04458	3396,04458	10538,6241	5,3059E-45
Resíduo	35	11,2786602	0,32224743		
Total	36	3407,32324			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inf.</i>	<i>95% Sup.</i>	<i>Inf. 95,0%</i>	<i>Sup. 95,0%</i>
Interseção	8,17184527	0,456196	17,9130139	3,3226E-19	7,24571703	9,09797352	7,24571703	9,09797352
P (kPa)	0,46742628	0,00455325	102,657801	5,3059E-45	0,45818268	0,47666987	0,45818268	0,47666987

TABELA B.5 - Regressão Linear Simples: Área de Contato x Área Circular Calculada

RESUMO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão

R múltiplo	0,95168536
R-Quadrado	0,90570502
R-quad. aj.	0,89223431
Erro padrão	8,93087072
Observações	9

$$Ac = 278,851 + 0,3376 Acirc$$

$$R^2 = 0,9057$$

Obs.: - Ac e Acirc em cm²,
 - Testou-se a variável independente Acirc², não obtendo-se significância para Valor-P.

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F Crít.
Regressão	1	5362,70413	5362,70413	67,2351272	7,78456E-05
Resíduo	7	558,323163	79,7604519		
Total	8	5921,02729			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% Inf.	95% Superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	278,851057	16,8063387	16,5920169	7,0558E-07	239,110409	318,5917045	239,110409	318,5917045
A Circular cm2	0,33757581	0,04116927	8,19970287	7,7846E-05	0,240226015	0,434925599	0,240226015	0,434925599

Dados

A Circ. cm2	Ac Cm2
427,35	428,58
356,13	407,18
292,02	383,88
474,68	426,23
395,57	400,85
324,37	382,38
534,76	468,03
445,63	432,43
365,42	400,75

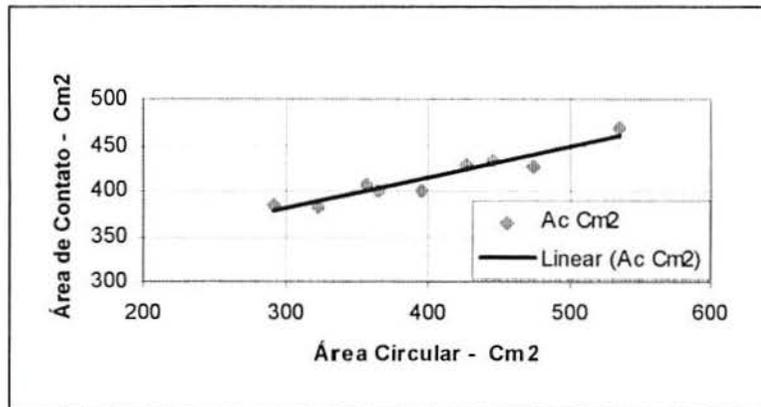


TABELA B.6 - Modelo de Regressão: Deflexão Recuperável

RESUMO DOS RESULTADOS

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,95290007
R-Quadrado	0,90801854
R-quad.ajust.	0,89085966
Erro padrão	2,892378
Observações	72

$$D_{ij} = 0,5689 C_e + 0,0373 P_e - 0,38 \cdot 10^{-4} P_e^2$$

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F Crít..</i>
Regressão	3	5698,40909	1899,4697	227,0504	2,3596E-35
Resíduo	69	577,243683	8,36585048		
Total	72	6275,65278			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inf.</i>	<i>95% sup.</i>	<i>Inf. 95,0%</i>	<i>Sup. 95,0%</i>
Interseção	0	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
Ce kN	0,56895649	0,02194661	25,9245755	2,7003E-37	0,52517422	0,61273876	0,52517422	0,61273876
Pe kPa	0,03726492	0,00950834	3,91918254	0,00020665	0,0182963	0,05623353	0,0182963	0,05623353
Pe2	-3,7906E-05	1,1434E-05	-3,31520647	0,0014622	-6,0717E-05	-1,5096E-05	-6,0717E-05	-1,5096E-05

RESULTADOS DE RESÍDUOS

<i>Observação</i>	<i>Previsto(a)</i>	<i>Resíduos</i>	<i>Resíd.</i>
	<i>Dij</i>		<i>Padrão</i>
1	55,6781147	0,32188527	0,11128742

RESULTADOS DE PROBABILIDADE

<i>Percentil</i>	<i>Dij</i>
0,69444444	50

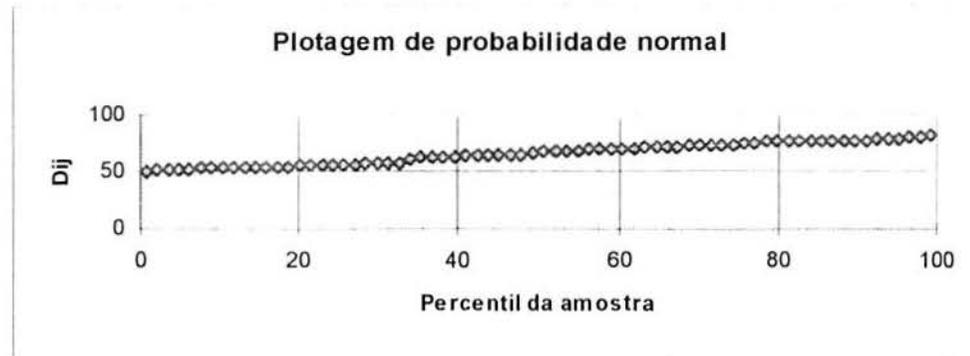
2	55,6781147	-2,67811473	-0,92592141	2,08333333	51
3	55,6781147	-1,67811473	-0,58018514	3,47222222	51
4	55,6781147	-1,67811473	-0,58018514	4,86111111	52
5	55,6781147	-0,67811473	-0,23444886	6,25	52
6	55,6781147	0,32188527	0,11128742	7,63888889	53
7	55,6781147	-3,67811473	-1,27165769	9,02777778	53
8	55,6781147	-1,67811473	-0,58018514	10,41666667	53
9	65,9193316	-4,91933157	-1,70079138	11,80555556	54
10	65,9193316	0,08066843	0,02789	13,19444444	54
11	65,9193316	3,08066843	1,06509883	14,58333333	54
12	65,9193316	2,08066843	0,71936256	15,97222222	54
13	65,9193316	5,08066843	1,75657139	17,36111111	54
14	65,9193316	3,08066843	1,06509883	18,75	54
15	65,9193316	1,08066843	0,37362628	20,13888889	55
16	65,9193316	4,08066843	1,41083511	21,52777778	56
17	77,2984614	-4,2984614	-1,48613404	22,91666667	56
18	77,2984614	-1,2984614	-0,44892521	24,30555556	56
19	77,2984614	-4,2984614	-1,48613404	25,69444444	56
20	77,2984614	-5,2984614	-1,83187032	27,08333333	56
21	77,2984614	-4,2984614	-1,48613404	28,47222222	57
22	77,2984614	-1,2984614	-0,44892521	29,86111111	57
23	77,2984614	-2,2984614	-0,79466149	31,25	58
24	77,2984614	-0,2984614	-0,10318893	32,63888889	58
25	55,1865335	2,81346647	0,97271742	34,02777778	61
26	55,1865335	2,81346647	0,97271742	35,41666667	62
27	55,1865335	-1,18653353	-0,41022768	36,80555556	62
28	55,1865335	1,81346647	0,62698115	38,19444444	63
29	55,1865335	-2,18653353	-0,75596396	39,58333333	63
30	55,1865335	1,81346647	0,62698115	40,97222222	64
31	55,1865335	0,81346647	0,28124487	42,36111111	64
32	55,1865335	-1,18653353	-0,41022768	43,75	64

33	65,4277504	2,57224963	0,88932001	45,1388889	65
34	65,4277504	-0,42775037	-0,14788882	46,5277778	65
35	65,4277504	-1,42775037	-0,4936251	47,9166667	65
36	65,4277504	1,57224963	0,54358373	49,3055556	66
37	65,4277504	6,57224963	2,27226512	50,6944444	67
38	65,4277504	4,57224963	1,58079256	52,0833333	67
39	65,4277504	7,57224963	2,61800139	53,4722222	68
40	65,4277504	4,57224963	1,58079256	54,8611111	68
41	76,8068802	0,1931198	0,06676852	56,25	69
42	76,8068802	2,1931198	0,75824108	57,6388889	69
43	76,8068802	-0,8068802	-0,27896776	59,0277778	70
44	76,8068802	1,1931198	0,4125048	60,4166667	70
45	76,8068802	5,1931198	1,79544991	61,8055556	70
46	76,8068802	2,1931198	0,75824108	63,1944444	71
47	76,8068802	-0,8068802	-0,27896776	64,5833333	71
48	76,8068802	-2,8068802	-0,97044031	65,9722222	72
49	54,3350542	-1,33505421	-0,46157667	67,3611111	72
50	54,3350542	1,66494579	0,57563216	68,75	73
51	54,3350542	-2,33505421	-0,80731295	70,1388889	73
52	54,3350542	1,66494579	0,57563216	71,5277778	73
53	54,3350542	-4,33505421	-1,4987855	72,9166667	73
54	54,3350542	-0,33505421	-0,1158404	74,3055556	74
55	54,3350542	-3,33505421	-1,15304923	75,6944444	75
56	54,3350542	-3,33505421	-1,15304923	77,0833333	75
57	64,5762711	-1,57627106	-0,54497409	78,4722222	76
58	64,5762711	-0,57627106	-0,19923781	79,8611111	76
59	64,5762711	0,42372894	0,14649847	81,25	76
60	64,5762711	-0,57627106	-0,19923781	82,6388889	76
61	64,5762711	-2,57627106	-0,89071036	84,0277778	76
62	64,5762711	0,42372894	0,14649847	85,4166667	76
63	64,5762711	-1,57627106	-0,54497409	86,8055556	76

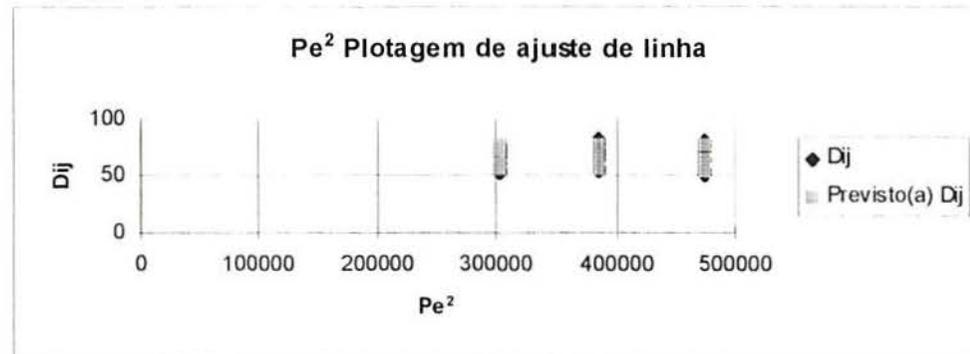
64	64,5762711	-2,57627106	-0,89071036	88,1944444	77
65	75,9554009	-0,95540088	-0,33031674	89,5833333	77
66	75,9554009	0,04459912	0,01541953	90,9722222	77
67	75,9554009	4,04459912	1,39836464	92,3611111	78
68	75,9554009	0,04459912	0,01541953	93,75	79
69	75,9554009	1,04459912	0,36115581	95,1388889	79
70	75,9554009	4,04459912	1,39836464	96,5277778	80
71	75,9554009	-4,95540088	-1,71326185	97,9166667	80
72	75,9554009	0,04459912	0,01541953	99,3055556	82

FIGURA B.1 - Modelo de Regressão para Deflexão: Plotagem de Probabilidade, Ajuste de Linha e Resíduos

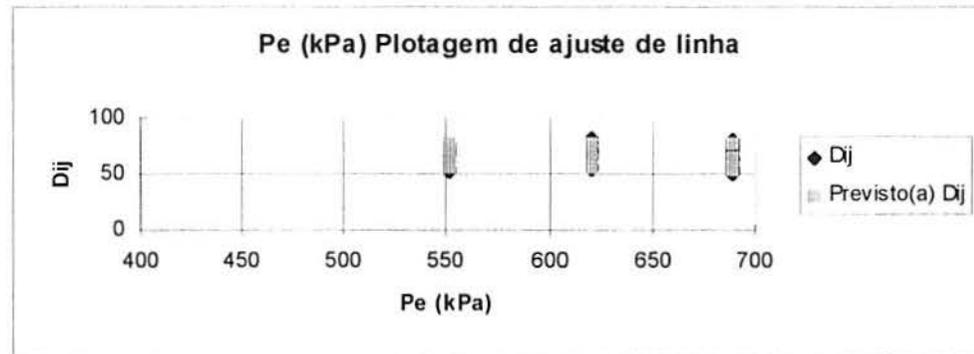
(a)



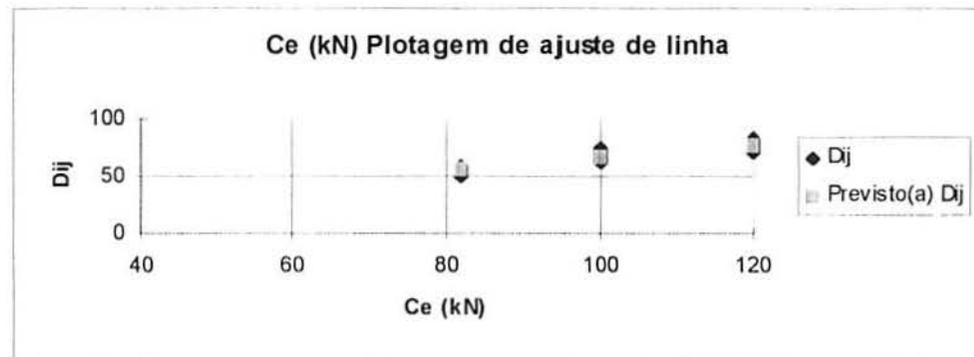
(b)



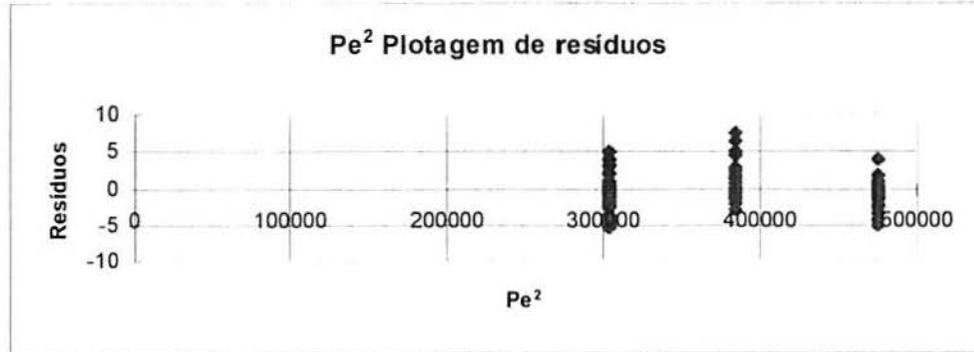
(c)



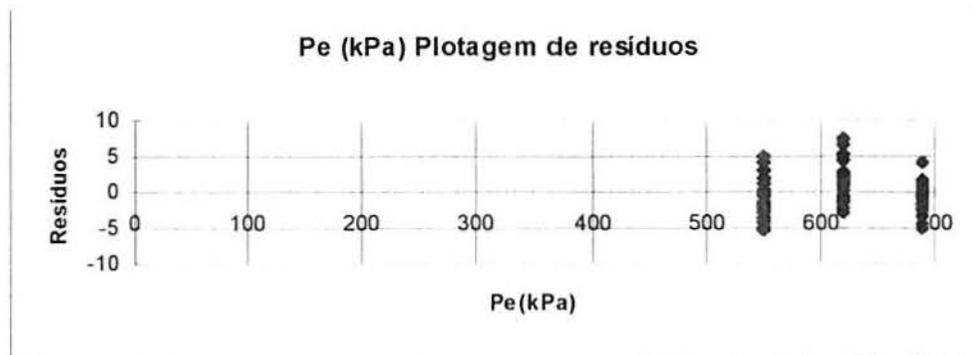
(d)



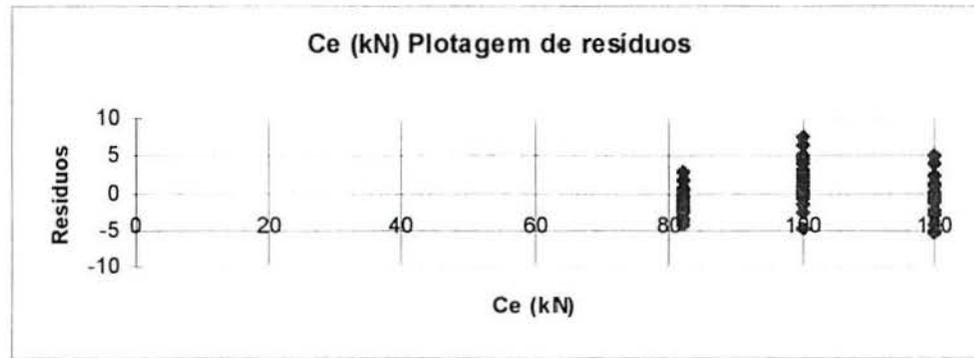
(e)



(f)



(g)



ANEXO C

Gráficos com os Resultados da Pesquisa de Campo

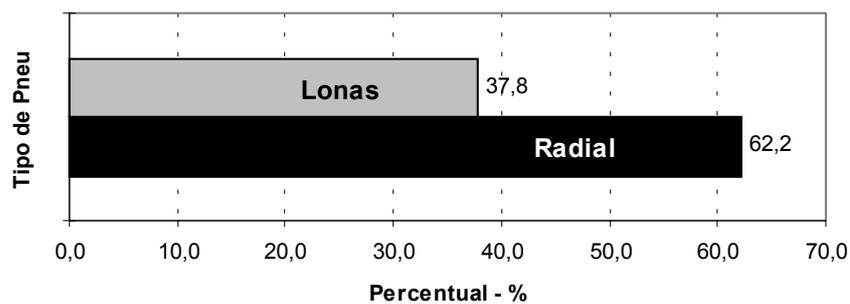
Explorando os recursos gráficos oferecidos pela informática, apresenta-se no Anexo C, as informações complementares colhidas na pesquisa de campo realizada na rodovia RS/240.

Além das informações sobre pressões de inflação de pneus apresentadas e analisadas no Cap. 4, abre-se aqui um novo ângulo de visão e interpretação de todos elementos levantados.

Estão tabuladas e graficadas informações sobre a discriminação da *amostra de pneus* por tamanho, tipo de construção, profundidade dos sulcos da banda de rodagem de pneus dianteiros e não-dianteiros e fabricantes de pneus; composição da *amostra de veículos* por tipo ou classe, marca e, por último, discrimina-se a *amostra de motoristas* dos veículos de acordo com a relação de trabalho vinculada ao frete, se feito por autônomo (proprietário) ou se frotista (empregado de empresa de transporte de carga).

TABELA C.1 - Discriminação da Amostra de Pneus por Tamanho e Tipo de Construção

Tamanho	Radial	Lonas	Totais	%
11.00R22	496		496	27,3
10.00R20	402		402	22,1
9.00x20		283	283	15,6
10.00x20		205	205	11,3
11.00x22		192	192	10,6
9.00R20	145		145	8,0
295/80R22.5	38		38	2,1
11.00R24.5	22		22	1,2
275/80R22.5	16		16	0,9
12.00R22.5	10		10	0,6
8.25x20		6	6	0,3
Totais	1129	686	1815	100
%	62,2	37,8		100

**FIGURA C.1 - Incidência do Tipo de Fabricação de Pneus**

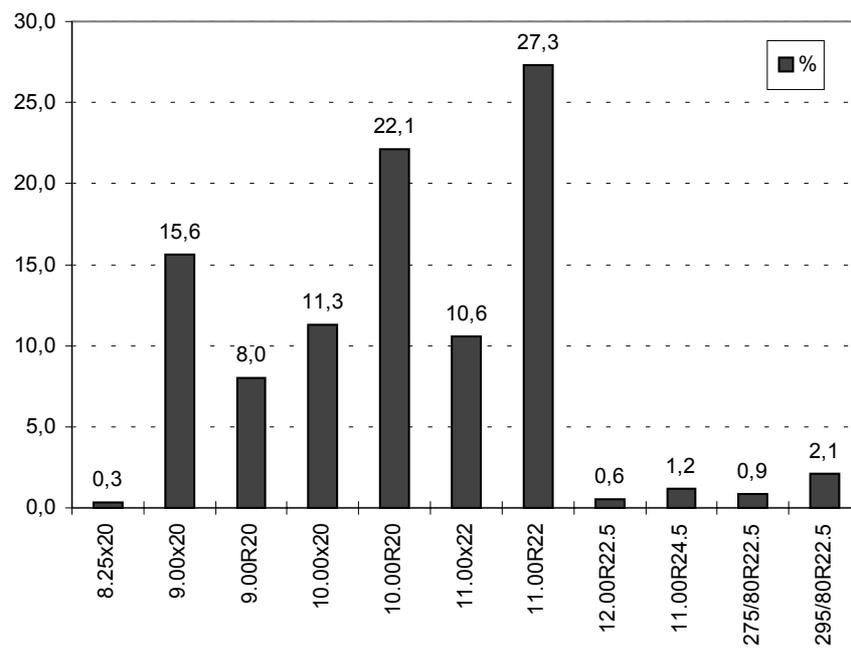


FIGURA C.2 - Distribuição Percentual por Tamanho de Pneu

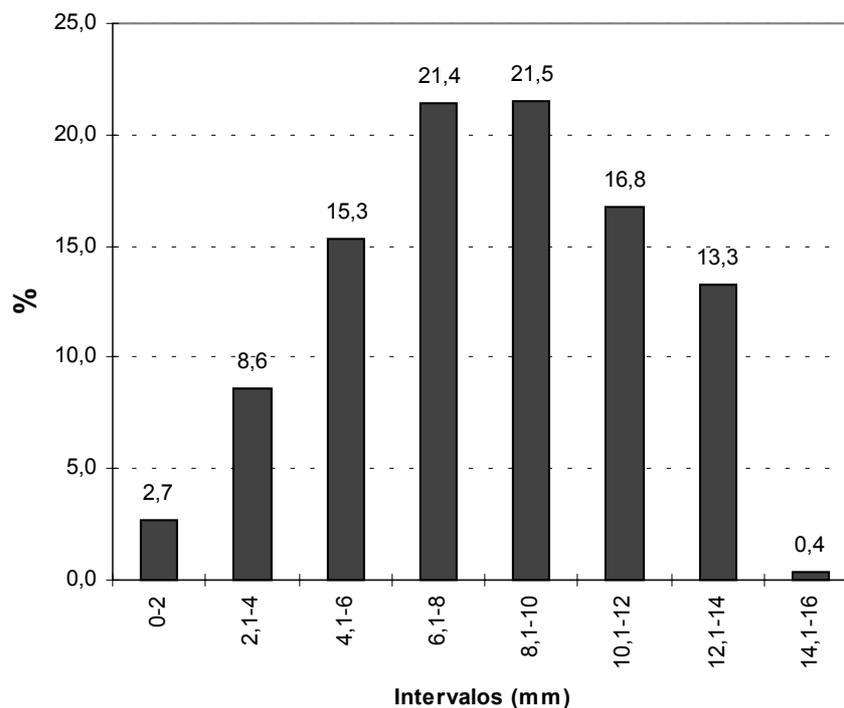


FIGURA C.3 - Distribuição das Profundidades dos Sulcos de Pneus Dianteiros

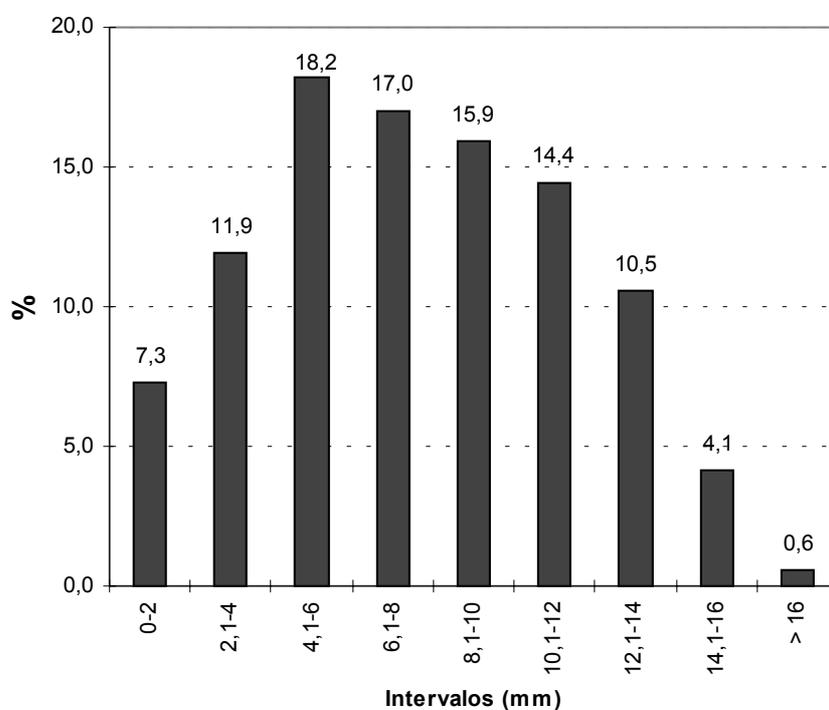
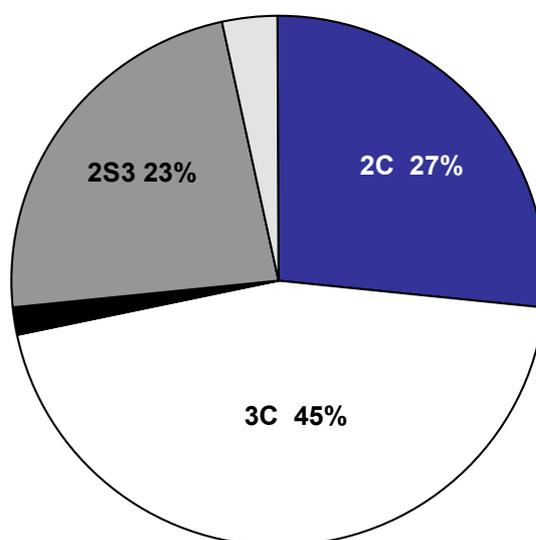


FIGURA C.4 - Distribuição das Profundidades dos Sulcos de Pneus Não-Dianteiros

TABELA C.2 - Discriminação da Amostra por Tipo de Veículo

Classificação	N.º de Veículos	%
3C	124	45,09
2C	73	26,55
2S3	64	23,27
3S3	9	3,27
2S2	4	1,45
2S1	1	0,36
Total	275	100

**FIGURA C.5 - Composição Percentual da Amostra de Caminhões**

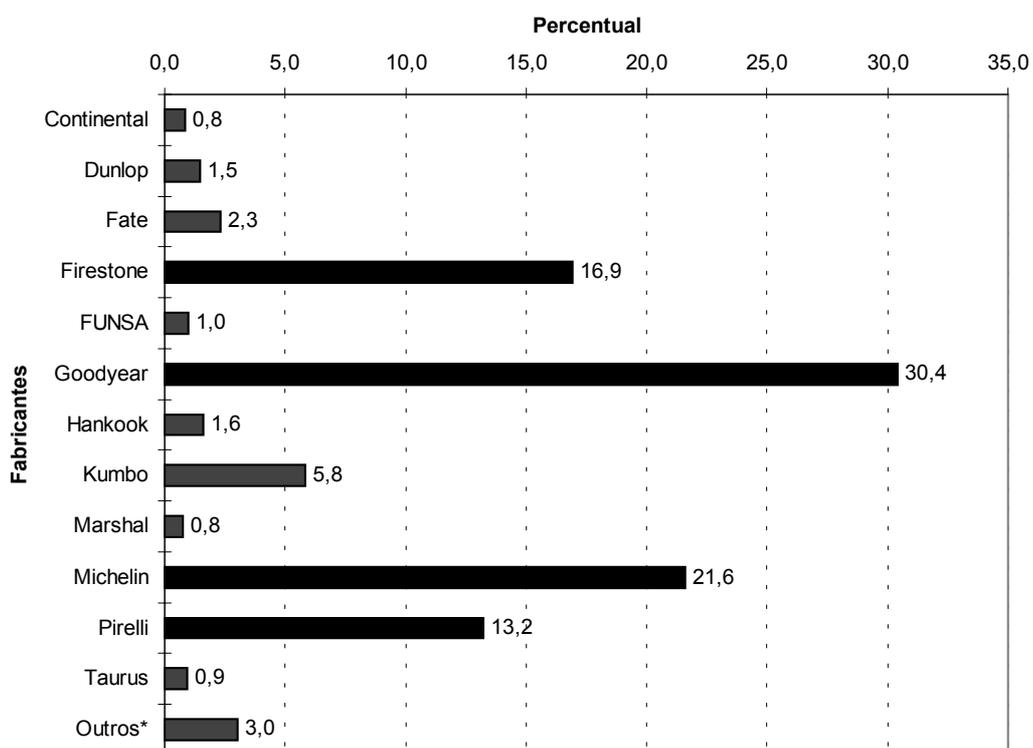


FIGURA C.6 - Discriminação da Amostra por Fabricante de Pneus*

* Outros: CEATVG, Double, General, Jet Star, Tauser, Toyo, Tubo Bype, Wallo, Wanli, Yelow, Yokohama.

TABELA C.3 - Discriminação da Amostra por Marcas de Veículos

Marcas	Quantidade	%
Mercedes	181	65,8
Scania	52	18,9
Volkswagem	16	5,8
Volvo	11	4,0
Ford	9	3,3
Chevrolet	5	1,8
Fiat	1	0,4
Total	275	100,0

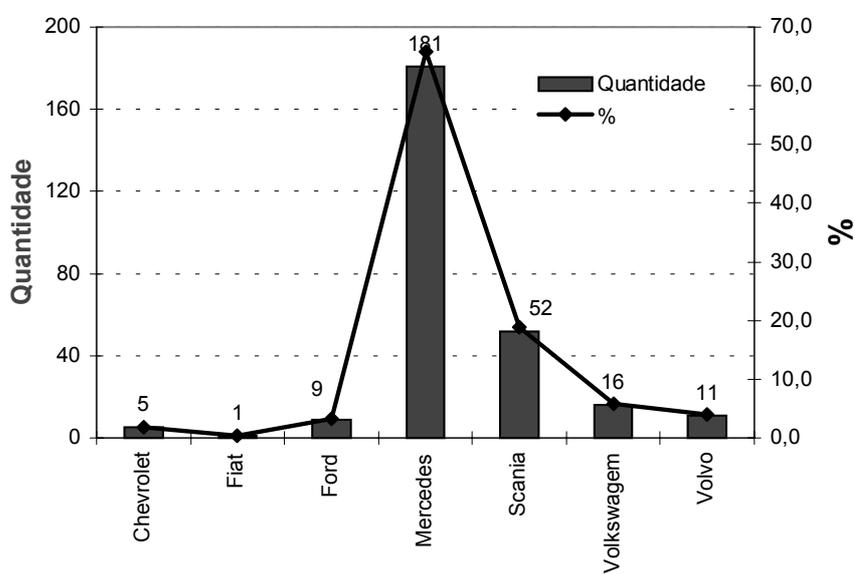
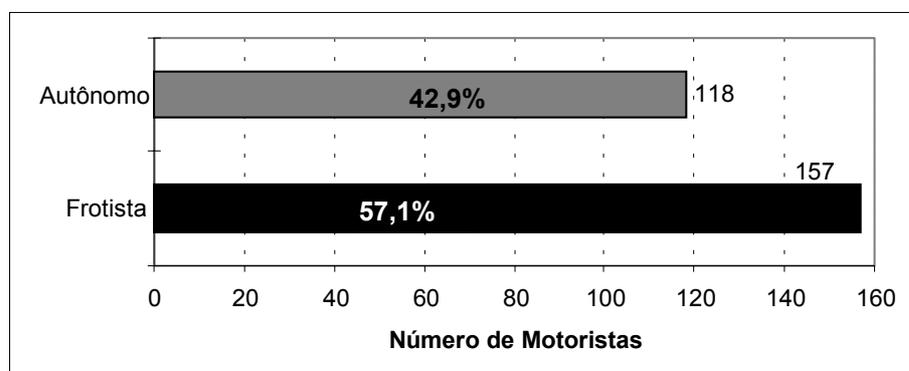


FIGURA C.7 - Marcas de Veículos

TABELA C.4 - Discriminação da Amostra por Relação de Trabalho do Motorista

	Número de Motoristas	%
Autônomo	118	42,9
Frotista	157	57,1

**FIGURA C.8** - Relação de Trabalho dos Motoristas