HELIANA BARBOSA FONTENELE

Representação do Tráfego de Veículos Rodoviários de Carga através de
Espectros de Carga por Eixo e seu Efeito no Desempenho dos
Pavimentos

Tese apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Doutor em
Ciências no Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Transportes.

Área de concentração: Infraestrutura de Transportes

Orientador: Professor Associado José Leomar Fernandes Junior

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

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

F683r	<p>Fontenele, Heliana Barbosa</p> <p>Representação do tráfego de veículos rodoviários de carga através de espectros de carga por eixo e seu efeito no desempenho de pavimentos / Heliana Barbosa Fontenele ; orientador José Leomar Fernandes Junior. -- São Carlos, 2011.</p> <p>Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.</p> <p>1. Veículos rodoviários. 2. Solicitações do tráfego. 3. Carga por eixo. 4. Espectros de carga. 5. Desempenho de pavimentos. I. Título.</p>
-------	---

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **HELIANA BARBOSA FONTENELE**

Título da tese: "Representação do tráfego de veículos rodoviários de carga através de espectros de carga por eixo e seu efeito no desempenho dos pavimentos"

Data da defesa: 31/01/2012

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **José Leomar Fernandes Júnior (Orientador)** APROVADA
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Profª. Drª. **Eliane Viviani** APROVADA
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Profª Drª. **Josiane Palma Lima** APROVADA
(Universidade Federal de Itajubá/UNIFEI)

Profª Drª. **Maria Rachel Russo Seydell** APROVADA
(Universidade Federal de Itajubá/UNIFEI)

Profª. Drª **Suelly Helena de Araújo Barroso** Aprovada
(Universidade Federal do Ceará/UFC)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e
Presidente da Comissão de Pós-Graduação
Prof. Associado **Paulo Cesar Lima Segantine**

Dedico este trabalho a meu marido Carlos, com muito amor e gratidão pelo incentivo e compreensão ao longo de todos esses anos, principalmente durante o desenvolvimento desta pesquisa; seu apoio e presença, bem como as palavras de carinho e de incentivo foram fundamentais para mais esta conquista.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por iluminar todos os meus passos;

Aos meus pais Edimar Pereira Fontenele e Margarida Barboza Fontenele, pelo apoio, amor e compreensão necessários à minha caminhada;

Ao Professor Associado José Leomar Fernandes Junior, pela orientação, apoio, compreensão e liberdade de trabalho;

Ao Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, pela infraestrutura disponibilizada para a realização desta tese;

À Universidade Estadual de Londrina - UEL, principalmente ao Centro de Tecnologia e Urbanismo (CTU), pela concessão de licença em tempo parcial desde o momento de meu ingresso em 2010 como professora efetiva nessa Instituição de Ensino Superior;

À Professora Dra. Raquel Souza Teixeira, chefe do Departamento de Construção Civil do CTU/UEL, pelo auxílio, compreensão e profissionalismo que foram muito importantes à conclusão dessa tese;

A todos os professores do Departamento de Construção Civil do CTU/UEL pelo apoio à minha licença em tempo parcial para a conclusão do programa de doutorado;

Às Professoras: Dra. Deize Dias Lopes e Dra. Tatiana Tavares Rodriguez, minhas colegas de trabalho e amigas, pelo apoio e carinho fundamentais à minha adaptação à cidade;

Aos meus queridos amigos-irmãos Lucy e Everaldo Pletz, por todo carinho e orações;

Aos Srs. Fernando Castro Ramos, Coordenador na OHL Brasil, e Mário G. Yamada, Gerente de Sinalização e Segurança Viária da OHL, pelo auxílio à aquisição de dados;

À concessionária de rodovias CENTROVIAS do grupo OHL Brasil, em especial ao Sr. Paulo Mendes Castro, ex-diretor superintendente e atual diretor da Autopista Litoral Sul, e Marcelo Adriano Silva, Supervisor de Pesagem, pelo grande apoio e informações fornecidas;

À concessionária de rodovias ECOVIAS do Grupo ECORODOVIAS, em especial ao Sr. Adolfo Machado de Magalhães, Coordenador de Pavimentação/Infraestrutura Viária, pelas informações e dados utilizados nesta pesquisa;

À concessionária de rodovias NOVA DUTRA do Grupo CCR, em especial ao Gestor de Atendimento Sr. Marcelo Chaim Resk, pelas informações e dados fornecidos;

A todos os colegas, funcionários e professores do Departamento de Transportes da EESC/USP que direta, ou indiretamente, contribuíram ao desenvolvimento desta pesquisa.

RESUMO

FONTENELE, H. B. **Representação do tráfego de veículos rodoviários de carga através de espectros de carga por eixo e seu efeito no desempenho dos pavimentos.** 2011. 287 p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

A caracterização das cargas do tráfego é de grande importância para o dimensionamento de pavimentos, bem como para a quantificação do desempenho para fins de gerência de pavimentos. A utilização de abordagens empíricas para determinar os efeitos das cargas do tráfego nas estruturas de pavimentos, datadas dos anos 1960, apresentam sérias limitações, pois seus resultados são válidos somente para os mesmos, ou muito similares, fatores intervenientes que prevaleciam quando do seu desenvolvimento. Os fatores relativos às solicitações do tráfego e às características dos veículos (tipo de eixo, tipo de rodagem, pressão de enchimento dos pneus e tipo de suspensão) são bem diferentes, atualmente, daquelas existentes há 50 anos. Tendo em vista que os modelos de desempenho são importantes ferramentas dos sistemas de gerência de pavimentos (SGP) para prever a evolução da condição ao longo do tempo e/ou tráfego acumulado e, portanto, dependentes de uma consistente caracterização do tráfego, o objetivo desta pesquisa foi analisar os efeitos da caracterização do tráfego sobre o desempenho dos pavimentos, a partir da geração de modelos estatísticos baseados no conceito proposto pelo método da AASHTO 2002, de espectros de carga por eixo dos veículos comerciais de carga, comparando-os com o conceito de equivalência de carga, desenvolvido a partir do AASHO Road Test na década de 1950. Dados de pesagens realizadas no ano de 2008 no Posto de Pesagem de Veículos da SP-160 – Rodovia dos Imigrantes, km 28, pista Sul, foram utilizados para o desenvolvimento dos espectros de carga e posterior modelagem. Testes estatísticos e práticos foram realizados para determinar a variabilidade mensal dos Fatores de Veículos (FV) em relação ao valor médio do ano de 2008. Apesar da análise estatística com a aplicação do teste *Kolmogorov-Smirnov* (K-S) ter apresentado diferenças significativas entre os espectros mensais e anuais, a variação observada nos fatores de tráfego não resultou em diferenças práticas na espessura final do pavimento. Os modelos estatísticos foram desenvolvidos separadamente para cada classe de veículo e de eixos que o compunha, tendo sido usadas distribuições de probabilidade Log-normal e Weibull para modelar os espectros de carga. Os parâmetros dos modelos foram obtidos através do método dos mínimos quadrados, complementado com a realização de testes K-S e Qui-quadrado, destacando-se a obtenção de coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,90. A comparação entre os resultados previstos pelos modelos e os dados originais, feita tanto pela abordagem empírica como empírico-mecanística, com uso dos programas computacionais ELSYM5 e MEPDG, evidencia o modelo Weibull como o mais indicado para aplicação em rodovias brasileiras com características de tráfego semelhantes às da Rodovia dos Imigrantes.

Palavras-chave: Veículos rodoviários. Solicitações do tráfego. Carga por eixo. Espectros de carga. Desempenho de pavimentos.

ABSTRACT

FONTENELE, H. B. Representation of road vehicle traffic load through axle load spectra and its effect on the pavement performance. 2011. 287 p. Thesis (Ph.D.). Engineering School of Sao Carlos, University of Sao Paulo, Sao Carlos, 2011.

The characterization of traffic loads is of great importance for pavement design, as well as for the measurement of performance in a pavement management system. The use of empirical approaches to determine the effects of traffic load on pavement structures, dating from the 1960's, presents serious limitations, since its results are just valid for the same or very similar intervening factors that prevailed at the time of its development. The traffic load factors and vehicle characteristics (axle type, tire type, tire inflation pressure, and suspension type) are quite different today from those existing 50 years ago. Given that the performance models are important tools of pavement management systems (PMS) to predict the evolution of pavement condition over time and/or accumulated traffic and therefore dependent on a consistent characterization of the traffic, the objective of this research was to analyze the effects of traffic characteristics on pavement performance through the generation of statistical models based on the concept proposed by the AASHTO 2002 method, axle load spectra of commercial vehicles, comparing them with the concept of load equivalence factor, developed through the AASHTO Road Test in the 1950s. Data collected in 2008 in a weighing station located on Immigrant Highway - SP-160, km 28, southern runway, were used for the development of load spectra and subsequent modeling. Practical and statistical tests were performed to determine the variability of monthly vehicle-factors (FV) to the mean value for the year 2008. Despite the statistical analysis, performed by applying the Kolmogorov-Smirnov (KS) test, have shown significant differences between the monthly and annual spectra variation, there were not practical differences in the final thickness of the pavement associated to changes in vehicle-factors. Statistical models were developed for each vehicle class and for its axles, having been used Log-normal and Weibull probability distributions to model the load spectra. The model parameters were obtained from the method of least squares, complemented by the KS and chi-square tests, being important to mention that the coefficients of determination (R^2) were greater than 0.90. The comparison between the results predicted by the models and the original data, made either by empirical and empirical-mechanistic approaches, with use of computer programs ELSYM5 and MEPDG, shows that the Weibull model is the most suitable for application in Brazilian highways with similar traffic characteristics to the Immigrants Highway.

Keywords: Road vehicles. Traffic load. Axle load spectra. Pavement performance.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 - Curva de desempenho de um pavimento adaptada de Haas, Hudson e Zaniewski (1994).....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 1.2 - Esquema de deformações críticas no interior do pavimento (Fernandes Junior, 1994).....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 2.1 - Tipos de eixos de veículos rodoviários de carga brasileiros.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 2.2 - Veículos adotados na classificação do DNIT (2007) – Quadro 1.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 2.3 - Veículos adotados na classificação do DNIT (2007) – Quadro 2.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 2.4 - Veículos adotados na classificação do DNIT (2007) – Quadro 3.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 2.5 - Veículos adotados na classificação do DNIT (2007) – Quadro 4.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 2.6 - Veículos adotados na classificação do DNIT (2007) – Quadro 5.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 2.7 - Posto de pesagem dinâmica na Rodovia dos Imigrantes SP-160, km 28 - Sul.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 2.8 - Posto de pesagem na Holanda: WIM + sistema de vídeo (VID).....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 2.9 - Pórtico e balança utilizada no sistema de medição na Suíça.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 2.10 - Tela do Software usado para criação da silhueta dos veículos.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 3.1- Fluxograma para dimensionamento empírico-mecanístico</i>	<i>72</i>
<i>Figura 4.1 - Exemplo de espectros de carga.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 4.2 - Espectro de carga por eixo para os ETD do veículo tipo 9 no Mississippi.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 4.3 - Esquema do modelo de distribuição mista.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 4.4 - Exemplo da determinação da espessura</i>	<i>110</i>
<i>Figura 4.5 - Previsão de deformação permanente nas trilhas de rodas</i>	<i>112</i>
<i>Figura 6.1 - Frequência de veículos por classe no PPV da SP 160 - km 28.....</i>	<i>140</i>
<i>Figura 6.2 - Espectro de Carga para o ESRS da classe 2S3.....</i>	<i>142</i>
<i>Figura 6.3 - Frequência Acumulada para o ESRS da Classe 2S3.....</i>	<i>142</i>
<i>Figura 6.4 - Espectro de Carga para o ESRD da classe 2S3.....</i>	<i>143</i>
<i>Figura 6.5 - Frequência Acumulada para o ESRD da Classe 2S3</i>	<i>144</i>
<i>Figura 6.6 - Espectro de Carga para o ETT da classe 2S3.....</i>	<i>144</i>
<i>Figura 6.7 - Frequência Acumulada para o ETT da Classe 2S3</i>	<i>145</i>
<i>Figura 6.8 - Espectro de carga para o ESRS da classe 3D4.....</i>	<i>146</i>
<i>Figura 6.9 - Frequência acumulada para o ESRS da classe 3D4.....</i>	<i>146</i>
<i>Figura 6.10 - Espectro de carga para o ETD1 da classe 3D4</i>	<i>147</i>
<i>Figura 6.11 - Frequência acumulada para o ETD1 da classe 3D4.....</i>	<i>148</i>
<i>Figura 6.12 - Espectro de carga para o ETD2 da classe 3D4</i>	<i>148</i>
<i>Figura 6.13 - Frequência acumulada para o ETD2 da classe 3D4.....</i>	<i>149</i>
<i>Figura 6.14 - Espectro de carga para o ETD3 da classe 3D4</i>	<i>149</i>

<i>Figura 6.15 - Frequência acumulada para o ETD3 da classe 3D4</i>	<i>150</i>
<i>Figura 6.16 - Espectro de carga para o ESRS da classe 3S3</i>	<i>151</i>
<i>Figura 6.17 - Frequência acumulada para o ESRS da classe 3S3.....</i>	<i>151</i>
<i>Figura 6.18 - Espectro de Carga para o ETD da classe 3S3.....</i>	<i>152</i>
<i>Figura 6.19 - Frequência acumulada para o ETD da classe 3S3</i>	<i>152</i>
<i>Figura 6.20 - Espectro de carga para o ETT da classe 3S3.....</i>	<i>153</i>
<i>Figura 6.21 - Frequência acumulada para o ETT da classe 3S3.....</i>	<i>154</i>
<i>Figura 6.22 - Espectro de carga para o ESRS da classe 2S2</i>	<i>155</i>
<i>Figura 6.23 - Frequência acumulada para o ESRS da classe 2S2.....</i>	<i>155</i>
<i>Figura 6.24 - Espectro de carga para o ESRD da classe 2S2</i>	<i>156</i>
<i>Figura 6.25 - Frequência acumulada para o ESRD da classe 2S2.....</i>	<i>156</i>
<i>Figura 6.26 - Espectro de carga para o ETD da classe 2S2.....</i>	<i>157</i>
<i>Figura 6.27 - Frequência acumulada para o ETD da classe 2S2</i>	<i>157</i>
<i>Figura 6.28 - Espectro de carga do ESRS e correspondente frequência acumulada anual para o veículo classe 2S3.</i>	<i>158</i>
<i>Figura 6.29 - Espectro de carga do ESRD e correspondente frequência acumulada anual para o veículo classe 2S3.</i>	<i>159</i>
<i>Figura 6.30 - Espectro de carga do ETT e correspondente frequência acumulada anual para o veículo classe 2S3.....</i>	<i>160</i>
<i>Figura 6.31 - Espectro de carga do ESRS e correspondente frequência acumulada anual para o veículo classe 3D4.</i>	<i>161</i>
<i>Figura 6.32 - Espectro de carga do ETD1 e correspondente frequência acumulada anual para o veículo classe 3D4.....</i>	<i>162</i>
<i>Figura 6.33 - Espectro de carga do ETD2 e correspondente frequência acumulada anual para o veículo classe 3D4.....</i>	<i>163</i>
<i>Figura 6.34 - Espectro de carga do ETD3 e correspondente frequência acumulada anual para o veículo classe 3D4.....</i>	<i>164</i>
<i>Figura 6.35 - Espectro de carga do ESRS e correspondente frequência acumulada anual para o veículo classe 3S3.</i>	<i>165</i>
<i>Figura 6.36 - Espectro de carga do ETD e correspondente frequência acumulada anual para o veículo classe 3S3.....</i>	<i>166</i>
<i>Figura 6.37 - Espectro de carga do ETT e correspondente frequência acumulada anual para o veículo classe 3S3.....</i>	<i>167</i>
<i>Figura 6.38 - Espectro de carga do ESRS e correspondente frequência acumulada anual para o veículo classe 2S2.</i>	<i>168</i>
<i>Figura 6.39 - Espectro de carga do ESRD e correspondente frequência acumulada anual para o veículo classe 2S2.</i>	<i>169</i>

<i>Figura 6.40 - Espectro de carga do ETD e correspondente frequência acumulada anual para o veículo classe 2S2.</i>	<i>170</i>
<i>Figura 6.41 - Comparação entre FEC_i empírico e empírico-mecanístico para o ESRS.....</i>	<i>183</i>
<i>Figura 6.42 - Comparação entre FEC_i para o ESRS entre os diferentes níveis de pressão de enchimento dos pneus</i>	<i>184</i>
<i>Figura 6.43 - Distribuições teóricas para o espectro de carga do ESRS do veículo 2S3....</i>	<i>195</i>
<i>Figura 6.44 - Evolução das trincas longitudinais (propagação de cima para baixo) para pressão de enchimento dos pneus de 80 e 120 psi – Espectros de carga por eixo originais.....</i>	<i>206</i>
<i>Figura 6.45 - Evolução das trincas por fadiga (propagação de baixo para cima) para pressão de enchimento dos pneus de 80 e 120 psi – Espectros de carga por eixo originais.....</i>	<i>207</i>
<i>Figura 6.46 - Evolução de afundamento nas trilhas de rodas para pressão de enchimento dos pneus de 80 e 120 psi – Espectros de carga por eixo originais</i>	<i>208</i>
<i>Figura 6.47 - Evolução de Irregularidade Longitudinal (IRI) para pressão de enchimento dos pneus de 80 e 120 psi – Espectros de carga por eixo originais</i>	<i>209</i>
<i>Figura 6.48 - Evolução das trincas longitudinais (propagação de cima para baixo) para pressão de enchimento dos pneus de 80 e 120 psi – Espectros de carga por eixo Weibull.....</i>	<i>210</i>
<i>Figura 6.49 - Evolução das trincas por fadiga (propagação de baixo para cima) para pressão de enchimento dos pneus de 80 e 120 psi – Espectros de carga por eixo Weibull</i>	<i>211</i>
<i>Figura 6.50 - Evolução de afundamento nas trilhas de rodas para pressão de enchimento dos pneus de 80 e 120 psi – Espectros de carga por eixo Weibull.....</i>	<i>212</i>
<i>Figura 6.51 - Evolução de Irregularidade Longitudinal (IRI) para pressão de enchimento dos pneus de 80 e 120 psi – Espectros de carga por eixo Weibull.....</i>	<i>213</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 2.1 - Expressões para fatores de equivalência de carga</i>	<i>44</i>
<i>Tabela 2.2 - Quantidades dos postos de pesagem no Brasil</i>	<i>52</i>
<i>Tabela 4.1 - Tamanho mínimo da amostra (em número de dias do ano) para estimar a distribuição de cargas por eixo.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabela 4.2 - Modelos relacionando os parâmetros de carga por eixo aos parâmetros de peso bruto e proporções de caminhões</i>	<i>96</i>
<i>Tabela 4.3 - Variáveis de entrada usadas nas Equações da AASHTO 1993</i>	<i>107</i>
<i>Tabela 4.4 - Parâmetros de entrada para análise de desempenho no MEPDG</i>	<i>111</i>
<i>Tabela 5.1 - Fatores de equivalência de carga por eixos do veículo 2C, considerando o espectro de carga anual.....</i>	<i>121</i>
<i>Tabela 5.2 - Volume diário médio de tráfego na SP 160 no ano de 2009.....</i>	<i>122</i>
<i>Tabela 5.3 - Porcentagem de veículos comerciais na faixa de projeto.....</i>	<i>123</i>
<i>Tabela 5.4 - Características do pavimento.....</i>	<i>124</i>
<i>Tabela 5.5 - Localizações usadas no ELSYM5 para cálculo das respostas estruturais.....</i>	<i>125</i>
<i>Tabela 5.6 - FEC empírico-mecanísticos para o ETT do veículo 2S3 com pressão de enchimento nos pneus de 80 psi.....</i>	<i>126</i>
<i>Tabela 5.7 - Valores críticos para o teste K-S em prova para 2 amostras.....</i>	<i>128</i>
<i>Tabela 5.8. Valores críticos para o teste K-S em prova para 1 amostra.....</i>	<i>132</i>
<i>Tabela 6.1 - Estatística para eixos simples</i>	<i>172</i>
<i>Tabela 6.2 - Estatística para eixos em tandem</i>	<i>172</i>
<i>Tabela 6.3 - FEC empíricos</i>	<i>176</i>
<i>Tabela 6.4 - Fatores de veículos (FV) para tráfego circulante na SP-160 no ano de 2008.</i>	<i>177</i>
<i>Tabela 6.5 - Número de solicitações considerando os FV oriundos dos pontos médios dos intervalos de classes de carga</i>	<i>177</i>
<i>Tabela 6.6 - FEC empírico-mecanísticos para pressões de enchimento dos pneus de 80 psi</i>	<i>178</i>
<i>Tabela 6.7 - FEC empírico-mecanísticos para pressões de enchimento dos pneus de 120 psi.....</i>	<i>179</i>
<i>Tabela 6.8 - Fatores de veículos empírico-mecanísticos individuais para pressão enchimento dos pneus de 80 psi</i>	<i>180</i>
<i>Tabela 6.9 - Fatores de veículos empírico-mecanísticos individuais para pressão de enchimento dos pneus de 120 psi.....</i>	<i>180</i>
<i>Tabela 6.10 - Número de solicitações (N) - Uso dos FV empírico-mecanísticos para 80 psi.....</i>	<i>181</i>

Tabela 6.11 - Número de solicitações (N) - Uso dos FV empírico-mecanísticos para 120 psi.....	182
Tabela 6.12 - Teste K-S para ESRS do veículo 2I2	186
Tabela 6.13 - Teste K-S para ESRS do veículo 3T6	187
Tabela 6.14 - Teste K-S para ESRD1 do veículo 2I2	188
Tabela 6.15 - Teste K-S para ESRD2 do veículo 3I3	188
Tabela 6.16 - Teste K-S para ETD do veículo 3C	189
Tabela 6.17 - Teste K-S para ETD3 do veículo 3D4	190
Tabela 6.18 - Teste K-S para ETT do veículo 2S3.....	190
Tabela 6.19 - Teste K-S para ETT do veículo 3S3.....	191
Tabela 6.20 - Variação das espessuras em função da variação dos FV ao mês.....	191
Tabela 6.21 - Parâmetros do modelo Log-normal	193
Tabela 6.22 - Parâmetros do modelo Weibull	194
Tabela 6.23 - Resultados do teste K-S para os modelos Log-normal e Weibull	197
Tabela 6.24 - Resultados do teste Qui-quadrado para os modelos Log-normal	198
Tabela 6.25 - Resultados do teste Qui-quadrado para os modelos Weibull	199
Tabela 6.26 - Comparação entre FEC e FV originais e previstos.....	201
Tabela 6.27 - Comparação do dimensionamento entre espectros originais e modelos	202
Tabela 6.28 - Valores de R^2 para os FEC empírico-mecanísticos.....	203
Tabela 6.29 - Comparação entre FV originais e previstos (modelos Log-normal e Weibull)	203
Tabela 6.30 - Comparação entre FV originais e previstos (junção modelos Log-normal e Weibull).....	204
Tabela 6.31 - Comparação de FV e “Ns” entre espectros originais e previstos (pressão de enchimento de pneus de 80 psi)	204
Tabela 6.32 - Comparação de FV e “Ns” entre espectros originais e previstos (pressão de enchimento de pneus de 120 psi)	205
Tabela 6.33 - Erros de previsão dos resultados provenientes do uso da pressão de enchimento de 120 psi em relação aos resultados provenientes do uso da pressão de 80 psi.....	214
Tabela 6.34 - Erros nas previsões dos modelos para pressões de enchimento de pneus de 80 psi, a partir do uso do MEPDG	215
Tabela 6.35 - Erros nas previsões dos modelos para pressões de enchimento de pneus de 120 psi, a partir do uso do MEPDG	215

LISTA DE SIGLAS

AASHO	American Association of State Highway Officials
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
BISAR	Bitumen Structures Analysis in Roads
CA	Concreto Asfáltico
CBR	Índice de Suporte Califórnia
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CSIR	Council for Scientific and Industrial Research
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ELSYM5	Elastic Layered System Model 5
ESAL	Equivalent Standard Axle Load
ESRD	Eixo Simples de Rodas Duplas
ESRS	Eixo simples de Rodas Simples
ETD	Eixo Tandem Duplo
ETT	Eixo Tandem Triplo
FEC	Fator de /equivalência de Cargas
FHWA	Federal Highway Administration
FV	Fator de Veículo
IRI	International Roughness Index
JULEA	Jacob Uzan Layered-Elastic Analysis
LTPP	Long Term Pavement Performance
MEPDG	Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
PBT	Peso Bruto Total
PBTC	Peso Bruto Total Combinado
PPV	Posto de Pesagem de Veículos
SGP	Sistemas de Gerência de Pavimentos
TDMA	Tráfego Diário Médio Anual
TTC	Truck Traffic Classification
USACE	United States Army Corps of Engineers
VDMA	Volume Diário Médio Anual
WESLEA	Waterways Experiment Station Layered-Elastic Analysis

WIM	Weight in Motion
WSDOT	Washington State Department of Transportation

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	27
1.1	Objetivo Geral	28
1.2	Objetivos Específicos	28
1.3	Justificativa	28
1.4	Considerações sobre Desempenho de Pavimentos.....	29
1.4.1	Sistemas de Gerência de Pavimentos.....	29
1.4.2	Serventia e Desempenho	30
1.4.3	Mecanismos de deterioração.....	32
1.4.3.1	Trincas por fadiga.....	33
1.4.3.2	Afundamento nas trilhas de rodas	33
1.4.4	Previsão do desempenho.....	34
1.5	Organização do Trabalho	35
2	CARACTERÍSTICAS DO TRÁFEGO	37
2.1	Volume.....	37
2.2	Veículos	38
2.2.1	Tipos	38
2.2.2	Tipos de Eixos.....	41
2.3	Cargas do Tráfego	42
2.3.1	Peso Bruto Total Combinado e Carga por Eixo	42
2.3.2	Equivalência entre cargas	43
2.3.3	Fator de veículo (FV).....	45
2.3.4	Limites legais.....	45
2.3.5	Medição das cargas: postos de pesagem de veículos (PPVs).....	51
2.3.6	Alguns sistemas de pesagem <i>WIM</i> na Europa	55
2.3.6.1	Holanda.....	55
2.3.6.2	Suíça	56
2.3.6.3	Alemanha	58
2.3.7	A situação de sobrecarga.....	58
2.3.8	Efeitos da sobrecarga e altos limites legais de carga sobre o pavimento	60
2.3.9	Rodagem.....	62
2.3.9.1	Os pneus.....	62
2.3.9.2	Pressão de inflação e pressão de contato	64
2.4	Conclusões do Capítulo	66

3	DIMENSIONAMENTO EMPÍRICO-MECANÍSTICO: GUIA DE PROJETOS AASHTO 2002	69
3.1	O Projeto NCHRP 1-37A.....	70
3.1.1	Guia de dimensionamento AASHTO 2002.....	71
3.1.2	O programa computacional	71
3.1.2.1	Os dados de entrada	73
3.1.2.2	Modelos de previsão de desempenho	75
3.1.3	AASHTO 1993 x AASHTO 2002.....	76
3.2	Conclusões do Capítulo	77
4	DISTRIBUIÇÃO DE CARGAS POR EIXO: ESPECTROS DE CARGA POR EIXO (AXLE LOAD SPECTRA).....	79
4.1	Considerações Iniciais	79
4.2	Desenvolvimento dos Espectros de Carga por Eixo	80
4.2.1	Tamanho da amostra	80
4.2.2	Os níveis de coletas de dados (abrangência)	83
4.2.3	Espectro de carga padrão	84
4.2.4	Espectros de carga por eixo do Mississippi	84
4.2.5	Espectros de carga por eixo de Washington.....	86
4.2.6	Espectros de carga por eixo de Lousiana	87
4.3	O Projeto NCHRP 1-39	88
4.4	Modelagem das Distribuições de Carga por Eixo.....	88
4.4.1	Modelo de distribuição combinada do Alabama.....	89
4.4.2	Modelo para parâmetros da distribuição de carga por eixo relacionados ao peso bruto e volumes de tráfego	93
4.4.3	Modelo de distribuição combinada Log-normal do Texas	97
4.4.4	Modelos de distribuição para os veículos pesados em dois países na Ásia.....	101
4.4.4.1	Modelo desenvolvido em Singapura	101
4.4.4.2	Modelo desenvolvido em Taiwan.....	103
4.5	O Efeito do Espectro de Carga por Eixo no Dimensionamento e Desempenho de Pavimentos	105
4.5.1	Reflexo das variações temporais e espaciais dos espectros de carga nas espessuras dos pavimentos.....	106
4.5.2	Consideração da diferença espacial dos espectros de carga no dimensionamento empírico-mecanístico	108
4.5.2.1	Espectro de carga local <i>versus</i> espectro de carga estadual no Alabama	108

4.5.2.2 Espectros de carga locais e estaduais <i>versus</i> espectros padrões do MEPDG	110
4.5.3 Comparação do desempenho entre a abordagem empírica e a mecanística	113
4.5.4 Propriedades dos espectros no desempenho de pavimentos flexíveis	114
4.6 Conclusões do Capítulo	115
 5 MÉTODO DE PESQUISA	 117
5.1 Coleta de Dados de Pesagens	117
5.2 Desenvolvimento das Distribuições Originais de Carga por Eixo (Espectros de Carga Originais).....	118
5.2.1 Organização dos dados.....	118
5.2.2 O desenvolvimento dos espectros de carga por eixo.....	118
5.3 Determinação de Fatores de Danos ao Pavimento.....	119
5.3.1 Fatores empíricos de equivalência de carga e de veículos.....	119
5.3.2 Cálculo convencional da vida útil.....	120
5.3.3 Fatores de equivalência de carga empírico-mecanísticos	124
5.3.4 Cálculo da vida útil	127
5.4 Ajuste às Distribuições de Carga – Modelagem	127
5.4.1 Escolha do tipo de espectro de carga: mensal x anual.....	127
5.4.1.1 Teste K-S: teste estatístico	128
5.4.1.2 Teste prático.....	129
5.4.2 O ajuste propriamente dito	129
5.4.2.1 Obtenção dos parâmetros da função de densidade de probabilidade.....	129
5.4.2.2 Teste do ajuste entre os espectros: modelo x original	131
5.5 Determinação do Efeito dos Espectros Teóricos no Dimensionamento Empírico e Empírico-mecanístico: AASHTO; USACE e ELSYM5.....	132
5.6 Determinação do Efeito do Espectro de Carga Teórico no Dimensionamento Empírico-Mecanístico a partir do uso do MEPDG	134
5.6.1 Critérios de desempenho	134
5.6.2 Tráfego.....	134
5.6.3 Clima.....	135
5.6.4 Estrutura.....	136
5.6.4.1 Propriedades de projeto de misturas asfálticas a quente.....	136
5.6.4.2 Camada 1.....	136
5.6.4.3 Camada 2.....	136
5.6.4.4 Camada 3.....	137
5.6.4.5 Camada 4.....	137

6	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	139
6.1	Configuração do Tráfego.....	139
6.2	Desenvolvimento das Distribuições Originais de Carga por Eixo.....	141
6.2.1	Espectros mensais de carga por eixo	141
6.2.1.1	Classe 2S3	141
6.2.1.2	Classe 3D4.....	145
6.2.1.3	Classe 3S3	150
6.2.1.4	Classe 2S2	154
6.2.2	Espectros anuais por eixo de carga.....	158
6.2.3	Considerações finais sobre os espectros originais de carga por eixo	172
6.3	Fatores de Danos e Número de Solicitações a partir dos Dados Originais	174
6.3.1	FEC e FV empíricos	174
6.3.2	Número “N” empírico	175
6.3.3	FEC e FV empírico-mecanísticos	178
6.3.4	Número “N” empírico-mecanístico	180
6.3.5	Comparação dos fatores de danos individuais	182
6.3.6	Considerações finais sobre fatores de danos e solicitações	184
6.4	Escolha do Tipo de Espectro de Carga por Eixo para o Ajuste.....	185
6.4.1	Variação nas distribuições de carga por eixo – teste estatístico	185
6.4.1.1	Resultados para os ESRS	186
6.4.1.2	Resultados para os ESRDs	187
6.4.1.3	Resultados para os ETDs.....	189
6.4.1.4	Resultados para os ETTs	190
6.4.2	Variação nos FV e espessuras totais do pavimento – teste prático	191
6.4.3	Considerações finais sobre a escolha do tipo de espectro	192
6.5	Modelagem: Ajuste às Distribuições de Carga por Eixo	192
6.5.1	Os parâmetros dos modelos.....	192
6.5.2	Testando a aderência dos espectros gerados pelos modelos aos espectros originais	196
6.5.3	Considerações finais sobre a modelagem dos espectros de carga	199
6.6	Efeito dos Espectros Teóricos no Dimensionamento	200
6.6.1	Empírico: AASHTO e USACE.....	200
6.6.2	Empírico-mecanístico: ELSYM5	202
6.6.3	Empírico-mecanístico: MEPDG	205
6.6.4	Considerações finais sobre os efeitos dos espectros teóricos	215
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	217

7.1	Introdução	217
7.2	Espectros de Carga por Eixo	218
7.3	FEC, FV e Número de Solicitações	218
7.4	Modelagem	219
7.5	Efeito dos Espectros	220
7.6	Conclusões Finais	221
7.7	Sugestões.....	223
REFERÊNCIAS		225
APÊNDICE A – Sumário com dados de entrada gerado pelo MEPDG		237
APÊNDICE B – Gráficos de espectros de carga e frequências acumuladas		243
APÊNDICE C – Gráficos de Fatores de Equivalência Individuais		257
APÊNDICE D – Gráficos de distribuições teóricas e original		263
APÊNDICE E – Cálculo dos FV e solicitações empírico-mecanísticos (dados originais e previstos)		269
APÊNDICE F – Curvas de desempenho geradas pelo MEPDG.....		279

1 INTRODUÇÃO

O tráfego de veículos representa um papel muito importante no dimensionamento de estruturas de pavimentos, bem como a representação do seu comportamento ao longo do tempo. No decorrer das últimas décadas muitos estudos têm sido desenvolvidos com o interesse de representar de forma mais próxima à realidade as condições impostas pelo carregamento oriundo dos veículos e os seus reflexos nos pavimentos, para que os projetos e sua posterior análise possam ser desenvolvidos da maneira mais fiel possível à situação vivida em campo.

Tais estudos se apoiaram na busca de estruturas eficientes que tenham um comportamento adequado e previsível mediante as inúmeras solicitações do tráfego esperado para o período de projeto. Tendo em vista que são bases fundamentais para um bom sistema de gerência a fim de auxiliar no emprego dos recursos disponíveis, não só a partir da escolha das corretas intervenções, mas também dos momentos propícios para tais.

As pesquisas realizadas com tal intuito sempre reforçam que a utilização das abordagens empíricas datadas dos anos 60 na consideração dos efeitos do tráfego nas estruturas de pavimentos vêm acompanhada de limitações, onde seus resultados são reproduzíveis somente para as mesmas, ou muito similares características da região do seu desenvolvimento. Atualmente, em termos de tráfego, as características dos veículos (tipo de eixo, tipo de rodagem, pressão de enchimento dos pneus e tipo de suspensão) e das cargas são bem diferentes daquelas existentes há 50 anos. Nas últimas décadas a vida remanescente dos pavimentos continuou sendo verificada sob bases empíricas e expressa em termos do número equivalente de solicitações do eixo padrão de 8,2 t, utilizando-se da lei da quarta potência para converter o tráfego misto em cargas equivalentes por eixo.

Atualmente, como resultado do avanço relacionado às pesquisas destinadas à representação do comportamento das estruturas mediante as solicitações do tráfego, observa-se a tendência na substituição da tradicional base puramente empírica pela empírico-mecanística. Neste quesito um dos métodos mais recentes foi proposto pela *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) no projeto 1-37 A, o Método AASHTO 2002, que inseriu um novo conceito para caracterização do tráfego: os espectros de carga por eixo (*Axle Load Spectra*).

A partir do exposto, afirma-se que o uso de métodos que empregam o empirismo na caracterização do tráfego, elaborados para condições totalmente diferentes das encontradas atualmente, principalmente no Brasil, podem gerar resultados divergentes aos da real situação em campo. Assim, tendo em vista que os modelos de desempenho são importantes ferramentas dos sistemas de gerência de pavimentos para prever a evolução da condição ao longo do tempo e/ou tráfego acumulado e, portanto, dependentes de uma adequada quantificação das cargas do tráfego, justifica-se a pesquisa para analisar os efeitos sobre os pavimentos da caracterização do tráfego baseada no conceito de espectros de carga por eixo dos veículos comerciais proposto pelo método da AASHTO 2002.

1.1 Objetivo Geral

Analisar os efeitos sobre o desempenho dos pavimentos da caracterização do tráfego a partir de modelos estatísticos baseados no conceito de espectros de carga por eixo dos veículos rodoviários comerciais de carga, para que posteriormente possam ser aplicados a análises estruturais e à gerência de pavimentos.

1.2 Objetivos Específicos

- Gerar as distribuições de carga por eixo (espectros de carga) para cada classe de veículos rodoviários de carga, com base em dados relativos aos pesos dos eixos ou conjunto de eixos dos veículos de um posto de pesagem do Estado de São Paulo;
- Desenvolver as funções de ajuste às distribuições de carga;
- Comparar estatisticamente as funções de ajuste e escolher a que melhor represente o espectro de cargas;
- Calcular e comparar os fatores de danos empíricos e empírico-mecanísticos gerados com os dados originais (uso dos espectros de carga originais) e os previstos (uso do modelo estatístico), bem como os respectivos números de solicitações;
- Executar uma análise empírico-mecanística com uso do software MEPDG (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*) com uso dos espectros originais de carga por eixo e dos espectros modelados.

1.3 Justificativa

O tráfego é um dos fatores mais importantes a ser considerado no dimensionamento de um pavimento e na previsão de seu comportamento ao longo do tempo em serviço, onde as

cargas provenientes estão intimamente relacionadas aos danos gerados aos pavimentos. Dessa forma, é imprescindível que a sua consideração seja feita de forma mais próxima possível da realidade, considerando assim a situação existente nos tempos atuais.

Os métodos até hoje comumente utilizados são baseados em experimentos datados da década de 60, onde a realidade era outra em termos de tipos de veículos, de dimensões, de configurações e de cargas transportadas. Atualmente novas concepções têm sido desenvolvidas para superar as limitações impostas pelos procedimentos provenientes dessa época, sendo a tratada neste trabalho relativa aos espectros de carga por eixo.

Ao longo dos últimos anos estudos têm sido desenvolvidos para preencher a lacuna existente entre o conceito antigo utilizado na caracterização do tráfego (baseado em cargas equivalentes) e o novo (baseado nos espectros de carga por eixo). Em tais estudos modelos matemáticos foram desenvolvidos para esboçar os dados necessários de tráfego da maneira mais fiel possível ao existente em campo. Assim, os locais que carecem de fontes de dados para uma correta análise de tráfego podem ser beneficiados, pois, infelizmente, nem todos os locais dispõem de equipamentos para as devidas coletas de cargas dos veículos rodoviários, ficando então o procedimento relativo ao projeto e ao gerenciamento de pavimentos dependente de aproximações oriundas de informações do volume de tráfego e contagem de eixos.

Assim, neste trabalho pretende-se contribuir para minimizar os custos das coletas de dados necessários não só ao processo de projeto de pavimentos, mas também à gerência de pavimentos, sendo importante ressaltar que isso não significa a extinção dos processos de coleta.

1.4 Considerações sobre Desempenho de Pavimentos

Em função do conhecimento que a caracterização das cargas do tráfego é de grande importância para o dimensionamento de pavimentos, bem como para a quantificação do desempenho para fins de gerência de pavimentos, verifica-se a necessidade de fazer uma breve abordagem sobre os sistemas de gerência de pavimentos.

1.4.1 Sistemas de Gerência de Pavimentos

Um Sistema de Gerência de Pavimentos (SGP), segundo DNER (2000), é composto por planejamento, projeto, construção e manutenção dos pavimentos, e tem como principais

fatores condicionantes externos os recursos orçamentários, os dados necessários ao sistema e as diretrizes políticas e administrativas. É um sistema que, de acordo com Kulkarni e Miller (2003), provou ser uma ferramenta eficaz para maximizar o uso dos limitados recursos disponíveis para manutenção e reabilitação de pavimentos.

O SGP necessita de informações referentes ao acompanhamento das condições do pavimento em serviço de forma que seja possível prever o seu comportamento e planejar a adequada política de manutenção.

A decisão dentro de um SGP pode ser considerada em nível de rede ou em nível de projeto. A gerência em nível de rede indica os trechos prioritários da malha rodoviária para receberem os investimentos em manutenção, incluindo a alternativa ideal e o momento de aplicação. Nesse nível de decisão não são apresentados detalhes de projeto tendo em vista que as indicações são feitas com base em dados que representam a totalidade da rede. Já o processo decisório em nível de projeto consta de atividades detalhadas do próprio projeto e da execução das intervenções em um trecho específico, confirmando e detalhando dessa maneira as recomendações da gerência em nível de rede. (HASS, HUDSON E ZANIEWSKI, 1994; DNER, 2000)

1.4.2 Serventia e Desempenho

Os pavimentos são dimensionados, segundo o DNIT (2006b), para durarem determinados períodos. Em tais períodos, designados por ciclos de vida, o pavimento inicia numa condição ótima até alcançar uma condição ruim; a esse decréscimo de condição atribui-se a denominação de deterioração.

Há dois conceitos importantes na área da Gerência de Pavimentos: a Serventia e o Desempenho de pavimentos. De acordo com Haas, Hudson e Zaniewski (1994), entende-se por serventia a habilidade de um pavimento servir ao tráfego com segurança, conforto e economia, sendo expressa em termos de satisfação do usuário ou de qualidade da superfície de rolamento de uma seção do pavimento. Enquanto que o desempenho, definido pelos mesmos autores, diz respeito à medida de serventia de um pavimento ao longo do tempo, ou após um determinado número de aplicações de carga, ou ainda a evolução da deterioração sob a ação do tráfego e dos agentes climáticos ao longo da vida em serviço do pavimento. Na Figura 1.1 é apresentada uma curva de desempenho utilizada para expressar a variação da serventia de um dado pavimento ao longo de sua vida em serviço.

Figura 1.1 - Curva de desempenho de um pavimento adaptada de Haas, Hudson e Zaniewski (1994)

Usando como base DNIT (2006b) pode ser afirmado que o gráfico da Figura 1.1 representa que num dado ciclo de vida as ações do tráfego e do ambiente, a partir do início das operações do pavimento, causam deteriorações que de início são imperceptíveis, mas que tendem a evoluir fazendo com que o desempenho decline até determinado nível de deterioração.

Ainda tomando como base o trabalho do DNIT (2006b), divide-se o desempenho em três partes: funcional; estrutural e relativo à segurança. O desempenho funcional diz respeito à capacidade do pavimento em fornecer a serventia adequada em termos de qualidade de rolamento. Já o desempenho estrutural refere-se à capacidade do pavimento em manter sua integridade estrutural, sem apresentar falhas significativas. O desempenho quanto à segurança está ligado às características de resistência à derrapagem e ao potencial de hidroplanagem.

É importante ainda salientar que há diversos fatores que afetam o desempenho de um pavimento rodoviário e conforme Shiyab (2007) podem ser agrupados nas seguintes categorias:

- *Fatores associados ao tráfego:* nessa categoria estão inclusos os volumes de tráfego; cargas de eixos; número equivalente de carga; pressão de enchimento dos pneus; tipos de eixos dos caminhões e configuração; tempo e mecanismo de aplicação de carga;
- *Composição e propriedade dos materiais:* fazem parte a capacidade de suporte; distribuição granulométrica; módulo de elasticidade e de resiliência e o coeficiente de Poisson;

- *Fatores associados ao ambiente:* estão relacionados à temperatura; congelamento e descongelamento; umidade; precipitação e águas subterrâneas;
- *Outros:* inclinação longitudinal e transversal; existência de dispositivos de drenagem; espessura do pavimento; nível de manutenção; micro e macro textura da superfície; nível inicial de irregularidade longitudinal e as juntas de construção.

1.4.3 Mecanismos de deterioração

As formas de deterioração de um pavimento não estão limitadas apenas às cargas do tráfego, elas podem surgir em função do material usado na estrutura, das condições ambientais etc. De uma forma geral as principais deteriorações no pavimento são: trincas por fadiga; afundamento nas trilhas de rodas; trincas térmicas e irregularidade longitudinal.

Nesse trabalho, como o assunto se refere à caracterização do tráfego e seu consequente efeito nas condições do pavimento, as deteriorações consideradas de imediato são aquelas relacionadas às solicitações do tráfego: as trincas por fadiga e os afundamentos nas trilhas de rodas. Dessa forma, assim como no trabalho de Wang (2005), as trincas térmicas e irregularidades não são consideradas, pelo menos de imediato, visto que as trincas térmicas não estão relacionadas às tensões resultantes das cargas aplicadas sobre o pavimento e a irregularidade é uma função de todos os outros defeitos.

A ação das cargas do tráfego sobre os pavimentos provoca deformações recuperáveis e permanentes, sendo as primeiras decorrentes do comportamento elástico da estrutura do pavimento que cessam quando o carregamento é extinto. Tais deformações dependem não somente da magnitude da carga aplicada, mas também das características dos materiais constituintes das camadas do pavimento, da geometria do carregamento e da pressão de enchimento dos pneus.

Da aplicação de carga resulta um estado de tensões na estrutura ao longo de sua profundidade, sendo que nos modelos de análise mais simplistas o meio é considerado elástico, isotrópico e homogêneo. Assim, dos princípios da teoria da elasticidade as tensões abaixo da área carregada diminuem à medida que aumenta a profundidade e há um afastamento do ponto de aplicação e consequentemente, tem-se que a deflexão provocada pelo carregamento diminui ao longo das camadas.

Na Figura 1.2 está indicado, esquematicamente, o estado de tensões sob a área carregada apresentando de maneira destacada as deformações críticas nos pavimentos (denominadas

como respostas estruturais do pavimento) relacionadas aos principais tipos de deterioração e a consequente ruptura estrutural do pavimento: a deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento ($\epsilon_{ht,1}$); deformação vertical de compressão na fibra inferior do revestimento ($\epsilon_{vc,1}$); tensão horizontal de tração na fibra inferior da camada tratada com cimento ($\sigma_{ht,2/3}$); e a deformação vertical de compressão no topo do subleito ($\epsilon_{vc,m}$).

Figura 1.2 - Esquema de deformações críticas no interior do pavimento (Fernandes Junior, 1994)

1.4.3.1 Trincas por fadiga

As trincas por fadiga se dividem em dois tipos: a *bottom-up* (aquelas que iniciam na fibra inferior do revestimento e são refletidas para a superfície – trincas por reflexão) e as *up-down* (aquelas que têm início na superfície do pavimento e se propagam para o interior do pavimento). As trincas *bottom-up* são causadas pelas deformações horizontais de tração na fibra inferior do revestimento, já as *up-down* são devidas às excessivas tensões de cisalhamento e/ou deformações na superfície do revestimento (NCHRP, 2004).

1.4.3.2 Afundamento nas trilhas de rodas

Duas abordagens relacionadas ao surgimento de deterioração do tipo afundamento nas trilhas de rodas têm sido usadas: a deformação vertical no topo do subleito e o acúmulo das deformações permanentes ao longo de todas as camadas do pavimento. Segundo Salama, Haider e Chatti (2007) a segunda forma não tem sido largamente usada por causa das

dificuldades na determinação das características elasto-plásticas dos materiais dos pavimentos. No método da AASHTO 2002 o acúmulo das deformações permanentes ao longo de todas as camadas do pavimento é considerado.

1.4.4 Previsão do desempenho

Nos SGPs são usados modelos para prever o desempenho do pavimento e assim elaborar planos de trabalho e estimar orçamentos relacionados às estratégias de manutenção e reabilitação. De acordo com Haas, Hudson e Zaniewski (1994) tais modelos podem ser do tipo subjetivo (experiência dos engenheiros e especialistas é formalizada a partir de processos de transição, como processo de Markov), empírico (formulados a partir de análises estatísticas de dados de desempenho em campo), empírico-mecanístico (relação das respostas estruturais com dados experimentais de desempenho do pavimento) e puramente mecanístico (ainda não desenvolvidos, pois as respostas estruturais devem estar associadas à deterioração). Em função da abordagem neste trabalho do método AASHTO 2002, o qual é de bases empírico-mecanísticas, tratar-se-á apenas desses tipos de modelos de desempenho.

As respostas estruturais utilizadas nos modelos empírico-mecanísticos são então obtidas por meio de programas computacionais. Nos pavimentos flexíveis os programas baseados na teoria elástica linear têm sido amplamente utilizados nos procedimentos relativos a análises e dimensionamento de pavimentos, por exemplo: ELSYM5 (*Elastic Layered System Model 5*); BISAR (*Bitumen Structures Analysis in Roads*); WESLEA (*Waterways Experiment Station Layered-Elastic Analysis*); JULEA (*Jacob Uzan Layered-Elastic Analysis*); MNLAYER; entre outros. O programa de dimensionamento da AASHTO 2002 usa o programa JULEA para calcular as respostas estruturais dos pavimentos flexíveis.

Os modelos de desempenho empírico-mecanísticos, ou as chamadas funções de transferência, desenvolvidos principalmente para previsão de trincas por fadiga e afundamentos nas trilhas de rodas, fornecem como resultado o número de solicitações necessárias para que o pavimento alcance a ruptura em função dos referidos defeitos. De acordo com Retherford e MacDonald (2010) os modelos seguem uma forma geral e a diferença entre eles está nas constantes determinadas empiricamente. Nas Equações 1 e 2 são apresentadas as formas gerais das funções de transferência para as trincas por fadiga e os afundamentos nas trilhas de rodas, respectivamente.

$$N_f = f_1 \times (\varepsilon_t)^{f_2} \times (E_1)^{f_3} \quad (1)$$

$$N_r = f_4 \times (\varepsilon_v)^{-f_5} \quad (2)$$

onde:

- N_r : número de repetições de carga até a ruptura por trincas por fadiga;
- N_r : número de repetições de carga até a ruptura por afundamentos nas trilhas de rodas;
- f_1, f_2, f_3, f_4 e f_5 : constantes determinadas empiricamente;
- ε_t : deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento;
- ε_v : deformação vertical de compressão no topo do subleito;
- E_r : módulo de elasticidade do revestimento.

1.5 Organização do Trabalho

O trabalho encontra-se dividido em 7 capítulos com a seguinte distribuição:

Capítulo 1 – É a parte introdutória onde são apresentados os objetivos, justificativa e uma breve exposição sobre os sistemas de gerência de pavimentos;

Capítulo 2 – Contém relevantes considerações sobre o tráfego de veículos, sendo apresentadas as principais características imprescindíveis para o dimensionamento e análise do desempenho de pavimentos;

Capítulo 3 – Capítulo no qual é abordado o dimensionamento empírico-mecanístico com enfoque no método de dimensionamento proposto pelo Projeto NCHRP 1-37 A, o Método AASHTO 2002, apresentando informações sobre o guia de dimensionamento e o programa computacional utilizado, bem como finalizando com uma comparação entre algumas características do método empírico AASHTO 1993 e do empírico-mecanístico AASHTO 2002;

Capítulo 4 – Constituído pelo detalhamento dos Espectros de Carga por Eixo (*Axle Load Spectra*), como: definições; processos para o seu desenvolvimento; modelagem estatística e o efeito no desempenho dos pavimentos;

Capítulo 5 – São relatadas de maneira detalhada todas as etapas seguidas no procedimento experimental deste trabalho;

Capítulo 6 – Os principais resultados obtidos na pesquisa e algumas conclusões parciais são apresentados no capítulo;

Capítulo 7 – Apresentam-se as principais conclusões e algumas sugestões para trabalhos posteriores

2 CARACTERÍSTICAS DO TRÁFEGO

O tráfego rodoviário é formado por veículos de diferentes configurações e magnitude de cargas e o conhecimento adequado das suas características é muito importante para o estudo do comportamento de pavimentos, tanto rígidos como flexíveis, e os danos causados a essa estrutura. Essas informações podem contribuir também para a interpretação das causas da deterioração dos pavimentos, delineando as tendências gerais das propagações de defeitos tipicamente causados pela ação do tráfego.

Neste capítulo são abordadas as características relacionadas ao tráfego importantes para o projeto e análise estrutural do pavimento e, portanto, conceitos utilizados ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Volume

De maneira simples o volume de tráfego é definido como “o número de veículos que atravessam uma determinada seção transversal de uma via na unidade de tempo” e para sua determinação é importante conhecer a composição do tráfego, ou seja, a proporção de cada tipo de veículo na corrente de tráfego visto a diferença existente entre as configurações dos caminhões e ônibus.

O Volume Diário Médio (VDM), muito utilizado, geralmente é obtido com base no cálculo de 365 dias para considerar toda a variação do tráfego, em termos semanais e mensais, que utiliza a via englobando todos os veículos em ambos os sentidos desta. Este volume é então definido como VDM anual (VDMA). A melhor maneira de quantificar os volumes dos veículos é através de contagens em campo (contagens classificatórias e volumétricas), mas apenas quando as vias já existem. Tais contagens são realizadas, geralmente, em períodos de sete dias, durante 24h, com uso de equipamentos automatizados instalados na pista ou simplesmente de forma visual com registro em formulário específico (DNIT, 2006c). É importante ressaltar que nas contagens manuais são adotadas as nomenclaturas indicadas pelo DNIT para os veículos rodoviários de carga, as quais serão abordadas no item seguinte.

Além das contagens manuais podem ser realizadas contagens automatizadas. A *National Cooperative Highway Research* trata no relatório nº 509 sobre os equipamentos para coletas de dados de carregamento de tráfego, onde os dados relativos ao volume e à distribuição

das cargas de tráfego podem ser obtidos a partir de equipamentos de pesagem em movimento - *Weigh in motion (WIM)*.

Em função de estações *WIM* apresentarem um maior custo de aquisição, bem como maior dificuldade de instalação e operação, outras técnicas tem sido utilizadas para coleta dos dados de tráfego, como os sensores dispostos no pavimento. A forma não intrusiva com sensores que não são colocados fisicamente no pavimento, mas que monitoram o tráfego acima ou na lateral da estrada tem a vantagem de não estarem sujeitos ao impacto das cargas dos veículos ou das tensões resultantes da interação do pavimento e o ambiente. Apesar de tais vantagens essa tecnologia apresenta limitações relativas à maior dificuldade de detectar e contar os eixos dos veículos (Hallenbeck e Weinblatt, 2004)

Bunchanan (2004) relatou em seu trabalho que no Mississippi o volume de tráfego é geralmente determinado com o uso de registradores automáticos de tráfego compostos por uma espécie de interruptores de ar que registram as aplicações de carga.

2.2 Veículos

2.2.1 Tipos

Conforme comentado no Capítulo 1, a presente pesquisa está relacionada à análise dos efeitos sobre os pavimentos da caracterização do tráfego a partir do conceito proposto no método da AASHTO 2002 de espectros de carga por eixo dos veículos de carga. Assim, neste item apresenta-se a classificação de veículos brasileiros e americanos, sendo a primeira abordagem necessária em função da área de estudo e a segunda em função da origem do método utilizado neste trabalho.

De acordo com DNIT (2005) são cinco os tipos básicos de veículos para efeito de projeto viário:

- *Veículo de passageiros (VP)*: representa os veículos leves, similares em termos geométricos e operacionais com o automóvel, incluindo vans, utilitários, pick-ups e similares;
- *Veículo comercial rígido (CO)*: são os veículos não articulados compostos por uma unidade tratora simples, abrangem os caminhões e ônibus convencionais de dois eixos e seis rodas;

- *Ônibus de longo percurso (O)*: grupo que representa os veículos comerciais rígidos de maiores dimensões. Incluem os ônibus de turismo e caminhões longos, geralmente de três eixos e dimensões superiores ao veículo tipo CO;
- *Semirreboques (SR)*: grupo dos veículos rodoviários de carga articulados, compostos de unidade tratora simples e um semirreboque;
- *Reboques (RE)*: representa os veículos rodoviários de carga com reboque; é composto por uma unidade tratora simples, um semirreboque e um reboque e é conhecido como bitrem.

O sistema de classificação adotado pelo DNIT atribui a cada classe de veículo de carga um código alfanumérico onde o primeiro algarismo significa o número de eixos do veículo simples ou unidade tratora, enquanto que o segundo, caso exista, representa a quantidade de eixos da(s) unidade(s) rebocada(s).

De acordo com DNIT (2006c) as letras significam:

- C → Veículo simples (caminhão ou ônibus) ou veículo trator + reboque;
- S → Veículo trator (cavalo mecânico) + semirreboque;
- I → Veículo trator + semirreboque com distância entre eixos maior que 2,40 m (eixos isolados);
- J → Veículo trator + semirreboque com um eixo isolado e outro em tandem;
- D → Combinação dotada de 2 (duas) articulações;
- T → Combinação dotada de 3 (três) articulações;
- Q → Combinação dotada de 4 (quatro) articulações;
- X → veículos especiais (usados para transportar cargas excepcionais em peso ou dimensões, possuem mais de 9 eixos, necessitando, portanto, de uma Autorização Especial de Tráfego - AET)
- B → ônibus.

Já a *Federal Highway Administration* (FHWA) desenvolveu uma classificação que divide o tráfego em 13 categorias, sendo que da classe 4 a 13 fazem parte os veículos rodoviários de carga. Em resumo as categorias consideradas por este órgão, de acordo com Hallenbeck (1991) e Smith e Diefenderfer (2009), são:

- *Classe 1*: motocicletas (todos os veículos motorizados de duas ou três rodas);
- *Classe 2*: carros de passageiros (sedans, *station wagon*, carros de passageiros rebocando *trailers* recreacionais e leves);

- *Classe 3:* Veículos unitários de dois eixos, quatro pneus (*pick ups*, vans, *motor homes*, ambulâncias, carros fúnebres, e outros rebocando *trailers* recreacionais e leves);
- *Classe 4:* Ônibus (esta categoria inclui somente ônibus tradicionais de passageiros, incluindo ônibus escolar; ônibus modificados deverão ser classificados como caminhões e classificados de modo apropriado);
- *Classe 5:* Caminhões unitários de dois eixos, seis pneus (todo caminhão de chassi único, incluindo caminhões, veículos de camping e recreacionais, e motor homes, que têm dois eixos e duas rodas traseiras);
- *Classe 6:* Caminhões unitários de três eixos (todo caminhão de chassi único, incluindo caminhões, veículos de camping e recreacionais, e motor homes, que têm três eixos);
- *Classe 7:* Caminhões unitários de quatro ou mais eixos;
- *Classe 8:* Todos os veículos de quatro ou menos eixos que são formados por duas unidades;
- *Classe 9:* Todos os veículos de cinco eixos que são formados por duas unidades;
- *Classe 10:* Todos os veículos de seis ou mais eixos que são formados por duas unidades;
- *Classe 11:* Todos os veículos de cinco ou menos eixos que são formados por três ou mais unidades;
- *Classe 12:* Todos os veículos de seis eixos que são formados por três ou mais unidades;
- *Classe 13:* Todos os veículos de sete ou mais eixos que são formados por três ou mais unidades.

De acordo com as definições da FHWA, percebe-se que dentro de uma mesma classe a configuração de eixos pode mudar o que dificulta a equivalência entre as classes de veículos da FHWA e as do DNIT para a aplicação no método empírico-mecanístico AASHTO 2002. De acordo com os relatos observados nos trabalhos referenciados nesta pesquisa, concernentes ao desenvolvimento das distribuições de carga, ao longo dos EUA os veículos de maior frequência nas rodovias eram os de classe 9 (o que pode corresponder, por exemplo, às classes 2S3, 2I1, 2I3, 3S2 do DNIT) seguido pelos de classe 5 (correspondentes à classe 2C do DNIT).

2.2.2 Tipos de Eixos

Em virtude da diversidade de configuração de eixos dos veículos rodoviários, faz-se necessária a sua detalhada abordagem. Os tipos de eixos de veículos rodoviários de carga podem ser de dois tipos: o isolado, chamado de eixo simples; e os em conjunto, denominados de eixos em tandem. Tais eixos podem ser dotados de apenas uma roda na extremidade (rodas simples) ou duas rodas (rodas duplas). É importante notar que existem combinações de eixos simples de rodas simples com eixos simples de rodas duplas em ônibus, o que não configura um eixo tipo tandem duplo.

O DNIT (2007) chama a atenção para os conjuntos de 2 ou 3 eixos onde as distâncias entre eixos forem maiores que 2,40 m, pois nesse caso estes serão considerados isolados. Na Figura 2.1 os tipos de eixos de veículos rodoviários que circulam nas rodovias brasileiras são apresentados.

Figura 2.1 - Tipos de eixos de veículos rodoviários de carga brasileiros

Fonte: DNIT (2007)

Uma diferença importante entre a situação brasileira e de outros países como Estados Unidos deve ser ressaltada com relação aos tipos de eixos. Diferentemente do Brasil, em outros países a frequência dos eixos ETTs em vários trabalhos é relatada como inexpressiva não ultrapassando 5%, tal situação foi observada em Turochy, Baker e Timm (2005), Timm, Tisdale e Turochy (2005), Haider e Harichandran (2007), Haider e Harichandran (2007b), Prozzi e Hong (2007) e Salama, Haider e Chatti (2007).

Além dessas pesquisas, Kim *et al* (1998) relataram que para desenvolver as distribuições de carga por eixo com os dados da região Norte Central do Programa LTPP (*Long Term Pavement Performance*) as informações de carga relativas aos ETTs também foram ignoradas, tendo em vista que de todos os eixos contados os ETTs correspondiam a apenas 1%. Os eixos simples corresponderam a 50% dos eixos verificados e os ETD a 49%, sendo que os ETD foram considerados com 80% de contribuição aos ESALs (*Equivalent Standard Axle Load*), os eixos simples com 19% e os ETT com 1%.

Vale ressaltar que no caso do Brasil é diferente, pois de acordo com Fernandes Junior, Pais e Pereira (2007), os ESRS equipados com pneus convencionais podem ser responsáveis por grande parte da deterioração dos pavimentos, o que torna preocupante a elevação do limite de carga permitido para esse tipo de eixo (de 5 t para 6 t). Ainda sobre este assunto, mas não relacionado ao Brasil, Wang e Machemehl (2008) estudaram os efeitos do aumento das cargas de ESRS direcionais no desempenho dos pavimentos e observaram que, com o aumento das cargas nesses tipos de eixos, o efeito de trincamento do pavimento é dominante quando comparado com o efeito das outras configurações com rodas duplas.

2.3 Cargas do Tráfego

2.3.1 Peso Bruto Total Combinado e Carga por Eixo

O Peso Bruto Total (PBT) de um veículo é considerado, de acordo com DNER (1997), aquele proveniente da somatória da tara e da carga deste, sendo o Peso Bruto Total Combinado (PBTC) aquele resultante da soma dos pesos brutos das unidades que compõem o veículo. Seus valores máximos legais são aqueles estabelecidos pelo Regulamento do Código Nacional de Trânsito.

No que concerne ao reflexo de sua aplicação no pavimento, Fernandes Júnior (1994) chama a atenção que não há uma relação direta do PBTC e o desempenho do pavimento, ou seja, a deterioração está ligada à carga por eixo. Assim se o veículo estiver pesado não significa que ele será danoso ao pavimento, desde que a carga total esteja distribuída adequadamente entre os eixos do veículo.

Para exemplificar que o desempenho está relacionado à carga por eixo, faz-se uso aqui das conclusões obtidas no trabalho de Hussain e Parker (2006) que verificaram que veículos com 2 eixos danificam mais que os veículos de 3 e 5 eixos. Sadeghi e Fathali (2007) compararam veículos de 4 e 5 eixos, obtendo que o veículo com menos eixos proporcionava

maiores valores de deformações na fibra inferior do revestimento e no topo do subleito, portanto sendo causador de mais deteriorações.

2.3.2 Equivalência entre cargas

O conceito de equivalência entre cargas surgiu da observação que em estruturas idênticas de pavimentos, os efeitos destrutivos ocasionados por veículos diferentes ao longo do tempo são desiguais, emergindo um critério comparativo entre os veículos. Ao efeito destrutivo pontual a cada passagem de uma carga individual atribui-se a terminologia de dano, sendo que a ruptura do pavimento será ocasionada por efeito do acúmulo de uma dada quantidade sucessiva de danos – Hipótese de Miner (Miner, 1945).

De forma a quantificar os danos causados no pavimento, Yoder e Witczak (1975) indicaram que os Fatores de Equivalência de Cargas (FEC) definem o dano causado pela passagem de um veículo qualquer em relação ao dano causado por um eixo considerado como padrão, num mesmo tipo de pavimento.

Assim, a definição e quantificação desses efeitos foi o principal objetivo da *AASHO Road Test*, onde foi estabelecido como eixo equivalente padrão o eixo simples de rodas duplas de 8,2 t (80,1 kN), espaçadas de 300 mm (cada conjunto de rodas duplas), desenvolvendo, de acordo com HRB (1962), o conceito conhecido como Equivalente de carga por eixo padrão (*Equivalent Standard Axle Load – ESAL*).

No experimento da AASHO, de acordo com HRB (1962), ficou estabelecido que o dano ao pavimento devido à passagem de cada eixo de carga simples individual pode ser estimado pela Lei da Quarta Potência. De acordo com essa lei o dano causado ao pavimento aumenta exponencialmente com o aumento da carga por eixo, conforme é expresso pela Equação 3:

$$FEC = \left(\frac{x_i}{L_s} \right)^m \quad (3)$$

onde:

- x_i : peso da carga por eixo no i-ésimo lote;
- L_s : carga por eixo padrão com o mesmo número de eixos de x_i (80,1 kN para eixo simples e 151,2 kN para eixos tandem duplo);
- m : potência que denota o dano relativo ao pavimento por uma dada carga x_i .

Alguns modelos de obtenção dos FEC foram tomados tradicionalmente ao longo do tempo, como por exemplo, os da AASHTO e os do USACE (DNIT, 2006b) Na Tabela 2.1 são listados os modelos comentados anteriormente.

Tabela 2.1 - Expressões para fatores de equivalência de carga

Tipo de eixo	AASHTO	Faixas de Carga (t)	USACE
ESRS	$\left(\frac{P}{7,77}\right)^{4,32}$	0 – 8	$2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$
ESRD	$\left(\frac{P}{8,17}\right)^{4,32}$	≥ 8	$1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$
ETD	$\left(\frac{P}{15,08}\right)^{4,14}$	0 – 11	$1,592 \times 10^{-4} \times P^{3,472}$
		≥ 11	$1,528 \times 10^{-6} \times P^{5,484}$
ETT	$\left(\frac{P}{22,95}\right)^{4,22}$	0 – 18	$8,0359 \times 10^{-5} \times P^{3,3549}$
		≥ 18	$1,3229 \times 10^{-7} \times P^{5,5789}$

Onde P é carga sobre o eixo em toneladas.

Fonte: DNIT (2006b)

Após mais de 50 anos do advento da AASHO e a verificação de todas suas limitações relativas à evolução dos materiais empregados na pavimentação, dos veículos, das cargas e etc., ainda hoje os FEC normalmente utilizados nos dimensionamentos de rodovias são os de base empírica que não permitem extrapolações para condições distintas àquelas nas quais eles foram criados. Dessa forma, Fernandes Junior (1994) e Fernandes Junior e Sória (1996) enfatizaram que FEC empírico-mecanísticos resultantes da análise estrutural dos pavimentos e da consideração de modelos de previsão do desempenho destes são os mais indicados para refletir a situação em campo. Os FEC empírico-mecanísticos assumem a forma da Equação 4.

$$FEC_i = \left(\frac{\rho_i}{\rho_0} \right)^b \quad (4)$$

onde:

- ρ_i é a resposta estrutural correspondente à solicitação em análise;
- ρ_0 é a resposta estrutural à solicitação padrão;
- **b** é o expoente associado à forma de deterioração, à resposta estrutural considerada, ao tipo de ensaio e à estrutura analisada.

No trabalho de Fernandes Júnior (1994) foram desenvolvidos, com base em 8 estruturas de pavimentos e as 5 respostas estruturais calculadas com os programas ELSYM5 e ILLI-PAVE (deflexão superficial, deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico, deformação vertical de compressão no topo do subleito, deformação vertical de compressão na fibra inferior do revestimento e tensão horizontal de tração na fibra inferior da camada tratada com cimento), modelos de regressão dos FEC empírico-mecanísticos que representam os fatores carga por eixo, pressão de enchimento de pneus, distribuição da pressão de contato pneu-pavimento e tipo de rodagem.

2.3.3 Fator de veículo (FV)

É o fator que transforma o tráfego real em um tráfego equivalente de eixos padrão, considerando o sentido dominante e o período de projeto. Sua obtenção pode ser feita a partir da utilização da Equação 5.

$$FV = \frac{\sum_{i=1}^n [(p_i) \times (FEC_{i,p})]}{100} \quad (5)$$

onde:

- p_i é o valor da percentagem de eixos tabulados em relação ao tráfego total;
- $FEC_{i,p}$ é o cômputo do produto para cada categoria de eixo indicada.

2.3.4 Limites legais

No Brasil, o Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), a partir das Resoluções nº 211/06 e 210/06 e Portaria do Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN) nº 86/06, regulamentou os artigos 99 e 100 do Código Nacional de Trânsito Brasileiro (CTB) que estipulam os limites de dimensões, peso bruto total (PBT) e por eixo a serem observados por todos os veículos rodoviários de carga que circulam nas rodovias brasileiras. O PBT nada mais é, segundo DNIT (2006c), que o peso máximo que o veículo pode transmitir ao pavimento, constituído da soma do peso próprio do veículo (tara) mais a carga útil máxima incluindo o condutor e os passageiros que ele pode transportar (lotação).

Sobre os valores de PBT/PBTC foi determinada pela lei 7.408/85 (BRASIL, 1985) que deve ser atribuída uma tolerância de 5% ao limite máximo permitido. Os pesos por eixo receberam na Resolução nº 104 de 21/12/99 do CONTRAN a alteração da tolerância ao excesso de peso de 5% para 7,5%.

Peterlini (2007) salientou em seu trabalho a evidência de que os transportadores carregam seus veículos considerando a tolerância de 7,5% permitida pela Resolução do CONTRAN como ganho real de sobrecarga e não como tolerância do próprio equipamento de pesagem, sem contar com a isenção de multas dos excessos nos eixos dada pela Resolução nº 104 de 21/11/1999, que considerou apenas o PBT com tolerância de 5%. O autor reforçou que tais fatos fizeram com que ficasse evidente a necessidade da imediata revogação de tais Resoluções do CONTRAN, por nunca terem levado em conta o caráter maléfico à preservação dos pavimentos que as permissividades legais desses procedimentos possuíam.

Na Resolução do CONTRAN nº 258 de 30/11/2007 a tolerância para os excessos de peso nos eixos foi alterada para 5%, revogando as Resoluções nº 102/99, 104/99 e 114/00 que tratavam sobre a tolerância máxima no PBT e peso bruto por eixo. A redução da tolerância de 7,5% para 5% nos eixos foi adiada (pela quinta vez) até dezembro de 2011, a partir da Resolução nº 365/10 do CONTRAN, sendo o procedimento justificado pela necessidade de conclusão, pela Câmara Temática de Assuntos Veiculares, dos estudos relativos aos procedimentos para fiscalização de peso bruto transferido por eixo de veículos à superfície das vias públicas (ver Resoluções nº 301/08, nº 328/09, nº 337/09, nº 353/10 e 365/10).

De forma a apresentar neste trabalho os limites máximos adotados no Brasil faz-se uso do material do DNIT (2007) para a construção das Figuras de 2.2 a 2.6. Nessas figuras estão contidas algumas das silhuetas de configurações básicas ou combinação dos veículos, o número de eixos e as suas correspondentes carga máximas, o PBT máximo com e sem a tolerância e a classe do veículo.

SILHUETA	Nº DE EIXOS	PBT/CMT MÁX.(t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE
2	16(16,8)	CAMINHÃO E1 = eixo simples (ES), rodagem simples (RS), carga máxima (CM) = 6t ou capacidade declarada pelo fabricante do pneumático E2 = ES, rodagem dupla (RD), CM = 10t $d12 \leq 3,50\text{m}$	2C
3	23(24,2)	CAMINHÃO TRUCADO E1 = ES, RS, CM = 6t E2E3 = ES, conjunto de eixos em tandem duplo TD, CM = 17t $d12 > 2,40\text{m}$ $1,20\text{m} < d23 \leq 2,40\text{m}$	3C
3	26(27,3)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM = 6t E2 = ED, RD, CM = 10t E3 = ED, RD, CM = 10t $d12, d23 > 2,40\text{m}$	2S1
4	31,5(33,1)	CAMINHÃO SIMPLES E1 = ES, RS, CM 6t E2E3E4 = conjunto de eixos em tandem triplo TT; CM = 25,5t $d12 > 2,40$ $1,20\text{m} < d23, d34 \leq 2,40\text{m}$	4C
4	29(30,5)	CAMINHÃO DUPLO DIRECIONAL TRUCADO E1E2 = conjunto de eixos direcionais CED, CM = 12t E3E4 = TD, CM = 17t $1,20\text{m} < d34 \leq 2,40\text{m}$	4CD
4	33(34,7)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3E4 = TD, CM = 17t $d12, d23 > 2,40\text{m}$ $1,20\text{m} < d34 \leq 2,40\text{m}$	2S2
4	36(37,8)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3 = ED, RD, CM 10t E4 = ED, RD, CM 10t $d12, d23, d34 > 2,40\text{m}$	2I2

Figura 2.2 - Veículos adotados na classificação do DNIT (2007) – Quadro 1

SILHUETA	Nº DE EIXOS	PBT/CMT MÁX.(t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE
4	33(34,7)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t d12, d34 > 2,40m 1,20 < d23 ≤ 2,40	3S1
4	36(37,8)	CAMINHÃO + REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3 = ED, RD, CM 10t E4 = ED, RD, CM 10m d12, d23, d34 > 2,40m	2C2
5	41,5(43,6)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD CM10t E3E4E5 = TT, CM 25,5t d12, d23 > 2,40m 1,20m d34, d45 ≤ 2,40m	2S3
5	40(42)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM17t E4E5 = TD, CM 17t d12, d34 > 2,40m 1,20m < d23, d45 ≤ 2,40m	3S2
5	45(47,3)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3 = ED, RD, CM 10t E4 = ED, RD, CM 10t E5 = ED, RD, CM 10t d12, d23, d34, d45 > 2,40m	2I3
5	43(45,2)	CAMINHÃO TRATOR + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3 = ED, RD, CM 10t E4E5 = TD, CM 17t d12, d23, d34 > 2,40m 1,20m < d45 ≤ 2,40m	2J3
5	43(45,2)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t E5 = ED, RD, CM 10t d12, d34, d45 > 2,40m 1,20m < d23 ≤ 2,40m	3I2

Figura 2.3 - Veículos adotados na classificação do DNIT (2007) – Quadro 2

SILHUETA	Nº DE EIXOS	PBT/CMT MÁX.(t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE
5	43(45,2)	CAMINHÃO + REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3 = ED, RD, CM 10t E4E5 = TD, CM 17t d12, d23, d34 > 2,40m 1,20m < d45 ≤ 2,40m	2C3
5	43(45,2)	CAMINHÃO TRUCADO + REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t E5 = ED, RD, CM 10t d12, d34, d45 > 2,40m 1,20m < d23 ≤ 2,40m	3C2
6	45(47,3)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4E5E6 = TT, CM 25,5t d12, d34, > 2,40m 1,20m < d23, d45, d56 ≤ 2,40m	3S3
6	45(47,3)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t E5 = ED, RD, CM 10t E6 = ED, RD, CM 10t d12, d34, d45, d56 > 2,40m 1,20m < d23 ≤ 2,40m	3I3
6	45(47,3)	CAMINHÃO TRATOR TRUCADO + SEMI REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t E5E6 = TD, CM 17t d12, d34, d45 > 2,40m 1,20m < d23, d56 ≤ 2,40m	3J3
6	45(47,3)	CAMINHÃO TRUCADO + REBOQUE E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t E5E6 = TD, CM 17t d12, d34, d45 > 2,40m 1,20m < d23, d56 ≤ 2,40m	3C3
6	19,5(20,5)	CAMINHÃO TRATOR E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD(6 pneus), CM 13,5t 1,20m < d23 ≤ 2,40m A CMT do conjunto vai variar conforme a capacidade do semi-reboque, no mínimo 10 ton até, no máximo o limite legal de 4r ton.	X

Figura 2.4 - Veículos adotados na classificação do DNIT (2007) – Quadro 3

SILHUETA	Nº DE EIXOS	PBT/CMT MÁX.(t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE
6	50(52,5)	ROMEU E JULIETA(caminhão trucado + reboque) E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = T0, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t E5E6 = TD, CM 17t d12, d34, d45 > 2,40m 1,20m < d23, d56 ≤ 2,40m	3D3
7	57(59,9)	ROMEU E JULIETA(caminhão trucado + reboque) E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = T0, CM 17t E4E5 = TD, CM 17t E6E7 = TD, CM 17t d12, d34, d56 > 2,40m 1,20m < d23, d45, d67 ≤ 2,40m	3D4
7	57(59,9)	BI TREM ARTICULADO(caminhão trator trucado + dois semi reboques) E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = T0, CM 17t E4E5 = TD, CM 17t E6E7 = TD, CM 17t d12, d34, d56 > 2,40m 1,20m < d23, d45, d67 ≤ 2,40m	3D4
7	63(66,2)	TREMINHAO(caminhão trucado + dois reboques) E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4 = ED, RD, CM 10t E5 = ED, RD, CM 10t E6 = ED, RD, CM 10t E7 = ED, RD, CM 10t d12, d34, d56, d67 > 2,40m 1,20m < d23 ≤ 2,40m	3Q4
9	74(77,7)	TRI TREM(caminhão trator trucado + três semi reboques) E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4E5 = TD, CM 17t E6E7 = TD, CM 17t E8E9 = TD, CM 17t d12, d34, d56, d78 > 2,40m 1,20m < d23, d45, d67, d89 ≤ 2,40m	3T6

Figura 2.5 - Veículos adotados na classificação do DNIT (2007) – Quadro 4

SILHUETA	Nº DE EIXOS	PBT/CMT MÁX.(t)	CARACTERIZAÇÃO	CLASSE
9	74(77,7)	RODOTREM (caminhão trator trucado + dois semi reboques dom dolly) E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = TD, CM 17t E4E5 = TD, CM 17t E6E7 = TD, CM 17t E8E9 = TD, CM 17t d12, d34, d56, d78 > 2,40m 1,20m < d23, d45, d67, d89 ≤ 2,40m	3T6
2	16(16,8)	ÔNIBUS E1 = ES, RS, CM 6t ou a capacidade declarada pelo fabricante do pneumático E2 = ED, RD, CM 10t d12 ≤ 3,50m	2CB
3	19,5(20,5)	ÔNIBUS TRUCADO E1 = ES, RS, CM 6t E2E3 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos, carga máxima 13,5t d12 > 2,40m 1,20 < d23 ≤ 2,40m	3CB
4	25,5(26,8)	ÔNIBUS DUPLO DIRECIONAL TRUCADO E1E2 = conjunto de eixos direcionais, carga máxima 12 ton E3E4 = conjunto de eixos em tandem duplo com 6 pneumáticos, carga máxima 13,5t 1,20 < d34 ≤ 2,40m	4CB
3	26(27,3)	ÔNIBUS URBANO ARTICULADO E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3 = ED, RD, CM 10t d12, d23 > 2,40m	2SB1
4	36(37,8)	ÔNIBUS URBANO BI-ARTICULADO E1 = ES, RS, CM 6t E2 = ED, RD, CM 10t E3 = ED, RD, CM 10t E4 = ED, RD, CM 10t d12, d23, d34 > 2,40m	2IB2

Figura 2.6 - Veículos adotados na classificação do DNIT (2007) – Quadro 5

2.3.5 Medição das cargas: postos de pesagem de veículos (PPVs)

De acordo com o Plano Diretor Nacional Estratégico de Pesagem (CENTRAN, 2006) o controle de peso dos veículos rodoviários iniciou a partir da necessidade de expansão da malha viária do país em decorrência da implantação automobilística na década de 50. Ou seja, para que essa ampliação acelerada acontecesse era importante aperfeiçoar a

tecnologia rodoviária existente no país, assim surgiu o Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis baseado na previsão da repetição dinâmica de uma carga padrão para os eixos dos veículos. Para que o método fosse válido foi preciso criar uma legislação para disciplinar os pesos dos eixos dos veículos, bem como fiscalizá-los e controlá-los. Assim, a partir da determinação de pontos estrategicamente localizados, onde era possível interceptar os principais fluxos de carga, foram observados aqueles que tinham condições de abrigar postos dotados com balanças para tal controle dos pesos dos veículos rodoviários – os PPVs.

Atualmente nas Rodovias Federais os PPVs, segundo DNIT (2010), estão subdivididos em quatro grupos: postos fixos em operação, postos fixos não operando, postos móveis em operação e postos móveis não operando. Na Tabela 2.2 estão listados os postos e suas quantidades no Brasil.

Tabela 2.2 - Quantidades dos postos de pesagem no Brasil

Postos de Pesagem	Quantidade
Postos fixos em operação	28
Postos fixos não operando	17
Postos móveis em operação	19
Postos móveis não operando	14
Total	78

Fonte: DNIT (2010)

A partir de informações existentes no site do DER-SP (2010), as rodovias estaduais contam atualmente com cerca de 160 (cento e sessenta) PPVs móveis e 37 (trinta e sete) PPVs fixos.

A quantidade de postos de pesagem ao longo do Brasil ainda é muito pequena. Para fins de comparação, no trabalho de Neidigh e Crawford (2004) foi afirmado que no ano 2002, havia somente no estado do Texas, 17 postos de pesagem (16 localizados na área rural, sendo que destes 11 estavam localizados em rodovias interestaduais ou autoestradas) e em 2005 Prozzi e Hong (2005) afirmaram que existia nesse estado um total de 20 estações de pesagem em operação. De acordo com a FHWA (2009) há cerca de 550 locais em operação dotados com estações WIM ao longo dos EUA, mas nem todos são usados para fiscalização/autuação. Na Europa, a Alemanha tem uma rede de aproximadamente 40 postos de pesagem WIM e a França 170 (Honefanger *et al*, 2007); onde na Alemanha há mais de 200 mil km de rodovias interurbanas e na França a malha rodoviária tem uma extensão de cerca de 1 milhão de quilômetros.

A operação de pesagem veicular pode ser feita de duas formas: estática e dinâmica. Todos os equipamentos de pesagem estática ou dinâmica são acoplados em um computador com um software que permite a interligação e armazenagem das informações geradas e transmitidas pelas unidades de pesagem. Estes programas permitem a entrada de dados, como o nome e localização do posto, data e hora, placa do veículo, marca e modelo e classificação do veículo, número de pesagens, origem e destino do veículo, peso por eixo, soma dos pesos, PBT, valor do transbordo e valor da autuação.

O procedimento nos postos de pesagem estática é feito com a passagem do veículo primeiramente por uma balança seletiva, a uma velocidade entre 10 km/h a 100 km/h, caso haja excesso, o veículo é desviado para uma balança de precisão onde fica totalmente paralisado.

A pesagem dita dinâmica é aquela realizada através de balanças com veículos em movimento e recebem a designação *Weight In Motion* (WIM). Sua maior utilização nas operações de fiscalização por pesagem se justifica por algumas vantagens, como: não produzir filas e demoras aos veículos que não estão sobrecarregados; medição do PBT e da carga por eixo com o veículo em movimento; ganho de tempo do usuário que não está com excesso de peso; os veículos podem retornar a rodovia com apenas uma mudança de marcha, sem paradas e outros inconvenientes; e possibilita que além dos pesos as velocidades e a classificação dos veículos que pelo posto passam sejam também coletados.

Em estudo sobre a eficiência de diferentes tipos de sistemas *WIM* realizado por Trsichuk, Berthelot e Taylor (2002), o aumento na capacidade das estações de pesagem veicular foi constatado, pois os veículos que estão de acordo com as regulamentações de peso são liberados da pesagem de precisão quando da passagem pela balança seletiva. Isso representa uma economia de tempo e diminuição de congestionamento no posto de pesagem, fazendo com que os fiscais concentrem seus esforços nos veículos que estão com excesso de peso, fato corroborado por FHWA (2009).

Apesar do alto custo inicial com a instalação de novas estações *WIM*, o que em parte explica a carência de sistemas de pesagem nas rodovias, Prozzi e Hong (2005) afirmaram que o custo inicial é rapidamente recuperado pelas economias acumuladas resultantes de dimensionamento de pavimentos mais confiáveis baseadas em dados mais precisos. Na Figura 2.7 é possível observar a organização de um posto de pesagem dinâmica.

Figura 2.7 - Posto de pesagem dinâmica na Rodovia dos Imigrantes SP-160, km 28 - Sul

A partir do momento em que a caracterização das cargas do tráfego é de grande importância para o dimensionamento de pavimentos, bem como para a quantificação do desempenho do pavimento, a qualidade da aquisição dos dados tem um papel fundamental. Tal qualidade está relacionada não só à extensão do período de coleta de dados, bem como ao equipamento usado na aquisição. Para Haider, Harichandran e Dwaikat (2010) a pesagem estática tem melhor precisão, mas seu uso fica limitado pelas ineficiências prática e operacional, principalmente com relação à quantidade de dados de eixos de carga que podem ser coletados. As vantagens do sistema *WIM* anteriormente descritas faz com que esse sistema seja mais popular, embora seja de precisão inferior segundo os autores (erros introduzidos pela tecnologia do sensor, efeitos relativos ao meio ambiente, condição do pavimento etc.).

Assim, alguns autores se dedicaram a demonstrar os impactos dos erros de pesagem *WIM* no desempenho dos pavimentos. Haider, Harichandran e Dwaikat (2010) observaram que erros negativos influenciam de forma significativa nas previsões de trincamentos de pavimentos rígidos e flexíveis, enquanto que para os pavimentos flexíveis os afundamentos nas trilhas de rodas são moderadamente afetados. Prozzi, Hong e Leung (2008) encontraram que no caso do sistema *WIM* não estar apropriadamente calibrado um erro de precisão negativo poderá superestimar a vida útil do pavimento em cerca de 3%, já um erro positivo de 1% a subestima em aproximadamente 2%. Portanto, os sistemas *WIM* devem ser calibrados periodicamente para prevenir erros de pesagem, principalmente os negativos.

2.3.6 Alguns sistemas de pesagem *WIM* na Europa

A tendência da indústria de usar carregamentos cada vez maiores e mais pesados em função do aumento da demanda comercial nos dias atuais desafia, segundo DNIT *et al* (2007), a efetiva e eficiente fiscalização da conformidade do peso dos veículos comerciais rodoviários de carga, pois fazê-los sair do fluxo normal para se submeter à fiscalização num posto fixo de pesagem sem interferir na eficiência de operação da indústria de transportes se torna uma tarefa cada vez mais difícil, mesmo quando esta pesagem é feita a baixa velocidade ao invés de estaticamente. Com base nessas dificuldades novas tecnologias com a utilização de sistemas *WIM* a altas velocidades, com capacidade de colher imagens e tele transmitir os dados, têm sido desenvolvidas e aplicadas. A seguir abordam-se alguns sistemas utilizados na Europa.

2.3.6.1 Holanda

Os órgãos de Transportes e de Fiscalização na Holanda desenvolveram um Sistema de Gerência dos Dados de pesagem em movimento que dá suporte às atividades de regulamentação do peso do veículo e de fiscalização, bem como ao planejamento em longo prazo e a tomada de decisões. Esse sistema foi desenvolvido pelo Centro de Transporte e Navegação do Ministério dos Transportes, Obras Públicas e Gestão de Águas em parceria com a Agência Nacional de Serviços Policiais e de Inspeção do Ministério de Transporte e de Gestão de água (FHWA, 2007).

A captura de dados é feita por sistemas de vídeo para detectar as imagens dos veículos e suas placas, além de balanças *WIM* que são posicionadas nas faixas de tráfego e inclusive nos acostamentos para detectar evasões. A Figura 2.8 contém uma imagem de um posto de pesagem na Holanda onde pode ser visto que em cada faixa há sistemas de pesagem em movimento para a captura de dados do tráfego.

Figura 2.8 - Posto de pesagem na Holanda: WIM + sistema de vídeo (VID)
Fonte: (FHWA, 2007)

Com relação à fiscalização, resumidamente, o procedimento é feito da seguinte forma: os policiais têm acesso aos dados capturados e os visualizam dentro da própria viatura através de um laptop e agem conforme a necessidade. As companhias transportadoras são identificadas pelas placas e recebem um código de cor em função da frequência das infrações; aquelas que apresentarem um maior número de infrações mensais recebem o código “vermelho” e, desta forma, precisam de uma atenção especial com visitas aos locais de trabalho para rever o histórico de violações, discussão de como os excessos podem ser causados (ação educativa) e é feito um acordo cooperativo para prevenir futuros excessos. A empresa é monitorada por dois meses e se a frequência de excessos de carga cai em 75%, ela muda para código “amarelo”, isso não quer dizer que ela deixe de ser monitorada, mas a forma de monitoração ganha menor intensidade.

No caso do comportamento continuar positivo ela retorna para o código “verde” e a empresa recebe uma notificação escrita de sua situação. Caso a companhia não melhore, os policiais recebem uma lista com os dados da empresa e param todos os veículos de tal companhia, independente de estarem cheios ou vazios, para inspeções adicionais ao processo de fiscalização.

2.3.6.2 Suíça

Os Centros de Controle Suíços de Veículos de Carga Pesada são locais de verificação simultânea do tamanho e peso dos veículos rodoviários de carga que também aplicam a tecnologia *WIM* e de imagem para o reconhecimento do peso e características do veículo.

Nos locais de fiscalização fixa, de acordo com FHWA (2009), os veículos devem passar sob pórticos dotados de uma tecnologia de scanner a laser onde um software cria uma imagem tridimensional do veículo (altura, largura e comprimento) que pode ser rotacionada em qualquer direção para análise. Simultaneamente, uma faixa no chão composta com sensores de pressão detecta a posição dos eixos e uma balança estática com várias células de carga fornece o peso dos eixos detectados e o peso bruto total do veículo. As imagens do pórtico e da silhueta criada pelo software utilizado são apresentadas nas Figuras 2.9 e 2.10.

Figura 2.9 - Pórtico e balança utilizada no sistema de medição na Suíça
Fonte: FHWA (2009)

Figura 2.10 - Tela do Software usado para criação da silhueta dos veículos
Fonte: FHWA (2009)

O software produz relatórios para cada veículo que atravessa o pórtico, caso excedentes sejam observados uma intimação é emitida no local e juntamente com o relatório de medição da silhueta do veículo e o respectivo relatório de conformidade de peso para o mesmo veículo são enviados à autoridade judicial como prova de violação.

2.3.6.3 Alemanha

As balanças de pesagem em movimento (*WIM*) são instaladas geralmente na faixa da direita, ou nas duas faixas à direita (caso de via com três faixas de tráfego) e com apenas sensores de tráfego (laços indutivos) instalados em todas as faixas. Essa estratégia reduz o custo de instalação enquanto continua capturando 80% dos dados relativos aos pesos dos veículos comerciais de carga. Esses dados são usados não somente na fiscalização, mas também para controle estatístico. Assim como na Suíça, a Alemanha possui pórticos dotados de uma tecnologia de scanner a laser, que são estrategicamente localizados ao longo do país, e equipados com câmeras capazes de criar a silhueta dos veículos e registrar as placas dos veículos para serem enviadas às unidades de fiscalização (verificação de pagamento de pedágio) ou unidades policiais (verificação das violações de peso ou dimensões) (Honefanger *et al*, 2007).

2.3.7 A situação de sobrecarga

No Brasil, os dados e informações dos excessos de carga praticados são muito escassos. Além da pequena quantidade de postos de pesagem, verifica-se uma inexistência de investimento nos equipamentos para a coleta de dados ao longo das rodovias, mesmo que para efeitos únicos de pesquisa e não de fiscalização/punição, ou seja, fora dos postos de pesagem obrigatórios. Não só a questão relacionada à quantidade de postos em operação tem que ser observada, mas também deve ser levado em consideração a adequada localização desses postos. Muitos postos têm seus dados comprometidos pela existência da possibilidade (e utilização) de rotas de fuga, assunto este corroborado por Chou (1996). O autor aponta que o desconhecimento das cargas excedentes afeta não somente o cumprimento da lei como também a precisão dos fatores de carga dos veículos e, conseqüentemente, a equivalência de carga por eixo padrão, item importante ao dimensionamento de pavimentos.

Fernandes Júnior (1994) comentou em seu trabalho que um dos primeiros estudos relativos à pesagem no Brasil foi realizado entre 1976 e 1981 pelo GEIPOT, onde ficou evidenciado que, naquela época, os caminhões trafegavam com cargas de 10 a 30% acima dos limites. De acordo com o mesmo autor, o percentual de excesso em cada tipo de eixo foi: 3% dos ESRS estavam com excesso; os ESRD correspondiam a 25%; os ETD a 15% e os ETT a 30%.

Em um estudo realizado na Bahia por Martins e Serravalle (2007), nas rodovias federais e estaduais delegadas ao DER-BA, foi constatado que 85% dos veículos estavam com excesso de peso por eixo e os veículos com maior frequência de infrações eram os do tipo 2C, 3C e 3S3. Tal estudo foi anterior à entrada em vigor da Resolução nº 258/2007 que permitiu a multa por excesso de carga nos eixos.

No trabalho desenvolvido pelo DNIT *et al* (2007) são indicadas como as causas da limitação da efetividade das estações de pesagem, as questões relativas à facilidade com que os postos fixos de pesagem são contornados, à falta de recursos para a fiscalização (custos de instalação e operação) e à limitação de horários de funcionamento e rotas monitoradas. Assim, em virtude das limitações reportadas, veículos sobrecarregados trafegam pela maioria das rodovias sem serem punidos pelo dano que causam na operação e ao pavimento.

Cunagin, Mickler e Wright (1997) pesquisaram os efeitos da evasão dos veículos, provavelmente sobrecarregados, dos postos de fiscalização fixos. Os autores se propuseram a verificar a magnitude, em função de *Equivalent Single Axle Load* (ESAL), dos sobrepesos dos veículos que evadiam os postos de pesagem na Flórida. Para tanto foram adotadas quatro estratégias a fim de comparação dos resultados:

- *Estratégia A*: postos fixos operando sem emissão de multas para veículos com excesso de peso e rotas secundárias (rotas de fuga) sem patrulhamento;
- *Estratégia B*: postos fixos de pesagem com autuação do sobrepeso e rotas de fuga sem equipes de fiscalização;
- *Estratégia C*: equipes de fiscalização tanto nas estações de pesagem fixas como nas rotas de fuga, as multas eram aplicadas em ambas, e
- *Estratégia D*: operação por curto período das estações fixas e as rotas de fuga eram fiscalizadas intensamente por várias equipes de patrulhamento, as multas eram aplicadas em ambos locais.

Os autores chegaram à conclusão que com o aumento da intensidade de fiscalização houve uma grande redução das violações de peso dos veículos e uma consequente redução dos ESALs, ou seja, concluíram que somente a intensa atividade de fiscalização pode reduzir as violações a níveis mais baixos. Enquanto os comerciantes verificarem que para eles há vantagem em evadir ou pagar multas menores que o lucro que ganham com a sobrecarga, a operação com excesso de peso continuará.

A questão da sobrecarga/controle/fiscalização é mundial, o estudo conduzido pelo *Council for Scientific and Industrial Research* (CSIR), no Programa de Desenvolvimento da África (CSIR, 1997), atestou que entre 15 a 20% de todos os veículos comerciais de carga que trafegam nas estradas da África do Sul estão com excesso de carga.

2.3.8 Efeitos da sobrecarga e altos limites legais de carga sobre o pavimento

De acordo com o estabelecido no AASHO Road Test e reforçado por Chou (1996), a relação entre a carga do tráfego e a deterioração do pavimento obedece à lei da quarta potência, ou seja, um eixo de carga duas vezes mais carregado que outro causará 16 vezes mais danos ao mesmo pavimento. Para melhor exemplificar o efeito da sobrecarga no pavimento, Widmer (2002) afirmou que o aumento de carga de 20% acima dos limites atuais implicará na redução da vida útil da estrutura em 50% e Albano (2004) ressaltou que os 2,5% a mais na tolerância sobre a carga por eixo estabelecida desde a Resolução 104/99 do CONTRAN, é responsável por uma redução de 10 a 15% na vida prevista do pavimento.

Assim, tendo em vista que o efeito do excesso de peso é exponencial, é muito importante a limitação das cargas por eixo. Martins e Serravalle (2007) apontam tal importância e salientam que o desgaste então produzido gera a necessidade de restauração muito antes do prazo previsto. De uma forma geral, os autores listam como impactos do excesso de peso nas rodovias: “deterioração de toda a estrutura, causando danos irreparáveis pela simples manutenção; formação de placas no revestimento devido à tração das rodas dos veículos; surgimento de fissuras e trincas e aumento do número de acidentes.” (MARTINS E SERRAVALLE, 2007, p. 2)

Fekpe, Clayton e Haas (1995) afirmaram que os comerciantes que trafegam com caminhões com excesso de carga provocam a redução do tempo de vida útil do pavimento e não reembolsam ao público o prejuízo oriundo disso, além de estarem competindo de forma injusta com os outros que estão com os veículos dentro dos limites de carga regulamentados. Os autores finalizam resumindo que a falta de fiscalização/controle dos pesos e dimensões dos veículos e consequente deficiência em manter os caminhões com excesso de carga fora do sistema rodoviário, tem como efeitos negativos o mau uso dos recursos públicos e proporcionam a falta de segurança aos usuários (acidentes com caminhões pesados) e a pouca justiça e equidade nas operações.

O CSIR (1997) estimou que cerca de 60% dos danos na rede rodoviária da África do Sul é causada por veículos que estão com sobrepeso e isso representa um custo ao contribuinte

de R400 milhões por ano (R\$ 96 milhões por ano) e afirmam que os acidentes causados diretamente ou indiretamente por veículos sobrecarregados normalmente não são incluídos quando os custos totais do país, causados pelo excesso de carregamento dos caminhões, são calculados. A pesquisa feita apresentou dados que levam à conclusão que um eixo carregando o dobro da carga legal pode causar danos acima de 4 a 60 vezes aos causados por aqueles que estão no limite de carga legal. Tal magnitude dependerá da condição da estrutura e tipo da estrada.

A alteração de limites de carga para valores superiores àqueles anteriormente usados tem um efeito mais ou tão importante quanto os excedentes aos limites legais, tendo em vista que a malha rodoviária projetada anteriormente à alteração sofrerá com tensões superiores àquelas que o pavimento foi dimensionado para suportar durante sua vida em serviço.

A partir da preocupação com o efeito relatado anteriormente, Freeman e Clark (2002) desenvolveram um trabalho após a promulgação da *Virginia House Bill 2209*, que permitiu que os veículos trafegassem com pesos brutos superiores ao anteriormente permitidos. Seu resultado não podia ser outro, os autores verificaram que houve um aumento drástico dos danos aos pavimentos da região sudoeste da Virgínia para pequenos aumentos nos pesos, para todas as classes de veículos. Como exemplo foi apresentado que uma passada de um veículo de três eixos com o peso bruto de 267 kN permitido na HB 2209 causava 50% mais danos que o mesmo veículo com o peso bruto de 240 kN, peso máximo permitido antes da HB 2209; o veículo de cinco eixos com carga permitida de 400 kN pela HB 2209 causava 58% mais deteriorações que o mesmo veículo com limite anterior de peso permitido de 356 kN. Sustentando a afirmação relativa à estrutura anteriormente dimensionada à alteração dos limites de cargas permitidos, foi verificado que cerca de 39% dos pavimentos investigados estavam estruturalmente inadequados para suportar a operação do tráfego sujeitos aos limites de carga permitidos na HB 2209.

Em uma linha similar, Jeongho Oh, Fernando e Lytton (2007), preocupados com a 75ª e 76ª Legislação do Texas que permitiu que veículos com pesos brutos superiores a 556 kN utilizassem uma rota no sul do Texas (que margeia o México), a qual não foi dimensionada para suportar a nova rotina de tráfego de caminhões com excesso de peso, se dedicaram a investigar os efeitos dessa sobrecarga no desempenho dos pavimentos. Os autores desenvolveram, com base nas respostas dos pavimentos oriundas de análises mecánísticas e sua correlação com os dados de campo obtidos por equipamento do tipo *Multidepth Deflectometer*, equações de previsão do consumo da vida útil do pavimento devido à passagem de cada veículo. A partir das equações o dano devido ao tráfego de caminhões

com excesso de peso pode ser avaliado a partir da razão entre a vida em serviço consumida por uma passagem do caminhão sobrecarregado e a correspondente vida em serviço do caminhão dentro dos limites legais de peso. Todos os caminhões obtiveram razões superiores à unidade, indicando o grande potencial para a deterioração acelerada do pavimento na rota estudada devido à permissão de cargas superiores às quais o pavimento foi projetado.

Vários trabalhos relativos aos efeitos causados aos pavimentos pelos veículos que trafegam com carregamento acima dos limites de peso regulamentados são encontrados na literatura e a maioria se atém apenas às análises de tensões e deformações não indo mais além, como por exemplo, no quesito relativo à aplicação de multa a esses contraventores. No trabalho de Sadeghi e Fathali (2007) esse item foi abordado sendo apresentados alguns modelos que descreviam o comportamento dos pavimentos sob veículos sobrecarregados e a determinação das multas. Os autores compararam então as multas obtidas num exemplo numérico com as aplicadas na época do estudo pelas autoridades iranianas. Eles concluíram que os donos dos veículos, que trafegam com sobrepeso, não estavam pagando valores adequados de multas de forma a compensar os danos aos pavimentos causados em virtude da violação.

2.3.9 Rodagem

2.3.9.1 Os pneus

Além dos sistemas de suspensão dos veículos, os pneus são os responsáveis pela transmissão das cargas do corpo do veículo à superfície do pavimento distribuindo-a sobre uma pequena superfície de contato. Os tipos de pneus existentes são os diagonais e radiais, sendo que estes últimos têm substituído os diagonais por oferecerem maior suporte de cargas e maiores pressões de enchimento.

Com o intuito de melhorar cada vez mais a eficiência do setor de transporte rodoviário, os fabricantes de pneus vêm aprimorando, desde seu surgimento na década de 80, a fabricação de um tipo de pneu de maiores dimensões e capacidade de carga e de pressões de enchimento, conhecido como Pneu Extralargo, para substituir os eixos com rodados duplos. De acordo com Al-Qadi, Elseifi e Yoo (2004), os pneus extralargos oferecem, em comparação ao conjunto de pneus duplos, melhoria da eficiência de combustível, aumento da capacidade de carga, melhor desempenho na frenagem e conforto e reduzem os custos de reparo e manutenção. Em contrapartida, o estudo conduzido pelo TRB (1990), assim

como outros posteriores (Fernandes Junior *et al*, 2002; Fernandes Junior, Pais e Pereira, 2007; Fernandes Junior, Pais e Pereira, 2009; Xue e Weaver, 2011) obtiveram resultados que remetem à conclusão que os pneus extralargos produzem maior deterioração dos pavimentos.

Tendo em vista a preocupação com os danos aos pavimentos sustentados pelas pesquisas realizadas como a do TRB (1990), mas também com a produtividade do setor rodoviário, uma nova geração de pneus extralargos foi desenvolvida para que os danos aos pavimentos fossem comparáveis (similares) aos da rodagem dupla convencional. Esses novos pneus extralargos possuem uma maior banda de pneu, uma maior capacidade de carga e uma menor pressão de enchimento que os pneus extralargos convencionais.

Com a finalidade de verificar a influência desta nova geração Elseifi *et al* (2005) e Al-Qadi, Elseifi e Yoo (2005) realizaram estudos comparativos entre dois tipos de pneus extralargos da nova geração e os sistemas de rodas duplas considerando a variação da pressão de enchimento, da distribuição da pressão de contato pneu-pavimento e velocidade. Esses autores observaram que quanto à deterioração relacionada às trincas por fadiga e aos afundamentos secundários (no subleito) os dois tipos de pneus extralargos apresentam danos superiores aos das rodagens duplas. Com relação às deteriorações de trincas “*top-down*” (propagação da trinca a partir da superfície do pavimento para baixo) e os afundamentos nas trilhas de rodas primários (na superfície do pavimento), o tipo de extralargo que possui uma maior largura da seção nominal foi menos danoso que os sistemas de rodados duplos para a velocidade do veículo de 105 km/h.

Dessouky, Al-Qadi e Yoo (2007) também testaram os pneus extralargos fazendo uma comparação entre os extralargos da primeira geração, da nova geração e os conjuntos de rodados duplos com pneus convencionais. Os resultados desse estudo levaram a conclusão que o tipo de pneu extralargo usado na pesquisa correspondente à primeira geração foi o mais prejudicial ao pavimento dentre os pneus os testados. Já os extralargos da nova geração de maior largura da seção nominal apresentaram potencial similar aos sistemas de pneus duplos no desenvolvimento de afundamento nas trilhas de rodas do tipo secundário e trincas por fadiga do tipo “*bottom-up*”. Quanto ao surgimento de afundamento das trilhas de rodas primário e de trincamento “*top-down*” os pneus extralargos têm influência menor que a composição de rodas duplas.

2.3.9.2 Pressão de inflação e pressão de contato

As cargas do tráfego são transmitidas ao pavimento por meio das rodas pneumáticas dos veículos que exercem uma pressão numa área aproximadamente elíptica e de distribuição parabólica com pressão máxima no centro da área carregada. Assim, as pressões a serem admitidas são referidas às cargas de rodas, embora geralmente se refira a cargas por eixo.

No processo de interação pneu-pavimento a pressão de inflação do pneu desempenha um significativo papel, sendo considerada por estudiosos como muito importante no mecanismo de surgimento das trincas por fadiga do tipo *top-down*. Se a carga de um eixo/roda é mantida constante, um aumento da pressão de inflação do pneu pode reduzir a área de contato, aumentando assim a pressão de contato entre pneu-pavimento. Há então um aumento nos esforços atuantes no revestimento asfáltico e, conseqüentemente, maiores efeitos danosos serão esperados.

Machemehl, Wang e Prozzi (2005) estudaram os possíveis efeitos das pressões de inflação dos pneus nos pavimentos flexíveis; para tanto as cargas de rodas de 20, 24, 28 e 31 kN, bem como as pressões de 483, 586, 690, 793 e 896 kPa foram usados. Os autores encontraram que as pressões de enchimento dos pneus apresentam uma forte relação com as deformações horizontais de tração na fibra inferior do revestimento, bem como com tensões próximas a superfície do revestimento. Isso ocorreu tanto para pavimentos delgados como espessos, sendo nestes casos que quanto maior a pressão de enchimento, maior o dano causado. Por outro lado, os efeitos da pressão de enchimento nas deformações de compressão no topo do subleito são menores, principalmente nas estruturas espessas.

Fernandes Junior, Pais e Pereira (2006; 2007) estudaram os efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos flexíveis brasileiros e portugueses e verificaram, a partir dos cálculos de fatores de equivalência de carga empírico-mecanísticos, que estes resultaram maiores quando do aumento das pressões, tendo em vista que o aumento das pressões de enchimento ocasiona um aumento nas deformações horizontais de tração na fibra inferior da camada asfáltica. Em termos percentuais os autores afirmaram que uma elevação da pressão de 80 psi (573 kPa) para a de 120 psi (844 kPa) pode corresponder a uma variação de até 50% nos fatores de equivalência de carga.

Tendo em vista a importância da pressão de contato na contribuição das respostas estruturais, vários estudos mostraram que esta não é uniformemente distribuída numa área

circular como comumente se considera para calcular as tensões/deformações necessárias pelos métodos tradicionais usados para o dimensionamento empírico-mecanístico, bem como para a previsão de desempenho de pavimentos.

Machemehl, Wang e Prozzi (2005) comentaram que em função do reforço nas laterais dos pneus as deflexões laterais são restringidas fazendo com que estes se deformem mais linearmente na direção longitudinal, o que faz com que a área de contato seja mais retangular que circular, gerando diferenças nas tensões/deformações nas direções longitudinais e transversais.

A diferença observada entre as áreas da superfície de contato e a distribuição da pressão sobre tais áreas gera resultados divergentes entre as previsões obtidas com uso de programas que consideram a hipótese simplificadora da distribuição uniforme sobre área circular. Machemehl, Wang e Prozzi (2005) sustentaram que o método convencional subestima os resultados a baixa pressão de enchimento e superestima a altas pressões.

Nos trabalhos de Wang (2005) e Wang e Machemehl (2006) foram realizadas comparações entre as respostas estruturais obtidas pelas duas formas de consideração da distribuição e área das pressões de contato. As respostas dos pavimentos sob as pressões de contato não uniformes para diferentes tipos de pneus e pressões de enchimento foram calculadas por um programa de elementos finitos (o ANSYS) considerando os ESRS, ESRD e ETD. Para a hipótese simplificada um programa multicamadas foi usado. Os resultados obtidos pelos autores mostraram que o modelo tradicional (pressão de contato uniformemente distribuída e igual à pressão de enchimento dos pneus, sobre superfície circular) tende a superestimar as deformações horizontais de tração na fibra inferior do revestimento e subestimar a deformação vertical de compressão no topo do subleito, o que são intensificadas pelo aumento da pressão de enchimento do pneu, além de mais significantes para pavimentos delgados que espessos e para ESRD e ETD que para ESRS.

Luo e Prozzi (2007) também compararam os resultados obtidos considerando a pressão de contato não uniforme com a pressão de contato uniforme. O programa CIRCLY de análise elástico-linear foi usado, sendo gerados dois modelos: um para pressão de contato não uniforme e outro para distribuição uniforme. A partir dos resultados verificaram que o modelo de pressão de contato uniforme superestima as deformações transversais (direção x – transversal à direção de viagem do veículo) independentemente da espessura da camada asfáltica (espessa ou delgada). No que tange à combinação de espessura de revestimento delgada e alta pressão de enchimento do pneu o modelo de pressão uniforme é muito

comedido. Na previsão das deformações de tensão longitudinais (direção de viagem do veículo) na superfície do revestimento delgado o modelo de pressão uniforme foi moderado. Já para revestimento de espessuras entre 70 mm e 190 mm ele produziu resultados similares aos obtidos com o não uniforme.

Park, Fernando e Leidy (2005) desenvolveram Equações de regressão para previsão da área de contato de quatro tipos de pneus com base na carga por roda e pressão de enchimento do pneu. As relações foram obtidas a partir da digitalização da impressão do pneu para cada situação de carga e pressão de enchimento e utilização de um programa para ler as impressões eletrônicas e calcular a área de contato baseado na leitura da intensidade de pixels da imagem.

Procedimento similar para obtenção da área de contato efetiva do pneu foi utilizada por Fernandes Júnior *et al* (2002) num estudo comparativo entre pneus extralargos (*Trelleborg*) e pneus convencionais. Para a obtenção da área de contato efetiva o pneu foi pintado e colocado sobre uma placa de madeira obtendo-se nesta a impressão da superfície de contato pneu-pavimento e a partir do uso do programa computacional AutoCAD as áreas e centros de gravidade foram determinados. A forma utilizada por Wang e Roque (2010) para medição da pressão de contato foi a partir do uso de uma placa metálica instrumentada colocada sob o pneu.

2.4 Conclusões do Capítulo

Tendo em vista que o dimensionamento dos pavimentos, bem como a previsão do seu desempenho é função direta do carregamento dos veículos, é de vital importância o controle dos carregamentos, seja com fins de fiscalização/punição para desencorajar o excedente aos limites de peso estabelecidos pelo Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN), ou para simples aquisição de dados e sua posterior aplicação em projetos, evitando as aproximações e simplificações relativas às estimativas de carregamento em função da atribuição dos limites por eixo dentro de um dado volume classificado de tráfego.

A realidade atual é que apesar das multas, o Brasil ainda apresenta um cenário desfavorável em relação ao excesso de carga. Essa prática continua sendo adotada com frequência devido às vantagens econômicas da relação frete/multa, à inexistência de controle de peso na maioria absoluta das estradas brasileiras e ao baixo risco de detecção da infração. É importante destacar também que há ainda a falta de consciência por parte

dos motoristas/transportadoras em relação ao excesso de carga, muitos deles criticam a fiscalização e não veem a menor necessidade de se verificar se o caminhão está com excesso nos eixos, e sim se o PBTC está dentro do limite.

Além disso, existe a facilidade pela qual os motoristas ignoram os postos de pesagem e passam direto pela balança, pois para muitos é preferível correr o risco de receber a multa pela evasão exatamente porque ainda têm vantagens econômicas (relação frete/multa). A questão do “risco” de receber multa pela evasão está atrelada a questão de que a polícia federal/estadual não tem funcionários suficientes para fiscalizar diariamente os postos, deixando-os ainda mais vulneráveis a esta prática. Caso houvesse um efetivo adequado além da multa pela evasão, o veículo deveria ser reconduzido ao posto e pesado e receberia, provavelmente, a multa pelo excesso de peso.

Os sistemas adotados na Europa e abordados nesse capítulo que utilizam balanças nas faixas de tráfego, inclusive no acostamento para evitar evasões, são interessantes. Apesar de todo custo envolvido para instalação e operação, será que não se torna viável quando avaliada a relação custo/benefício em função dos custos destinados à recuperação das vias e, pior, em tempos cada vez menores? É claro que de nada adianta se não há uma efetividade/seriedade na fiscalização/punição.

Além do exposto não pode ser esquecida a questão relacionada às pressões de enchimento dos pneus, que em função dos elevados carregamentos são também elevadas. Como comentado no trabalho de Fernandes Júnior, Pais e Pereira (2007), a pressão de enchimento deve ser considerada no dimensionamento dos pavimentos, na dosagem de misturas asfálticas, nos critérios de alocação de custos rodoviários e na regulamentação técnica, onde deveria haver a limitação da pressão de enchimento (limites de pressão para o pneu frio mais uma tolerância de cerca de 15 psi para acréscimo de pressão quando em operação).

3 DIMENSIONAMENTO EMPÍRICO-MECANÍSTICO: GUIA DE PROJETOS AASHTO 2002

O projeto de pavimentos pode ser separado em dois tipos básicos de abordagem: empírica e empírico-mecanística. Nas abordagens de base empírica, o desempenho do pavimento é estimado como uma função de importantes variáveis, como as propriedades estruturais e dos materiais, a carga do tráfego e os fatores ambientais. Já nas abordagens empírico-mecanísticas as respostas dos pavimentos (tensões, deformações e deflexões) são calculadas a partir de métodos numéricos de elementos finitos ou a partir da teoria elástica de camadas, as quais são depois correlacionadas ao desempenho dos pavimentos a partir de ensaios laboratoriais ou dados de campo. A diferença fundamental entre os métodos utilizados no projeto é a forma que as cargas do tráfego são caracterizadas. (HONG, PEREIRA e PROZZI, 2006)

Carvalho e Schwartz (2006) definiram os métodos empíricos de dimensionamento de pavimentos como aqueles baseados unicamente nos resultados experimentais ou na experiência e possuem como principal desvantagem a limitação às condições em que os dados foram gerados. Já os métodos empírico-mecanísticos são frutos da união de teorias da mecânica com o empirismo: o componente mecanístico está relacionado às determinações teóricas das respostas estruturais dos pavimentos (tensões, deformações e deflexões) devido a influência das cargas e do ambiente, e o componente empírico diz respeito às correlações dessas respostas com o desempenho do pavimento via modelos empíricos de deteriorações.

Ao longo das últimas décadas, como comentado de forma introdutória neste trabalho, a vida remanescente do pavimento foi verificada em bases empíricas e expressa em termos do número equivalente de solicitações do eixo padrão de 8,2 t, usando a lei da quarta potência para converter o tráfego misto em cargas equivalentes por eixo. Com a tendência atual de substituição da tradicional base puramente empírica pela mecanicista, vários métodos de dimensionamento foram desenvolvidos sendo o mais recente, e objeto de interesse neste trabalho, o AASHTO 2002, proposto pelo *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) no projeto 1-37 A, que introduziu uma nova forma para a caracterização do tráfego: os espectros de carga por eixo (*Axle Load Spectra*).

Em seu trabalho Guo, Prozzi e Tuditud (2005) afirmaram que o número equivalente de solicitações do eixo padrão não pode determinar as informações do tráfego real, pois é

apenas um método de aproximação para quantificar a carga do tráfego. Concluíram tais autores que o espectro de carga produz um método exato e confiável para computar as cargas de tráfego e recomendaram que mais atenção fosse dada a este conceito, pois a partir de sua aplicação a previsão do desempenho é mais precisa.

O novo método de dimensionamento de pavimentos proposto pelo NCHRP é uma mudança radical do método empírico baseado nos ESALs, assim a partir da quantificação das características do tráfego usando diretamente todas as cargas por eixo, ao invés de convertê-las em ESALs, é possível analisar os impactos das variações das cargas de tráfego no pavimento e prover um adequado dimensionamento da estrutura do pavimento (Jiang *et al*, 2008).

3.1 O Projeto NCHRP 1-37A

No ano de 2004 foi lançado o relatório final do Projeto NCHRP 1-37A. O projeto constou de uma pesquisa desenvolvida pelo NCHRP e patrocinada pela AASHTO (*American Association of Highway Transportation Officials*), onde foi desenvolvido um novo método empírico-mecanístico para o projeto de pavimentos novos e reabilitados, então denominado de “Guia de Projetos AASHTO 2002 para dimensionamento de estruturas de pavimentos novos e reabilitados”, além de um software computacional, conhecido como MEPDG (*Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*), e a documentação baseada no procedimento de dimensionamento do guia. (NCHRP, 2004)

Os métodos de dimensionamento anteriormente utilizados e muito difundidos pela AASHTO (Guia AASHTO 1972/1986/1993) fundamentam-se na análise estatística dos dados obtidos na pista experimental da AASHO que datam entre os anos de 1958 e 1960, sendo métodos empíricos. A necessidade da revisão desses métodos foi observada pela constatação de que o volume de tráfego nas rodovias americanas após a década de 60 cresceu exponencialmente, bem como a evolução das configurações dos veículos e pressões aplicadas pelos pneus nos pavimentos. Pode-se observar que as versões anteriores estavam apoiadas em uma pequena variabilidade de materiais, tipos de pavimentos e condições ambientais, além do subleito ser considerado único e constante ao longo das seções de testes. Dessa forma, pode ser afirmado que há uma série de restrições quanto à sua aplicação para condições não compatíveis com os experimentos da AASHO, e nisso se encaixa o Brasil. A seguir, com base principal no relatório da NCHRP (2004), os pontos principais são apresentados de forma resumida.

3.1.1 Guia de dimensionamento AASHTO 2002

O dimensionamento proposto pelo AASHTO 2002 é o critério mais recente disponível atualmente. Sua abordagem francamente empírico-mecanística, fruto da calibração de modelos teóricos com dados experimentais obtidos em campo e laboratório, permite avaliar o comportamento estrutural dos pavimentos de forma coerente e analítica.

De acordo com o relatório do NCHRP (2004), o guia proporciona um conjunto de procedimentos para o dimensionamento de pavimentos novos e reabilitados tanto do tipo flexível como do tipo rígido. Segue ainda que o formato empírico-mecanístico fornece uma estrutura para que contínuos melhoramentos sejam feitos no futuro para acompanhar as mudanças nos veículos, materiais, técnicas de construção, conceitos de projetos, tecnologia de computadores etc. O guia está dividido em quatro partes distintas e apêndices:

- *Parte I:* fornece uma visão global sobre o guia, abordando em linhas gerais os objetivos até a previsão do desempenho do pavimento;
- *Parte II:* apresenta definições e procedimentos de como obter os dados de entrada necessários para projetos novos ou de reconstrução, bem como de reabilitação;
- *Parte III:* inclui um material detalhado para auxiliar na compreensão do usuário dos conceitos usados no desenvolvimento do guia e na aplicação adequada dos procedimentos de dimensionamento;
- *Parte IV:* Aborda como o processo empírico-mecanístico pode ser aplicado no dimensionamento de pavimentos sujeitos a baixos volumes de tráfego;
- *Apêndices A a D:* contém informações detalhadas sobre algumas considerações adicionais de projeto, como por exemplo: lista com diretrizes para comparação de estratégias alternativas de dimensionamento; informações sobre análises econômicas das estratégias e um guia do usuário do software.

3.1.2 O programa computacional

A partir da utilização do programa computacional uma dada estrutura de pavimento é analisada e seu desempenho avaliado mediante critérios pré-estabelecidos. Caso seja verificado um comportamento indesejado, tal estrutura deve ser descartada e uma nova deverá ser analisada. O procedimento deverá ser repetido até que a condição desejada seja alcançada.

O processo de dimensionamento está então dividido em três estágios: avaliação; análise e seleção de estratégias. De uma forma um pouco mais detalhada, como pode ser também observado na Figura 3.1, as etapas a serem seguidas são as seguintes:

- Estabelecimento da estrutura do pavimento com os dados referentes ao tráfego, clima e materiais disponíveis conhecidos;
- Seleção de critérios de desempenho com previsão para o nível de confiança desejado;
- Processamento dos dados de entrada para geração dos dados mensais de tráfego, variações sazonais, climáticas e dos materiais;
- Geração das respostas dos pavimentos a partir dos modelos de respostas da estrutura oriundos da teoria de camadas elásticas ou elementos finitos;
- Cálculo dos danos acumulados;
- Previsão dos danos a partir dos modelos de desempenho calibrados;
- Previsão do conforto ao rolamento;
- Avaliação do desempenho da estrutura pré-estabelecida e verificação ao atendimento dos critérios de desempenho no nível de confiança selecionado;
- Submissão de nova estrutura ao processo acima relacionado caso na etapa anterior seja verificado o não atendimento aos critérios estabelecidos.

Figura 3.1- Fluxograma para dimensionamento empírico-mecânico
Fonte: Adaptado de NCHRP (2004)

No que concerne ao tráfego pelo procedimento de projeto estabelecido no guia AASHTO 2002, os dados requeridos para sua caracterização independem do tipo de pavimento

(rígido ou flexível) ou do tipo de projeto (novo ou reabilitado). Conforme encontrado em Sridhar (2008), os dados são:

- *Volume do tráfego de caminhões no ano base (início da abertura do tráfego no segmento em projeto):* tráfego diário médio anual nas duas faixas; número de faixas na direção de projeto; porcentagem de caminhões na faixa de tráfego do projeto e velocidade operacional dos veículos;
- *Distribuição por classe de veículos (caminhões):* representa a porcentagem de cada classe de caminhão dentro do volume diário médio anual;
- *Fatores de distribuição de carga por eixos:* representam a porcentagem da aplicação total de eixos dentro de um intervalo de carga para um tipo específico de eixo e classe de veículo;
- *Configuração de eixos e distância entre eixos:* podem ser obtidas no catálogo do fabricante ou medidas em campo;
- *Características do pneu e pressão de enchimento:* valores especificados no manual e valores padrões a serem usados no software;
- *Fator de crescimento de caminhões:* representa o volume futuro de tráfego de caminhões estimado para uma idade em particular do pavimento e requerem contagens de tráfego contínuas em locais específicos ao longo de vários anos. Há três funções de crescimento recomendadas pelo método empírico-mecanístico: nula; linear e composta.

3.1.2.1 Os dados de entrada

No MEPDG (NCHRP, 2004) é utilizada uma aproximação hierárquica na incorporação das variáveis de entrada, de acordo com a importância do projeto e a disponibilidade de dados, o que permite ao projetista uma maior flexibilidade. Tal aproximação se refere a dados relativos ao tráfego, aos materiais e ao meio ambiente. A hierarquização pode ser feita em três níveis:

- *Nível 1:* é a mais meticulosa e com o maior nível de precisão, deve ser usada para dimensionamento de pavimentos onde as consequências de um colapso precoce podem ser muito significantes. Este nível requer dados laboratoriais ou de campo, como por exemplo, módulo de resiliência da mistura asfáltica, deflexões e espectros de carga por eixo específicos do local;

- *Nível 2:* é um nível intermediário. Seu uso é justificado quando não há disponibilidade de equipamentos e recursos que seriam necessários ao nível 1, dessa forma são usadas equações de regressão, ou seja, correlações empíricas que permitam extrapolar os valores necessários a partir de um conhecido. Prozzi e Hong (2005) ressaltam que nesse nível são necessários os espectros de carga regionais juntamente com contagens e classificações de veículos específicos do local;
- *Nível 3:* menor nível de precisão. Nele são usados valores médios da região. Os dados de tráfego são obtidos a partir de pesagens nacionais, contagens manuais ou automáticas de veículos ou até mesmo a partir da experiência local. De acordo com Mehta *et al* (2008), como este nível conta com valores padrões nacionais e regionais, um dimensionamento antieconômico pode ser gerado, pois os valores disponibilizados pelo órgão rodoviário estadual nem sempre são próximos dos valores padronizados. Assim, as entradas desse nível podem não ser aplicáveis para todos os tipos de pavimentos e condições.

Prozzi e Hong (2005), no estudo da hierarquia de dados para o projeto empírico-mecanicista, ressaltaram que para análises e dimensionamento precisos e consistentes com o nível 1 e 2 são necessários mais dados, que só podem ser obtidos com a instalação de uma densa rede de postos de pesagem *WIM* adequadamente planejada, operada, mantida e gerenciada.

No MEPDG oito passos importantes devem ser seguidos para o processamento final dos dados de entrada:

- i. Determinação de incrementos (horários e mensais);
- ii. Determinação do Tráfego Diário Médio Anual (TDMA) para o ano base;
- iii. Determinação da distribuição normalizada do tráfego por classe de caminhões para o ano base;
- iv. Determinação do número de eixos por tipo de eixo e classe de caminhões;
- v. Determinação do espectro de carga por eixo normalizado por cada tipo de eixo e classe de caminhão;
- vi. Previsão do tráfego de caminhões com revisão de incrementos para cada ano consecutivo, durante toda a análise da vida útil de projeto;
- vii. Multiplicação do espectro de carga por eixo e também do espectro da classe de caminhões para determinar o número total de aplicações do eixo, dentro de cada grupo de carga por eixo, cada tipo de eixo e para cada hora de cada mês de cada ano, dentro da análise da vida útil de projeto;

viii. Especificação de detalhes relativos às cargas por eixo e pneus.

3.1.2.2 Modelos de previsão de desempenho

No método AASHTO 2002 considera-se o desempenho referido apenas ao aspecto funcional e estrutural do pavimento. O desempenho estrutural é relativo à sua condição física (trincas por fadiga e afundamentos nas trilhas de rodas para os pavimentos flexíveis e falha na junta e trincas na placa para os pavimentos de concreto) e o desempenho funcional relativo à irregularidade longitudinal expresso pelo índice *International Roughness Index* (IRI).

Para a verificação do desempenho é necessário primeiramente o cálculo das tensões, deformações e deslocamentos da estrutura do pavimento, respostas estas provocadas pelo tráfego e/ou fatores ambientais. O cálculo de tais respostas no pavimento flexível é realizado com base na teoria elástico-linear pelo programa JULEA (*Jacob Uzan Layered-Elastic Analysis*). No guia é observado que se o usuário optar pelos níveis 1 para caracterizar os módulos de resposta não lineares para qualquer material das camadas (base, sub base e/ou subleito) uma análise de elementos finitos é executada por intermédio do programa de elementos finitos em 2D DSC2D, ressaltando que esta abordagem ainda não está calibrada. Para os pavimentos rígidos o programa de elementos finitos ISLAB2000 é usado.

As respostas estruturais obtidas são aplicadas em modelos de deterioração relativos a trincas e à deformação permanente e usadas para a previsão de danos acumulados ao longo do período de projeto. É importante ressaltar que para a verificação das respostas estruturais do pavimento são utilizados os seguintes parâmetros: espessura das camadas; propriedades dos materiais e o carregamento do tráfego. (NCHRP, 2004)

Os modelos de previsão, ou funções de transferência, desenvolvidos no Projeto NCHRP 1-37A para trincas por fadiga, taxa de deterioração e afundamento nas trilhas de rodas são apresentados nas Equações 6, 7 e 8, respectivamente. (Wang e Machemehl, 2006; Wang, 2005)

$$N_f = 0,00432 \times k_1 \times C \times (\varepsilon_t)^{-3,9492} (E)^{-1,281} \quad (6)$$

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_{fi}} \quad (7)$$

$$RD = \sum_{i=1}^{n_l} \varepsilon_p^i h^i \quad (8)$$

onde:

- **N_r** : número de repetições de carga para a deterioração;
- **k_1** : fator de correção para espessura da camada de concreto asfáltico

$$\left(k_1 = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{11,02 - 3,49 H_{ca}}}} \right);$$
- **ε_t** : máxima deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento (*trincas bottom-up*) ou no topo do revestimento (*trincas up-down*);
- **E** : módulo de elasticidade do revestimento, em psi;
- **C** : fator de ajuste de laboratório ou campo ($C = 10^M$);
- **D** : taxa total de dano por trincas ao final da vida útil;
- **M** : variável intermediária $\left[M = 4,84 \times \left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0,69 \right) \right];$
- **V_a** : volume de vazios no concreto asfáltico;
- **V_b** : volume de betume no concreto asfáltico;
- **H_{ca}** : espessura do concreto asfáltico, em polegadas;
- **m** : número de intervalos de carga no espectro de carga por eixo;
- **n_i** : número de repetições de carga para o i -ésimo intervalo de carga incremental;
- **N_{fi}** : número admissível de repetições de carga para a condição de carregamento;
- **RD** : deformação permanente total, ou profundidade do afundamento;
- **n_l** : número de camadas do pavimento;
- **ε_p^i** : deformação vertical de compressão na i -ésima camada do pavimento;
- **h^i** : espessura da i -ésima camada.

No MEPDG o surgimento da deterioração afundamento nas trilhas de rodas considera o acúmulo das deformações permanentes ao longo de todas as camadas do pavimento.

3.1.3 AASHTO 1993 x AASHTO 2002

Além das diferenças conceituais entre as duas abordagens de dimensionamento de pavimentos, a empírica e a empírico-mecanística, algumas diferenças entre o método empírico AASHTO 1993 e o empírico-mecanístico AASHTO 2002 são importantes de relacionar, são elas (Carvalho e Schwartz, 2006):

- O método AASHTO 1993 dimensiona os pavimentos levando em consideração um único critério de desempenho: o *Present Serviceability Index* (PSI); já o AASHTO 2002 considera, para pavimentos flexíveis, os critérios de desempenho de trincas por fadiga, de afundamento nas trilhas de rodas e de irregularidade;
- Mais variáveis são consideradas no AASHTO 2002, principalmente no que diz respeito às propriedades dos materiais e propriedades ambientais;
- O guia AASHTO 1993 foi desenvolvido com base em dados de campo de trecho experimental de um único local (clima, materiais etc. relativos à seção de teste em Ottawa); o AASHTO 2002 foi desenvolvido com dados de várias seções de teste ao longo dos EUA (banco de dados do projeto LTPP);
- O método AASHTO 1993 utiliza a caracterização do tráfego com base no conceito de equivalência de cargas (ESALs), enquanto que o AASHTO 2002 define o tráfego em termos de espectros de carga por eixo.

3.2 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo pode ser visto que o novo método de dimensionamento de pavimentos proposto pelo NCHRP é uma mudança radical do método empírico, pois a quantificação das características do tráfego é feita a partir de todas as cargas por eixo, ao invés de convertê-las em ESALs. Dessa maneira, os impactos das variações das cargas de tráfego no pavimento podem ser analisadas, bem como um adequado dimensionamento da estrutura do pavimento pode ser realizado. As principais diferenças abordadas entre o método empírico e o empírico-mecanístico vão desde a forma de caracterização do tráfego e as variáveis consideradas (clima, propriedade dos materiais, propriedades ambientais etc) até os critérios de desempenho.

No guia do novo método são estabelecidos vários procedimentos para auxiliar no dimensionamento de pavimentos novos e reabilitados, tanto para o tipo rígido como o tipo flexível. Destaca-se que há um capítulo específico para dimensionamento de pavimentos sujeitos a baixos volumes de tráfego.

No método proposto pelo NCHRP, a partir do relatório 1-37A, simulações realizadas com o programa computacional MEPDG possibilitam que estruturas de pavimento sejam analisadas e seus desempenhos sejam avaliados mediante alguns critérios pré-estabelecidos. Ao todo oito passos devem ser seguidos para o processamento final dos dados de entrada.

O MEPDG foi concluído em 2004 e liberado ao público para revisão e avaliação. Uma revisão formal do Projeto NCHRP 1-37A foi conduzida no Projeto NCHRP 1-40A, resultando em algumas melhorias. Tais mudanças foram incorporadas ao método no projeto 1-40D, gerando a versão 1.0 no software MEPDG (AASHTO, 2008).

4 DISTRIBUIÇÃO DE CARGAS POR EIXO: ESPECTROS DE CARGA POR EIXO (*AXLE LOAD SPECTRA*)

No presente capítulo, o conceito de espectros de carga por eixo adotado no método empírico-mecanístico da AASHTO 2002 é detalhado abordando-se os estudos relativos à forma de obtenção e ajuste de dados, bem como aqueles estudos relativos aos efeitos observados no desempenho dos pavimentos a partir da aplicação desta nova forma de configuração do tráfego de veículos comerciais de carga.

4.1 Considerações Iniciais

Os espectros de carga por eixo consistem, de acordo com Haider e Harichandran (2007), de informações de carga por eixo e de suas repetições para várias configurações (eixos simples, tandem duplos e triplos), sendo então usadas para criar distribuições que representam as cargas dos eixos e as variações a elas associadas.

Timm, Bower e Turochy (2006) descreveram que espectros de carga são distribuições de peso por eixo desenvolvidas para cada tipo de eixo, para um determinado fluxo de tráfego. Essas distribuições serão utilizadas na modelagem das respostas mecânicas do pavimento necessárias à determinação das funções de deterioração empíricas para prever a vida remanescente do pavimento. Para Salama, Haider e Chatti (2007), essa é a forma mais precisa atualmente para representar o tráfego real e que possibilita investigações mais detalhadas sobre a deterioração dos pavimentos.

Na Figura 4.1 estão representados espectros de carga por eixos simples e tandem duplo, coletados no ano de 2001 no Estado do Alabama e usados como exemplo no trabalho de Timm, Bower e Turochy (2006).

Figura 4.1 - Exemplo de espectros de carga
Fonte: Timm, Bower e Turochy (2006)

4.2 Desenvolvimento dos Espectros de Carga por Eixo

Desde o lançamento do novo método AASHTO 2002, vários trabalhos relatam as experiências com relação aos aspectos específicos de desenvolvimento dos espectros de carga e a implementação do MEPDG nos setores rodoviários, principalmente ao longo dos Estados Unidos, como por exemplo, os trabalhos de Buchanan (2004); Al-Yagout (2005); Hong, Prozzi e Prozzi (2007); Sridhar (2008); Swan *et al* (2008); Jiang *et al* (2008); Mehta *et al* (2008). A seguir são apresentados itens relativos ao desenvolvimento (tamanho da amostra, níveis, abrangência da coleta de amostras e procedimentos), modelagem estatística e a consideração dos espectros de carga na previsão do desempenho de pavimentos flexíveis.

4.2.1 Tamanho da amostra

Muitos estudos ao longo dos anos na área rodoviária têm utilizado amostras de dados ao invés do uso da população de dados. Esse procedimento tem sido justificado pelo elevado custo envolvido para coleta, registro e processamento de grande quantidade de dados, tendo em vista a preocupação de muitos órgãos rodoviários com as limitações orçamentárias e restrições de recursos.

Sendo assim, um item importante em qualquer pesquisa é a escolha do tamanho adequado da amostra de dados a utilizar, de forma a representar de maneira mais fiel possível as características do objeto de trabalho. Como este trabalho tem como objeto principal o tráfego, a coleta aqui abordada se refere exclusivamente a ele – o tráfego. Os órgãos

rodoviários geralmente coletam três tipos de dados relativos ao tráfego: pesagens do tipo dinâmica (estações *WIM*); classificação automática de veículos e contagens manuais de veículos. Esses dados podem ser expandidos a partir da estimativa de tráfego obtida por modelos de previsão e de geração de viagens.

Para que as distribuições de carga por eixo fossem representadas de uma maneira confiável, alguns estudos foram realizados para verificar qual o tamanho ideal que a amostra de dados de pesagem deve apresentar para que possam ser capturados, com o máximo de precisão, os espectros de carga por eixo da região em estudo. Por exemplo, Hallenbeck (1998), no protocolo de critérios de amostragem para coleta de dados de monitoramento de tráfego para diferentes tipos de experimento do Programa LTPP (*Long Term Pavement Performance*), estabeleceu que amostras de 2 dias por ano de dados obtidos em estações *WIM* são capazes de produzir cerca de 50% de estimativa de carga a um nível de confiança de 95% e no Guia de Monitoramento de Tráfego da FHWA (FHWA, 2001) há orientações gerais para os critérios de amostragem para coleta de dados relativos à contagem e classificação de veículos.

Na Tabela 4.1, de acordo com o relatório desenvolvido por Buchanan (2004), são apresentados os tamanhos mínimos (em número de dias no ano) da amostra de dados de pesagem dinâmica (*WIM*) para estimar a distribuição de carga por eixo para um específico intervalo de confiança e erro esperado.

Tabela 4.1 - Tamanho mínimo da amostra (em número de dias do ano) para estimar a distribuição de cargas por eixo

Erro Esperado (± percentual)	Nível de confiança (percentual)				
	80	90	95	97,5	99
20	1	1	1	1	1
10	1	1	2	2	3
5	2	3	5	7	10
2	8	19	30	43	61
1	32	74	122	172	242

Fonte: Buchanan (2004)

Além dos trabalhos citados anteriormente, Hong, Prozzi e Leung (2008) desenvolveram uma pesquisa com o intuito de investigar o efeito de diferentes esquemas de amostragem na precisão dos dados de tráfego a partir de informações coletadas em sistema *WIM* no estado do Texas. No estudo, três frequências na amostragem foram realizadas: mensal; trimestral e

anual, sendo que para cada uma delas foram considerados três tamanhos para o período de coleta: um dia; dois dias consecutivos e uma semana.

Os autores destacaram que a amostragem e processamento de dados *WIM* são muito demorados, sendo este o motivo para a escolha de apenas três esquemas de amostragem. Com os resultados, foi verificado que o aumento do tamanho da amostra gerou uma melhora na precisão da distribuição de cargas e uma menor variabilidade, ou seja, amostras de 2 dias por trimestre, 1 dia por mês, 2 dias por mês, uma semana por trimestre e uma semana por mês são suficientes para fornecer dados precisos de tráfego para serem usados no projeto de pavimentos. Com relação às amostras de uma semana por ano (sete dias consecutivos), observou-se que seu uso não possibilita a captura da variação sazonal nas cargas por eixo existentes ao longo do ano.

Lu e Harvey (2006) usaram para o desenvolvimento de espectros de carga na Califórnia amostras de dados de carga de estações *WIM* de períodos de uma semana (7 dias consecutivos) por ano, pois numa análise preliminar foi observado que havia significativa diferença no padrão de tráfego entre os dias da semana e os dos finais de semana, mas pouca diferença entre as semanas de um mesmo mês. Já Ishak *et al* (2010), no estudo conduzido em Lousiana, usaram dados de tráfego de 96 estações *WIM* portáteis referentes a 2 dias consecutivos, mas recomendaram que os dados fossem coletados por um período maior tendo em vista que a limitação da quantidade de dados usados no estudo compromete a qualidade destes.

Em estudo anterior na Lousiana, Sridar (2008) apresentou em seu trabalho que a coleta de dados de tráfego relativos a dois dias não fornece uma estimativa correta das mudanças nas características dos veículos de forma anual, sazonal ou diária. Além disso, o dado de peso por eixo nessas amostragens de 48 horas é inadequado para comparar dois locais com fatores de distribuição de carga por eixo e para construir vários grupos de rodovias com características similares de peso de caminhões, ou seja, também não é possível desenvolver espectros de carga abrangendo um local em especial e caracterizar as cargas de tráfego de forma precisa.

No estado da Virgínia, Smith e Diefenderfer (2010) usaram dados *WIM* de um período de 1 semana, de domingo a sábado, para cada mês num período de junho de 2007 a maio de 2008. Baseados na previsão de precisão de dados de acordo com a quantia coletada fornecida pelo material do MEPDG, o erro esperado para o espectro de carga desse trabalho foi de 2% com 99% de nível de confiança.

Verifica-se que com o aumento da quantidade de dados de tráfego (aumento do tamanho da amostra) a precisão estatística aumenta. De acordo com Li *et al* (2007) curtos períodos de coletas geram valores extremos nos resultados (previsão de desempenho, por exemplo) e indicam em seu trabalho após comparação entre cenários mensais (1, 3, 6, 9 meses) e anual (12 meses) que até três meses completos de dados de tráfego são suficientes para evitar valores extremos e proporcionar suficiência estatística e previsão realística do desempenho de pavimentos.

4.2.2 Os níveis de coletas de dados (abrangência)

A coleta de dados para o desenvolvimento dos espectros de carga pode ser realizada em três diferentes tipos de níveis de abrangência que, de acordo com NCHRP (2005), são:

- *Local específico*: para que esse tipo de nível de coleta possa ser realizado o Estado deve ser capaz de pesar os caminhões na estrada na qual o novo pavimento será colocado. Para a coleta de dados neste nível, a balança para verificação do peso por eixo deve estar localizada de modo que o tráfego medido por ela seja basicamente o mesmo que opera na faixa de projeto do segmento a ser projetado, ou seja, a variação das taxas de carregamento do tráfego não deve ser considerável. Os erros relativos às distribuições de localizações específicas são normalmente devidos ao equipamento e erros de calibração, bem como erros causados na amostragem do fluxo de tráfego;
- *Grupo de estradas por peso do caminhão*: são distribuições de carga resumidas que representam as cargas por eixos encontrados em estradas que possuem características de peso de caminhão similares. Neste tipo, de acordo com a FHWA (2001), os dados relativos ao tráfego são agrupados por estradas pelas características do transporte rodoviário para que os espectros de carga em todas as estradas de um grupo sejam razoavelmente similares. As características das estradas que podem ser usadas para definir os grupos são: a região do estado; a natureza da mercadoria sendo transportada e às vezes o tipo e localização da via. Lu *et al* (2009) ressaltam que a determinação de grupos é difícil, pois o fluxo de tráfego nas rodovias é composto de veículos com diversas áreas de origem e destino e, portanto são afetados pelas características demográficas e econômicas dessas áreas;
- *Estadual*: deve ser usada somente quando o órgão estadual rodoviário tem pouco conhecimento das cargas dos caminhões na rodovia sendo projetada. A

distribuição de carga por eixo é então obtida a partir da combinação dos dados coletados em todos os locais com estações *WIM* no estado. Representam, então, uma média das condições que podem ser usadas se algo melhor não está disponível, sendo a forma menos desejável para os dados da distribuição de cargas por eixo.

4.2.3 Espectro de carga padrão

Espectros padrões de carga por eixo incorporados no MEPDG foram determinados a partir da análise de 163 seções de teste selecionadas do banco de dados de tráfego do LTPP que continham extensivos dados de tráfego. Tais espectros são dependentes da classificação de tráfego de caminhões da rodovia. O uso desses valores para dimensionamento deve ser feito somente em casos de locais onde não há equipamentos apropriados para coletas de dados de tráfego.

Os valores padrões sugeridos para os espectros de carga para cada tipo de eixo e classe de veículo estão apresentados no apêndice AA.7 do Guia em forma gráfica (histogramas) e em Tabelas. Resumindo, os valores padrões são fornecidos para os seguintes parâmetros de entrada:

- Distribuição normalizada de caminhões por cada dia do ano por classificação do projeto estrutural da rodovia;
- Detalhes de carregamento por eixo de carga e configuração;
- Fatores de tráfego.

4.2.4 Espectros de carga por eixo do Mississippi

Em estudo conduzido por Buchanan (2004), pela Universidade Estadual do Mississippi, espectros anuais de carga para eixos simples, tandem duplos e tandem triplos de cada tipo de classe de veículo foram determinados com base nos dados dos locais do Mississippi constantes na base de dados do Programa LTPP.

A princípio os dados usados para o desenvolvimento dos espectros de carga seriam aqueles fornecidos pelo Departamento de Transportes do Mississippi e complementados com os dados existentes na base de dados do Programa LTPP de locais no Mississippi. Em função de problemas ocorridos durante o download e a exportação de dados aos arquivos do

FHWA CARD, somente os dados do LTPP relativos ao Mississippi foram utilizados (ao todo dados de 22 seções de teste).

O procedimento descrito para obtenção do espectro de carga no MEPDG foi seguido. Os espectros foram desenvolvidos de acordo com um sistema grupos de classificação de tráfego de caminhões, o *Truck Traffic Classification – TTC*, o qual é função da distribuição das classes de veículos nos locais pesquisados determinados entre as classes 4 a 13 da FHWA. No MEPDG são elencados 17 grupos de classificação de tráfego de caminhões (NCHRP, 2004, parte 2, p. 2.4.16 e 2.4.17); no estudo conduzido no Mississippi a maior parte dos locais foi classificada como tipo 3 (rota principal de caminhões de um ou mais reboques).

Os espectros de carga por eixo para cada tipo de veículo dentro de cada grupo de classificação de tráfego foram desenvolvidos e comparados aos espectros padrões. Apesar dos espectros aparentarem razoabilidade, os espectros padrões dos eixos simples e tandem duplo assemelharam-se mais aos do grupo 3 (TTC 3) que aos dos outros grupos. Nesse estudo os espectros para os eixos tandem triplo apresentaram alta variabilidade devido ao limitado número de registros desses tipos de eixos e os espectros para os eixos quádruplos não puderam ser desenvolvidos pela insuficiência de dados disponíveis de tais tipos de eixos. Na Figura 4.2 os espectros desenvolvidos para o ETD do veículo classe 9, para cada grupo de classificação de tráfego, são apresentados.

Figura 4.2 - Espectro de carga por eixo para os ETD do veículo tipo 9 no Mississippi

4.2.5 Espectros de carga por eixo de Washington

No estudo de Al-Yagout *et al* (2005) foram desenvolvidos espectros de carga de caminhões para a melhoria do dimensionamento de pavimentos do Estado de Washington. Para tanto foram coletados dados de eixos de carga com estações *WIM* ao longo do Estado. Assim, um procedimento para calcular o espectro de carga por eixo dos caminhões no Estado de Washington, seguindo os procedimentos do MEPDG, foi desenvolvido propondo oito passos:

- Obter dados de tráfego a partir do WSDOT (*Washington State Department of Transportation*) entre janeiro de 2000 e abril de 2003;
- Verificar os postos que tinham dados inutilizáveis, principalmente a partir dos relatórios elaborados pelo WSDOT;
- Avaliar os dados de tráfego de cada posto para assim determinar a exatidão destes. Para tanto, foram plotados gráficos de pesos brutos versus frequência e/ou número de caminhões da classe 9 (classificação FHWA) para produzir gráficos que, de acordo com o cenário, receberiam as caracterizações: ideal; aceitável, mas não ideal; uso parcial dos dados e eliminação da estação WIM. Para ser considerado ideal o gráfico deveria apresentar dois picos: o primeiro entre 30 a 35 kips (13,6 a 15,9 t) e o segundo entre 75 a 80 kips (34,1 a 36,4 t), onde o limite de carga federal para esta classe é de 80 kips (36,4 t). Notou-se que os veículos vazios dessa classe geralmente pesavam entre 28 a 35 kips (12,7 a 15,9 t). Portanto, os picos do gráfico ideal coincidiam com os pesos do veículo classe 9 vazio e totalmente carregado. O gráfico considerado aceitável apresenta um pico superestimado de veículos vazios. Já os que propõem uso parcial dos dados apresentam somente em certos meses comportamento ideal, sendo que somente estes devem ser incluídos no estudo. Aqueles dados que produzissem picos incompatíveis com os picos costumeiros (variação no comportamento dos picos para o veículo totalmente carregado ou picos indefinidos) deveriam ser excluídos, ou seja, os dados dessa estação WIM não deveriam ser considerados;
- Plotar o peso do eixo de direção dos veículos da classe 9 (classificação FHWA) *versus* a frequência ou peso médio do eixo de direção por ano. Já que o eixo de direção deve ter um peso variando entre 8500 a 12000 lbs (3,8 a 5,4 t), o teste pode ter um dos 3 efeitos: todos os meses apresentam gráficos similares com pico na faixa de valores anteriormente mencionada (comportamento ideal) e neste caso todos os meses devem ser incluídos; somente alguns meses exibem

gráficos similares ao ideal e então somente esses devem ser incluídos; e nenhum dos meses reflete a dominância de tal faixa de peso, portanto os dados dessa estação devem ser desconsiderados;

- Importar os dados originais coletados no WIM para o software de base de dados (Microsoft Access, por exemplo) e avaliá-los (tipo de veículo, peso bruto, dia, hora, ano, mês etc.). Nessa pesquisa dentre os 52 locais considerados, apenas 11 passaram nos testes descritos anteriormente;
- Verificar se as tendências do tráfego de veículos classe 4 a 13 (classificação FHWA) nas estações são similares e se elas têm os padrões de carregamento: sazonais (isto é, fatores de veículo médios para eixos simples em tandem duplo e triplo) e espectros de carga típicos para eixos simples, tandem duplos e triplos;
- Desenvolver os fatores de veículos típicos e sazonais por eixo para cada classe de veículo;
- Desenvolver o espectro de carga típico que satisfaça os requisitos do Guia de Dimensionamento AASHTO 2002.

4.2.6 Espectros de carga por eixo de Lousiana

O estudo conduzido por Sridhar (2005) no estado da Lousiana objetivou o desenvolvimento de espectros de carga por eixo para melhorar o dimensionamento e o desempenho do pavimento com base no novo guia de dimensionamento empírico-mecanístico da AASHTO (MEPDG).

Antes do desenvolvimento dos espectros, algumas estações WIM foram avaliadas a partir do teste do eixo de direção e do peso bruto para eliminar dados errôneos de tráfego. Nesses testes de 96 estações selecionadas para o estudo apenas 51 passaram no controle de qualidade e foram usados no desenvolvimento da distribuição de cargas por eixo.

Além disso, as estações WIM que possuíam características similares de tráfego de caminhões foram agrupadas. Os espectros de carga por eixo simples, tandem duplo e tandem triplo desenvolvidos nesse estudo basearam-se no procedimento de classificação de tráfego de caminhões. Os espectros de carga e a distribuição de classes de veículos foram comparados com os valores padrões e assim foi verificado que houve uma boa concordância das distribuições de veículos e do eixo simples. Com relação aos espectros padrões de eixos tandem duplo e triplo, observou-se que estes eram totalmente diferentes dos gerados a partir dos grupos formados pela classificação de tráfego de caminhões.

4.3 O Projeto NCHRP 1-39

No relatório do projeto NCHRP 1-39 (NCHRP, 2005), são fornecidas orientações para a coleta de dados de tráfego a serem utilizados no dimensionamento de pavimentos, além da inclusão de um software, chamado de TrafLoad, para ponderar e produzir as entradas de dados de tráfego necessárias para análise e concepção mecanicista do pavimento. Assim, pode-se dizer que o software TrafLoad foi projetado para converter os dados de monitoramento do tráfego em entradas para o software de dimensionamento de pavimento do guia da AASHTO 2002. O TrafLoad tem como saídas:

- Os espectros de carga por classe de veículos e tipo de grupo de eixos;
- O erro estatístico para o espectro de carga por eixo;
- Tráfego diário médio anual (TDMA) em função da classe de veículos;
- Coeficientes de variação para o TDMA por classe de veículos;
- Distribuição mensal do TDMA;
- Fator de distribuição direcional;
- Distribuição horária do TDMA por classe de veículo;
- Número médio de grupos de eixos (por tipo) para cada classe veicular;
- Taxas de crescimento para o TDMA.

4.4 Modelagem das Distribuições de Carga por Eixo

Em função da forma em que os dados de tráfego devem ser inseridos no método de dimensionamento AASTHO 2002, métodos simplificados para gerar os espectros de carga por eixo têm sido desenvolvidos. Assim, vários trabalhos têm dado ênfase à criação de modelos matemáticos a partir de distribuições de carga por eixo (espectros de carga) para caracterizar o tráfego original da forma mais exata possível, para que posteriormente possam ser diretamente aplicados nos modelos mecanísticos para calcular as respostas do pavimento que está sob a ação do carregamento.

De acordo com a afirmativa de Timm, Tisdale e Turochy (2005), alguns estados americanos possuem sistema de aquisição de dados necessários para a montagem do espectro de carga a partir do uso de balanças portáteis ou com estações *WIM*, mas infelizmente nem todos os casos são assim. Na maioria dos cenários envolvidos no projeto de pavimentos, os espectros de carga com dados específicos do local não são obtidos, pois estão disponíveis somente os dados relativos ao volume de tráfego a partir de contagem de eixos. Assim, é

importante o desenvolvimento de espectros de carga padrões, ou representativos, que possam ser utilizados com algum nível de confiança no projeto de pavimentos para os casos similares ao anteriormente comentado.

Ainda segundo tais autores, há vários trabalhos voltados para o desenvolvimento de equações matemáticas para modelar o espectro de carga com o intuito de preencher essa lacuna. A seguir algumas pesquisas relativas ao assunto são abordadas.

4.4.1 Modelo de distribuição combinada do Alabama

Este item tem como base os trabalhos de Timm, Tisdale e Turochy (2005) e Turochy, Timm e Tisdale (2005). Esses autores propuseram uma combinação de distribuições teóricas para caracterizar a distribuição de eixos de carga, justificando sua escolha no fato das distribuições de eixo de carga ser sempre complexas e não bem representadas por distribuições teóricas estatísticas individuais.

Para o estudo foram utilizados dados de tráfego coletados em estações *WIM* de treze vias arteriais principais na área rural do estado do Alabama durante o ano de 2001. Para a elaboração do modelo foi usada uma combinação linear das distribuições log-normal e normal, aplicando-se aos dados um procedimento de regressão para determinar os parâmetros da modelagem. Como verificação final o coeficiente de determinação R^2 foi usado para mensurar a precisão do modelo desenvolvido.

Durante o estudo foi verificado que as distribuições apresentavam múltiplas concentrações de tendência central, assim foi decidido utilizar a hipótese da decomposição de eixos de carga em duas ou mais distribuições teóricas. Os parâmetros f_1 , f_2 , como observados na Figura 4.3, representam as distribuições teóricas que são somadas em adequadas proporções (p_1 e p_2) para formar a função densidade de probabilidade final f^* . Dependendo do número de picos, têm-se a quantidade de funções teóricas necessárias ao ajuste e, consequentemente, as proporções a elas relacionadas. Assim, de uma forma geral, o modelo de distribuição mista pode ser expresso pela Equação 9:

$$f^* = \sum_{i=1}^n p_i f_i \quad (9)$$

Figura 4.3 - Esquema do modelo de distribuição mista
Fonte: Timm, Tisdale e Turochy (2005)

A seleção das distribuições foi feita a partir daquelas comumente usadas e que tinham potencial para modelar com exatidão a distribuição de eixos mensurada. Então, pelo formato de sino apresentado pela distribuição dos eixos de carga foi escolhida a distribuição normal para modelar o segundo pico formado pelos dados. Na Equação 10, a função densidade de probabilidade usada para a distribuição normal é apresentada.

$$f(x; \mu; \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}, \quad -\infty < x < \infty \quad (10)$$

A distribuição normal também seria usada no primeiro pico da distribuição dos dados, mas devido a sua natureza de possuir caldas infinitas, que podem prever valores negativos se o primeiro pico for próximo de zero, seria necessário utilizar um artifício para evitar a previsão de pesos negativos de eixos. Portanto, outra distribuição, a log-normal, foi aplicada por apresentar, como parte de sua definição matemática, um limite inferior de zero. A função densidade de probabilidade da log-normal segue representada nas Equações 11 e 12:

$$f(x; \mu; \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma x}} \cdot e^{-[\ln(x)-\mu]^2/2\sigma^2}, \quad x \geq 0 \quad (11)$$

$$f(x; \mu; \sigma) = 0, \quad x < 0 \quad (12)$$

onde:

- μ : média dos dados logaritmicamente transformados;

- σ : desvio padrão dos dados logaritmicamente transformados;
- x : carga do eixo.

O desvio padrão $[S(x)]$ e a média $[E(x)]$, dos dados não transformados do primeiro pico, podem ser calculados pelas Equações 13 e 14:

$$E(X) = e^{\mu + \sigma^2/2} \quad (13)$$

$$S(X) = \sqrt{e^{2\mu + \sigma^2} \cdot (e^{\sigma^2} - 1)} \quad (14)$$

Como dito no início deste item, uma análise de regressão simples foi aplicada no modelo estatístico f^* produzido para determinar as incógnitas relativas às distribuições estatísticas (p_i , μ_i e σ_i) utilizadas para formulação do modelo. Para tanto, foi utilizada uma planilha com uma sub-rotina de busca incorporada para procurar pelos valores desconhecidos, dentro de uma gama de valores especificados, de forma a minimizar o erro quadrático. Ou seja, os parâmetros (ou incógnitas) foram obtidos a partir da técnica de regressão dos mínimos quadrados, sendo selecionados aqueles que proporcionaram a menor soma dos quadrados dos desvios, como definido na Equação 15, entre a probabilidade da distribuição real (obtida com os dados de campo) e a probabilidade oriunda da distribuição teórica (dados gerados pelo modelo) para cada intervalo de carga estabelecido no NCHRP 1-37A. Esse procedimento foi repetido até alcançar os parâmetros que resultaram na mínima soma do quadrado dos desvios.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (15)$$

onde:

- **SSE**: soma do quadrado dos desvios;
- y_i : valores de y (probabilidade real ao eixo de carga no intervalo i);
- $\hat{y}$: valores estimados (probabilidade teórica no eixo de carga no intervalo i).

Para determinar o quanto do desvio (erro) observado no estudo era explicado pelo modelo combinado com as distribuições log-normal e normal foi calculado o R^2 usado a Equação 16.

$$R^2 = 1 - \left(\frac{SSE}{SST} \right) \quad (16)$$

O valor da soma total dos desvios (SST) foi obtido a partir do uso da Equação 17.

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (17)$$

onde:

- **SST**: soma total dos quadrados (variação total);
- y_i : valores de y (probabilidade real ao eixo de carga no intervalo i);
- $\bar{y}$: valores de probabilidade média.

A conformidade dos dados à distribuição teórica foi observada a partir da aplicação de um teste de aderência, ou qualidade de ajustamento da distribuição: o teste Qui-Quadrado (Equação 18).

$$\chi_o^2 = \sum_o^i \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (18)$$

onde:

- χ_o^2 : valor qui-quadrado observado;
- O_i : número de eixos observados;
- E_i : número de eixos esperados.

O ajuste do modelo foi verificado comparando o χ_o^2 ao valor crítico do Qui-Quadrado. Para que o modelo fosse considerado de bom ajuste o valor de χ_o^2 deveria ser menor que o crítico.

Os resultados da pesquisa demonstraram que o modelo desenvolvido apresentou uma boa capacidade de caracterização, tanto dos eixos simples como dos eixos tandem duplos, afirmação esta suportada pelos altos valores de R^2 que excederam 0,96 em todos os casos analisados, mesmo embora no teste de aderência os dados dos eixos simples não se ajustavam à distribuição teórica usada para modelar tais eixos de carga.

Ainda, Timm, Tisdale e Turochy (2005) ressaltaram no estudo que espectros de carga padrão desenvolvidos para tipos específicos de veículos podem ser usados por órgãos rodoviários na ausência de dados de pesagem, sendo necessária apenas a disponibilidade dos dados relativos à classificação de veículos.

4.4.2 Modelo para parâmetros da distribuição de carga por eixo relacionados ao peso bruto e volumes de tráfego

A coleta por dados detalhados dos pesos de eixos de cargas de caminhões, e suas correspondentes classes, necessária para o desenvolvimento do espectro de carga é uma operação complexa, cara e trabalhosa em função dos equipamentos envolvidos e do volume de dados coletados. Essa realidade faz com que muitos locais não disponham do sistema de coleta e dessa forma careçam de dados confiáveis para aplicar num dimensionamento de pavimentos e no gerenciamento da malha viária. Em função disto, Haider e Harichandran (2007a), Haider e Harichandran (2007b) e Haider e Harichandran (2007c) relataram a pesquisa desenvolvida para extrair distribuições de cargas por eixos dos dados relativos ao peso bruto dos caminhões e volume de tráfego.

No trabalho foram usadas informações sobre o carregamento dos veículos disponíveis no banco de dados pertencente ao Programa LTPP (*Long-Term Pavement Performance*) e correspondentes a diversas localidades dos EUA. Tais dados incluíam tanto os pavimentos flexíveis quanto os rígidos e eram relativos: à carga, contendo os espectros de carga por eixo para várias configurações de eixos por classe de caminhões, e ao volume de tráfego, contendo o volume diário médio anual para cada classe de veículo na faixa de projeto. Ao todo, dados de 25 locais foram utilizados na pesquisa, sendo 14 locais de pavimentos flexíveis e 11 de pavimentos rígidos.

De posse de todos os dados, o espectro bimodal de carga por eixo para cada combinação tipo de eixo e de veículo foi modelado sendo utilizada uma combinação de duas distribuições normais, como a apresentada na Equação 19. É importante ressaltar que numa combinação de distribuições bimodais contendo duas funções densidade de probabilidade, os dois pesos (p_1 e p_2) são complementares: $p_2 = 1 - p_1$.

$$f(x; \mu_1; \sigma_1; \mu_2; \sigma_2; p_1) = p_1 \cdot \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-[x-\mu_1]^2/2\sigma_1^2} + (1 - p_1) \cdot \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-[x-\mu_2]^2/2\sigma_2^2} \quad (19)$$

Para estimar os parâmetros $\mu_1, \sigma_1, p_1, \mu_2$ e σ_2 , assim como no trabalho relatado no item 4.4.1, foi utilizado o método dos mínimos quadrados, onde os parâmetros da distribuição foram calculados pela minimização da soma dos erros quadráticos entre o espectro de carga teórico (estimado) e o observado (oriundo dos dados de campo).

No banco de dados do LTPP (DataPave) somente as distribuições de carga por eixo estavam disponíveis. Então, para simular as distribuições de peso bruto dos veículos necessárias para dar continuidade ao estudo foram empregadas simulações Monte Carlo usando as informações das distribuições de carga por eixo. Como exemplo os autores relataram o procedimento realizado com o veículo de classe 9 (veículo 3S2 na classificação do DNIT): a distribuição de carga por eixo foi simulada usando a função densidade de distribuição para o eixo simples e para o eixo tandem duplo para o mesmo tipo de veículo e para simular o peso bruto foram combinadas uma distribuição do eixo simples e duas do eixo tandem duplo. O procedimento usou a técnica da transformada inversa da função distribuição de probabilidade. Assim, a função $F_X(x)$, constante na Equação 20, foi calculada para cada tipo de eixo fazendo a somatória das funções de densidade de probabilidade individuais:

$$F_X(x) = \sum_{x_j \leq x} p_X(x_j) \quad (20)$$

Um número aleatório, u_i , entre zero e um foi gerado a partir de uma distribuição uniforme e $F_X(x)$ foi usada para transformar u_i para se obter uma carga por eixo, x_j , satisfazendo a seguinte condição da Equação 21:

$$F_X(x_j - 1) < u_i \leq F_X(x_j) \quad (21)$$

Após o desenvolvimento das distribuições de peso bruto para todos os tipos de veículos foi necessário verificar se elas eram “representativas”. Dessa forma as distribuições de pesos brutos simuladas foram comparadas com distribuições provenientes de outros estudos, como por exemplo, o de Al-Yagout *et al* (2005). Dessa comparação foi concluído haver uma boa concordância entre as distribuições.

As distribuições para peso bruto geradas na simulação apresentaram característica bimodal e também foram modeladas a partir da combinação de distribuições de probabilidade. Os parâmetros das distribuições de peso bruto de veículos foram verificados da mesma forma que aqueles referentes às distribuições de carga por eixo: foi utilizado o método dos mínimos quadrados buscando aqueles que resultavam na minimização da soma dos erros quadráticos entre a distribuição ajustada e a simulada.

Os parâmetros dos dois tipos de distribuições (carga por eixo e peso bruto), além dos volumes de caminhões, foram confrontados de forma a se buscar correlações entre eles.

Para alcançar esse objetivo foram feitas análises de regressão múltipla tanto pela forma multiplicativa (Equação 22), que pode capturar os efeitos não lineares das variáveis, quanto pela aditiva (Equação 23) a partir da transformação da Equação 22 para a forma de regressão log-linear.

$$PCE = \beta_0 \prod_i^n PPB_i^{\beta_i} \varepsilon_{modelo} \quad (22)$$

$$\ln PCE = \ln \beta_0 + \sum_i^n \beta_i \ln PPB_i + \varepsilon_{modelo} \quad (23)$$

onde:

- **PCE**: parâmetro de carga por eixo;
- **PPB_i**: parâmetro de peso do veículo pela classe “i”;
- **β_i**: coeficientes de regressão para variável “i”;
- **β₀**: interseção do plano tridimensional de Y, x₁ e x₂;
- **ε_{modelo}**: modelo de erro.

Na Tabela 4.2 os modelos finais resultantes desse procedimento estão apresentados, sendo que os parâmetros m, s e p representam as médias, desvios padrão e porcentagens (pesos) das distribuições combinadas. O primeiro subscrito nesses parâmetros é 1 ou 2, para 1º ou 2º pico da combinação de distribuições, respectivamente; o segundo subscrito representa o eixo ou o tipo de classe (s para eixo simples, tanto os ESRs quanto os ESRD, t para tandem duplo e número n para classe n). A variável Pr_i apresenta a proporção do volume de caminhões para a i-ésima classe de caminhão expressa na porcentagem.

Assim, para o modelo do parâmetro m_{1,s} (Equação a), ou seja, a média do primeiro pico da distribuição do eixo simples dos veículos, verifica-se que é necessário conhecer a média do 1º pico da distribuição de peso bruto relativo ao veículo classe 5 (m_{1,5}), o desvio padrão relativo a essa mesma distribuição (s_{1,5}), a proporção relativa ao primeiro pico da distribuição de peso bruto do veículo classe 13 (p_{1,13}), o volume relativo aos veículos classe 13 (Pr₁₃), além do desvio padrão para o segundo pico da distribuição de peso bruto dos veículos de classe 8 e 10 (s_{2,8} e s_{2,10}).

Nesse modelo, observa-se que a média dos pesos brutos dos veículos parcialmente carregados (relativos ao 1º pico da distribuição – m_{1,5}) tem o efeito mais significativo na carga média dos eixos simples parcialmente carregados (m_{1,s}) e o expoente de 2,047 significa que um aumento de 1% no parâmetro m_{1,5} será responsável por 2% de aumento no parâmetro m_{1,s}, se todas as outras variáveis permanecerem com os mesmos valores. Para

os outros modelos esse raciocínio pode ser seguido para identificar os efeitos dos parâmetros de peso bruto naqueles relativos aos de carga por eixo.

Tabela 4.2 - Modelos relacionando os parâmetros de carga por eixo aos parâmetros de peso bruto e proporções de caminhões

Modelo	Equação
Eixo Simples:	
$m_{1,s} = 0,00326 (m_{1,5})^{2,047} (s_{1,5})^{0,074} (s_{1,9})^{0,217} (s_{2,8})^{0,37} (s_{2,10})^{-0,39} (p_{1,13})^{0,101} (ln Pr_{13})^{0,031}$ $ln m_{1,s} = -5,727 + 2,047(ln m_{1,5}) + 0,074(ln s_{1,5}) + 0,217(ln s_{1,9}) + 0,37(ln s_{2,8}) - 0,39(ln s_{2,10})$ $+ 0,101(ln p_{1,13}) + 0,031(Pr_{13})$ $R^2 = 0,985, R^2_{aju} = 0,97, SE = 0,077$	(a)
$m_{2,s} = 0,492(m_{2,9})^{0,578} (m_{2,11})^{0,223} (ln Pr_5)^{-0,003}$ $ln m_{2,s} = -0,71 + 0,578(ln m_{2,9}) + 0,223(ln m_{2,11}) - 0,003(Pr_5)$ $R^2 = 0,84, R^2_{aju} = 0,80, SE = 0,028$	(b)
$s_{1,s} = e^{-9,333} (m_{1,5})^{0,959} (m_{2,s})^{2,22} (m_{1,6})^{-0,404} (s_{1,9})^{-0,633} (s_{2,5})^{0,905} (s_{2,8})^{0,446} (p_{1,9})^{0,226} (ln Pr_6)^{-0,042}$ $ln s_{1,s} = -9,33 + 0,959(ln m_{1,5}) + 2,22(ln m_{2,s}) - 0,404(ln m_{1,6}) - 0,633(ln s_{1,9}) + 0,905(ln s_{2,5})$ $+ 0,446(ln s_{2,8}) + 0,226(ln p_{1,9}) - 0,042(Pr_6)$ $R^2 = 0,98, R^2_{aju} = 0,96, SE = 0,12$	(c)
$s_{2,s} = e^{10,957} (m_{1,9})^{-1,454} (ln Pr_6)^{0,051} (ln Pr_9)^{-0,022} (ln Pr_{13})^{-0,039}$ $ln s_{2,s} = 10,957 - 1,454(ln m_{1,9}) + 0,051(Pr_6) - 0,022(Pr_9) - 0,039(Pr_{13})$ $R^2 = 0,86, R^2_{aju} = 0,82, SE = 0,22$	(d)
$p_{1,s} = e^{-11,077} (m_{1,s})^{0,68} (m_{2,11})^{1,443} (ln Pr_{10})^{-0,068}$ $ln p_{1,s} = 11,077 + 0,68(ln m_{1,s}) + 1,443(ln m_{2,11}) - 0,068(Pr_{10})$ $R^2 = 0,75, R^2_{aju} = 0,70, SE = 0,29$	(e)
Eixo Tandem:	
$m_{1,t} = 0,00541(m_{1,9})^{1,476} (s_{1,9})^{0,205} (s_{2,6})^{0,212} (p_{1,9})^{-0,335} (p_{1,8})^{0,055}$ $ln m_{1,t} = -5,22 + 1,476(ln m_{1,9}) + 0,205(ln s_{1,9}) + 0,212(ln s_{2,6}) - 0,335(ln s_{1,9}) + 0,055(ln p_{1,8})$ $R^2 = 0,85, R^2_{aju} = 0,80, SE = 0,091$	(f)
$m_{2,t} = 0,2066(m_{1,t})^{0,392} (m_{2,9})^{0,819} (m_{1,6})^{-0,093} (s_{2,9})^{0,13}$ $ln m_{2,t} = -1,577 + 0,392(ln m_{1,t}) + 0,819(ln m_{2,9}) - 0,093(ln m_{1,6}) + 0,13(ln s_{2,9})$ $R^2 = 0,89, R^2_{aju} = 0,87, SE = 0,031$	(g)
$s_{1,s} = 10,591 (m_{1,t})^{0,792} (s_{2,9})^{-0,728} (p_{1,9})^{-0,228}$ $ln s_{1,t} = 2,36 + 0,792(ln m_{1,t}) - 0,728(ln m_{2,9}) - 0,228(ln p_{1,9})$ $R^2 = 0,77, R^2_{aju} = 0,73, SE = 0,17$	(h)
$s_{2,t} = 341,04 (s_{1,t})^{-1,039} (s_{2,9})^{0,252} (p_{1,13})^{-0,052} (ln Pr_6)^{0,024} (ln Pr_9)^{-0,011} (ln Pr_{13})^{-0,027}$ $ln s_{2,t} = 5,832 - 1,039(ln s_{1,t}) + 0,252(ln s_{2,9}) - 0,052(ln p_{1,13}) + 0,024(Pr_6) - 0,011(Pr_9)$ $- 0,027(Pr_{13})$ $R^2 = 0,97, R^2_{aju} = 0,96, SE = 0,102$	(i)
$p_{1,s} = e^{-13,192} (m_{1,9})^{1,998} (m_{2,8})^{0,388} (p_{1,6})^{-0,331} (p_{1,8})^{0,038}$ $ln p_{1,t} = -13,192 + 1,998(ln m_{1,9}) + 0,388(ln m_{2,8}) - 0,331(ln p_{1,6}) + 0,038(ln p_{1,8})$ $R^2 = 0,903, R^2_{aju} = 0,87, SE = 0,09$	(j)

OBS: As unidades de média e desvios padrão em kN e as proporções em porcentagem (70% = 70)

Fonte: Haider e Harichandran (2007a,b e c).

A partir dos modelos apresentados na Tabela 4.2 os parâmetros a serem usados da Equação 19 foram estimados e comparados com os parâmetros estimados pelo método dos mínimos quadrados, sendo os resultados provenientes do R^2 considerados satisfatórios. O passo seguinte foi aplicar os parâmetros estimados pelos modelos da Tabela 4.2 na função densidade de probabilidade para prever o espectro de carga para cada tipo de eixo dos veículos testados.

Os espectros de carga por eixos resultantes do uso dos parâmetros estimados pela relação com o peso bruto e volume de veículos foram comparados aos “observados” estimados pela aplicação da combinação das duas distribuições normais aos dados reais. Os resultados de correlação mostraram que havia boas relações entre distribuições de carga por eixo e peso bruto, ou seja, as distribuições de cargas por eixo são significativamente afetadas pelos parâmetros relacionados ao peso bruto do veículo. Desta forma, os autores concluíram na pesquisa aqui relatada que uma combinação de duas distribuições normais caracterizou, de forma razoável, o espectro de carga por eixo e o peso bruto de caminhões para várias configurações de eixos e classes, além da possibilidade de se desenvolver relações razoáveis entre o peso do caminhão e cargas por eixo.

4.4.3 Modelo de distribuição combinada Log-normal do Texas

Na pesquisa feita por Prozzi e Hong (2007) foi desenvolvida uma metodologia estatística que inclui não somente funções de ajuste das distribuições dos eixos, mas também uma estatística que representa a associação carga-dano ao pavimento. O estudo que objetiva desenvolver funções de ajuste com significado físico e estatístico para os espectros de carga por eixo, é descrito neste item.

O procedimento envolvido no desenvolvimento das funções de ajuste dos espectros de carga por eixo contou com dados de 20 estações *WIM* no Texas. A característica multi picos (ou multimodal) assumida pelo conjunto dos dados induziu aqui, como nos outros estudos até o momento reportados, ao uso de uma combinação de distribuições teóricas para representar o espectro de carga por eixo. No relato dos autores foi ainda reforçado que para um mero ajuste aos dados havia uma ampla margem de distribuições que poderia ser aplicada com uma precisão razoavelmente alta, mas nem sempre está claro qual delas é a melhor. No que se refere à correlação aos impactos provenientes da aplicação da carga por eixo no desempenho dos pavimentos essa margem pode ser reduzida, ficando, pois limitada em função de alguns aspectos como, por exemplo, a não consideração de valores negativos.

Sendo assim, nesse trabalho uma combinação de distribuições do tipo log-normal foi utilizada para o ajuste dos dados da distribuição de cargas por eixo. A função densidade de probabilidade da combinação de distribuições log-normal é dada então pela Equação 24:

$$f(x; \mu_k; \sigma_k; p_k) = \sum_{k=1}^k \frac{p_k}{2\pi x \sigma_k} e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x) - \mu_k}{\sigma_k} \right)^2 \right]} \quad (24)$$

onde:

- **x**: peso da carga por eixo (kN);
- **p_k**: proporção do k-ésimo pico da combinação de distribuições;
- **μ_k**: média de ln (X) da k-ésima distribuição log-normal;
- **σ_k**: desvio padrão de ln (X) da k-ésima distribuição log-normal.

A precisão de ajuste concernente aos parâmetros atribuídos às funções de densidade de probabilidade foi verificada a partir do cálculo do R² para os diferentes tipos de eixos, cujo procedimento não foi muito detalhado no trabalho.

A preocupação dos autores com relação à carência de pesquisas relativas ao dano juntamente com os ajustes das funções dos espectros de carga por eixo expondo como tal dano é sensível a essa função de ajuste se tornou um dos objetivos desse trabalho. No que tange ao dano relacionado à carga aplicada foi verificado que ele era matematicamente equivalente ao momento estatístico da distribuição de carga por eixo.

Antes de prosseguir é importante ressaltar o comentário de Prozzi e Hong (2007) sobre o conceito de cargas equivalentes por eixo simples (*Equivalent Single Axle Load – ESALs*). Os autores sustentaram que apesar de todo o debate sobre os ESALs eles continuarão por muito tempo tendo um importante papel no dimensionamento e projetos de reabilitação de pavimentos, lembrando que sua aplicação tem sido feita desde os anos 60, a partir dos resultados do *AASHO Road Test*. Dessa forma, as agências rodoviárias têm, desde então, acumulado uma grande quantidade de informações de tráfego em termos de ESALs.

Portanto, com o intuito de preencher essa lacuna entre ESALs e os espectros de carga por eixo desenvolveu-se nesta pesquisa o Fator de Espectro de Carga (FESC), onde foi sustentado que o dano baseado no espectro de carga pode ser obtido pelo uso da função de ajuste do espectro de carga $f(x)$ através do momento estatístico, expresso nas Equações 25 e 26:

$$FESC = \int \left(\frac{x}{L_s}\right)^m \cdot f(x) dx \quad (25)$$

$$FESC = \frac{\int x^m f(x) dx}{L_s^m} = \frac{E(X^m)}{L_s^m} = \frac{M^m}{C} \quad (26)$$

onde:

- **x**: peso da carga por eixo (kN);
- **m**: ordem do momento (potência);
- **f (x)**: função de ajuste da carga por eixo para um dado tipo de eixo;
- **L_s**: constante, C (carga padrão referente ao tipo de eixo);
- **M^m**: m-ésimo momento de uma dada função densidade de probabilidade.

Sendo o momento da distribuição log-normal obtido pela Equação 27, o FESC pode finalmente ser obtido aplicando a Equação 28.

$$M^m = \int x^m \frac{1}{\sqrt{2\pi x \sigma}} e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x) - \mu}{\sigma}\right)^2\right]} dx = e^{\left(m\mu + \frac{m^2}{2}\sigma^2\right)} \quad (27)$$

$$FESC = \sum_k^K \frac{p_k e^{\left(m\mu_k + \frac{m^2}{2}\sigma_k^2\right)}}{L_s^m} \quad (28)$$

onde:

- **K**: número de distribuições de probabilidade combinadas;
- **k**: identificação da ordem do pico da distribuição;
- **p_k**: proporção relativa ao k-ésimo pico da distribuição.

No estudo relatado neste item, o método foi aplicado aos dados das 20 estações *WIM* no Estado do Texas usando como ordens do momento (potências) os valores: 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0 e 4,5; justificando-os em virtude da faixa de valores encontrados na literatura relativa ao assunto.

Para a análise foi decidido ainda que, em função dos diferentes tipos de eixo e suas diferentes configurações, bem como seus impactos no desempenho do pavimento, os eixos simples deveriam ser separados em eixos direcionais (ESRS) e ESRD. Portanto, de forma diferente dos estudos relatados até o momento, onde foram considerados na categoria dos

eixos simples tanto os ESRS como os ESRD. Além disso, os ETT foram excluídos por simplificação e também sua presença representava menos que 0,2%.

A precisão dos dados com relação aos danos ao pavimento foi verificada a partir do estabelecimento da diferença relativa entre o fator de espectro de carga estimado a partir da função ajustada (contínua) e o espectro de carga por eixo observado (discreto) para cada ordem de momento estatístico considerado no estudo. Os erros resultantes desse procedimento foram considerados relativamente baixos e aceitáveis no contexto do projeto de pavimentos, principalmente para condições de potência baixa, sendo o valor máximo de erro menor que 13%.

Para reduzir ainda mais os erros obtidos para condições de potência maiores e assim otimizar os dados de entrada de cargas do tráfego foi adotado ainda um procedimento para minimização dos erros quadráticos usando para tanto uma função composta de duas partes: uma para garantir que a função de ajuste seguirá as distribuições log-normal e a outra representando as informações dos momentos estatísticos (dano). A otimização dos dados foi feita de acordo com a Equação 29.

$$\text{Minimização SSE} = \sum_i (q_i - f_i)^2 + \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{4,5} \left\{ \frac{\left[\frac{\sum_k^K p_k e^{\left(m\mu_k + \frac{m^2}{2}\sigma_k^2 \right)}}{L_s^m} - \sum_{i=1}^I \left(\frac{x_i}{L_s} \right)^m q_{it} \right]}{\sum_{i=1}^I \left(\frac{x_i}{L_s} \right)^m q_{it}} \right\}^2 \quad (29)$$

onde:

- **I**: número total de intervalos de carga;
- **t**: intervalo de carga (4,4 kN para eixo simples e 8,9 kN para eixo tandem duplo)
- **q_i**: frequência relativa da carga por eixo no i-ésimo intervalo de carga para um dado espectro;
- **f_i**: valores da função de ajuste correspondentes ao i-ésimo intervalo de carga;
- **m**: potência de 1 a 4,5 (ao todo 8 condições de momento).

Relataram os autores que os parâmetros obtidos inicialmente na consideração do ajuste da distribuição ao espectro de carga dos dados reais de campo (parâmetros originais) foram usados como partida. Os parâmetros otimizados diferenciavam levemente dos parâmetros originais, mas a precisão em termos da relação carga-dano ao pavimento aumentou significativamente onde o máximo valor para os erros de ajuste não superou 3,5%.

4.4.4 Modelos de distribuição para os veículos pesados em dois países na Ásia

4.4.4.1 Modelo desenvolvido em Singapura

Um estudo estatístico foi conduzido por Fwa *et al.* (1993) para caracterizar as cargas por eixo de 12.638 veículos pesados das estradas de Singapura para que posteriormente pudessem ser usados no projeto de pavimentos e análise de desempenho de pavimentos. No trabalho aqui relatado foram desenvolvidos dois tipos de modelos: aqueles para a distribuição de peso bruto para cada classe de veículo e aqueles para a distribuição de cargas por eixo para cada eixo de uma classe de veículo.

Para a distribuição relativa ao peso dos veículos os autores relatam que foi utilizada a função de distribuição *Weibull*. Em alguns casos foi observado que a distribuição do peso do veículo apresentava dois picos, sendo então necessário ajustar os dados usando uma composição de duas funções *Weibull*. Na Equação 30 é apresentada a função acumulada *Weibull*:

$$F(W) = 1 - e^{-a(W-c)^b} \quad (30)$$

onde:

- **F (W)**: frequência acumulada;
- **W**: peso bruto de veículos individuais;
- **a, b, e c**: constantes de regressão relacionadas ao formato da distribuição.

A função densidade de *Weibull* é igual à apresentada na Equação 31:

$$f(W) = ab(W - c)^{b-1} e^{-a(W-c)^b} \quad (31)$$

As constantes *a*, *b* e *c* foram obtidas a partir do ajuste da Equação 31 à distribuição acumulada dos dados usados no estudo a partir do método dos mínimos quadrados. A qualidade de ajuste dos modelos gerados foi verificada posteriormente usando o teste *Kolmogorov-Smirnov* que é útil para determinar se duas distribuições de probabilidade são idênticas ou não avaliando as hipóteses:

- H_0 : os dados seguem uma distribuição normal.
- H_1 : os dados não seguem uma distribuição normal.

Este teste observa a máxima diferença absoluta entre a função de distribuição acumulada dos dados e a função de distribuição empírica dos dados a qual é comparada com um valor crítico, para um dado nível de significância. Se a diferença for maior que o valor crítico, a hipótese de normalidade dos dados com $(1-\alpha)100\%$ de confiança é rejeitada. Caso contrário, é aceita. No trabalho não foram fornecidos maiores detalhes sobre o teste, como os dados relacionados aos valores críticos e aos valores das diferenças.

Para a especificação das distribuições de carga por eixo para os eixos existentes em cada tipo de classe de veículo duas formas foram usadas: uma expressava as cargas por eixo através de porcentagem do peso bruto do veículo e a outra estimava diretamente as cargas por eixo. Assim, duas formas de modelos foram geradas: um modelo de regressão polinomial e um modelo não linear que expressava a magnitude de um eixo de carga como uma função de um termo de potência do peso bruto do veículo. As formas dos modelos são apresentadas, respectivamente, nas Equações 32 e 33.

$$AF = \alpha_0 + \alpha_1 W + \alpha_2 W^2 + \dots + \alpha_n W^n + \varepsilon \quad (32)$$

$$A = d(W^e) \quad (33)$$

onde:

- **AF:** frequência acumulada;
- **α_i :** constantes da regressão;
- **W:** peso bruto do veículo;
- **ε :** erro;
- **d, e:** constantes do modelo.

A precisão relativa às duas formas dos modelos de carga por eixo foi verificada a partir de uma comparação com dados reais de campo coletados para o estudo. Assim, a partir do peso bruto de um dado tipo de veículo as cargas em cada eixo deste foram calculadas usando ambos os modelos (polinomial e de potência) e coeficientes de determinação múltipla e de diferença média quadrática entre as cargas reais e as previstas pelo modelo foram calculados. Com base nos resultados obtidos foi concluído que os dois tipos de métodos usados para modelar os espectros de carga foram satisfatórios, pois resultaram em cargas por eixo com alta correlação aos dados reais coletados em campo, mas sendo que os dados obtidos pelos modelos polinomiais foram aqueles que apresentaram os melhores resultados de R^2 e de diferença média quadrática.

Ainda nesse trabalho foi realizada, para fins de verificação da aplicabilidade dos modelos, uma comparação entre os valores de ESAL obtidos pelos modelos e os obtidos por outros três tipos de métodos de cálculo. Os métodos foram: o da AASTHO (1986) e tido como valor real de ESALs; o de fator de conversão da *United Kingdom Road Note 29* (consiste na multiplicação do volume de veículos comerciais de carga por um fator de conversão constante); o do fator de caminhão do *Asphalt Institute* (similar ao método anterior diferenciando que apresenta fatores de conversão para vários tipos de classes de veículos) e o de percentagem-constante de carga por eixo (o qual pressupõe a participação percentual constante entre os vários eixos de dado tipo de veículo), usando para esse estudo os valores de percentagem média dos eixos de carga dos dados coletados.

Os ESALs obtidos pelo método do fator de conversão da *United Kingdom Road Note 29* foram cerca de três vezes maiores que os valores obtidos pela AASTHO, fato este atribuído às diferenças nas características operacionais da indústria de transportes. Os ESALs obtidos pelo método da percentagem constante, pelo modelo de regressão polinomial e pelo modelo de potência foram de mesma ordem de magnitude que os valores considerados como reais, sendo o método polinomial o de melhores resultados.

4.4.4.2 Modelo desenvolvido em Taiwan

Sung *et al* (2008) trabalharam em uma pesquisa para desenvolver e fornecer modelo matemático para estimar o espectro global de carga por eixo para aplicação em estudos de pavimentos. Para o desenvolvimento do modelo de distribuição de carga por eixo foram utilizados dados relativos ao tráfego coletados em balanças estáticas ao longo de um período de 10 anos, localizadas em quatro praças de pedágio da autoestrada de Sun Yat-Sen em Taiwan.

Nesse estudo, os autores observaram que os espectros de carga desenvolvidos para cada classe de veículo e seus correspondentes eixos de carga eram bastante diferentes e não seguiam um padrão de similaridade. Dessa forma, decidiram agrupar os espectros por local, sendo levados em consideração apenas os eixos simples (tanto os ESRS quanto os ESRD) e os ETD, pois a quantidade de ETT foi considerada insignificante. Assim, espectros de carga por eixo simples e por eixo tandem foram desenvolvidos para cada um dos quatro locais de coleta, sendo então verificado que estes passaram a apresentar visualmente um formato e padrão similar. Para testar se estatisticamente os dados coletados dos quatro locais representavam padrões idênticos de tráfego foi aplicado o teste de *Kolmogorov-Smirnov* para cada par de praças de pedágio. As seguintes hipóteses foram assumidas:

- H_0 : as distribuições de carga por eixo nas duas estações amostradas na rodovia Sun Yat-Sen são idênticas.
- H_1 : as distribuições de carga por eixo nas duas estações não são idênticas

A partir dos resultados do teste foi concluído que os padrões de distribuição das cargas por eixo em cada estação de coleta de dados não eram idênticas a nenhuma outra das estações, pois os valores resultantes do teste para os pares de estações foram superiores ao valor crítico a um nível de significância de 5%, rejeitando-se assim a hipótese H_0 . Em função disso, os pesquisadores decidiram que as distribuições das cargas por eixo em cada estação de coleta deveriam ser verificadas separadamente.

O procedimento continuou então com a construção de curvas de frequência acumulada *versus* a carga por eixo para os dois tipos de eixos estudados. As curvas apresentaram um formato de “S”, sendo então usados para trabalhar no ajuste de dados, assim como no estudo de Fwa *et al.* (1993), a função acumulada de *Weibull* (Equações 30 e 31) e a polinomial (Equação 32), mas usando na incógnita W das Equações o valor da carga por eixo em kN e não mais o peso bruto. Em virtude de serem observados na função de *Weibull* apenas três parâmetros de regressão, ou constantes, foi usado no estudo um modelo polinomial de terceiro grau.

Depois de desenvolvidos, os dois tipos de modelos foram comparados a dados reais de campo coletados entre 1990 e 1999. A qualidade de ajuste foi verificada em função do coeficiente de determinação múltipla (R^2) e do erro médio quadrático de cada um dos modelos, sendo este último obtido a partir do uso da Equação 34.

$$MSE = \frac{SSE}{n-p} \quad (34)$$

onde:

- **SSE**: soma dos quadrados dos desvios (Equação 15);
- **n**: número de observações;
- **p**: número de parâmetros no modelo.

O modelo de melhor ajuste foi considerado aquele que produziu o maior R^2 ou o menor MSE plotando o R^2 e MSE, derivado de um modelo de regressão contra aqueles do outro modelo. Nos resultados os valores de R^2 estavam bem próximos, mas os MSEs do modelo *Weibull* foram inferiores aos do modelo polinomial na maioria dos casos avaliados. Dessa

forma, foi concluído que o modelo *Weibull* se adequava melhor aos dados que o modelo polinomial apresentando, pelos resultados obtidos, uma melhor habilidade de estimar a distribuição de carga por eixos acumulada, sendo, portanto utilizado na pesquisa relatada para modelar a distribuição de carga por eixo de veículos pesados em Taiwan. Os autores comentaram, sem fornecer muitos detalhes, que devido os múltiplos picos nas distribuições dos ETD foi necessário utilizar duas funções *Weibull* para ajuste dos dados.

Com os dados coletados no ano de 2000, que não foram utilizados no desenvolvimento dos modelos, foi executado um procedimento de estimativa de distribuição de carga por eixo usando curvas de frequência acumulada para vários locais da rodovia. Os dados reais e os previstos pelo modelo foram plotados num mesmo gráfico e comparados, apenas visualmente, sendo considerado pelos pesquisadores que os modelos resultaram numa previsão aceitável para ambos os tipos de eixos e que desta forma poderiam ser aplicados para caracterização da distribuição de carga por eixos de qualquer lugar do país, ficando a cargo dos engenheiros selecionar, com base na experiência local e na localização geográfica, o modelo adequado. Afirmaram ainda que as constantes de regressão poderiam ser facilmente ajustadas usando os dados de carga do tráfego local. O procedimento adotado para a estimativa em Taiwan foi:

- Obter uma estimativa precisa do número de veículos pesados que passem por determinada estação;
- Converter as contagens de veículos em contagens de eixos usando dados de contagem de tráfego coletados dos últimos cinco anos nas 4 estações;
- Usar os modelos de distribuição para a dada estação para calcular a frequência de cada tipo de eixo de carga.

4.5 O Efeito do Espectro de Carga por Eixo no Dimensionamento e Desempenho de Pavimentos

A partir dos itens anteriormente desenvolvidos, percebe-se que ao longo da última década houve uma grande preocupação voltada para o desenvolvimento de modelos que representassem a distribuição de cargas por eixo de uma determinada localidade, buscando gerar padrões que pudessem ser usados com certa confiabilidade para estimar os dados necessários ao dimensionamento e análise de desempenho de pavimentos, visando principalmente auxiliar órgãos que não dispõem de dados do local de interesse.

Nos itens anteriores foi abordado que, para gerar esses modelos representativos do real carregamento do tráfego em campo, vários estudos com base estatística foram desenvolvidos. Em tais pesquisas havia uma acentuada preocupação no ajuste dos dados observados em campo aos estimados a partir dos modelos, mas pouca ou nenhuma atenção era dada ao dano. De acordo com Prozzi e Hong (2007), não é racional assumir que a precisão na estimativa de dano ao pavimento devido ao carregamento do tráfego é equivalente à precisão do ajuste dos dados, tendo em vista que o dano causado pelo carregamento não é uma função linear da carga por eixo.

4.5.1 Reflexo das variações temporais e espaciais dos espectros de carga nas espessuras dos pavimentos

Um estudo conduzido por Turochy, Baker e Timm (2005) avaliou a variabilidade temporal e espacial dos espectros de carga por eixo de veículos de carga com base em dados de pesagem coletados de 13 locais em rodovias arteriais rurais do Alabama no ano de 2001 e seu consequente reflexo no dimensionamento dos pavimentos flexíveis e rígidos. Para tanto, duas abordagens foram utilizadas: uma estatística e outra prática.

A abordagem estatística diz respeito à quantificação da significância entre as diferenças nos espectros de carga a partir da aplicação do teste *Kolmogorov-Smirnov* às funções densidade de probabilidade das distribuições de carga por eixo. Para identificar as diferenças temporais e espaciais de significância estatística o conjunto de dados foi separado em 4 subgrupos fazendo as seguintes comparações:

a. Temporal:

- Cada dia da semana *versus* média anual (todos os dados de cada localidade);
- Cada mês *versus* média anual.

b. Espacial:

- Cada direção do tráfego no local *versus* a combinação das duas direções naquele local (bidirecional);
- Cada local *versus* a média de todo o estado.

Foi assumido como hipótese nula, H_0 , que as distribuições comparadas eram iguais e a hipótese alternativa, H_1 , que as distribuições não eram iguais. Para a verificação de aceitação ou rejeição a maior das diferenças entre as duas funções densidade sob consideração foram comparadas a um valor crítico obtido para níveis de significância $\alpha = 0,05$ e $\alpha = 0,001$.

A quantificação da significância das diferenças entre os resultados do dimensionamento provenientes do uso de espectros de carga relativos a cada direção do tráfego no local *versus* a combinação das duas direções naquele local (bidirecional) e o espectro de cada local *versus* o espectro médio de todo o estado foi analisada para observar os efeitos práticos no projeto de pavimentos.

As espessuras necessárias para um dado carregamento foram obtidas de acordo com as Equações do método da AASHTO 1993, tanto para pavimentos flexíveis como para pavimentos rígidos. Os parâmetros usados para o cálculo do número estrutural (SN) dos pavimentos flexíveis e a espessura (D) dos pavimentos rígidos são apresentados na Tabela 4.3. Valores genéricos foram adotados para muitas das variáveis de entrada para manter os efeitos constantes e assim conseguir observar o impacto das variações nos espectros de carga. Para o tráfego foi considerada uma taxa anual de crescimento de 4%, vida de projeto de 25 anos e distribuição por faixa igual a 85%, tráfego uniformemente distribuído nas duas direções e VDMA igual a 100, 800, 1500 e 2500. Assim, para verificar os efeitos no projeto de pavimentos todos os parâmetros do pavimento foram mantidos constantes exceto os VDMAs, as resistências do solo e os fatores de veículos resultantes dos dados de carga por eixo.

Tabela 4.3 - Variáveis de entrada usadas nas Equações da AASHTO 1993

Pavimento Flexível	Pavimento Rígido
Valor de confiabilidade de 95%	Valor de confiabilidade de 95%
Coeficiente de variabilidade de 0,45	Coeficiente de variabilidade de 0,35
Serventia inicial de 4,2	Coeficiente de transferência de carga de 2,8
Serventia final de 2,5	Coeficiente de drenagem 1,15
Módulo de resiliência de 5.000 psi	Serventia inicial de 4,2
Módulo de resiliência de 10.000 psi	Serventia final de 2,5
Módulo de resiliência de 15.000 psi	Módulo de ruptura do concreto de 4,290 kPa
	Módulo de suporte do subleito de 70.000 kN/m ³
	Módulo de suporte do subleito de 140.000 kN/m ³
	Módulo de suporte do subleito de 210.000 kN/m ³

Fonte: Turochy, Baker e Timm (2005)

Os resultados relativos à significância estatística levaram à conclusão que, na maioria, as distribuições apresentaram diferenças temporais e espaciais significativas. Quanto à significância prática, os impactos no dimensionamento de pavimentos rígidos e flexíveis não se apresentaram de forma significativa, pois a diferença entre as espessuras resultantes do uso do espectro unidirecional *versus* a resultante pelo uso do espectro bidirecional correspondeu a 1,3 cm para o pavimento flexível e 0,8 cm para o pavimento rígido. A

diferença entre as espessuras resultantes do uso do espectro local *versus* a obtida do uso do espectro de todo o estado foi, em cerca de 90% dos locais, considerada aceita para o dimensionamento devido a sua insignificância para propósitos de dimensionamento.

Finalizando, as variações temporais e espaciais nos espectros de carga por eixo, observadas pelos autores, com base nos dados usados no estudo, não produziram efeitos notáveis sobre a concepção dos pavimentos.

4.5.2 Consideração da diferença espacial dos espectros de carga no dimensionamento empírico-mecanístico

4.5.2.1 Espectro de carga local *versus* espectro de carga estadual no Alabama

O impacto gerado na espessura de pavimentos flexíveis proveniente do uso de espectros de carga por eixo de 12 locais de pesagem em movimento no Alabama e os espectros gerais obtidos com dados de todos os locais em conjunto foi avaliado por Turochy, Timm e Tisdale (2005) e Timm, Bower e Turochy (2006) usando o software de dimensionamento empírico-mecanístico PerRoad. Esse programa foi desenvolvido para facilitar o dimensionamento de pavimentos perpétuos usando os princípios empírico-mecanísticos (Timm e Newcomb, 2006 e Timm, Newcomb e Selvaraj, 2006) incorporando, portanto, a teoria linear de camadas elásticas, simulação Monte Carlo e funções de transferência para estimar o desempenho do pavimento.

No estudo foram usadas estruturas de pavimentos de três camadas (mistura asfáltica a quente sobre uma base granular assentada em um solo de subleito) com três níveis de suporte do solo e três diferentes espessuras para a camada de rolamento. Todos os espectros de carga foram avaliados para um tráfego fixado em 10^6 repetições de carga por eixo.

O espectro de carga foi então modelado usando a simulação Monte Carlo e as respostas do pavimento foram calculadas, pelo programa WESLEA de análise elástico-linear do pavimento, em dois pontos: na fibra inferior da camada de rolamento e no topo do subleito. Tais respostas foram usadas para prever, respectivamente, as trincas por fadiga e as deformações permanentes nas trilhas de roda.

A partir desses resultados as distribuições de deformações foram geradas e as funções de transferência para o desempenho do pavimento foram usadas para calcular o número de

ciclos até a ruptura para cada nível de deformação. Os modelos utilizados para prever o trincamento por fadiga e as deformações permanentes em cada ciclo Monte Carlo e usados pelo WESLEA estão apresentados nas Equações 35 e 36, respectivamente (Timm e Newcomb, 2003)

$$N_f = 2,83 \times 10^{-6} \left(\frac{10^6}{\varepsilon_t} \right)^{3,148} \quad (35)$$

$$N_r = 1 \times 10^{16} \left(\frac{1}{\varepsilon_v} \right)^{3,87} \quad (36)$$

onde:

- N_f : número de ciclos até ruptura por fadiga;
- N_r : número de ciclos até a ruptura por deformações permanentes nas trilhas de rodas;
- ε_t : tensão de deformação horizontal na fibra inferior da camada de revestimento;
- ε_v : tensão de deformação vertical no topo do subleito.

O dano total foi calculado pela soma de danos de todos os ciclos Monte Carlo (MC) a partir da Equação 37 e o número de repetições de carga até a ruptura para a estrutura do pavimento e o espectro de carga foram determinados a partir da Equação 38 dimensionando o dano ao valor crítico 1 .

$$\frac{D_{total}}{MC} = \frac{\sum_{i=1}^{MC} \left(\frac{1}{N_{fi}} \right)}{MC} \quad (37)$$

$$n = \frac{1,0 \times MC}{\sum_{i=1}^{MC} D_i} \quad (38)$$

onde:

- $\frac{D_{total}}{MC}$: Dano total;
- $\frac{1}{N_{fi}}$: dano para cada ciclo MC (i).

A espessura foi determinada para cada valor de n versus a espessura da camada asfáltica. A espessura necessária ao tráfego considerado no estudo ($n=10^6$) foi encontrada para cada

tipo de espectro de carga considerado na análise, conforme pode ser observado na Figura 4.4. De uma forma geral, as espessuras resultantes para cada localidade proveniente do uso dos espectros locais não diferiram em mais de 1,25 cm das espessuras obtidas com o uso dos espectros de cargas gerais (ou estaduais), sendo concluído que as rotas consideradas no estudo representam uma ampla distribuição geográfica no Alabama e o uso dos espectros gerais para dimensionamento de pavimentos é, para este caso, recomendado quando os dados específicos do local não estiverem disponíveis.

Figura 4.4 - Exemplo da determinação da espessura

Fonte: Adaptado de Turochy, Timm e Tisdale (2005) e Timm, Bower e Turochy (2006)

4.5.2.2 Espectros de carga locais e estaduais versus espectros padrões do MEPDG

Uma análise comparativa do desempenho de pavimentos flexíveis entre os resultados provenientes do uso de espectros de carga por eixo com dados de tráfego coletados no Estado do Arkansas e os espectros padrões do MEPDG foi realizada na pesquisa de Tran e Hall (2007). A comparação tinha como objetivo verificar se as diferenças entre a previsão de vida em serviço do pavimento eram significantes para representarem a necessidade de futuros ajustes à situação local.

O desenvolvimento dos espectros de carga representativos de todo o estado foi feito com base em dados coletados em 10 estações *WIM* entre os anos de 2003 e 2005, a partir da utilização de um programa computacional desenvolvido para o estudo, chamado de *WEIGHT.xls*, pois o uso inicial do *TrafLoad* não foi bem sucedido devido à incompatibilidade

deste programa com os arquivos de dados fornecidos pelo Departamento Estadual de Rodovias e Transportes do Arkansas. Como os caminhões de classe 9 representavam acima de 70% do tráfego local, a análise foi baseada neste tipo de veículo.

O programa MEPDG foi usado para as análises de desempenho considerando um período de projeto de 20 anos e VDMA de 10.000 veículos; os parâmetros de entrada usados no programa estão listados na Tabela 4.4. A análise do desempenho foi aplicada a partir de uma estrutura de pavimento previamente dimensionada a partir do método da AASHTO 1993 e envolvia os defeitos de trincas por fadiga e deformação permanente. Os valores padrões do programa, 1,9 cm ou 0,75" de afundamento nas trilhas de rodas e 25% de trincas por fadiga, foram considerados como os valores limites para o projeto. Para quantificar a diferença entre as previsões foi usada a Equação 39.

Tabela 4.4 - Parâmetros de entrada para análise de desempenho no MEPDG

Descrição	Entrada
Confiabilidade	50%
VDMA (duas faixas)	10.000
Faixas na direção de projeto	2
Fatores de distribuição mensal	Padrão
Fatores de distribuição de classes de veículos	Padrão
Fatores de distribuição horária	Padrão
Fatores de distribuição de cargas por eixo	Variável
Clima	Fayetteville, AR
Camada asfáltica	
Espessura	11" (27,5 cm)
Mistura	12,5 mm e PG 70-22
Módulo	Nível 3
Base granular	
Espessura	14" (35 cm)
Módulo	40.000 psi
Subleito	
Classificação	A-7-6
Módulo	5.000 psi

Fonte: Adaptado de Tran e Hall (2007)

Os defeitos então previstos para os dois tipos de espectro de carga por eixo foram comparados entre si como apresentado na Figura 4.5. Tran e Hall (2007) verificaram no seu estudo que o espectro de carga por eixo para todo o estado do Arkansas diferia dos valores padrões considerados no MEPDG e essas diferenças apresentaram uma significativa influência no resultado final das previsões de desempenho obtidas com o uso do programa, pois de acordo com o calculado pela Equação 39 com o espectro de carga específico do

estado de Arkansas a vida prevista do pavimento é maior que 25% da prevista para o espectro padrão.

$$DN = \frac{|x_{padrão} - x_{estadual}|}{x_{padrão}} \times 100 \quad (39)$$

onde:

- **DN**: diferença normalizada;
- $x_{padrão}$: defeito previsto baseado no espectro padrão;
- $x_{estadual}$: defeito previsto baseado no espectro para todo o estado do Arkansas.

Figura 4.5 - Previsão de deformação permanente nas trilhas de rodas
Fonte: Adaptado de Tran e Hall (2007)

No Estado da Virgínia um estudo similar foi conduzido por Smith e Diefenderfer (2010) levando em consideração os espectros de cargas locais provenientes de 8 estações *WIM* para a comparação com os espectros padrões do MEPDG. Para a análise de desempenho uma estrutura de pavimento foi simulada para apresentar um número estrutural (SN) de aproximadamente 6,2 representando o valor estrutural típico para os pavimentos interestaduais da Virgínia, o período de projeto considerado foi de 20 anos e VDMA de 19.470 veículos.

De acordo com os resultados obtidos no estudo, foi concluído que os dados para as quatro entradas de tráfego consideradas (espectros de carga por eixo, fator de ajuste mensal, fator

de distribuição por classe de veículos e número de eixos por caminhão) não apresentaram um efeito estatístico significativo nas previsões dos defeitos no MEPDG quando considerado com relação à incerteza dos modelos de previsão de defeitos nos pavimentos. Já o tempo de ruptura previsto para o defeito de deformação permanente total (em todas as camadas do pavimento) foi significativamente diferente, sendo que com o uso do espectro local o tempo previsto para a ruptura era maior que aquele previsto para os valores de entrada padrão.

A partir das diferenças obtidas, tornou-se evidente que o MEPDG não estava calibrado especificamente para Arkansas e Virgínia. Esse mesmo problema foi observado em vários locais dos EUA, o que gerou a necessidade de vários estudos para calibração dos modelos de desempenho à situação do local, como por exemplo, os estudos de: Timm, Newcomb (2003), Banerjee, Aguiar-Moya e Prozzi (2009); Hoegh, Khazanovich e Jensen (2010), Souliman *et al* (2010), Banerjee, Prozzi e Freiman (2011), Hall, Xiao e Wang (2011); e para camadas tratadas com cimento e pavimentos rígidos, a pesquisa de Prozzi e Aguiar-Moya (2010) e Bustos *et al* (2011), respectivamente, pois segundo os autores, as caracterizações mecânicas dos materiais e seus principais modos de defeitos não têm sido adequadamente representados no MEPDG.

4.5.3 Comparação do desempenho entre a abordagem empírica e a mecânica

Guo, Prozzi e Tadtud (2005) usaram cinco estruturas de pavimentos para avaliar a diferença nas respostas e desempenho dos pavimentos resultantes da aplicação, separadamente, das duas formas de caracterização do tráfego: por meio dos ESALs e por meio dos espectros de carga por eixo; e assim avaliar a metodologia de quantificação da carga do tráfego. No estudo foram considerados cinco níveis de tráfego (para os ESALs, 10 anos) e cinco diferentes espessuras da camada superficial: 5 cm; 7,5 cm; 10 cm; 15 cm e 20 cm. A comparação entre os dois métodos de caracterização do tráfego foi realizada através de análises do desempenho do pavimento previstas pelo MEPDG, ou seja, pelo guia de projetos da AASTHO 2002.

Como conclusões, os autores destacaram que para todas as cinco estruturas o desempenho previsto pelo critério afundamento nas trilhas de rodas no concreto asfáltico resultantes dos ESALs eram inferiores às previsões obtidas para o tráfego real (segundo o método da AASTHO 2002), ou seja, o efeito da carga real estava subestimado. No que diz respeito ao desempenho relacionado ao surgimento das trincas longitudinais, o resultado para os ESALs foi muito inferior ao do carregamento do tráfego real e para as trincas por fadiga foi

observado pelos pesquisadores que à medida que a estrutura do pavimento se tornava mais espessa os valores tendiam a ficar menos distanciados. Sendo assim, eles afirmam que a seleção do critério de desempenho é que irá demandar o tipo de método de quantificação das cargas do tráfego: para o critério de deformação permanente nas trilhas de rodas a previsão a partir do espectro de cargas sempre é subestimada no formato dos ESALS e para o critério de trincamento a diferença entre os dois formatos dependerá do tipo da estrutura de pavimento.

Com a mesma finalidade de comparar o dimensionamento e o desempenho previsto pelas duas formas de caracterização do tráfego, Carvalho e Schwartz (2006) desenvolveram um estudo considerando 5 estados dos EUA (Alabama, Arizona, Maryland, Dakota do Sul e Washington) que representavam uma variedade de condições climáticas e de tipo de solo. Os valores padrões para as distribuições de carga por eixo e outros relativos aos níveis de tráfego foram adotados. Para o dimensionamento empírico foram usados os dados de tráfego divididos entre nível baixo, moderado e alto (para acesso aos valores em maior detalhe ver trabalho anteriormente citado), onde os valores de ESALs foram calculados para 15 anos de vida em serviço segundo o uso dos fatores de equivalência de cargas constantes no Guia AASHTO 1993.

Os pavimentos flexíveis considerados nesse estudo eram compostos por revestimento de concreto asfáltico, base granular e subleito, sendo cerca de três estruturas para cada estado (uma para cada nível de tráfego), que foram submetidos a uma análise de desempenho do MEPDG. A partir dos resultados, de acordo com o desempenho previsto pelo MEPDG, o Guia da AASTHO 1993 superestima o desempenho a partir da subestimação dos defeitos de deformação permanente nas trilhas de rodas e trincas por fadiga nos pavimentos localizados nos locais de temperaturas mais quentes que aquelas do local de realização do *AASHTO Road Test*, bem como para as condições de maior nível de tráfego.

4.5.4 Propriedades dos espectros no desempenho de pavimentos flexíveis

Haider e Harichandran (2009) usaram espectros de carga por eixo de 14 locais de diferentes estados dos EUA usados no experimento do LTTP para relacionar as características da distribuição de carga com o desempenho previsto para pavimentos flexíveis. As propriedades das distribuições bimodais das cargas por eixo (combinação de duas distribuições normais) usadas nesse estudo foram a média, o desvio padrão, o 95º percentil, o 4º momento da distribuição e a raiz quarta do 4º momento.

Tais propriedades foram encontradas para cada estado e tipo de eixo (simples e tandem duplo). O programa MEPDG foi utilizado para a obtenção das medidas de desempenho trincas por fadiga, deformação permanente nas trilhas de roda e irregularidade longitudinal (a partir do *International Roughness Index* – IRI), considerando estruturas de pavimentos de três camadas e três níveis de tráfego em função do VDMA. A estrutura do pavimento era composta por camada de mistura asfáltica a quente de 15 cm, base de brita graduada de 38 cm, solo de subleito de classificação A-6; quanto aos níveis de tráfego foram considerados 5.000, 10.000 e 15.000 repetições de eixos por dia.

Para verificar o efeito das propriedades no desempenho dos pavimentos foi verificada a correlação existente entre elas. Assim, foi plotado nas ordenadas de um eixo cartesiano as medidas de desempenho e nas abscissas as propriedades relativas ao espectro de carga por eixo obtido para cada estado dos EUA envolvido no estudo.

A partir dos resultados obtidos os autores concluíram que o crescimento das trincas por fadiga, das deformações permanentes e da irregularidade longitudinal têm uma correlação muito forte com a raiz quarta de uma distribuição de carga por eixo, implicando em que as trincas e a deformação permanente na superfície do pavimento são causadas principalmente por espectros de carga por eixo com caudas que representam eixos mais pesados. As distribuições que possuem cargas médias altas e 95º percentil causam, respectivamente, maiores deformações permanentes na base e no subleito. Além disso, foi visto que a magnitude das cargas contribui mais para a irregularidade longitudinal e para o trincamento, enquanto o maior número de repetições é mais crítico no desenvolvimento de deformações permanentes em pavimentos flexíveis.

4.6 Conclusões do Capítulo

A partir do exposto ao longo do capítulo, verificou-se que desde o lançamento do novo método empírico-mecanístico de dimensionamento da AASHTO, o AASHTO 2002, que sustentou a caracterização do tráfego a partir de espectros de carga por eixo e não mais os ESALs, houve uma preocupação relacionada aos tipos e quantidades de dados de tráfego necessários.

Em função dos limitados recursos disponíveis pelos órgãos rodoviários, o que não é uma questão específica do Brasil, para a implementação e operação dos sistemas de coletas de dados de tráfego, bem como o processamento da grande quantidade de dados necessários a uma caracterização mais fiel possível, estudos apresentaram tamanhos de amostras

considerados razoáveis para a caracterização do tráfego. Além disso, ainda com foco na ausência de recursos e com vistas a auxiliar os órgãos que não dispõem dos dados do local a ser estudado, destacou-se a busca por modelos estatísticos que representem a distribuição de cargas por eixo de uma determinada localidade a serem usados para estimar os dados de tráfego necessários ao dimensionamento e análise de desempenho de pavimentos.

Dentre esses estudos, verificou-se que na geração dos modelos que representariam o carregamento do tráfego em campo a preocupação estava muito mais voltada ao ajuste dos dados observados aos estimados que com relação ao efeito no desempenho do pavimento (em alguns casos verificações puramente visuais, outros com base em resultados de testes estatísticos). Portanto, havia pouca ou nenhuma preocupação com o efeito dessa caracterização no desempenho do pavimento, ou seja, a precisão da estimativa de dano ao pavimento devido ao carregamento do tráfego acabava sendo considerada equivalente à precisão do ajuste dos dados. Como afirmado por Prozzi e Hong (2007), e já mencionado anteriormente neste capítulo, o dano causado pelas solicitações do tráfego não acontecem de forma linear ao carregamento por eixo.

A partir do momento em que os efeitos no desempenho foram observados, a partir de comparações entre os resultados obtidos pela abordagem empírica e a empírico-mecanística, verificou-se que o efeito da carga na abordagem empírica subestima os defeitos, superestimando, dessa forma, a vida útil do pavimento. Outro ponto interessante é que o MEPDG considera o desenvolvimento dos espectros de carga dos eixos direcionais em conjunto com os ESRD, sem se preocupar com a diferença dos impactos de cada um no desempenho do pavimento. Como já salientado no item 2.2.2, os ESRS são responsáveis por boa parte da deterioração dos pavimentos, sendo os maiores causadores de trincas quando comparados com os eixos dotados de rodas duplas. Desta forma, neste trabalho optou-se por diferenciar os espectros dos ESRS dos espectros dos ESRD.

5 MÉTODO DE PESQUISA

Neste capítulo, o método usado ao longo da pesquisa é abordado em detalhes. A partir da coleta de dados, o procedimento experimental foi dividido em três etapas: uma relativa somente ao uso dos dados originais (dados de pesagem de um posto de pesagem do Estado de São Paulo), com o desenvolvimento dos espectros de carga, análise empírica e empírico-mecanística dos danos a uma dada estrutura de pavimento; uma segunda etapa, relacionada ao desenvolvimento de funções de ajuste aos espectros de carga originais, bem como posterior análise empírica e empírico-mecanística a partir dos espectros ajustados; uma terceira e última etapa com a avaliação dos efeitos previstos no desempenho do pavimento.

Na última etapa, o software MEPDG foi utilizado para simular o desempenho do pavimento. As características de entrada de dados no programa foram mantidas constantes, alterando-se apenas as pressões de enchimento dos pneus e os espectros de carga por eixo (originais e modelados), o que possibilitou a análise do efeito do ajuste aos dados obtidos em campo por funções de densidade de probabilidade.

5.1 Coleta de Dados de Pesagens

Os dados relativos ao peso bruto total combinado e por eixo ou conjunto de eixos e ao tipo de veículo rodoviário de carga, registrados na respectiva data em um dos postos de pesagem (PPVs) em operação no ano de 2008, no Estado de São Paulo, foram utilizados neste estudo para a montagem dos espectros de carga por eixo e análises posteriores.

O posto de pesagem (PPV01) fica localizado no km 28 da Rodovia dos Imigrantes (SP-160), pista Sul. A rodovia tem uma extensão total de 58,54 km e está sob a administração da Concessionária Ecovias. Os dados coletados no PPV01 são relativos às pesagens efetuadas nos meses de janeiro a dezembro de 2008. As planilhas com as informações estavam em arquivos Excel e continham: identificação do PPV; data da pesagem; placa; número da pesagem; classe de cada caminhão; pesos individuais dos eixos e identificação do tipo de eixo. As pesagens foram realizadas durante todo o dia (24 horas) e consideraram todos os caminhões que passaram pela balança, tanto os carregados como os não carregados.

5.2 Desenvolvimento das Distribuições Originais de Carga por Eixo (Espectros de Carga Originais)

5.2.1 Organização dos dados

Anteriormente ao desenvolvimento dos espectros de carga por eixo dos veículos rodoviários foi necessário organizar os dados em função das classes e meses de pesagem. Dessa forma, com o intuito de desenvolver os espectros de carga por eixo em cada mês, foram montadas planilhas para cada classe de veículo e em cada uma delas os dados foram separados por mês e o tipo de eixo (ESRS, ESRD, ETD e ETT) foi identificado.

5.2.2 O desenvolvimento dos espectros de carga por eixo

Para cada tipo de eixo (ESRS, ESRD, ETD e ETT) foi montada uma distribuição mensal, tendo no eixo das abscissas a carga observada por eixo e na ordenada a correspondente frequência relativa. É importante ressaltar que nesta pesquisa, diferentemente da maioria dos trabalhos relativos ao tema, os espectros para os eixos simples foram separados entre simples com rodas simples e simples com rodas duplas, com o intuito de avaliar a influência da rodagem simples (eixos direcionais e eixos com pneus extralargos) sobre o desempenho dos pavimentos, pois tal ação não fica evidenciada no método empírico de dimensionamento em função dos ESRS e ESRD serem considerados em conjunto, em um único gráfico ou tabela, quando da determinação do FEC.

Para reforçar o motivo da separação entre os eixos simples, em função do tipo de rodagem, Fernandes Júnior, Pais e Pereira (2007), em estudo considerando pavimentos flexíveis de rodovias brasileiras e portuguesas, obtiveram FEC para ESRS de três a cinco vezes maiores que os correspondentes aos ESRD, ou seja, para uma mesma carga por eixo, os ESRS são significativamente mais danosos aos pavimentos. A consideração dos ESRS e ESRD de forma conjunta, assim como o considerado nas figuras e tabelas do método de dimensionamento do DNIT, usado atualmente no Brasil, pode subestimar os efeitos dos ESRS aos pavimentos.

Para o desenvolvimento dos espectros de carga por eixo foram seguidos os intervalos de carga estabelecidos no relatório NCHRP 1-37A, que permitiram a posterior comparação entre o número de solicitações aplicadas durante o período de projeto, obtido a partir de métodos empíricos (uso de Equações da AASTHO e USACE) e métodos empíricos-

mecanísticos (uso do ELSYM5 e, principalmente, do método empírico-mecanístico MEPDG). Os intervalos usados foram:

- *ESRS e ESRD*: faixa de valores de carga entre 3.000 e 40.000 lbs, em intervalos de 1.000 lbs (1.360,5 a 18.140,6 kg, em intervalos de 453,5 kg);
- *ETD*: faixa de valores de carga entre 6.000 e 80.000 lbs, em intervalos de 2.000 lbs (2.721,1 a 36.281,2 kg, em intervalos de 907,0 kg);
- *ETT*: faixa de valores de carga entre 12.000 e 102.000 lbs, em intervalos de 3000 lbs (5.442,2 a 46.258,5 kg, em intervalos de 1.360,5 kg).

Resultaram 38 intervalos entre classes de carga para os ESRS, ESRD e ETD e 31 intervalos entre classes de carga para o ETT. Os espectros de carga foram desenvolvidos para os eixos das 11 classes de veículos observadas com maior frequência, de forma separada para cada um dos meses do ano de 2008, conforme planilhas de dados fornecidas pela concessionária de rodovias. Também foram desenvolvidos espectros de carga gerais, considerando todos os dados do ano.

5.3 Determinação de Fatores de Danos ao Pavimento

Os fatores que visam expressar os danos nos pavimentos foram obtidos de maneira convencional e não convencional. A forma convencional diz respeito à utilização das Equações da AASHTO e USACE, enquanto a não convencional diz respeito à abordagem empírico-mecanística a partir do uso das respostas estruturais críticas do pavimento. Com os fatores de danos, os dados relativos ao volume do tráfego comercial, a proporção dos tipos de eixos e as respostas estruturais, foi determinado o número de solicitações necessárias à ruptura do pavimento.

5.3.1 Fatores empíricos de equivalência de carga e de veículos

Os FEC empíricos foram calculados a partir das equações da AASHTO e USACE, sendo que, para fins de comparação, três formas de obtenção desses dados foram consideradas: uso de todas as cargas por eixo individuais; uso da carga por eixo média anual e uso dos valores médios dos intervalos das classes de carga.

O uso do ponto médio dos intervalos das classes de carga, com a respectiva frequência relativa e para cada tipo de eixo considerado na construção dos espectros de carga por eixo

foi a forma adotada, neste trabalho, para representar o espectro de cargas por eixo, objeto principal de análise. Dessa forma, o ponto médio do intervalo de cada classe de carga foi usado como o valor “P” da carga por eixo.

Destaque deve ser dado à obtenção do fator de equivalência de carga com o uso dos pontos médios das classes, pois para que esses fossem finalizados foi necessária a multiplicação dos fatores de equivalência individuais (FEC_i), obtidos com as equações da AASHTO e USACE, pela frequência observada na classe de carga; ou seja, obteve-se um fator de equivalência de carga ponderado que foi referenciado no texto simplesmente como “ FEC_{AASHTO} ” ou “ FEC_{USACE} ”. Para encontrar o FV correspondente a cada classe considerada neste trabalho foi feito o somatório dos valores de fatores de equivalência de carga ponderados obtidos para cada eixo que compõe o veículo em análise. Na Tabela 5.1 apresenta-se um exemplo relativo ao veículo classe 2C, cujos FV encontrados, soma de FEC para ESRS e ESRD, foram: $FV_{AASHTO} = 0,603$ e $FV_{USACE} = 0,769$. É importante ressaltar que os FEC e FV foram obtidos de forma mensal e anual.

5.3.2 Cálculo convencional da vida útil

O cálculo do número equivalente de solicitações (N) a partir da abordagem empírica, aqui denominado convencional, foi feito a partir da consideração dos valores de FEC obtidos das equações da AASHTO e do USACE. O período de projeto considerado para cálculo foi de 20 anos e a taxa de crescimento igual a 4% a.a.

O Volume Diário Médio Anual (VDMA) usado foi o constante na estatística de tráfego fornecida pela ARTESP (Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transportes do Estado de São Paulo) e disponível no site do DER-SP (DER-SP, 2011), obtido a partir de contagens na praça de pedágio do km 32,381 (Piratininga – sentido Sul), da Rodovia SP 160, e por sensor de tráfego no sentido contrário, no Km 38,04 (Piratininga - sentido norte). A Tabela 5.2 contém apenas os dados relativos ao ano de 2009, considerado nos cálculos.

Tabela 5.1 - Fatores de equivalência de carga por eixos do veículo 2C, considerando o espectro de carga anual

Ponto Médio (kg)	Frequência	ESRS		Frequência	ESRD	
		FEC _{AASHTO}	FEC _{USACE}		FEC _{AASHTO}	FEC _{USACE}
1587,25	0,16%	0,000	0,000	0,10%	0,000	0,000
2040,75	5,16%	0,000	0,000	1,47%	0,000	0,000
2494,25	12,16%	0,001	0,001	8,40%	0,000	0,001
2947,75	20,63%	0,003	0,003	7,57%	0,001	0,001
3401,25	19,11%	0,005	0,005	7,30%	0,002	0,002
3854,75	12,90%	0,006	0,006	7,32%	0,003	0,003
4308,25	9,29%	0,007	0,007	7,39%	0,005	0,005
4761,75	7,57%	0,009	0,008	7,16%	0,007	0,008
5215,25	5,49%	0,010	0,009	5,85%	0,008	0,009
5668,75	4,11%	0,011	0,009	5,92%	0,012	0,013
6122,25	1,91%	0,007	0,006	5,81%	0,017	0,018
6575,75	0,93%	0,005	0,004	4,61%	0,018	0,019
7029,25	0,32%	0,002	0,002	4,86%	0,025	0,026
7482,75	0,06%	0,000	0,000	4,29%	0,029	0,029
7936,25	0,04%	0,000	0,000	4,73%	0,042	0,040
8389,75	0,03%	0,000	0,000	4,37%	0,049	0,048
8843,25	0,02%	0,000	0,000	3,38%	0,048	0,052
9296,75	0,04%	0,001	0,001	2,63%	0,046	0,055
9750,25	0,03%	0,001	0,001	2,12%	0,045	0,060
10203,75	0,02%	0,001	0,001	1,82%	0,048	0,068
10657,25	0,02%	0,001	0,001	1,23%	0,039	0,060
11110,75	0,00%	0,000	0,000	0,85%	0,032	0,054
11564,25	0,00%	0,000	0,000	0,34%	0,015	0,028
12017,75	0,00%	0,000	0,000	0,19%	0,010	0,019
12471,25	0,00%	0,000	0,000	0,12%	0,008	0,016
12924,75	0,00%	0,000	0,000	0,06%	0,004	0,009
13378,25	0,00%	0,000	0,000	0,03%	0,003	0,007
13831,75	0,00%	0,000	0,000	0,05%	0,005	0,012
14285,25	0,00%	0,000	0,000	0,01%	0,001	0,002
14738,75	0,00%	0,000	0,000	0,02%	0,002	0,006
15192,25	0,00%	0,000	0,000	0,00%	0,000	0,000
15645,75	0,01%	0,002	0,004	0,01%	0,001	0,004
16099,25	0,00%	0,000	0,000	0,02%	0,003	0,010
16552,75	0,00%	0,000	0,000	0,01%	0,002	0,006
17006,25	0,00%	0,000	0,000	0,00%	0,000	0,000
17459,75	0,00%	0,000	0,000	0,00%	0,000	0,000
17913,25	0,00%	0,000	0,000	0,01%	0,002	0,010
18366,75	0,00%	0,000	0,000	0,00%	0,000	0,000
Total	100%	0,072	0,069	100%	0,531	0,700

Tabela 5.2 - Volume diário médio de tráfego na SP 160 no ano de 2009

Localização	VDM 2009		
	Passeio	Comercial	Total
SP 160 km 32, 381 - Sentido Sul	26.910	5.126	32.037
SP 160 km 38, 04 - Sentido Norte	25.646	5.867	31.513

Para a determinação do valor de “N” para o período de projeto de 20 anos foi calculado, inicialmente, o VDMA para cada ano, dentro do referido período, usando-se a Equação 40, que considera uma projeção linear do tráfego. O valor de “N” relativo a cada ano foi obtido a partir da Equação 41, sendo posteriormente acumulado até o 20º ano, Equação 42.

$$V_n = V_0 + n \times t \quad (40)$$

$$N_a = 365 \times FV \times V_n \times c \quad (41)$$

$$N = \sum_{a=1}^{a=p} N_a \quad (42)$$

onde:

- V_n : volume de tráfego no ano “n”;
- V_0 : volume de tráfego no ano base;
- n : número de anos decorridos após o ano base;
- t : taxa de crescimento anual;
- N_a : número equivalente de solicitações durante o ano “a”;
- FV : fator de veículos;
- c : fator de distribuição de veículos comerciais em relação ao tráfego comercial, nos dois sentidos, na faixa de projeto (Tabela 5.3);
- N : número equivalente de solicitações durante o período de projeto;
- a : ano do período de projeto;
- p : número de anos do período de projeto.

É importante salientar que os FV são obtidos a partir dos pontos médios dos intervalos de carga, forma utilizada para a representação do espectro de carga. Assim, os FV calculados para cada classe individual de veículos foram ponderados de acordo com sua frequência na via, ou seja, foram multiplicados pela frequência relativa de cada classe de pesagem, obtendo-se, a partir da somatória de todos os valores, o FV médio da frota. Analogamente

aos FV, o número equivalente de solicitações durante o período de projeto (N) foi calculado de maneira mensal (uso de FV mensais) e anual (uso de FV anual).

Para efeitos de projeto, o tráfego considerado é aquele na faixa mais solicitada da rodovia e, segundo DNIT (2006c), na falta de dados mais precisos para estabelecimento do valor do fator de distribuição “c”, podem ser usadas porcentagens de acordo com as indicadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Porcentagem de veículos comerciais na faixa de projeto

Número de faixas de tráfego na rodovia	Fator de distribuição “c”
2 (pista simples)	50%
4 (pista dupla)	35 a 48%
6 ou mais (pista dupla)	25 a 48%

Como a Rodovia dos Imigrantes possui 4 faixas por sentido adotou-se o valor de 48% para a distribuição de veículos comerciais na faixa de projeto. Apesar de haver uma balança no sentido Norte, os dados considerados nesse trabalho foram apenas os da balança no sentido Sul, os únicos disponibilizados, considerando-se, portanto, que são suficientes e adequados para verificação da vida útil de projeto.

A espessura total do pavimento foi calculada a partir do N_{USACE} , com o uso da Equação 43, constante no manual do DNIT (2006), de maneira mensal e anual. O valor da capacidade de suporte do subleito, representado por um CBR médio de 9%, é compatível com os parâmetros utilizados na análise empírico-mecanística.

$$H_t = 77,67 \times N^{0,0482} \times CBR^{-0,598} \quad (43)$$

onde:

- **H_t**: espessura total do pavimento, em centímetros;
- **N**: número equivalente de solicitações do eixo padrão;
- **CBR**: valor do índice de suporte Califórnia do subleito.

A espessura obtida a partir do valor de **N** calculado segundo o carregamento do posto de pesagem usado neste trabalho (Capítulo 6) foi igual a 56,50 cm (22,6”).

5.3.3 Fatores de equivalência de carga empírico-mecanísticos

Os FEC empírico-mecanísticos resultaram da análise estrutural do pavimento, cujas características estão apresentadas na Tabela 5.4, e da aplicação da Equação 4 (ver p. 44).

Tabela 5.4 - Características do pavimento

Camadas	Espessura (pol.)	Módulo de Elasticidade (psi)	Coef. de Poisson
1	5	600.000	0,3
2	8	60.000	0,4
4	10	30.000	0,4
Subleito (m)	∞	10.000	0,45

As respostas estruturais consideradas nesse estudo dizem respeito às deformações horizontais de tração na fibra inferior do revestimento ($\varepsilon_{ht, 1}$) e às deformações verticais de compressão no topo do subleito ($\varepsilon_{vc, m}$). O programa computacional de análises elástico-lineares ELSYM5 foi utilizado para a obtenção das respostas estruturais. O ELSYM5 foi escolhido por ser um programa simples e compatível com a análise de tensões e deformações executada no MEPDG. Os dados de entrada são: propriedades das camadas (espessura, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson), localização e magnitude das cargas por roda e as coordenadas para a determinação das respostas do pavimento (x, direção perpendicular ao tráfego, e y, direção paralela ao tráfego).

A distância considerada entre os centros das superfícies de carregamento no ESRD foi de 33 cm, já para os ETD e ETT foi de 120 cm. As respostas estruturais foram determinadas nos centros das superfícies de carregamento e em pontos de equidistância entre elas. Para melhor visualização, cada eixo e correspondentes distâncias de análise estão apresentados na Tabela 5.5.

Apesar de inúmeros trabalhos ressaltarem as limitações das análises relativas aos programas de análises tradicionais, que consideram a pressão de contato uniformemente distribuída sobre uma superfície circular e igual à pressão de enchimento, o MEPDG também utiliza para o cálculo das respostas estruturais um programa baseado na teoria das camadas elásticas e no modelo tradicional relativo ao contato pneu-pavimento (pressão de contato uniformemente distribuída sobre uma área circular e pressão de contato igual à pressão de enchimento), o JULEA.

Tabela 5.5 - Localizações usadas no ELSYM5 para cálculo das respostas estruturais

Eixo	Localização Cargas (pol.)		Localização Análise (pol.)		Profundidade
	x	y	x	y	
ESRS	0	0	0	0	
ESRD	0	0	0	0	
	13,11	0	6,56	0	
ETD	0	0	0	0	
	13,11	0	6,56	0	
	0	47,24	0	24	$Z_1 = 5''$
	13,11	47,24	6,56	24	$Z_m = 23,01''$
ETT	0	0	0	0	
	13,11	0	6,56	0	
	0	47,24	0	24	
	13,11	47,24	6,56	24	
	0	94,48	0	47,24	
	13,11	94,48	6,56	47,24	

Para verificação do efeito relativo à pressão de enchimento dos pneus foram consideradas as pressões de 80 psi e 120 psi. Tais valores são, respectivamente, a pressão quando do AASHTO Road Test e, de acordo com Fernandes Junior, Pais e Pereira (2007), a pressão de enchimento média no Brasil. Para cada pressão foram obtidos os valores de $FEC_{trincas}$ (com uso da deformação horizontal de tração na fibra inferior do revestimento - $\varepsilon_{ht,1}$) e de $FEC_{afundamento}$ (para a deformação vertical de compressão no topo do subleito - $\varepsilon_{vc,m}$). Cada valor de fator de equivalência de carga individual (FEC_i) foi calculado a partir do uso da Equação 4 (ver p. 44), aplicando-se o expoente 3,291 e 4, respectivamente.

As respostas estruturais correspondentes à solicitação em análise foram obtidas para as cargas correspondentes aos pontos médios dos intervalos de classe de cargas, para simular a aplicação do espectro de carga por eixo, convertendo-as para libras e dividindo-as de acordo com o número de rodas. Já para a obtenção das respostas à solicitação padrão foi usado o carregamento de 4500 lb/roda, pressão de enchimento de 80 psi e a localização das cargas correspondentes ao ESRD. O valor do FEC para cada carga aplicada (ponto médio do intervalo de classe de carga) foi obtido pela atribuição da correspondente frequência relativa ao FEC_i , sendo que o valor final para o eixo analisado constou da somatória dos 38 valores parciais de ESRS e ESRD e/ou 31 valores parciais de ETT. Assim, como no procedimento empírico, obteve-se um fator de equivalência de carga ponderado referenciado no texto como “ $FEC_{trincas}$ ” e “ $FEC_{afundamento}$ ”.

Como exemplo, a Tabela 5.6 apresenta o cálculo dos FEC empírico-mecanísticos para o ETT do veículo 2S3, considerando-se pressão de enchimento dos pneus igual a 80 psi. As deformações relativas ao eixo padrão resultantes na estrutura estudada foram: $(e_{ht,1})_0 = 0,138E-03$ in/in e $(e_{vc,m})_0 = 0,253E-03$ in/in.

Tabela 5.6 - FEC empírico-mecanísticos para o ETT do veículo 2S3 com pressão de enchimento nos pneus de 80 psi

Pto. Médio (kg)	Carga por roda (lbs)	Frequência	ETT		FEC _{trincas}	FEC _{afundamento}
			$e_{ht,1}$	$e_{vc,m}$		
6.122,45	1120	0,090%	4,71E-05	7,02E-05	2,60E-05	5,30E-06
7.482,99	1369	1,602%	5,57E-05	8,57E-05	8,08E-04	2,11E-04
8.843,53	1618	1,140%	6,38E-05	1,01E-04	8,99E-04	2,92E-04
10.204,07	1867	1,158%	7,14E-05	1,17E-04	1,33E-03	5,23E-04
11.564,61	2116	0,935%	7,87E-05	1,32E-04	1,47E-03	6,93E-04
12.925,15	2365	0,841%	8,55E-05	1,47E-04	1,74E-03	9,68E-04
14.285,69	2614	1,028%	9,20E-05	1,63E-04	2,71E-03	1,76E-03
15.646,23	2863	1,371%	9,83E-05	1,78E-04	4,48E-03	3,37E-03
17.006,77	3112	1,773%	1,04E-04	1,93E-04	7,04E-03	6,06E-03
18.367,31	3360	2,099%	1,10E-04	2,09E-04	9,89E-03	9,70E-03
19.727,85	3609	3,029%	1,15E-04	2,24E-04	1,68E-02	1,86E-02
21.088,39	3858	4,590%	1,21E-04	2,39E-04	2,94E-02	3,66E-02
22.448,93	4107	6,338%	1,26E-04	2,54E-04	4,65E-02	6,47E-02
23.809,47	4356	6,356%	1,30E-04	2,69E-04	5,27E-02	8,17E-02
25.170,01	4605	13,031%	1,35E-04	2,85E-04	1,22E-01	2,08E-01
26.530,55	4854	29,935%	1,40E-04	3,00E-04	3,10E-01	5,89E-01
27.891,09	5103	20,430%	1,44E-04	3,15E-04	2,34E-01	4,89E-01
29.251,63	5352	3,918%	1,48E-04	3,30E-04	4,94E-02	1,13E-01
30.612,17	5601	0,295%	1,52E-04	3,45E-04	4,07E-03	1,02E-02
31.972,71	5850	0,028%	1,57E-04	3,60E-04	4,28E-04	1,15E-03
33.333,25	6099	0,005%	1,62E-04	3,75E-04	8,72E-05	2,47E-04
34.693,79	6348	0,000%	1,68E-04	3,90E-04	0,00E+00	0,00E+00
36.054,33	6596	0,003%	1,73E-04	4,04E-04	5,38E-05	1,67E-04
37.414,87	6845	0,003%	1,78E-04	4,19E-04	5,94E-05	1,93E-04
38.775,41	7094	0,000%	1,83E-04	4,34E-04	0,00E+00	0,00E+00
40.135,95	7343	0,000%	1,88E-04	4,49E-04	0,00E+00	0,00E+00
41.496,49	7592	0,003%	1,93E-04	4,64E-04	7,77E-05	2,89E-04
42.857,03	7841	0,000%	1,98E-04	4,79E-04	0,00E+00	0,00E+00
44.217,57	8090	0,000%	2,03E-04	4,93E-04	0,00E+00	0,00E+00
45.578,11	8339	0,000%	2,08E-04	5,08E-04	0,00E+00	0,00E+00
46.938,65	8588	0,000%	2,12E-04	5,23E-04	0,00E+00	0,00E+00

A partir dos FEC foram calculados os valores de FV_{trincas} e $FV_{\text{afundamento}}$, correspondentes a cada classe considerada neste trabalho, mediante o somatório dos valores de FEC obtidos para cada eixo que compõe o veículo em análise.

5.3.4 Cálculo da vida útil

O procedimento para o cálculo do “N” foi feito de forma similar ao obtido pelo método empírico, ou seja, a Equação 42 foi usada aplicando-se os valores de FV_{trincas} e $FV_{\text{afundamento}}$ médios da frota. Os FV_{trincas} e $FV_{\text{afundamento}}$ médios da frota foram calculados a partir da somatória dos FV ponderados, ou seja, os valores individuais de cada classe de veículos foram multiplicados pela frequência de cada classe verificada na pesagem. Dessa forma obteve-se o consumo da vida útil em termos de solicitações correspondentes aos efeitos danosos calculados a partir das deformações correspondentes aos carregamentos dos eixos observados em campo para cada classe de veículo.

5.4 Ajuste às Distribuições de Carga – Modelagem

O espectro de carga para cada tipo de eixo (simples, tandem duplo e triplo) foi modelado a partir da função estatística que melhor se ajustasse aos dados. Assim, neste trabalho foram desenvolvidos modelos de distribuição de carga por eixo usando-se funções Weibull e Log-normal e verificado aquela que melhor se adequou à distribuição original a partir dos valores de R^2 , testes de aderência como o qui-quadrado (χ^2) e teste *Kolmogorov-Smirnov (K-S)* e porcentagem de diferença (erros) no valor final de FEC e FV entre os espectros originais e os previstos pelos modelos. Ressalta-se que do total de 11 classes de veículos com frequência superior a 1% foram utilizados na modelagem os espectros referentes a somente 7 (sete) classes de veículos, pois estas sete classes em conjunto correspondiam a uma porcentagem do tráfego comercial próxima a 90%.

5.4.1 Escolha do tipo de espectro de carga: mensal x anual

Uma questão inicial ao ajuste das distribuições de carga originais e, consequentemente, o desenvolvimento dos modelos estatísticos para cada eixo de veículos foi o espectro de carga por eixo que deveria ser usado como ponto de partida para o desenvolvimento dos modelos que melhor representasse o tráfego, ou seja, o (s) espectro (s) de determinado (s) meses ou o espectro anual (de todos os meses em conjunto). Dessa forma, dois procedimentos foram usados na comparação entre os espectros mensais e o anual para

auxiliar na escolha: um teste estatístico com a verificação da aderência pelo teste de hipóteses K-S e um teste prático a partir da diferença entre os FEC, FV e as espessuras finais do pavimento.

5.4.1.1 Teste K-S: teste estatístico

O teste K-S para 2 amostras foi usado para comparar cada um dos espectros mensais ao espectro anual, pois este tem o objetivo de comprovar se 2 amostras foram extraídas da mesma população (ou de populações com a mesma distribuição) comparando as correspondentes frequências acumuladas das amostras. Além disso, a prova foi bilateral (nas duas caudas) tendo em vista que não havia a necessidade de afirmar se a média amostral era significativamente maior ou menor que o valor usado como referência. Um fator favorável à escolha deste método foi que não há nenhum problema que as amostras sejam de tamanhos diferentes, portanto não houve necessidade de artifícios para que ele pudesse ser aplicado. Assim as seguintes hipóteses foram testadas: H_0 : as distribuições de carga por eixo do mês “x” e a anual são iguais e H_1 : as distribuições de carga por eixo do mês “x” e a anual são significativamente diferentes estatisticamente.

As máximas diferenças (D) entre as frequências acumuladas, em cada intervalo de carga por eixo, relativas ao espectro de cada mês e do ano todo foram determinadas e comparadas com o valor crítico ($D_{\text{crítico}}$) para amostras superiores a 40. O $D_{\text{crítico}}$ foi obtido para os níveis de significância de $\alpha = 0,05$ e $\alpha = 0,01$, conforme apresentado na Tabela 5.7. Para os valores de D maiores que os dos $D_{\text{crítico}}$ a hipótese nula (H_0) foi rejeitada, ou seja, nesse caso ficava evidenciado que havia uma diferença estatisticamente significativa entre os espectros de carga por eixo que foram comparados.

Tabela 5.7 - Valores críticos para o teste K-S em prova para 2 amostras

Nível de Significância	Valor de $D_{\text{crítico}}$
0,05	$1,36 \sqrt{\frac{n_1 + n_2}{n_1 n_2}}$
0,01	$1,63 \sqrt{\frac{n_1 + n_2}{n_1 n_2}}$

Obs.: os valores n_1 e n_2 são as contagens totais de eixos de cada amostra: anual e mensal, respectivamente.

5.4.1.2 Teste prático

Nesta etapa foram calculados os FEC e FV empíricos para os espectros originais mês a mês e depois foi feita a comparação com os valores obtidos a partir do espectro geral (considerando juntos todos os meses). De posse dos FV os correspondentes números de solicitações equivalentes ao eixo padrão também foram calculados para que se pudesse, posteriormente, verificar o reflexo da diferença entre os valores na espessura total (H_t). A porcentagem da diferença entre os FV (ou erros percentuais nos FV) foram calculados a partir da Equação 44.

$$\% \text{ erro} = \left(\frac{FV_{\text{mês}} - FV_{\text{ano}}}{FV_{\text{ano}}} \right) \times 100 \quad (44)$$

onde:

- **FV_{mês}**: FV relativo ao mês em análise;
- **FV_{ano}**: FV relativo a todos os meses juntos do ano de 2008.

As espessuras foram calculadas de acordo com a Equação 43 e conforme as características e procedimentos já informados no item 5.2.2 Os erros percentuais foram obtidos de forma similar ao do FV, usando-se no lugar do FV o valor da espessura encontrada.

5.4.2 O ajuste propriamente dito

5.4.2.1 Obtenção dos parâmetros da função de densidade de probabilidade

Em função dos resultados obtidos do procedimento relatado no item anterior, e que serão melhor detalhados no próximo capítulo (item 6.4), decidiu-se usar o espectro anual (relativo ao conjunto de meses de 2008) para o desenvolvimento dos modelos de distribuição de carga por eixo. Assim, os espectros anuais originais relativos a cada eixo da configuração de cada uma das 7 classes mais frequentes no PPV01 e que juntas representavam porcentagem próxima a 90% do tráfego de veículos comerciais de carga foram modeladas usando as distribuições de probabilidade Log-normal e Weibull. Essas distribuições foram escolhidas por se assemelharem às distribuições obtidas originalmente.

Alguns dos espectros apresentaram apenas um pico e outros apresentaram 2 ou mais picos. No caso das distribuições Log-normal, as médias (μ_y) e desvios padrões (σ_y) dos dados transformados logaritmicamente foram os parâmetros usados para caracterizar os dados,

onde a média fornece a localização do pico da carga por eixo e o desvio padrão descreve a dispersão dos dados de cargas por eixo em torno do pico. Já na distribuição Weibull, em que foram usados os parâmetros de forma (α) e o parâmetro de escala (β), nota-se que o β influenciou na localização do pico e o α no “alongamento” do pico da distribuição.

De uma forma geral, quando o espectro apresentou mais de um pico foi necessário usar, além da média e desvio padrão relacionados a cada pico, a porcentagem relativa a cada “porção” da distribuição teórica (prevista pelo modelo). Na Equação 9 e na Figura 4.3 (ver p. 89 e 90) essa consideração foi exemplificada. É importante esclarecer que inicialmente todos os picos de um mesmo espectro foram modelados pelo mesmo tipo de distribuição, ou seja, foi usada a mesma função de densidade de probabilidade modificando apenas os parâmetros de cada pico. Com a estimativa dos parâmetros as funções de distribuição acumulada para cada intervalo de carga por eixo foram obtidas (mesmos intervalos usados no desenvolvimento dos espectros originais) e a partir da subtração entre as frequências acumuladas de cada intervalo foi possível obter as respectivas frequências relativas do espectro previsto pelo modelo. O procedimento usado para a estimativa de cada parâmetro das distribuições teóricas foi o seguinte:

a. Distribuição teórica Log-normal (modelo Log-normal):

Nos espectros com apenas um pico os parâmetros desconhecidos do modelo log-normal que precisavam ser estimados para que a curva da distribuição teórica se ajustasse ao espectro original de campo eram apenas dois: μ_y e σ_y (ver Equação 11, p. 90). O procedimento constou de várias tentativas sendo que os valores usados inicialmente na primeira tentativa dessa busca foram os valores iniciais próprios da população observada em campo.

Os valores das somas dos quadrados dos desvios entre as frequências originais e as previstas pelo modelo foram calculados para cada tentativa procurando manter constante o valor adequado para a μ_y (localização do pico) e variando os valores de σ_y até que fosse encontrado aquele que resultasse em uma menor soma dos quadrados dos desvios. Quando os espectros possuíam mais de um pico o procedimento foi o mesmo, embora mais complexo em função do número de parâmetros envolvidos.

Para auxiliar nesse processo uma análise visual do ajuste entre o espectro original e o espectro previsto pelo modelo foi feita simultaneamente às tentativas. Para tanto foram

plotados num mesmo gráfico os espectros dos dados originais e dos dados previstos pelo modelo.

b. Distribuição teórica Weibull (modelo Weibull):

Para o modelo Weibull o processo foi similar, buscando por tentativas, os valores dos parâmetros (α) e (β) que resultassem na menor soma do quadrado dos desvios. Neste procedimento também foi utilizado, para auxiliar nas tentativas, a análise visual dos gráficos, ou seja, foram sendo usados valores que inicialmente ajustassem, visualmente, a distribuição prevista à forma da distribuição original. Os parâmetros foram então usados na obtenção da frequência acumulada a partir da Equação 45.

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha} \quad (45)$$

5.4.2.2 Teste do ajuste entre os espectros: modelo x original

Após a estimativa dos parâmetros necessários a cada distribuição teórica para cada eixo de carga dos veículos considerados, o teste do ajuste entre os espectros originais e os correspondentes espectros teóricos foi realizado. Para tanto, foram observados os valores do coeficiente de determinação R^2 entre as frequências relativas, além da realização dos testes Qui-quadrado e K-S.

Os valores de R^2 foram obtidos considerando as frequências relativas originais como ordenadas (y) e as frequências relativas previstas pelo modelo como abscissas (x). A estatística R^2 refere-se à proporção dos erros observados que são explicados pelo modelo teórico.

O teste K-S usado para comparar o ajuste entre os espectros originais aos modelados foi aquele relativo à prova para uma amostra, portanto prova diferente da usada na comparação entre os espectros mensais e anuais. Isto se explica pelo fato desta ser uma prova de aderência entre as distribuições originais e previstas, ou seja, diz o grau de concordância entre a distribuição de um conjunto de valores amostrais (observados) e uma determinada distribuição teórica específica (valores previstos). Assim, é capaz de determinar se os valores da amostra podem razoavelmente ser considerados como provenientes de uma população com aquela distribuição teórica. O valor de D_{critico} para amostras superiores a

35, como foi o caso desta pesquisa, foi obtido para os níveis de significância de $\alpha = 0,05$ e $\alpha = 0,01$, conforme apresentado na Tabela 5.8.

Tabela 5.8. Valores críticos para o teste K-S em prova para 1 amostra

Nível de Significância	Valor de $D_{\text{crítico}}$
0,05	$1,36/\sqrt{N}$
0,01	$0,63/\sqrt{N}$

Obs.: o valor de N é o número de veículos pesados (ou o determinado tipo de eixo em análise).

Outro teste usado para verificar a aderência entre as distribuições de valores observados e de valores previstos foi o teste qui-quadrado (χ_{obs}^2). Diferentemente do teste K-S, o teste χ_{obs}^2 foi aplicado a partir das frequências absolutas, onde foram agrupados os dados da frequência absoluta dos intervalos de carga que apresentavam frequência inferior a 5. Assim, o número de intervalos “k” diminuiu. Para que houvesse coerência na comparação, os números de intervalos foram reduzidos até ficarem iguais para os dois tipos de espectros analisados (original e estimado), embora uma delas apresentasse valor de frequência maior ou igual a cinco em determinado(s) intervalo(s) enquanto que a outra não.

O χ_{obs}^2 foi comparado com um valor crítico ($\chi_{\text{crítico}}^2$). Para hipótese nula ser aceita o χ_{obs}^2 deveria ser menor que o $\chi_{\text{crítico}}^2$ para os níveis de significância $\alpha = 0,05$ e $\alpha = 0,01$. As hipóteses consideradas nesse teste foram: H_0 : as distribuições de carga por eixo do modelo “x” e a distribuição de carga por eixo original possuem um bom ajuste e H_1 : as distribuições de carga por eixo do modelo “x” e a distribuição de carga por eixo original não possuem um bom ajuste.

5.5 Determinação do Efeito dos Espectros Teóricos no Dimensionamento Empírico e Empírico-mecanístico: AASHTO; USACE e ELSYM5

O procedimento para cálculo dos fatores de danos e solicitações a partir dos modelos desenvolvidos foi executado da mesma forma como foi realizado com os espectros originais, tanto na forma convencional (empírica) como na empírico-mecanística a partir das respostas estruturais calculadas no ELSYM5. Tendo em vista que os valores dos carregamentos a considerar permaneciam os mesmos, não foi necessária uma nova análise das respostas estruturais no ELSYM5; em função do ajuste houve apenas variação nas frequências relativas onde os FEC e “Ns” foram recalculados.

Ressalta-se que na comparação entre os resultados oriundos da aplicação das distribuições originais e das teóricas (modelos) também foi feita uma alternância entre os modelos para determinados tipos de veículos e eixos segundo aqueles modelos que apresentaram melhores resultados de R^2 . Ou seja, para exemplificar tem-se o caso do veículo do tipo 3D4: para o ESRS foi aplicado o modelo log-normal, para o ETD1 foi considerado o modelo Log-normal, no ETD2 foi considerado o modelo log-normal e no ETD3 o modelo Weibull.

Vale a pena lembrar que assim como nos valores empíricos dos FV, os veículos considerados foram os 7 mais frequentes no PPV01, os quais em conjunto compunham aproximadamente 90% do tráfego comercial de carga. Assim, para que o tráfego a ser aplicado na Equação de N fosse comparável posteriormente com os resultados do MEPDG as porcentagens de cada veículo foram corrigidas considerando que as sete classes de veículos correspondiam a 100% do tráfego comercial de carga, ou seja, que os exatos 88,27% do tráfego comercial de carga equivaliam a 100%.

As espessuras foram calculadas de acordo com os métodos do DNIT, para CBR 9%, a partir do uso da Equação 43 e pelo método da AASHTO 1993 a partir das Equações 46 e 47. Os dados necessários da estrutura considerados para aplicação nas Equações da AASHTO foram: índice de serventia final de 2,5; Z_r igual a zero, para 50% de confiabilidade; S_0 igual a 0,35; a_1 igual a 0,44, para mistura em usina; a_2 igual a 0,14, para brita graduada e a_3 igual a 0,1, para areia e argila arenosa.

$$\log_{10} W_{18} = Z_r \times S_0 + 9,36 \times \log_{10}(SN + 1) - 0,2 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,4 + \frac{1094}{(SN+1)^{5,19}}} + 2,32 \times \log_{10} \times Mr - 8,07 \quad (46)$$

$$SN = a_1 \times D_1 + a_2 \times D_2 + \dots + a_n \times D_n \quad (47)$$

onde:

- W_{18} : ESALs;
- Z_r : nível de confiança;
- S_0 : variabilidade;
- SN : Número estrutural;
- ΔPSI : perda de serventia;
- Mr : módulo de resiliência do solo;
- a_i : coeficientes de camadas;

- D_i : espessuras das camadas.

5.6 Determinação do Efeito do Espectro de Carga Teórico no Dimensionamento Empírico-Mecanístico a partir do uso do MEPDG

Nesta etapa o objetivo foi determinar o impacto dos espectros de carga modelados no desempenho do pavimento comparando-os com os resultados obtidos com os espectros originais. Assim os espectros originais e aqueles modelados pelas funções log-normal e weibull dos eixos dos sete tipos de veículos (tanto usando o mesmo tipo de função em todos os eixos como as alternando segundo aquelas de melhor R^2) foram avaliados usando o programa computacional do AASHTO 2002: o MEPDG. A versão 1.100, a última disponibilizada, foi utilizada neste trabalho.

Conforme o procedimento usado anteriormente o período de projeto considerado foi de 20 anos e o pavimento foi do tipo flexível. No APÊNDICE A apresenta-se como exemplo um dos sumários gerados com os dados de entrada no MEPDG.

5.6.1 Critérios de desempenho

Os critérios de desempenho considerados no trabalho são: Irregularidade longitudinal inicial (IRI_{ini}) aproximadamente igual a 1,0 m/km (63 in/mi), onde geralmente o valor ideal para pavimentos novos é entre 50 a 75 in/mi (0,79 a 1,18 m/km); Irregularidade longitudinal final (IRI_{final}) de 4 m/km (172 in/mi); Trincas longitudinais *up-down* igual a 189,0 m/km (1000 ft/mi); Trincas por fadiga classe 3 *bottom-up* igual a 25%; trincas transversais térmicas igual a 189 m/km (1000 ft/mi); Afundamento nas trilhas de rodas no CBUQ igual a 6,35 mm (0,25 in) e Afundamento nas trilhas de rodas no pavimento todo igual a 19,5mm (0,75 in).

O nível de confiabilidade (segurança) considerado para todos os critérios de desempenho foi de 90%, pois conforme é proposto no NCHRP (2004) o nível de confiança para restaurações e pavimentos novos nas vias Interestaduais e nas *Freeways* em áreas urbanas deve estar entre 85-97% e em áreas rurais entre 80-95%.

5.6.2 Tráfego

Os dados de tráfego foram considerados como nível 1 sendo inseridos os valores locais como distribuição de veículos por classe do tráfego diário médio anual (TDMA), fator de

crescimento linear, espectro de carga por eixo no PPV01 e número de eixos por caminhão. Os valores padrões existentes no programa para a distribuição horária e o fator de correção mensal foram usados. As características necessárias a esse item (período de projeto, TDMA, taxa de crescimento anual do tráfego, fator de distribuição de veículos comerciais em relação ao tráfego comercial nos dois sentidos na faixa de projeto) foram adotadas conforme já relatado no item 5.3.2; o número de faixas na direção de projeto foi igual a 4 e a porcentagem de caminhões na direção de projeto foi de 50%. A velocidade de operação considerada foi o valor padrão do programa, de aproximadamente 96 km/h (60 mi/h).

As classes de veículos da FHWA equivalentes às classes de veículos do DNIT consideradas neste trabalho foram: Classe 5 (2C); Classe 6 (3C); Classe 8 (2S1 e 2S2); Classe 9 (2S3); Classe 10 (3S3) e Classe 13 (3D4). Novamente, é importante lembrar que as porcentagens de cada veículo foram corrigidas considerando que estes sete veículos correspondiam a 100% do tráfego comercial de carga, ou seja, que os exatos 88,27% do tráfego comercial de carga equivaliam a 100%, pois no MEPDG a somatória final da distribuição de veículos por classe deve ser igual a 100%.

No que concerne aos espectros de carga por eixo, uma média dos valores de frequência relativa foi obtida entre eixos simples daqueles veículos que possuíam em sua composição ESRS e ESRD, pois o programa considera os eixos simples em conjunto (ESRS+ESRD). Procedimento também realizado entre aqueles tipos de eixos em número maior que a unidade no veículo.

Como última observação neste item, relata-se que quando houve o preenchimento relativo à porcentagem de caminhões de 48% na faixa de projeto e a pressão de enchimento do pneu de 80 psi, surgiu uma mensagem de aviso informando que o valor inserido estava fora da faixa de valores típicos, respectivamente, 50% a 100% e 120 psi. Na caixa de mensagem havia a opção de ignorar, então esse item foi selecionado e o valor colocado pelo usuário foi mantido.

5.6.3 Clima

A condição climática foi considerada igual a de Orlando na Flórida, em virtude da similaridade dos índices pluviométricos da região onde se encontra a rodovia em estudo (em média de, aproximadamente, 1317 mm de chuva ao ano). A profundidade do lençol freático considerada foi de 10 m (32,8 ft).

5.6.4 Estrutura

A estrutura usada no MEPDG foi aquela apresentada no item 5.3.3. A seguir são apresentadas em detalhes as características de cada camada requeridas no programa para que a análise empírico-mecanística fosse feita.

5.6.4.1 Propriedades de projeto de misturas asfálticas a quente

Este item constava no momento das simulações realizadas, mas não era apresentado no manual do usuário. Nele, como opções padrões, já estavam selecionados que o modelo de previsão do módulo de elasticidade da mistura (*E* HMA predictive model*) seguiria o modelo da NCHRP 1-37A nacionalmente calibrado com base na viscosidade, bem como que os coeficientes usados no modelo de previsão da deformação permanente na mistura asfáltica (*HMA rutting model coefficients*) – afundamento nas trilhas de rodas - seriam os coeficientes do NCHRP 1-37A, nacionalmente calibrados. Assim, tais opções foram mantidas.

5.6.4.2 Camada 1

- Seleção do nível 3;
- Revestimento em concreto asfáltico de espessura igual a 12,5 cm (5 in);
- Distribuição granulométrica dos agregados segundo a faixa “C” do DNIT: porcentagem retida acumulada na peneira 3/4” igual a 0; porcentagem retida acumulada na peneira 3/8” igual a 20; porcentagem retida acumulada na peneira nº 4 igual a 42 e porcentagem passada na peneira nº 200 igual a 6;
- Ligante asfáltico do tipo CAP 60-70;
- Temperatura de referência igual a 25°C (77°F);
- Coeficiente de Poisson de 0,30;
- Teor de ligante de 6%;
- Volume de vazios igual a 4%;
- Densidade da mistura igual a 2,5 kg/cm³ (142 pcf);
- Condutividade térmica do asfalto de 0,67 BTU/hr-ft-F⁰;
- Capacidade de calor do asfalto de 0,23 BTU/lb-F⁰.

5.6.4.3 Camada 2

- Nível 3;

- Base granular (brita graduada simples) de espessura igual a 20 cm (8 in);
- Coeficiente de Poisson igual a 0,40;
- Coeficiente de pressão lateral igual a 0,50;
- Módulo de Elasticidade de 60000 psi (neste item, assim como ocorreu com a distribuição de caminhões na faixa de projeto e a pressão de enchimento, a mensagem de aviso sobre o valor estar fora da faixa de valores típicos – 20000 a 45000 - surgiu novamente. E a opção ignorar foi mais uma vez selecionada);
- Índice de plasticidade igual a 0% e limite de liquidez igual a 6%;
- Distribuição granulométrica dos agregados segundo a faixa “C” do DER-SP: porcentagem passante na peneira nº 200 igual a 10%; porcentagem passante na peneira nº 4 igual a 50%;
- D_{60} igual a 7,058 mm (calculado pelo programa);
- Material compactado;
- Demais valores usados foram os padrões do programa.

5.6.4.4 Camada 3

- Nível 3;
- Sub-base granular (solo A-2-6) com espessura igual a 25 cm (10 in);
- Coeficiente de Poisson igual a 0,40;
- Coeficiente de pressão lateral igual a 0,50;
- Módulo de Elasticidade de 30.000 psi;
- Material compactado;
- Demais valores usados foram os padrões do programa.

5.6.4.5 Camada 4

- Nível 3;
- Subleito em solo A-7-6;
- Coeficiente de Poisson igual a 0,45 (a mensagem de aviso sobre o valor estar fora da faixa de valores típicos – 0,10 a 0,40 - surgiu novamente. E a opção ignorar foi mais uma vez selecionada);
- Coeficiente de pressão lateral igual a 0,50;
- Módulo de Elasticidade de 10.000 psi;
- Material não compactado/natural;
- Demais valores usados foram os padrões do programa.

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados correspondentes a cada etapa seguida no procedimento adotado neste trabalho, bem como uma análise. As etapas são relativas: ao desenvolvimento dos espectros originais de carga por eixo e as correspondentes análises empírica e empírico-mecanística; ajuste dos espectros de carga por eixo a distribuições de probabilidades e as análises empíricas e empírico-mecanísticas a partir dos espectros ajustados e a comparação dos dados obtidos em ambas as fases.

Para fins de praticidade, os resultados apresentados nesse capítulo são relativos aos tipos de veículos de maior frequência no PPV01 localizado na Rodovia Imigrante – SP 160, km 28, no ano de 2008. Os gráficos com os espectros de carga por eixo e as frequências acumuladas relativos às classes de veículos que não estão contidos no capítulo são apresentados no APÊNDICE B.

6.1 Configuração do Tráfego

A configuração do tráfego de veículos de carga circulante no ano de 2008 no PPV01 está representada na Figura 6.1. Nesse gráfico foram plotadas as frequências relativas (FR) mensais para cada classe de veículo pesado, bem como a frequência relativa anual por classe. Nota-se que não houve grande variação de valores entre os meses de cada classe, portanto a FR anual pode ser usada sem maiores problemas para a seleção das classes dominantes na via.

De uma forma geral, o tráfego encontra-se distribuído entre 17 classes veiculares sendo consideradas para o desenvolvimento dos espectros de carga por eixo apenas 11, pois as 6 classes desconsideradas representam, juntas, apenas 1% do tráfego comercial de carga. As frequências em termos anuais das 11 classes usadas no desenvolvimento inicial dos espectros de carga por eixo são: 2C (FR = 7,69% e desvio padrão de 1,3); 2S1 (FR = 7,42% e desvio padrão de 0,6); 2S2 (FR = 9,87% e desvio padrão de 0,8); 2S3 (FR = 24,19% e desvio padrão de 1,3); 3C (FR = 6,54% e desvio padrão de 1,3); 3D4 (FR = 20,79% e desvio padrão de 2,9); 3S3 (FR = 11,76% e desvio padrão de 0,6); 2I2 (FR = 1,19% e desvio padrão de 0,4); 2I3 (FR = 1,47% e desvio padrão de 0,2); 3I3 (FR = 4,37% e desvio padrão de 1,1); 3T6 (FR = 3,70% e desvio padrão de 0,4).

Ressalta-se que em alguns dias não havia dados de pesagens: 08/02/2008 a 20/02/2008; 22/02/2008 a 29/02/2008; 01/05 a 08/05/2008; março/2008; abril/2008; 03/06/2008 e 12/10/2008. De acordo com informações obtidas da concessionária a maioria refere-se a dias em que as balanças fecharam por motivos operacionais, embora tenham tido casos de meses em que houve problemas no banco de dados. Outro fator observado é que não há registro específico de pesagem de ônibus.

Segundo uma das empresas concessionárias do estado de São Paulo, a opção por não pesagem dessa classe de veículos veio através da ARTESP (Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transportes ao Estado de São Paulo) e DER-SP, pois de acordo com os órgãos o fluxo dessa categoria é bastante significativo o que representaria um aumento do número de veículos pesados, que do ponto de vista deles seria desnecessário, em virtude de não haver muito excesso de peso nesta categoria. Esse fato representa uma perda de dados importantes na caracterização do tráfego para fins de dimensionamento e previsão de desempenho, a pouca ou não ocorrência de infrações de peso por parte desses veículos não descarta a necessidade de aquisição de dados, pois a frequência relacionada à carga é um item importante. O procedimento deveria contar pelo menos com pesagem por amostragem.

Figura 6.1 - Frequência de veículos por classe no PPV da SP 160 - km 28

6.2 Desenvolvimento das Distribuições Originais de Carga por Eixo

A seguir são apresentados os espectros originais de carga por eixo desenvolvidos para as quatro classes de veículos de maior frequência na via. No APÊNDICE B estão os espectros mensais e anuais, bem como as distribuições de frequência acumulada desenvolvidos para as outras classes de veículos. Ressalta-se, novamente, que os veículos das classes 2I1, 3I2, 3S1, 3S2, 4C e 4CD foram excluídos em função da somatória de suas frequências na via ser igual 1%.

Salienta-se, ainda, que em função da diferença dos impactos de cada um dos tipos de eixos no desempenho do pavimento, neste trabalho os espectros de carga referentes aos ESRS foram desenvolvidos separadamente dos espectros dos ESRD, tendo em vista que em várias pesquisas foi observado que os ESRS são os maiores causadores de trincas quando comparados com os eixos dotados de rodas duplas.

6.2.1 Espectros mensais de carga por eixo

6.2.1.1 Classe 2S3

Os veículos do tipo 2S3, cuja configuração consta de um eixo simples de roda simples (ESRS) e um eixo simples de roda dupla (ESRD) na unidade tratora e um eixo do tipo tandem triplo (ETT) na unidade rebocada, apresentaram frequência de 24,19% e, portanto a maior verificada no PPV 01. A partir das cargas mensuradas em cada eixo dos veículos passantes, os espectros de carga mensais para cada tipo de eixo foram montados separadamente e encontram-se nas Figuras 6.2, 6.4 e 6.6.

Com o intuito de verificar de forma mais clara a porcentagem de eixos dentro do padrão de carga por eixo aceitável, foram também desenvolvidos gráficos com as frequências acumuladas observadas para cada tipo de eixo de carga do tipo de veículo em questão. Tais frequências estão representadas nas Figuras 6.3, 6.5 e 6.7.

Figura 6.2 - Espectro de Carga para o ESRS da classe 2S3

Observando a Figura 6.2, nota-se que as cargas encontram-se numa faixa aproximada de 4.000 a 7.000 kg, tendo um pico pronunciado na proximidade de 5.500kg. Esse espectro tem uma boa conformação, onde as distribuições de cada mês estão muito próximas, ou seja, sem grandes variações. Na distribuição das frequências acumuladas ao longo dos meses, apresentada na Figura 6.3, fica nítido que valor próximo a 10% dos ESRS possuem carregamento superior a 6.000kg (carga máxima permitida no eixo).

Figura 6.3 - Frequência Acumulada para o ESRS da Classe 2S3

Observando a Figura 6.4 nota-se que as cargas verificadas nos ESRD do veículo 2S3 concentram-se numa faixa aproximada de 4.000 a 12.000 kg, tendo um pico pronunciado em torno de 20% no peso de, aproximadamente, 10.500kg. Tal peso é superior ao limite normal permitido para o tipo de eixo, que é de 10.000 kg. Se for considerada a tolerância para excessos de peso nos eixos de 7,5%, o limite fica em 10.750 kg, estando a carga máxima de pico dentro do tolerado. Esse espectro tem uma boa conformação, onde as distribuições de cada mês estão muito próximas, tendo pequenas variações antes do pico.

Figura 6.4 - Espectro de Carga para o ESRD da classe 2S3

Na distribuição das frequências acumuladas ao longo dos meses, apresentada na Figura 6.5, tem-se que os ESRDs se apresentam com pesos superiores a 10.000 kg em 38% dos casos.

Figura 6.5 - Frequência Acumulada para o ESRD da Classe 2S3

Para os ETT do veículo 2S3 (Figura 6.6), tem-se que as cargas estão concentradas numa faixa aproximada de 7.000 a 30.000 kg, tendo um pico pronunciado em torno do peso de, aproximadamente, 26.000kg. Tal peso é superior ao limite normal permitido para o tipo de eixo, que é de 25.500 kg. Se for considerada a tolerância para excessos de peso nos eixos de 7,5%, o limite fica em 27.412,5 kg, estando a carga máxima de pico dentro do tolerado. Nesse espectro observa-se boa conformação, embora sejam notadas algumas variações, principalmente nas proximidades do valor máximo da distribuição.

Figura 6.6 - Espectro de Carga para o ETT da classe 2S3

Na distribuição das frequências acumuladas ao longo dos meses para esse tipo de eixo, apresentada na Figura 6.7, tem-se que os ETTs se apresentam com pesos superiores a 25.500 kg em pelo menos 40% dos casos.

Figura 6.7 - Frequência Acumulada para o ETT da Classe 2S3

6.2.1.2 Classe 3D4

Os espectros de carga e a distribuição de frequências acumuladas também foram desenvolvidos para a segunda classe de maior frequência, a 3D4. O veículo conhecido como “Romeu e Julieta” composto por um caminhão tratorado de um ESRS dianteiro e um ETD traseiro, acompanhado de um reboque com dois ETDs, apresentou uma FR de 20,79%, entre todos os veículos pesados. Desta classe faz parte também o bi-trem (caminhão trator tratorado mais dois semireboques)

No espectro de carga por ESRS relativo a esse tipo de veículo, representado na Figura 6.8, nota-se que as cargas encontram-se numa faixa aproximada de 4.500 a 7.000 kg, tendo um pico pronunciado em, aproximadamente, 6.350 kg. Esse espectro tem uma boa conformação, onde as distribuições de cada mês estão muito próximas, sem grandes variações.

Figura 6.8 - Espectro de carga para o ESRS da classe 3D4

Na Figura 6.9, que contém a distribuição das frequências acumuladas ao longo dos meses, observa-se que próximo de 40% dos ESRS possuem carregamento superior a 6.000 kg. Sendo esse o eixo de direção, sobrecarregá-lo só trará dificuldades de dirigibilidade ao veículo, portanto tem-se neste caso cerca de 50% em situação de dirigibilidade aquém do adequado.

Figura 6.9 - Frequência acumulada para o ESRS da classe 3D4

Para os ETDs observa-se que há apenas um pico, diferentemente do relatado no trabalho de Ishak *et al.* (2010) no qual eles afirmam que a forma ideal esperada para os espectros de carga para os ETDs é a bimodal, ou seja, apresentação de dois picos, onde o primeiro é atribuído aos veículos descarregados e o segundo aos carregados.

No caso dos ETDs dos veículos classe 3D4 desse estudo (Figuras 6.10, 6.12 e 6.14), destaca-se a similaridade entre os três espectros. Assim tem-se que, de uma forma geral, as cargas estão concentradas numa faixa aproximada de 15.000 a 20.000 kg, tendo um pico pronunciado em torno de, aproximadamente, 17.200kg. Tal peso é superior ao limite normal permitido para o tipo de eixo, que é de 17.000 kg. Se for considerada a tolerância para excessos de peso nos eixos de 7,5%, o limite fica em 18.280 kg, estando a carga máxima de pico dentro do tolerado.

Nesses espectros observa-se boa conformação, embora sejam notadas algumas pequenas variações, principalmente nas proximidades do valor máximo da distribuição. Nas distribuições das frequências acumuladas dos ETDs do veículo de classe 3D4 constante nas Figuras 6.11, 6.13 e 6.15, observa-se que porcentagens próximas a 40% correspondem a carregamentos superiores a 17.000 kg.

Figura 6.10 - Espectro de carga para o ETD1 da classe 3D4

Figura 6.11 - Frequência acumulada para o ETD1 da classe 3D4

Figura 6.12 - Espectro de carga para o ETD2 da classe 3D4

Figura 6.13 - Frequência acumulada para o ETD2 da classe 3D4

Figura 6.14 - Espectro de carga para o ETD3 da classe 3D4

Figura 6.15 - Frequência acumulada para o ETD3 da classe 3D4

6.2.1.3 Classe 3S3

Os veículos da classe 3S3 estiveram presentes em 11,76 % das pesagens no PPV. O 3S3 é composto por um caminhão trator trucado com um ESRS e um conjunto de eixos em tandem duplo (ETD) acoplado em um semirreboque com um ETT.

Na Figura 6.16 tem-se o espectro de carga para o ESRS do 3S3. Novamente, como nos outros espectros de carga para ESRS, tem-se um único pico de cargas que variam numa faixa aproximada de 4.000 a 7.000 kg. Nesse espectro o pico está localizado nas proximidades da carga de 5.400 kg com uma variação em termos de porcentagem relativa, mas ainda assim percebe-se a mesma tendência entre os meses.

Figura 6.16 - Espectro de carga para o ESRS da classe 3S3

Na distribuição das frequências acumuladas da Figura 6.17 há um pouco mais de 10% dos ESRS com carga superior a 6.000 kg, confirmando uma tendência vista até aqui que a maioria dos ESRS não está sobrecarregada.

Figura 6.17 - Frequência acumulada para o ESRS da classe 3S3

No espectro dos ETDs dos veículos classe 3S3, Figura 6.18, também foi observada a existência de apenas um pico, estando as cargas concentradas numa faixa aproximada de 8.000 a 19.000 kg. Há uma variação de pico entre os meses, principalmente em fevereiro e

dezembro, mas geralmente a carga observada com maior frequência nas distribuições é inferior a 17.000 kg.

Figura 6.18 - Espectro de Carga para o ETD da classe 3S3

Na distribuição das frequências acumuladas do ETD do veículo de classe 3S3 constante na Figura 6.19, observa-se uma variação na frequência acumulada, reflexo da própria variação observada nos espectros de carga por eixo. Pode ser afirmado que cerca de 10% dos ETDs apresentam carregamento superior a 17.000 kg.

Figura 6.19 - Frequência acumulada para o ETD da classe 3S3

No que se refere aos ETTs dos veículos de classe 3S3, na Figura 6.20 tem-se a existência de apenas um pico de carga pronunciado que apresenta certa variação entre os meses de fevereiro, setembro, outubro e dezembro. A concentração das cargas está numa faixa de 13.000 a 30.000 kg e o valor de carga com a máxima frequência nas distribuições, na maioria, não supera 26.000 kg. Lembrando que o limite permitido para o tipo de eixo é de 25.500 kg.

Figura 6.20 - Espectro de carga para o ETT da classe 3S3

Na Figura 6.21, as frequências acumuladas apresentaram uma variação principalmente nos meses de fevereiro e dezembro fruto da variação observada nos espectros de carga por eixo, sendo que cerca de 40% dos ETTs apresentam carregamento superior a 25.500 kg.

Figura 6.21 - Frequência acumulada para o ETT da classe 3S3

6.2.1.4 Classe 2S2

A porcentagem de veículos da classe 2S2 dentro do universo de veículos pesados no ano de 2008 foi de 9,87%. O 2S2 é composto por um caminhão trator com um ESRS dianteiro e um ESRD traseiro com um semirreboque de ETD a ele acoplado.

Na Figura 6.22, tem-se o espectro de carga para o ESRS do 2S2 onde é evidenciado um único pico de cargas que variam numa faixa aproximada de 3.000 a 7.000 kg. Nesse espectro o pico está localizado nas proximidades da carga de 4.500 kg sem variações pronunciadas, percebendo-se a mesma tendência entre os meses.

Figura 6.22 - Espectro de carga para o ESRS da classe 2S2

Na distribuição das frequências acumuladas da Figura 6.23, observa-se que quase 100% dos ESRS apresentam carregamento igual ou inferior a 6.000 kg. As curvas de frequência acumulada estão seguindo mesma tendência, sem variações consideráveis.

Figura 6.23 - Frequência acumulada para o ESRS da classe 2S2

Nos ESRDs dos veículos de classe 2S2, na Figura 6.24 percebe-se pela primeira vez a existência de três picos de carga, o primeiro entre a faixa de valores aproximados de 3.000 a 6.300 kg e pico em torno do valor de 4.500 kg, o segundo entre 6.300 a 9.000 kg com pico

em torno de 7.200 kg e o terceiro, não muito pronunciado, entre 9.000 a 11.100 e pico em torno da carga de 9.500 kg, aproximadamente. Apesar de apresentar variações, o espectro segue uma mesma tendência de forma. Na curva da Figura 6.25 com a frequência acumulada para o ESRD, observa-se que menos de 5% desses eixos apresentaram carregamento superior a 10.000 kg, que é o limite de carga para o ESRD.

Figura 6.24 - Espectro de carga para o ESRD da classe 2S2

Figura 6.25 - Frequência acumulada para o ESRD da classe 2S2

No espectro de carga por ETD da Figura 6.26 está evidenciado que há três picos de cargas que variam numa faixa aproximada de 3.000 a 7.000 kg, de 7.000 kg a 10.000 kg e de 10.000 a 17.000 kg, aproximadamente. Nesse espectro o primeiro pico está localizado nas proximidades da carga de 6.000 kg com o mês de fevereiro apresentando certa diferença da tendência dos outros meses, o segundo está próximo à carga de 8.000 kg e o terceiro está nas proximidades da carga de 11.300 kg. As frequências acumuladas para o ETD que estão apresentadas na Figura 6.27 deixam claro que quase 100% desses eixos apresentaram carregamento igual ou inferior a 17.000 kg.

Figura 6.26 - Espectro de carga para o ETD da classe 2S2

Figura 6.27 - Frequência acumulada para o ETD da classe 2S2

6.2.2 Espectros anuais por eixo de carga

Nas Figuras 6.28 a 6.40 estão os gráficos com os espectros de carga por eixo e a frequência acumulada relativos à totalidade de dados do ano de 2008 de todos os veículos pesados no PPV01, localizado no km 28 da Rodovia dos Imigrantes (SP-160), pista Sul. Os espectros, assim como feito até o momento, estão separados por tipos de eixos de carga referentes a cada uma das quatro classes de veículos de maior frequência no local, sendo apresentados no APÊNDICE B os gráficos desenvolvidos para as outras sete classes.

Figura 6.28 - Espectro de carga do ESRS e correspondente frequência acumulada anual para o veículo classe 2S3.

Figura 6.29 - Espectro de carga do ESRD e correspondente frequência acumulada anual para o veículo classe 2S3.

Figura 6.30 - Espectro de carga do ETT e correspondente frequência acumulada anual para o veículo classe 2S3.

Figura 6.31 - Espectro de carga do ESRS e correspondente frequência acumulada anual para o veículo classe 3D4.

Figura 6.32 - Espectro de carga do ETD1 e correspondente frequência acumulada anual para o veículo classe 3D4

Figura 6.33 - Espectro de carga do ETD2 e correspondente frequência acumulada anual para o veículo classe 3D4

Figura 6.34 - Espectro de carga do ETD3 e correspondente frequência acumulada anual para o veículo classe 3D4

Figura 6.35 - Espectro de carga do ESRS e correspondente frequência acumulada anual para o veículo classe 3S3.

Figura 6.36 - Espectro de carga do ETD e correspondente frequência acumulada anual para o veículo classe 3S3.

Figura 6.37 - Espectro de carga do ETT e correspondente frequência acumulada anual para o veículo classe 3S3.

Figura 6.38 - Espectro de carga do ESRS e correspondente frequência acumulada anual para o veículo classe 2S2.

Figura 6.39 - Espectro de carga do ESRD e correspondente frequência acumulada anual para o veículo classe 2S2.

Figura 6.40 - Espectro de carga do ETD e correspondente frequência acumulada anual para o veículo classe 2S2.

A partir da análise dos gráficos apresentados da Figura 6.28 até a Figura 6.40 são apresentadas a seguir, para cada tipo de eixo de carga do veículo, os seguintes comentários:

- *Espectro de carga por ESRS:* Os espectros de carga apresentaram, na sua maioria, inclinação à direita (ou positiva) sinalizando que um ou mais valores da amostra são valores extremos maiores que a maioria dos valores restantes. A exceção ficou com o espectro formado para o veículo de classe 3D4, cuja inclinação foi negativa. Os

espectros desenvolvidos para esse tipo de eixo de carga são unimodais, tendo a presença de um único pico que, à exceção do apresentado para o veículo 3D4, apresentaram carga máxima de pico inferior a 6.000 kg. Os ESRS apresentaram porcentagens de desobediência ao limite máximo de 6.000 kg de até 20%, tendo apenas os ESRS do veículo 3D4 uma presença correspondente a 40% de cargas superiores a 6.000 kg;

- *Espectro de carga por ESRD:* Os dois espectros de carga apresentaram inclinações diferentes, no relativo ao veículo 2S3 tem-se que a inclinação é negativa (ou à esquerda) e no do veículo tipo 2S2 a inclinação está à direita (ou positiva). O espectro desenvolvido para o ESRD do veículo 2S3 apresenta um único pico pronunciado com carregamento superior a 10.000kg, mas o espectro do veículo 2S2 apresentou variações na calda direita apresentando ao todo três picos. Essas variações refletiram no formato da curva de frequência acumulada, deixando-a com uma conformação um pouco diferente das desenvolvidas para os outros tipos de eixos. Considerando a carga máxima permitida (sem a tolerância) de 10.000kg, foi observado para esses eixos que a maioria estava com carregamento superior. Para os veículos de classe 2S2 os eixos com excesso correspondiam a 4% e, para os 2S3, a 36%;
- *Espectro de carga por ETD:* Os espectros de carga apresentaram, na sua maioria, inclinação à esquerda (ou negativa) com exceção do espectro formado para o veículo de classe 2S2, cuja inclinação foi positiva. O espectro desenvolvido para esse tipo de eixo de carga do veículo 2S2 apresentou uma pequena variação próximo ao pico. Tal variação, assim como a do eixo anterior, deixou a conformação da curva de frequência acumuladas um pouco diferente das demais. Já os espectros desenvolvidos para os três ETDs do veículo 3D4 apresentaram um único pico com carga de máxima frequência inferior a 17.000 kg. A desobediência ao limite de carga por eixo do 2S2 foi cerca de 10%, tendo o veículo 3D4 uma presença correspondente a 40% de cargas maiores a 17.000 kg;
- *Espectro de carga por ETT:* Os espectros de carga apresentaram inclinação à esquerda (ou negativa). Os espectros desenvolvidos para esse tipo de eixo de carga foram considerados com a presença de um único pico com carga superior a 25.500kg. Para o ETT da classe 3S3 foi observado que cerca de 38% continham carregamento superior a 25.500 kg, mas para o veículo tipo 2S3 essa porcentagem foi de 36%. O espectro desenvolvido para a classe 2S3 apresentou leves variações na calda esquerda, nada que sugerisse novo pico de carga.

Para fins de comparação entre os espectros de carga desenvolvidos para cada tipo de eixo dos quatro veículos de maior frequência na via, foram elaboradas as Tabelas 6.1 e 6.2, com os valores de Desvio Padrão (DP), Erro Padrão (EP) e Coeficiente de Variação (CV).

Tabela 6.1 - Estatística para eixos simples

Tipo Veículo	ESRS			ESRD		
	DP	EP	CV	DP	EP	CV
2S3	529,8	2,68	0,10	1562,1	7,9	0,17
3D4	437,2	2,38	0,07	-	-	-
3S3	561,6	4,07	0,10	-	-	-
2S2	557,4	4,41	0,12	1915,46	15,18	0,33

Tabela 6.2 - Estatística para eixos em tandem

Tipo Veículo	ETD			ETT		
	DP	EP	CV	DP	EP	CV
2S3	-	-	-	4769,83	24,15	0,21
3D4	775,5	2,44	0,05	-	-	-
3S3	2237,16	16,24	0,15	3041,5	22,08	0,13
2S2	3092,67	24,5	0,38	-	-	-

A partir da observação das Tabelas 6.1 e 6.2, pode ser afirmado que os menores coeficientes de variação e desvios padrão são encontrados nos ESRS, estando nesses tipos de eixos as menores variabilidades, ou dispersões. O erro padrão tem seus menores valores também para os ESRS, portanto apresentando maior precisão na estimativa da média.

6.2.3 Considerações finais sobre os espectros originais de carga por eixo

A partir dos espectros mensais e anuais apresentados neste capítulo, bem como no APÊNDICE B, pode ser verificado que os ESRS de todas as classes de veículos observadas no PPV01 apresentaram as melhores conformações e menores variabilidades entre os meses, possuindo a maioria das cargas no pico das distribuições (cargas de maiores frequências) inferiores a máxima permitida. Ressalta-se que as variações observadas em alguns meses nos espectros podem ter como prováveis causas problemas operacionais (erros na balança, momentos em que as balanças ficaram fora de operação, erros no banco de dados) entre outras como o escoamento da safra, mas que neste trabalho não foi possível afirmar com exatidão qual, ou quais, foram as causas reais por não se dispor de dados suficientes para tal.

Com relação às formas e faixas de cargas foi possível verificar que os espectros desenvolvidos para os ESRS apresentaram, na maioria, certa similaridade entre as classes de veículos. Tal afirmação também pode ser feita para os ETTs, embora estivessem em apenas duas das classes de veículos estudadas (2S3 e 3S3), pois os ETTs apresentaram similaridade havendo apenas uma pequena diferença na calda esquerda. Para os outros dois tipos de eixos (ESRD e ETD) foram observadas diferenças entre os espectros das diversas classes e até mesmo variações dentro da própria classe, salvo os ETDs do 3D4. Assim, a consideração de um espectro padrão a partir de valores médios para aquele determinado eixo poderia resultar em dimensionamentos equivocados, principalmente no que diz respeito àqueles veículos de menor porte como o 3C, não esquecendo que a intensidade do erro dependerá da porcentagem do veículo no tráfego comercial.

Além disso, e reforçando a questão relativa ao erro gerado pela simplificação em obter um “valor médio” representativo do tipo de eixo para todos os veículos, verifica-se que os espectros dos ESRS e dos ESRDs não são nem de perto similares, e muito menos os espectros dos ESRDs dentro da mesma classe. O Método da AASHTO 2002 considera os eixos simples em conjunto para a avaliação do pavimento, ou seja, nos dados de entrada de tráfego os espectros de ESRS e ESRD devem ser considerados juntos a partir de uma média entre eles. Portanto, a necessidade de diferenciar os espectros de cada eixo de carga em cada classe de veículos é aqui salientada.

No que diz respeito à obediência aos valores máximos de carga permitidos por eixo, de uma forma geral, ainda há muita frequência de excessos. Embora que boa parte dos ESRS estava abaixo do limite máximo de 6.000 kg, ainda foram observadas desobediências, ou seja, em torno de 20% a 50% de eixos estavam com excesso de peso. Para os ESRDs foi observado que havia, relatando apenas os piores casos, de 70% até 80% de eixos acima do limite. Os ETTs apresentaram porcentagens de eixos em desacordo com a carga máxima permitida no eixo de aproximadamente 40%.

Em termos de classes a pior situação está nos veículos de 6 eixos, sendo mais específico o 3I3, que embora tenha uma presença de 4,37% no tráfego observado no PPV, não deixa de ser preocupante. Em contrapartida os veículos de 2, 3 e 4 eixos apresentaram as melhores porcentagens de obediência às cargas máximas permitidas por eixo, chegando em boa parte a quase 100%.

Em função do exposto até o momento, afirma-se que os excessos de carga continuam sendo adotados devido às vantagens econômicas da relação frete/multa, bem como à

inexistência de controle de peso na maioria absoluta das estradas brasileiras e ao baixo risco de detecção da infração, além também da falta de consciência por parte dos motoristas/transportadoras.

6.3 Fatores de Danos e Número de Solicitações a partir dos Dados Originais

Os resultados e breves análises sobre os FEC empíricos, obtidos a partir das Equações da AASHTO e USACE, e os FEC empírico-mecanísticos para os veículos de maior frequência na via são apresentados a seguir.

É importante reforçar que os valores empíricos foram obtidos de três maneiras: uso de todas as cargas por eixo individuais; uso da carga por eixo média anual e uso dos valores médios dos intervalos das classes de carga e a correspondente frequência da classe. A intenção era observar se a utilização dos pontos médios dos intervalos de carga por eixo, os quais seriam utilizados para representar o espectro de carga, forneceria resultados finais compatíveis aos valores obtidos das outras duas formas. Os números de solicitações foram obtidos da mesma forma.

Ainda vale salientar que os fatores de equivalência de carga foram ponderados, ou seja, foi atribuído ao Fator de Equivalência Individual (FEC_i) calculado pelas fórmulas da USACE ou AASHTO, ou pelas relações entre as deformações (empírico-mecanísticos), as frequências observadas do determinado carregamento em campo.

6.3.1 FEC e FV empíricos

Na Tabela 6.3 são apresentados, resumidamente, os FEC empíricos (fatores de equivalência ponderados) para cada tipo de eixos de carga das classes de veículos pesados no PPV da SP-160 (sentido Sul) consideradas neste trabalho.

A partir da observação da Tabela 6.3, pode ser afirmado que a consideração de todos os eixos do tráfego gera valores de FEC com certa diferença daqueles obtidos pela simplificação utilizada de carga média de cada tipo de eixo, sendo as maiores diferenças presentes nos FEC calculados com a Equação do USACE. O uso dos pontos médios dos intervalos de carga por eixo produziu valores superiores aos encontrados com o uso de todas as cargas individuais do ano.

Os FV para cada situação também foram calculados e estão na Tabela 6.4. Nota-se, de uma forma geral, que os FV_{AASHTO} são inferiores aos FV_{USACE} e uma diferença bem nítida pode ser observada quando se compara os valores de FV oriundos dos valores médios de carga por eixo e os FV de todas as cargas individuais (principalmente dos veículos 2C, 2I2, 2I3, 2S1, 2S2, 2S3 e 3C). Novamente, em certos casos, há uma proximidade entre os fatores calculados com todas as cargas individuais e os pontos médios dos intervalos de classe de carga, embora estes apresentem valores superiores, principalmente para os fatores calculados pela Equação do USACE.

6.3.2 Número “N” empírico

Na Tabela 6.5 estão apresentados os valores individuais e acumulados dos números de solicitações equivalentes ao eixo padrão provenientes da metodologia AASHTO e USACE. Os valores obtidos se apoiam na consideração dos FV resultantes dos pontos médios dos intervalos de classe de carga e do tráfego contado na Rodovia Imigrantes apresentado no método de pesquisa relatado no capítulo anterior. Os valores médios finais obtidos para a frota circulante, ou seja, atribuindo a porcentagem de cada um dos veículos no tráfego comercial de carga, foram: $FV_{AASHTO} = 4,13$ e $FV_{USACE} = 16,33$.

Para fins comparativos, os valores de **N** encontrados a partir dos FV calculados com o uso de todos os carregamentos individuais por eixo com a carga por eixo média foram iguais no valor de $N_{USACE} = 6,9E+08$. Quanto aos obtidos pelo método AASHTO tem-se os seguintes valores: $N_{AASHTO} = 1,88E+08$ (considerando a totalidade das cargas por eixo) e $N_{AASHTO} = 1,69E+08$ (considerando a carga média por eixo). Portanto valores diferentes dos obtidos na Tabela 6.5 para os pontos médios dos intervalos de classes de carga.

Com a finalidade de verificar a representatividade dessa diferença na espessura do pavimento, para cada valor de N_{USACE} encontrado foi aplicada a Equação (43). O resultado foi que a diferença entre as espessuras resultantes é inferior a 1 cm, mais precisamente 0,82 cm. Portanto, foi considerada razoável a utilização dos pontos médios dos intervalos de classes de carga para representar o carregamento do tráfego nos cálculos seguintes. Ou seja, a partir deste momento as cargas utilizadas nos cálculos são aquelas relativas aos valores do ponto médio de cada intervalo de classe de carga por eixo, intervalos esses considerados no desenvolvimento dos espectros de carga.

Tabela 6.3 - FEC empíricos

Classe	Tipo Eixo	Carga Média/eixo		Todos os eixos		Pontos médios intervalos de classe	
		FEC _{AASHTO}	FEC _{USACE}	FEC _{AASHTO}	FEC _{USACE}	FEC _{AASHTO}	FEC _{USACE}
2C	ESRS	0,02	0,15	0,05	0,05	0,07	0,07
	ESRD	0,14	0,15	0,44	0,64	0,53	0,70
2I2	ESRS	0,10	0,09	0,11	0,10	0,16	0,14
	ESRD 1	0,55	0,55	0,75	0,98	0,96	1,29
	ESRD 2	0,10	0,12	0,21	0,27	0,27	0,35
	ESRD 3	0,06	0,07	0,20	0,29	0,25	0,38
2I3	ESRS	0,22	0,19	0,23	0,20	0,32	0,27
	ESRD 1	2,54	3,59	2,79	4,35	3,36	5,69
	ESRD 2	1,82	2,20	2,15	3,18	2,67	4,34
	ESRD 3	1,62	1,87	1,87	2,48	2,30	3,36
	ESRD 4	1,94	2,42	2,21	3,17	2,70	4,24
2S1	ESRS	0,09	0,08	0,09	0,08	0,14	0,13
	ESRD 1	0,10	0,12	0,18	0,19	0,24	0,26
	ESRD 2	0,61	0,61	0,74	0,80	0,98	1,13
2S2	ESRS	0,10	0,09	0,11	0,10	0,17	0,15
	ESRD	0,24	0,25	0,49	0,65	0,61	0,82
	ETD	0,08	0,24	0,22	1,14	0,28	1,43
2S3	ESRS	0,18	0,16	0,20	0,17	0,28	0,24
	ESRD	1,76	2,11	2,07	2,97	2,52	3,90
	ETT	0,99	5,13	1,21	7,04	1,53	9,60
3C	ESRS	0,11	0,10	0,15	0,13	0,21	0,18
	ESRD	0,50	1,75	0,84	4,33	1,08	5,94
3D4	ESRS	0,28	0,24	0,29	0,25	0,40	0,34
	ETD 1	1,64	8,51	1,65	8,63	2,06	11,58
	ETD 2	1,57	8,08	1,58	8,17	1,98	11,01
	ETD 3	1,52	7,74	1,53	7,84	1,92	10,62
3I3	ESRS	0,29	0,25	0,29	0,25	0,42	0,35
	ETD	1,38	6,76	1,45	7,42	1,86	10,32
	ESRD 1	2,32	3,13	2,53	3,79	3,09	5,04
	ESRD 2	2,41	3,31	2,53	3,70	3,11	4,97
	ESRD 3	2,45	3,40	2,66	4,03	3,25	5,38
3S3	ESRS	0,20	0,17	0,21	0,18	0,30	0,26
	ETD	0,95	4,13	1,04	4,94	1,35	6,93
	ETT	1,20	6,56	1,28	7,39	1,64	10,27
3T6	ESRS	0,33	0,28	0,35	0,29	0,48	0,39
	ETD 1	1,49	7,53	1,52	7,77	1,89	10,41
	ETD 2	1,78	9,54	1,82	10,01	2,28	13,45
	ETD 3	1,27	6,06	1,30	6,39	1,67	8,85
	ETD 4	1,63	8,45	1,68	9,00	2,09	12,02

Tabela 6.4 - Fatores de veículos (FV) para tráfego circulante na SP-160 no ano de 2008

Classe	Carga Média/eixo		Todos os eixos		Pontos médios intervalos de classe	
	FV _{AASHTO}	FV _{USACE}	FV _{AASHTO}	FV _{USACE}	FV _{AASHTO}	FV _{USACE}
2C	0,16	0,18	0,47	0,63	0,60	0,77
2I2	0,81	0,82	1,27	1,65	1,64	2,16
2I3	8,14	10,29	9,37	13,70	11,36	17,90
2S1	0,80	0,81	1,05	1,12	1,37	1,52
2S2	0,42	0,58	0,81	1,79	1,06	2,40
2S3	2,94	7,40	3,50	10,29	4,33	13,74
3C	0,60	1,85	1,01	4,59	1,29	6,12
3D4	5,02	24,57	5,02	24,57	6,36	33,55
3I3	8,83	16,85	9,64	19,78	11,73	26,05
3S3	2,34	10,87	2,59	12,91	3,30	17,45
3T6	6,50	31,87	6,75	34,01	8,41	45,12

Tabela 6.5 - Número de solicitações considerando os FV oriundos dos pontos médios dos intervalos de classes de carga

Anos	VDMA	Número de solicitações no ano		Número de solicitações acumuladas	
		N _{AASHTO}	N _{USACE}	N _{AASHTO}	N _{USACE}
2009	10993	7,94E+06	3,14E+07	7,94E+06	3,14E+07
2010	11433	8,26E+06	3,27E+07	1,62E+07	6,41E+07
2011	11890	8,59E+06	3,40E+07	2,48E+07	9,82E+07
2012	12366	8,94E+06	3,54E+07	3,37E+07	1,34E+08
2013	12860	9,29E+06	3,68E+07	4,30E+07	1,70E+08
2014	13375	9,67E+06	3,83E+07	5,27E+07	2,09E+08
2015	13910	1,01E+07	3,98E+07	6,27E+07	2,48E+08
2016	14466	1,05E+07	4,14E+07	7,32E+07	2,90E+08
2017	15045	1,09E+07	4,30E+07	8,41E+07	3,33E+08
2018	15646	1,13E+07	4,48E+07	9,54E+07	3,78E+08
2019	16272	1,18E+07	4,65E+07	1,07E+08	4,24E+08
2020	16923	1,22E+07	4,84E+07	1,19E+08	4,72E+08
2021	17600	1,27E+07	5,03E+07	1,32E+08	5,23E+08
2022	18304	1,32E+07	5,24E+07	1,45E+08	5,75E+08
2023	19036	1,38E+07	5,44E+07	1,59E+08	6,30E+08
2024	19798	1,43E+07	5,66E+07	1,73E+08	6,86E+08
2025	20590	1,49E+07	5,89E+07	1,88E+08	7,45E+08
2026	21413	1,55E+07	6,12E+07	2,04E+08	8,06E+08
2027	22270	1,61E+07	6,37E+07	2,20E+08	8,70E+08
2028	23161	1,67E+07	6,62E+07	2,37E+08	9,36E+08

6.3.3 FEC e FV empírico-mecanísticos

Os FEC empírico-mecanísticos calculados com base nos resultados das análises estruturais do ELSYM5, considerando as deformações horizontais de tração na fibra inferior do revestimento e as deformações verticais de compressão no topo do subleito ($FEC_{trincas}$ e $FEC_{afundamento}$, respectivamente), para a pressão de enchimento de pneu de 80 e 120 psi, são apresentados para cada classe de veículos nas Tabelas 6.6 e 6.7.

Tabela 6.6 - FEC empírico-mecanísticos para pressões de enchimento dos pneus de 80 psi

Classe	Tipo Eixo	$FEC_{trincas}$	$FEC_{afundamento}$	Classe	Tipo Eixo	$FEC_{trincas}$	$FEC_{afundamento}$
2C	ESRS	0,441	0,097	3C	ESRS	0,778	0,271
	ESRD	0,528	0,513		ESRD	0,670	0,918
2I2	ESRS	0,744	0,212	3D4	ESRS	1,086	0,504
	ESRD 1	0,878	0,920		ETD 1	1,075	1,732
	ESRD 2	0,407	0,278		ETD 2	1,056	1,672
	ESRD 3	0,318	0,242		ETD 3	1,041	1,628
2I3	ESRS	0,999	0,410	3I3	ESRS	1,099	0,521
	ESRD 1	1,783	2,939		ETD	1,004	1,571
	ESRD 2	1,537	2,373		ESRD 1	1,695	2,727
	ESRD 3	1,429	2,087		ESRD 2	1,712	2,748
	ESRD 4	1,560	2,411		ESRD 3	1,747	2,861
2S1	ESRS	0,717	0,192	3S3	ESRS	0,962	0,383
	ESRD 1	0,403	0,260		ETD	0,845	1,161
	ESRD 2	0,911	0,955		ETT	0,955	1,755
2S2	ESRS	0,760	0,224	3T6	ESRS	1,152	0,589
	ESRD	0,622	0,594		ETD 1	1,028	1,599
	ETD	0,276	0,246		ETD 2	1,123	1,911
2S3	ESRS	0,941	0,361		ETD 3	0,962	1,419
	ESRD	1,499	2,255		ETD 4	1,075	1,761
	ETT	0,896	1,636				

Nos valores apresentados, observa-se que com o aumento da pressão de enchimento os FEC empírico-mecanísticos sofrem um aumento nos danos causados aos pavimentos flexíveis, tendo maior influência nos fatores relacionados ao surgimento de trincas por fadiga, pois os $FEC_{afundamento}$ sofrem pouquíssima diferença. Além disso, maiores danos relativo ao trincamento foram observados nos ESRS, sendo os valores bem superiores aos $FEC_{afundamentos}$. Com relação aos ESRD, observa-se que em alguns veículos houve certa proximidade entre os efeitos relacionados à contribuição da formação de trincas e afundamentos, mas em outros o efeito relativo ao afundamento é mais pronunciado. Para os ETD e ETT foi verificado que a contribuição desses tipos de eixos para o surgimento de

afundamentos nas trilhas de roda é maior, tendo em vista que os $FEC_{afundamento}$ são superiores aos $FEC_{trincas}$.

Tabela 6.7 - FEC empírico-mecanísticos para pressões de enchimento dos pneus de 120psi

Classe	Tipo Eixo	$FEC_{trincas}$	$FEC_{afundamento}$	Classe	Tipo Eixo	$FEC_{trincas}$	$FEC_{afundamento}$
2C	ESRS	0,743	0,100	3C	ESRS	1,407	0,272
	ESRD	0,781	0,528		ESRD	1,030	0,943
2I2	ESRS	1,322	0,215	3D4	ESRS	2,061	0,504
	ESRD 1	1,328	0,948		ETD 1	1,705	1,782
	ESRD 2	0,577	0,285		ETD 2	1,671	1,720
	ESRD 3	0,436	0,249		ETD 3	1,644	1,674
2I3	ESRS	1,862	0,410	3I3	ESRS	2,087	0,521
	ESRD 1	2,781	3,049		ETD	1,586	1,616
	ESRD 2	2,406	2,458		ESRD 1	2,664	2,826
	ESRD 3	2,260	2,158		ESRD 2	2,696	2,848
	ESRD 4	2,462	2,496		ESRD 3	2,741	2,967
2S1	ESRS	1,265	0,194	3S3	ESRS	1,785	0,383
	ESRD 1	0,565	0,266		ETD	1,311	1,192
	ESRD 2	1,395	0,982		ETT	1,507	1,800
2S2	ESRS	1,357	0,226	3T6	ESRS	2,206	0,589
	ESRD	0,910	0,612		ETD 1	1,622	1,644
	ETD	0,394	0,252		ETD 2	1,792	1,967
2S3	ESRS	1,735	0,361		ETD 3	1,509	1,458
	ESRD	2,351	2,334		ETD 4	1,707	1,813
	ETT	1,412	1,679				

A partir dos $FEC_{trincas}$ e $FEC_{afundamento}$ relatados anteriormente foram obtidos os respectivos FV individuais de acordo com a pressão de enchimento dos pneus (Tabelas 6.8 e 6.9). Os FV empírico-mecanísticos médios finais, obtidos a partir da atribuição das respectivas proporções de classes dos veículos na via, foram:

- Considerando pressão de 80psi: $FV_{trincas} = 3,15$ e $FV_{afundamento} = 3,80$;
- Considerando pressão de 120psi: $FV_{trincas} = 5,0$ e $FV_{afundamento} = 3,71$.

Tabela 6.8 - Fatores de veículos empírico-mecanísticos individuais para pressão enchimento dos pneus de 80 psi

Classe	FV_{trincas}	FV_{afundamento}
2C	0,969	0,610
2I2	2,347	1,652
2I3	7,308	10,219
2S1	2,032	1,407
2S2	1,659	1,064
2S3	3,336	4,252
3C	1,448	1,188
3D4	4,258	5,536
3I3	7,257	10,427
3S3	2,762	3,298
3T6	5,340	7,279

Tabela 6.9 - Fatores de veículos empírico-mecanísticos individuais para pressão de enchimento dos pneus de 120 psi

Classe	FV_{trincas}	FV_{afundamento}
2C	1,523	0,628
2I2	3,662	1,696
2I3	11,772	10,571
2S1	3,224	1,443
2S2	2,661	1,089
2S3	5,499	4,374
3C	2,437	1,216
3D4	7,081	5,679
3I3	11,773	10,778
3S3	4,603	3,374
3T6	3,828	2,233

6.3.4 Número “N” empírico-mecanístico

De acordo com os fatores de veículos, o valor acumulado de **N** ao longo do período de projeto foi obtido em cada uma das situações de pressão de enchimento de pneus e consta nas Tabelas 6.10 e 6.11. Vale ressaltar que as solicitações verificadas findo o período do projeto são relativas aos valores de deformações horizontais de tração na fibra inferior do revestimento ($N_{trincas}$) e as deformações verticais de compressão no topo do subleito ($N_{afundamentos}$).

Para pressões de 80 psi, o consumo do pavimento em termos de solicitações relativas aos afundamentos são superiores às aquelas obtidas pelo critério de trincas. Fato que não ocorre quando a pressão de enchimento dos pneus é considerada igual a 120 psi. As pressões de inflação de 120 psi consomem mais da vida útil do pavimento de acordo com o critério de trincamento e também mais que quando pressões de 80 psi são consideradas.

Tabela 6.10 - Número de solicitações (N) - Uso dos FV empírico-mecanísticos para 80 psi

Anos	VDMA	Número de solicitações no ano		Número de solicitações acumuladas	
		N _{trincas}	N _{afundamento}	N _{trincas}	N _{afundamento}
2009	10993	6,07E+06	7,31E+06	6,07E+06	7,31E+06
2010	11433	6,31E+06	7,60E+06	1,24E+07	1,49E+07
2011	11890	6,56E+06	7,91E+06	1,89E+07	2,28E+07
2012	12366	6,83E+06	8,23E+06	2,58E+07	3,11E+07
2013	12860	7,10E+06	8,55E+06	3,29E+07	3,96E+07
2014	13375	7,38E+06	8,90E+06	4,03E+07	4,85E+07
2015	13910	7,68E+06	9,25E+06	4,79E+07	5,78E+07
2016	14466	7,99E+06	9,62E+06	5,59E+07	6,74E+07
2017	15045	8,31E+06	1,00E+07	6,42E+07	7,74E+07
2018	15646	8,64E+06	1,04E+07	7,29E+07	8,78E+07
2019	16272	8,98E+06	1,08E+07	8,18E+07	9,86E+07
2020	16923	9,34E+06	1,13E+07	9,12E+07	1,10E+08
2021	17600	9,72E+06	1,17E+07	1,01E+08	1,22E+08
2022	18304	1,01E+07	1,22E+07	1,11E+08	1,34E+08
2023	19036	1,05E+07	1,27E+07	1,22E+08	1,46E+08
2024	19798	1,09E+07	1,32E+07	1,32E+08	1,60E+08
2025	20590	1,14E+07	1,37E+07	1,44E+08	1,73E+08
2026	21413	1,18E+07	1,42E+07	1,56E+08	1,88E+08
2027	22270	1,23E+07	1,48E+07	1,68E+08	2,02E+08
2028	23161	1,28E+07	1,54E+07	1,81E+08	2,18E+08

Tabela 6.11 - Número de solicitações (N) - Uso dos FV empírico-mecanísticos para 120 psi

Anos	VDMA	Número de solicitações no ano		Número de solicitações acumuladas	
		N _{trincas}	N _{afundamento}	N _{trincas}	N _{afundamento}
2009	10993	9,62E+06	7,14E+06	9,62E+06	7,14E+06
2010	11433	1,00E+07	7,43E+06	1,96E+07	1,46E+07
2011	11890	1,04E+07	7,72E+06	3,00E+07	2,23E+07
2012	12366	1,08E+07	8,03E+06	4,09E+07	3,03E+07
2013	12860	1,13E+07	8,35E+06	5,21E+07	3,87E+07
2014	13375	1,17E+07	8,69E+06	6,38E+07	4,74E+07
2015	13910	1,22E+07	9,04E+06	7,60E+07	5,64E+07
2016	14466	1,27E+07	9,40E+06	8,87E+07	6,58E+07
2017	15045	1,32E+07	9,77E+06	1,02E+08	7,56E+07
2018	15646	1,37E+07	1,02E+07	1,16E+08	8,57E+07
2019	16272	1,42E+07	1,06E+07	1,30E+08	9,63E+07
2020	16923	1,48E+07	1,10E+07	1,45E+08	1,07E+08
2021	17600	1,54E+07	1,14E+07	1,60E+08	1,19E+08
2022	18304	1,60E+07	1,19E+07	1,76E+08	1,31E+08
2023	19036	1,67E+07	1,24E+07	1,93E+08	1,43E+08
2024	19798	1,73E+07	1,29E+07	2,10E+08	1,56E+08
2025	20590	1,80E+07	1,34E+07	2,28E+08	1,69E+08
2026	21413	1,87E+07	1,39E+07	2,47E+08	1,83E+08
2027	22270	1,95E+07	1,45E+07	2,66E+08	1,98E+08
2028	23161	2,03E+07	1,50E+07	2,86E+08	2,13E+08

Paralelamente foram utilizados os modelos de fadiga e deformações permanentes (afundamento) anteriormente apresentados nas Equações (35) e (36), respectivamente. As deformações resultantes da passagem de um eixo padrão sobre o pavimento em estudo foram aplicadas aos modelos e os valores obtidos foram: $N_f = 4,01E+06$ e $N_r = 5,95E+05$.

6.3.5 Comparação dos fatores de danos individuais

Com o intuito de reforçar a comparação entre os fatores de equivalência de carga ponderados são apresentados a seguir os Fatores de Equivalência de Carga Individuais (FEC_i) obtidos a partir dos pontos médios dos intervalos de carga por eixo, tanto para a abordagem empírica como a empírico-mecanística (E-M). Os gráficos que não foram apresentados neste item podem ser observados no APÊNDICE C.

A Figura 6.41 exemplifica a comparação efetuada entre os FEC_i empíricos e E-M obtidos para o ESRS. Somente a partir do ponto médio de 9.296,75 kg os FEC_i empíricos são superiores aos E-M, estando as maiores diferenças nos FEC_i resultantes da equação do

USACE. A concentração média das cargas dos espectros relativos aos ESRS está entre 4.000 kg e 7.000 kg, logo se confirma que os FEC_i empíricos-mecanísticos atribuídos a esses tipos de eixos dos veículos pesados no PPV01 foram superiores aos empíricos.

Figura 6.41 - Comparação entre FEC_i empírico e empírico-mecanístico para o ESRS

Na Figura 6.42 apresentam-se os FEC_i obtidos nas análises do ESRS entre os diferentes níveis de pressão de enchimento dos pneus. Nessa figura o objetivo foi analisar e reforçar o reflexo individual da variação da pressão de enchimento dos pneus. Assim, para iguais cargas por eixo, as pressões de enchimento de 120 psi resultaram em FEC_i mais elevados, sendo, portanto, mais danosas ao pavimento.

Para a estrutura analisada, em termos médios, o aumento de pressão (de 80 psi para 120 psi) nos ESRS pode proporcionar FEC_i com o dobro do valor quando consideradas as deformações horizontais de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico; esse tipo de eixo foi o mais crítico com relação a tais diferenças. Apesar dos FEC_i provenientes da pressão de enchimento de 120 psi, quando consideradas as deformações verticais de compressão no topo do subleito, ainda serem maiores àqueles provenientes da pressão de 80 psi, a diferença existente entre eles é menos acentuada.

Figura 6.42 - Comparação entre FEC_i para o ESRS entre os diferentes níveis de pressão de enchimento dos pneus

Ainda na Figura 6.42, observa-se que, dentro da região delimitada como a concentração média das cargas dos espectros do ESRS, fica evidente a maior contribuição desse tipo de eixo ao trincamento do revestimento, principalmente quando a pressão é de 120 psi. Ressalta-se, ainda, que nessa faixa os FEC_i empírico-mecanísticos são superiores aos empíricos, daí a explicação para a obtenção, nesse eixo, dos FEC empírico-mecanísticos (fatores de equivalência empírico-mecanísticos ponderados) maiores em todos os veículos que os FEC empíricos.

6.3.6 Considerações finais sobre fatores de danos e solicitações

A diferença inferior a 1 cm entre as espessuras totais do pavimento encontradas a partir do uso do N_{USACE} obtido por cada uma das três formas de obtenção do FV empírico foi considerada insignificante em termos práticos e, portanto, o uso dos pontos médios dos intervalos de classe de carga foi considerado razoável para aplicação neste estudo.

Os FEC empírico-mecanísticos representam, em termos comparativos, o número de passadas necessárias do eixo padrão para causar o mesmo dano ao pavimento (em virtude das deformações originadas no interior do pavimento) que o eixo em análise. Em função disso, pode ser observado que os FEC empírico-mecanísticos são bem diferentes dos FEC empíricos, sendo que os FEC para as pressões de enchimento de 80 psi são, na maioria,

inferiores aos empíricos; a exceção está nos valores de FEC empírico-mecanísticos obtidos para os ESRS, pois estes são superiores aos FEC empíricos em todos os veículos, dada a região de concentração de carga dos espectros. Os FEC empírico-mecanísticos para as pressões de 120 psi são superiores aos obtidos com a pressão de enchimento de 80 psi. Além disso, foi observado, também, que há o mesmo comportamento para os ESRS.

Os Fatores de Veículos empíricos e empírico-mecanísticos médios para a frota, quando comparados, resultaram em erros máximos para a AASHTO (80 psi) de -25% e para o USACE (120 psi) superiores a -70%, ou seja, os FV empírico-mecanísticos são inferiores que os empíricos em torno de 25% e 70%.

A partir de uma rápida comparação entre o número de solicitações obtidos com os FEC empírico-mecanísticos e os obtidos com os FEC empíricos, pode ser observado que o número de solicitações acumuladas no 20º ano de operação do pavimento (ano de 2028) será igual a um máximo valor de $2,18\text{E}+08$ para pressão de enchimento de pneus de 80 psi, e $2,86\text{E}+08$ para pressão de enchimento de pneus de 120 psi; enquanto que pelo método empírico no ano de 2028 o maior valor de N é de $9,36\text{E}+08$. Ainda, comparando os valores de solicitações obtidos, a partir dos FEC da AASHTO e do USACE, os valores obtidos pelos modelos de fadiga e deformações permanentes ($N_f = 4,01\text{E}+06$ e $N_r = 5,95\text{E}+05$) foram ultrapassados logo no início da vida útil do pavimento.

6.4 Escolha do Tipo de Espectro de Carga por Eixo para o Ajuste

Neste trabalho houve uma preocupação em escolher um espectro de carga por eixo que fosse representativo e que, posteriormente, pudesse ser usado no desenvolvimento dos modelos estatísticos para tais distribuições de carga por eixo. De uma forma geral, os resultados indicaram que uma diferença estatisticamente significativa entre as distribuições de carga de cada mês e a anual não significa que há uma diferença prática nos fatores de veículos e nas espessuras totais da estrutura do pavimento.

6.4.1 Variação nas distribuições de carga por eixo – teste estatístico

Nos resultados do teste estatístico *Kolmogorov-Smirnov (K-S)* ficou evidenciado que as diferenças entre os espectros de carga por eixo em boa parte dos casos foram estatisticamente significantes; ou seja, em muitas das combinações tipo de eixo e veículos as diferenças entre o espectro mensal e o anual foram maiores que o valor crítico calculado para $\alpha = 0,05$ e $\alpha = 0,01$. Tal situação pode ser atribuída principalmente, ao grande

tamanho das amostras que fez com que em certos casos o valor crítico ($D_{\text{crítico}}$) fosse um valor pequeno, ou seja, a diferença tolerada entre os espectros era pequena.

6.4.1.1 Resultados para os ESRS

Para os ESRS o maior $D_{\text{crítico}}$ observado foi igual a 23%, mais precisamente para o veículo 2I3, no mês de fevereiro. Os valores de $D_{\text{crítico}}$ para esse mês sempre foram os maiores em comparação aos outros meses, pois o mês de fevereiro apresentava o menor número de eixos pesados em relação aos outros meses do ano de 2008. Assim, quanto menor o número de eixos pesados no mês, maior o valor de $D_{\text{crítico}}$ daquele mês. Em função disso em praticamente todas as classes de veículos, o mês de fevereiro apresentou aceitação da hipótese nula, ou seja, praticamente todos os espectros relativos ao mês de fevereiro foram considerados iguais ao espectro anual. No restante dos meses, de uma forma geral, os maiores valores de $D_{\text{crítico}}$ variaram em torno de 2 a 5%, salvo as exceções relativas a menores quantidades de eixos pesados.

Nas Tabelas 6.12 e 6.13 a melhor e a pior situação (com relação apenas à quantidade de aceitação da hipótese nula) são apresentadas. Para o único mês em que H_0 foi rejeitada no ESRS do veículo 2I2, percebe-se que a diferença entre o valor crítico ($D_{\text{crítico}}$) e a máxima diferença (D_{max}) entre os espectros foi de 1,25%. Já para o veículo 3T6 a maioria apresentou diferença entre $D_{\text{crítico}}$ e D_{max} do espectro mensal e anual inferior a 4%, sendo os valores extremos de 0,74% e 10,8% para que o espectro do mês fosse considerado igual ao espectro anual.

Tabela 6.12 - Teste K-S para ESRS do veículo 2I2

Mês	$\alpha = 0,05$			$\alpha = 0,01$		
	$D_{\text{crítico}}$	D_{max}	Situação	$D_{\text{crítico}}$	D_{max}	Situação
Jan	0,0848	0,0429	Aceitar H_0	0,1017	0,0429	Aceitar H_0
Fev	0,1813	0,0659	Aceitar H_0	0,2172	0,0659	Aceitar H_0
Mai	0,1382	0,0785	Aceitar H_0	0,1656	0,0785	Aceitar H_0
Jun	0,1357	0,0404	Aceitar H_0	0,1626	0,0404	Aceitar H_0
Jul	0,1055	0,1181	Rejeitar H_0	0,1264	0,1181	Aceitar H_0
Ago	0,0858	0,0472	Aceitar H_0	0,1029	0,0472	Aceitar H_0
Set	0,1018	0,0669	Aceitar H_0	0,1220	0,0669	Aceitar H_0
Out	0,1052	0,0496	Aceitar H_0	0,1261	0,0496	Aceitar H_0
Nov	0,0957	0,0864	Aceitar H_0	0,1147	0,0864	Aceitar H_0
Dez	0,0880	0,0413	Aceitar H_0	0,1055	0,0413	Aceitar H_0

Tabela 6.13 - Teste K-S para ESRS do veículo 3T6

Mês	$\alpha = 0,05$			$\alpha = 0,01$		
	D_{critico}	D_{max}	Situação	D_{critico}	D_{max}	Situação
Jan	0,0537	0,0857	Rejeitar H_0	0,0643	0,0857	Rejeitar H_0
Fev	0,1339	0,0899	Aceitar H_0	0,1605	0,0899	Aceitar H_0
Mai	0,0749	0,0199	Aceitar H_0	0,0898	0,0199	Aceitar H_0
Jun	0,0637	0,0711	Rejeitar H_0	0,0764	0,0711	Aceitar H_0
Jul	0,0564	0,1007	Rejeitar H_0	0,0676	0,1007	Rejeitar H_0
Ago	0,0498	0,0931	Rejeitar H_0	0,0597	0,0931	Rejeitar H_0
Set	0,0497	0,0341	Aceitar H_0	0,0596	0,0341	Aceitar H_0
Out	0,0511	0,1591	Rejeitar H_0	0,0613	0,1591	Rejeitar H_0
Nov	0,0550	0,0856	Rejeitar H_0	0,0660	0,0856	Rejeitar H_0
Dez	0,0655	0,0871	Rejeitar H_0	0,0786	0,0871	Rejeitar H_0

Os meses que apresentaram maior frequência de diferença estatística significativa entre o espectro mensal e anual foram agosto e outubro, sendo que a diferença para aceitação da hipótese de igualdade entre os espectros para o mês de agosto não ultrapassou, na maioria, 2,5% e para o mês de outubro 5%. Ressalta-se que na maioria dos casos as diferenças observadas para que H_0 deixasse de ser aceita eram menores que 3% chegando, por exemplo, a haver diferença de 0,09%. Nos ESRS os valores extremos de D_{max} foram iguais a 17,23% (veículo 2I3) e 0,34% (veículo 2S2).

6.4.1.2 Resultados para os ESRDs

A partir da consideração de cada um ESRD que compõe os veículos estudados nesse trabalho, foi observado que o maior e o menor valor de D_{max} foram: 30,75% para o ESRD3 do veículo 2I2 e 0,70% para o ESRD1 do veículo 2S1. Quando comparados todos os ESRDs foi observado, em média, que os menores valores de D_{max} pertenciam ao ESRD dos veículos 2S2 e 2S3. Além disso, assim como nos ESRS, o maior D_{critico} observado para os ESRDs foi de 23,29% para o veículo 2I3 no mês de fevereiro, sendo os valores de D_{critico} para esse mês sempre os maiores comparados aos outros meses devido apresentar um menor número de eixos pesados entre os meses do ano de 2008. Novamente, em todas as classes de veículos que possuíam ESRD praticamente todos os espectros relativos ao mês de fevereiro foram considerados iguais ao espectro anual. No restante dos meses, de uma forma geral, os maiores valores de D_{critico} também variaram em torno de 2 a 5%, salvo as exceções relativas a menores quantidades de eixos pesados.

Nas Tabelas 6.14 e 6.15, a melhor e pior situação (com relação apenas à quantidade de aceitação da hipótese nula) são apresentadas. Para o ESRD1 do veículo 212 tem-se que todos os meses possuem espectros iguais ao espectro anual. Já o ESRD2 do veículo 313 a maioria apresentou diferença entre o valor crítico e a máxima diferença entre os espectros de valores extremos de 0,14% e 8,37% para que o espectro do mês fosse considerado igual ao espectro anual.

Tabela 6.14 - Teste K-S para ESRD1 do veículo 212

Mês	$\alpha = 0,05$			$\alpha = 0,01$		
	D_{critico}	D_{max}	Situação	D_{critico}	D_{max}	Situação
Jan	0,0848	0,0640	Aceitar H0	0,1017	0,0640	Aceitar H0
Fev	0,1813	0,1554	Aceitar H0	0,2172	0,1554	Aceitar H0
Mai	0,1382	0,1101	Aceitar H0	0,1656	0,1101	Aceitar H0
Jun	0,1357	0,0558	Aceitar H0	0,1626	0,0558	Aceitar H0
Jul	0,1055	0,0407	Aceitar H0	0,1264	0,0407	Aceitar H0
Ago	0,0858	0,0267	Aceitar H0	0,1029	0,0267	Aceitar H0
Set	0,1018	0,0484	Aceitar H0	0,1220	0,0484	Aceitar H0
Out	0,1052	0,0608	Aceitar H0	0,1261	0,0608	Aceitar H0
Nov	0,0957	0,0713	Aceitar H0	0,1147	0,0713	Aceitar H0
Dez	0,0880	0,0724	Aceitar H0	0,1055	0,0724	Aceitar H0

Tabela 6.15 - Teste K-S para ESRD2 do veículo 313

Mês	$\alpha = 0,05$			$\alpha = 0,01$		
	D_{critico}	D_{max}	Situação	D_{critico}	D_{max}	Situação
Jan	0,0547	0,1155	Rejeitar H0	0,0656	0,1155	Rejeitar H0
Fev	0,1858	0,2348	Rejeitar H0	0,2227	0,2348	Rejeitar H0
Mai	0,0797	0,0660	Aceitar H0	0,0955	0,0660	Aceitar H0
Jun	0,0720	0,1488	Rejeitar H0	0,0863	0,1488	Rejeitar H0
Jul	0,0578	0,1152	Rejeitar H0	0,0693	0,1152	Rejeitar H0
Ago	0,0471	0,1307	Rejeitar H0	0,0564	0,1307	Rejeitar H0
Set	0,0441	0,0543	Rejeitar H0	0,0529	0,0543	Rejeitar H0
Out	0,0437	0,0812	Rejeitar H0	0,0523	0,0812	Rejeitar H0
Nov	0,0445	0,0423	Aceitar H0	0,0533	0,0423	Aceitar H0
Dez	0,0508	0,0342	Aceitar H0	0,0609	0,0342	Aceitar H0

Os meses que apresentaram maior frequência de diferença estatística significativa entre o espectro mensal e anual foram janeiro, agosto, outubro e dezembro, sendo que a diferença para aceitação da hipótese de igualdade entre os espectros na maioria foi: para janeiro, em

torno de 2 a 9%; para agosto inferiores a 6%; para outubro inferiores a 2,60% e para dezembro inferiores a 2,5%.

6.4.1.3 Resultados para os ETDs

Os ETDs apresentaram maior quantidade de rejeições da H_0 , onde boa parte dos meses possuía espectros considerados, pelo teste K-S, significativamente diferentes do espectro anual. O maior valor de D_{critico} foi de 22,26% para o ETD do veículo 3I3, no mês de fevereiro, e o menor foi igual a 2% para ETD1 do veículo 3D4. Valores de diferenças entre D_{critico} e D_{max} inferiores a 2% foram bastante observados, embora às vezes valores bem superiores também tenham ocorrido, como por exemplo 23,56% para o ETD do veículo 3S3.

Nas Tabelas 6.16 e 6.17 são apresentados os valores encontrados para o ETD do veículo 3C (melhor situação dentre os ETDs quanto à quantidade de rejeições de H_0) e para o ETD3 do veículo 3D4 (pior situação). Na Tabela 6.16 as diferenças entre os valores críticos e as diferenças máximas não superam, na maioria, 2%. Já na Tabela 6.17, percebem-se diferenças superiores a 3%, como o máximo em aproximadamente 16%.

Tabela 6.16 - Teste K-S para ETD do veículo 3C

Mês	$\alpha = 0,05$			$\alpha = 0,01$		
	D_{critico}	D_{max}	Situação	D_{critico}	D_{max}	Situação
Jan	0,0348	0,0953	Rejeitar H_0	0,0417	0,0953417	Rejeitar H_0
Fev	0,0926	0,0756	Aceitar H_0	0,1110	0,075644119	Aceitar H_0
Mai	0,0646	0,0684	Rejeitar H_0	0,0775	0,068356415	Aceitar H_0
Jun	0,0534	0,0217	Aceitar H_0	0,0640	0,021729447	Aceitar H_0
Jul	0,0482	0,0420	Aceitar H_0	0,0578	0,0420137	Aceitar H_0
Ago	0,0401	0,0609	Rejeitar H_0	0,0481	0,060895698	Rejeitar H_0
Set	0,0395	0,0271	Aceitar H_0	0,0473	0,02712433	Aceitar H_0
Out	0,0406	0,0369	Aceitar H_0	0,0486	0,036856655	Aceitar H_0
Nov	0,0418	0,0122	Aceitar H_0	0,0501	0,012243622	Aceitar H_0
Dez	0,0378	0,0524	Rejeitar H_0	0,0453	0,052415777	Rejeitar H_0

Tabela 6.17 - Teste K-S para ETD3 do veículo 3D4

Mês	$\alpha = 0,05$			$\alpha = 0,01$		
	$D_{\text{crítico}}$	D_{max}	Situação	$D_{\text{crítico}}$	D_{max}	Situação
Jan	0,0240	0,1049	Rejeitar H_0	0,028838	0,1049	Rejeitar H_0
Fev	0,0567	0,0939	Rejeitar H_0	0,067977	0,0939	Rejeitar H_0
Mai	0,0309	0,1781	Rejeitar H_0	0,037084	0,1781	Rejeitar H_0
Jun	0,0260	0,0657	Rejeitar H_0	0,03121	0,0656	Rejeitar H_0
Jul	0,0230	0,0389	Rejeitar H_0	0,027599	0,0388	Rejeitar H_0
Ago	0,0208	0,1216	Rejeitar H_0	0,024931	0,1215	Rejeitar H_0
Set	0,0211	0,0938	Rejeitar H_0	0,025328	0,0937	Rejeitar H_0
Out	0,0212	0,1883	Rejeitar H_0	0,025482	0,1883	Rejeitar H_0
Nov	0,0242	0,0293	Rejeitar H_0	0,029025	0,0293	Rejeitar H_0
Dez	0,0269	0,0682	Rejeitar H_0	0,032321	0,0682	Rejeitar H_0

6.4.1.4 Resultados para os ETTs

Os ETTs estavam presentes em apenas dois dos veículos avaliados nesse estudo: um ETT no veículo 2S3 e outro no veículo 3S3. Os valores de $D_{\text{crítico}}$ para tal tipo de eixo variaram, na maioria, dentro de uma faixa de 2 a 4%. As diferenças observadas entre os valores de $D_{\text{crítico}}$ e D_{max} para cada mês, em termos gerais, são inferiores a 8% apresentando um valor mínimo de 0,13% e um máximo de 18,77%. Nas Tabelas 6.18 e 6.19 são apresentados os resultados do teste K-S para os ETTs de cada uma dessas classes veiculares.

Tabela 6.18 - Teste K-S para ETT do veículo 2S3

Mês	$\alpha = 0,05$			$\alpha = 0,01$		
	$D_{\text{crítico}}$	D_{max}	Situação	$D_{\text{crítico}}$	D_{max}	Situação
Jan	0,0197	0,0542	Rejeitar H_0	0,0237	0,0542	Rejeitar H_0
Fev	0,0539	0,0524	Aceitar H_0	0,0647	0,0524	Aceitar H_0
Mai	0,0289	0,0957	Rejeitar H_0	0,0346	0,0957	Rejeitar H_0
Jun	0,0260	0,0249	Aceitar H_0	0,0312	0,0249	Aceitar H_0
Jul	0,0228	0,0286	Rejeitar H_0	0,0273	0,0286	Rejeitar H_0
Ago	0,0202	0,0993	Rejeitar H_0	0,0242	0,0993	Rejeitar H_0
Set	0,0200	0,0718	Rejeitar H_0	0,0239	0,0718	Rejeitar H_0
Out	0,0207	0,0975	Rejeitar H_0	0,0248	0,0975	Rejeitar H_0
Nov	0,0214	0,0176	Aceitar H_0	0,0257	0,0176	Aceitar H_0
Dez	0,0225	0,0408	Rejeitar H_0	0,0269	0,0408	Rejeitar H_0

Tabela 6.19 - Teste K-S para ETT do veículo 3S3

Mês	$\alpha = 0,05$			$\alpha = 0,01$		
	D_{critico}	D_{max}	Situação	D_{critico}	D_{max}	Situação
Jan	0,0301	0,1343	Rejeitar H_0	0,0361	0,1343	Rejeitar H_0
Fev	0,0825	0,2702	Rejeitar H_0	0,0988	0,2702	Rejeitar H_0
Mai	0,0438	0,0613	Rejeitar H_0	0,0525	0,0613	Rejeitar H_0
Jun	0,0386	0,0262	Aceitar H_0	0,0463	0,0262	Aceitar H_0
Jul	0,0325	0,0632	Rejeitar H_0	0,0389	0,0632	Rejeitar H_0
Ago	0,0281	0,0881	Rejeitar H_0	0,0337	0,0881	Rejeitar H_0
Set	0,0277	0,1187	Rejeitar H_0	0,0332	0,1187	Rejeitar H_0
Out	0,0285	0,1069	Rejeitar H_0	0,0341	0,1069	Rejeitar H_0
Nov	0,0304	0,0331	Rejeitar H_0	0,0365	0,0331	Aceitar H_0
Dez	0,0329	0,0520	Rejeitar H_0	0,0394	0,0520	Rejeitar H_0

6.4.2 Variação nos FV e espessuras totais do pavimento – teste prático

A variação dos FV ao longo do ano de 2008, bem como a variação das espessuras totais do pavimento calculadas de acordo com o relatado no capítulo 5 está apresentada na Tabela 6.20. A partir dos resultados obtidos pode ser afirmado que não há grandes variações nos valores de FV ao longo dos meses de 2008, pois o maior erro percentual entre o FV mensal e o anual foi de 16,42% no mês de dezembro, o que gera o maior erro percentual entre as espessuras totais do pavimento calculadas, mas um erro que não chega a 1%, ou seja, exatos 0,48 cm.

Tabela 6.20 - Variação das espessuras em função da variação dos FV ao mês

MÊS	FV _{USACE}	CBR	N ₂₀₂₈	Espessura	% erro FV	% erro H _t
Jan	11,33	9	6,50E+08	55,51	-6,14%	-0,30%
Fev	11,19	9	6,42E+08	55,48	-7,30%	-0,36%
Mai	12,13	9	6,96E+08	55,70	0,48%	0,02%
Jun	13,06	9	6,96E+08	55,70	8,19%	0,02%
Jul	12,83	9	7,36E+08	55,85	6,26%	0,29%
Ago	11,99	9	6,88E+08	55,66	-0,69%	-0,03%
Set	13,15	9	7,54E+08	55,91	8,93%	0,42%
Out	13,24	9	7,59E+08	55,93	9,68%	0,45%
Nov	11,71	9	6,71E+08	55,60	-3,00%	-0,15%
Dez	10,09	9	5,79E+08	55,20	-16,42%	-0,86%
Anual	12,07	9	6,92E+08	55,68	0,00%	0,00%

6.4.3 Considerações finais sobre a escolha do tipo de espectro

Os eixos do tipo simples apresentaram as menores variações entre os espectros mensais e anuais para os 11 veículos estudados. Ao longo dos resultados foi observado que em alguns meses a igualdade entre os espectros foi rejeitada por muitas vezes apresentarem uma pequena diferença entre o valor crítico e a máxima diferença observada entre as distribuições.

Apesar dos resultados obtidos pelo teste estatístico *K-S* apontarem a discordância entre os espectros, a variabilidade entre os FV e as espessuras totais do pavimento flexível não se mostraram elevadas. A partir dos resultados pode ser verificado que uma máxima variação de 16,42% no FV não proporcionou uma grande diferença na espessura, ou seja, a variação foi de aproximadamente 0,5 cm na espessura da estrutura, o que é considerado praticamente insignificante.

A partir dessas considerações foi decidido que o uso do espectro anual para o desenvolvimento dos modelos estatísticos de distribuição de carga por eixo poderia ser considerado aceitável e representativo das características do tráfego de veículos comerciais de carga utilizadas neste trabalho.

6.5 Modelagem: Ajuste às Distribuições de Carga por Eixo

A seguir são apresentados os resultados obtidos durante o ajuste (modelagem) das distribuições de carga por eixo. Inicialmente são apresentados os parâmetros obtidos para cada distribuição de probabilidade usada para modelar os espectros de carga originais e posteriormente seguem os resultados relativos aos testes estatísticos realizados para verificar a aderência entre os espectros originais e os correspondentes espectros teóricos (modelos estatísticos).

6.5.1 Os parâmetros dos modelos

O melhor ajuste foi aquele considerado pelo menor valor da soma dos quadrados dos desvios entre as frequências relativas originais e as teóricas. Nas Tabelas 6.21 e 6.22 são apresentados os parâmetros obtidos para os espectros de cada um dos eixos dos sete veículos usados no desenvolvimento dos modelos, acompanhados do valor de R^2 .

A partir da Tabela 6.21 pode ser visualizado que os ESRS sempre aparecem com espectros de apenas um pico e as médias do modelo log-normal estão entre 8 e 8,7 e os parâmetros desvio entre 0,06 e 0,11, portanto valores não muito distantes considerando todos os veículos. Os ETT apresentaram os menores valores do parâmetro desvio, ficando na ordem de 0,07. Já os espectros dos ESRDs foram modelados com 3 e até 5 picos, apresentando assim mais variações nos valores.

Tabela 6.21 - Parâmetros do modelo Log-normal

Classe	Tipo eixo	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	μ ₁	σ ₁	μ ₂	σ ₂	μ ₃	σ ₃	μ ₄	σ ₄	μ ₅	σ ₅	R ²
2S3	ESRS	-	-	-	-	-	8,56	0,086	-	-	-	-	-	-	-	-	0,96
	ESRD	-	-	-	-	-	9,22	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-	0,90
	ETT	-	-	-	-	-	10,15	0,07	-	-	-	-	-	-	-	-	0,87
3D4	ESRS	-	-	-	-	-	8,70	0,065	-	-	-	-	-	-	-	-	0,91
	ETD1	-	-	-	-	-	9,74	0,039	-	-	-	-	-	-	-	-	1,00
	ETD2	-	-	-	-	-	9,73	0,036	-	-	-	-	-	-	-	-	1,00
	ETD3	-	-	-	-	-	9,72	0,04	-	-	-	-	-	-	-	-	0,99
3S3	ESRS	-	-	-	-	-	8,58	0,107	-	-	-	-	-	-	-	-	0,99
	ETD	0,095	0,140	0,765	-	-	9,21	0,190	9,47	0,08	9,68	0,074	-	-	-	-	0,99
	ETT	-	-	-	-	-	10,13	0,075	-	-	-	-	-	-	-	-	0,96
2S2	ESRS	-	-	-	-	-	8,42	0,120	-	-	-	-	-	-	-	-	1,00
	ESRD	0,67	0,24	0,09	-	-	8,4	0,160	8,85	0,088	9,135	0,055	-	-	-	-	0,98
	ETD	0,25	0,39	0,36	-	-	8,64	0,093	8,93	0,087	9,26	0,372	-	-	-	-	1,00
2C	ESRS	-	-	-	-	-	8,02	0,32	-	-	-	-	-	-	-	-	0,98
	ESRD	0,215	0,35	0,10	0,10	0,235	7,7	0,20	8,29	0,23	8,6	0,13	8,82	0,23	8,95	0,16	0,98
2S1	ESRS	-	-	-	-	-	8,4	0,103	-	-	-	-	-	-	-	-	0,99
	ESRD1	0,73	0,27	-	-	-	8,3	0,158	8,78	0,120	-	-	-	-	-	-	0,97
	ESRD2	0,068	0,44	0,492	-	-	8,5	0,07	8,75	0,058	9,02	0,069	-	-	-	-	0,98
3C	ESRS	-	-	-	-	-	8,44	0,24	-	-	-	-	-	-	-	-	0,99
	ETD	0,53	0,47	-	-	-	9,1	0,42	9,7	0,083	-	-	-	-	-	-	0,95

Nota: p_i = proporção da distribuição *i*; μ_i = média da distribuição *i* e σ_i = desvio padrão da distribuição *i*.

Para o modelo log-normal os valores de R² superaram 0,90, sendo que a maioria atingiu resultados superiores a 0,96, atingindo em muitos casos valores de 0,99 e 1,0. O valor de R² igual a 0,87 e, portanto o menor observado para o modelo log-normal foi para o ETT do veículo 2S3, mas ainda sim representa uma boa correlação, pois o coeficiente de correlação é de 0,93, ou seja, há 93% de correlação entre as frequências do espectro original e do modelo Log-normal.

Já para o modelo Weibull, na partir da Tabela 6.22, pode ser visualizado que os parâmetros α e β entre os ESRS foram bem diferentes para os espectros teóricos de cada classe

veicular, a exceção está nos ETTs. Para o modelo Weibull os valores de R^2 também superaram 0,90 e, a maioria atingiu resultados superiores a 0,95 chegando muitas vezes a valores de 0,99. O valor de R^2 igual a 0,92 e, portanto o menor coeficiente de determinação para o modelo Weibull foi observado no ESRS do veículo 2C, representando um coeficiente de correlação de 0,96, ou seja, entre as frequências do espectro original e do modelo Weibull desenvolvido para esse eixo de carga há uma correlação de 96%.

Tabela 6.22 - Parâmetros do modelo Weibull

Classe	Tipo eixo	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	α_1	β_1	α_2	β_2	α_3	β_3	α_4	β_4	α_5	β_5	R ²
2S3	ESRS	-	-	-	-	-	15,0	5.308	-	-	-	-	-	-	-	-	0,95
	ESRD	-	-	-	-	-	11,2	10.063	-	-	-	-	-	-	-	-	0,98
	ETT	-	-	-	-	-	15,6	25.660	-	-	-	-	-	-	-	-	0,93
3D4	ESRS	-	-	-	-	-	17,5	6.015	-	-	-	-	-	-	-	-	0,99
	ETD1	-	-	-	-	-	31,0	17.171	-	-	-	-	-	-	-	-	0,99
	ETD2	-	-	-	-	-	36,0	17.071	-	-	-	-	-	-	-	-	1,00
	ETD3	-	-	-	-	-	30,0	16.988	-	-	-	-	-	-	-	-	1,00
3S3	ESRS	-	-	-	-	-	10,0	5.514	-	-	-	-	-	-	-	-	0,97
	ETD	0,095	0,14	0,765	-	-	2,0	10.000	9,0	12.200	16	16.122	-	-	-	-	0,99
	ETT	-	-	-	-	-	15,6	25.405	-	-	-	-	-	-	-	-	1,00
2S2	ESRS	-	-	-	-	-	9,6	4.679	-	-	-	-	-	-	-	-	0,98
	ESRD	0,67	0,64	0,09	-	-	7,0	4.690	13,0	6.998	19	9.458	-	-	-	-	0,95
	ETD	0,19	0,47	0,34	-	-	12,3	5.709	10,32	7.655	3,42	11.330	-	-	-	-	1,00
2C	ESRS	-	-	-	-	-	3,7	3.250	-	-	-	-	-	-	-	-	0,92
	ESRD	0,18	0,27	0,19	0,10	0,26	5,0	2.250	5,2	3.660	6,5	5.300	4,0	6.810	6,0	7.709	0,95
2S1	ESRS	-	-	-	-	-	10,9	4.540	-	-	-	-	-	-	-	-	0,99
	ESRD1	0,59	0,41	-	-	-	9,0	4.081,5	6,2	6.410	-	-	-	-	-	-	0,96
	ESRD2	0,046	0,4	0,554	-	-	17,3	5.007	21,5	6.341	13,3	8.500	-	-	-	-	0,96
3C	ESRS	-	-	-	-	-	4,7	4.915	-	-	-	-	-	-	-	-	0,99
	ETD	0,44	0,56	-	-	-	3,1	9.350	11,91	16.614	-	-	-	-	-	-	0,97

Nota: p_i = proporção da distribuição i ; β_i = parâmetro de escala da distribuição i e α_i = parâmetro de forma da distribuição i .

Na Figura 6.43 são apresentados os gráficos com as distribuições teóricas para o ESRS do veículo 2S3, onde se percebe que numa análise visual os espectros estão bem próximos que em certos trechos fica difícil distinguir qual tipo de espectro. As demais distribuições podem ser visualizadas no APÊNDICE D.

- *Classe 3S3*: ESRS (modelo Log-normal); ETD (modelo Weibull); ETT (modelo Weibull);
- *Classe 2S2*: ESRS (modelo Log-normal); ESRD (modelo Log-normal) e ETD (modelo Weibull);
- *Classe 2C*: ESRS (modelo Log-normal) e ESRD (modelo Log-normal)
- *Classe 2S1*: ESRS (modelo Log-normal); ESRD1 (modelo Log-normal) e ESRD2 (modelo Log-normal);
- *Classe 3C*: ESRS (modelo Log-normal); ETD (modelo Weibull).

As combinações anteriormente relatadas foram utilizadas posteriormente para comparação entre os efeitos práticos dos modelos no dimensionamento/desempenho do pavimento.

6.5.2 Testando a aderência dos espectros gerados pelos modelos aos espectros originais

Os testes estatísticos realizados (K-S e Qui-quadrado) foram unânimes em todos os tipos de classes de veículos na rejeição de igualdade entre os espectros gerados pelos modelos desenvolvidos e os espectros originais. Para o teste K-S as rejeições são explicadas pelo grande tamanho das amostras que fizeram com que os valores de $D_{\text{crítico}}$ fossem muito baixos com o valor máximo de cerca de 1,3%, ou seja, esse foi o maior valor tolerado para as diferenças entre os espectros sendo testados.

Já no teste qui-quadrado o número de intervalos com frequência superior ou igual a 5 gerou graus de liberdade baixos e, conseqüentemente, baixos valores $\chi^2_{\text{crítico}}$. Assim, valores críticos baixos aumentam a probabilidade de rejeição da hipótese nula a qual sustenta que os dados observados se ajustam à distribuição teórica testada. Além disso, o teste é bastante sensível aos valores nas caudas dos espectros, assim qualquer diferença entre os valores previstos pelo modelo e os valores originais nas caudas é ampliado. Nas Tabelas 6.23, 6.24 e 6.25 são apresentados, de forma resumida, os resultados obtidos no teste K-S e qui-quadrado.

Tabela 6.23 - Resultados do teste K-S para os modelos Log-normal e Weibull

Classe	Tipo eixo	Contagem de eixos	D _{max}		$\alpha = 0,05$		$\alpha = 0,01$	
			Log-normal	Weibull	D _{crítico}	Situação	D _{crítico}	Situação
2S3	ESRS	39.021	0,0531	0,1242	0,0069	Rejeitar H ₀	0,0032	Rejeitar H ₀
	ESRD	39.021	0,1790	0,0893				
	ETT	39.021	0,2495	0,1859				
3D4	ESRS	33.545	0,1457	0,0521	0,0074	Rejeitar H ₀	0,0034	Rejeitar H ₀
	ETD1	33.545	0,114	0,0416				
	ETD2	33.545	0,0127	0,0231				
	ETD3	33.545	0,0420	0,0142				
3S3	ESRS	18.971	0,0265	0,0617	0,0099	Rejeitar H ₀	0,0046	Rejeitar H ₀
	ETD	18.971	0,0444	0,0468				
	ETT	18.971	0,1274	0,0685				
2S2	ESRS	15.924	0,0137	0,0577	0,0108	Rejeitar H ₀	0,0050	Rejeitar H ₀
	ESRD	15.924	0,0623	0,0906				
	ETD	15.924	0,0202	0,0186				
2C	ESRS	12.412	0,0270	0,1080	0,0122	Rejeitar H ₀	0,0056	Rejeitar H ₀
	ESRD	12.412	0,0267	0,0665				
2S1	ESRS	11.974	0,0325	0,0479	0,0124	Rejeitar H ₀	0,0058	Rejeitar H ₀
	ESRD1	11.974	0,0257	0,0486				
	ESRD2	11.974	0,0412	0,0393				
3C	ESRS	10.550	0,0408	0,0382	0,0132	Rejeitar H ₀	0,0061	Rejeitar H ₀
	ETD	10.550	0,0424	0,0322				

Tabela 6.24 - Resultados do teste Qui-quadrado para os modelos Log-normal

Classe	Tipo eixo	Contagem de eixos	gl	χ^2_{obs}	$\alpha = 0,05$		$\alpha = 0,01$	
					$\chi^2_{\text{crítico}}$	Situação	$\chi^2_{\text{crítico}}$	Situação
2S3	ESRS	39.021	7	8.427,4	14,07	Rejeitar H_0	18,48	Rejeitar H_0
	ESRD	39.021	17	893.368,7	27,59		33,41	
	ETT	39.021	9	2.693.330,4	16,92		21,66	
3D4	ESRS	33.545	6	41.159,2	12,59	Rejeitar H_0	16,81	Rejeitar H_0
	ETD1	33.545	5	802,4	11,07		15,09	
	ETD2	33.545	5	1.063,0	11,07		15,09	
	ETD3	33.545	6	11.227,3	12,59		16,81	
3S3	ESRS	18.971	7	911,0	14,07	Rejeitar H_0	18,48	Rejeitar H_0
	ETD	18.971	10	802,7	18,31		23,21	
	ETT	18.971	8	63.206,5	15,51		20,09	
2S2	ESRS	15.924	9	97,3	16,92	Rejeitar H_0	21,67	Rejeitar H_0
	ESRD	15.924	18	4.269,0	28,87		34,81	
	ETD	15.924	26	432,8	38,88		45,64	
2C	ESRS	12.412	15	354,5	25,00	Rejeitar H_0	30,58	Rejeitar H_0
	ESRD	12.412	26	364,2	38,89		45,64	
2S1	ESRS	11.974	7	2.329,1	14,07	Rejeitar H_0	18,48	Rejeitar H_0
	ESRD1	11.974	15	523,0	24,99		30,58	
	ESRD2	11.974	19	1,3E+45	30,14		36,19	
3C	ESRS	10.550	16	555,0	26,30	Rejeitar H_0	32,00	Rejeitar H_0
	ETD	10.550	19	882,0	30,14		36,19	

Nota: gl = graus de liberdade

Tabela 6.25 - Resultados do teste Qui-quadrado para os modelos Weibull

Classe	Tipo eixo	Contagem de eixos	gl	χ^2_{obs}	$\alpha = 0,05$		$\alpha = 0,01$	
					$\chi^2_{crítico}$	Situação	$\chi^2_{crítico}$	Situação
2S3	ESRS	39.021	7	76.125,0	14,07	Rejeitar H_0	18,48	Rejeitar H_0
	ESRD	39.021	17	128.026,9	27,59		33,41	
	ETT	39.021	11	1.153.673,3	19,68		24,72	
3D4	ESRS	33.545	7	1.602,9	14,07	Rejeitar H_0	18,48	Rejeitar H_0
	ETD1	33.545	6	14.478,4	12,59		16,81	
	ETD2	33.545	6	133.433,1	12,59		16,81	
	ETD3	33.545	7	9.755,5	14,07		18,48	
3S3	ESRS	18.971	9	1.148,0	16,92	Rejeitar H_0	21,66	Rejeitar H_0
	ETD	18.971	13	1.505,0	22,36		27,69	
	ETT	18.971	11	32.611,5	19,68		24,72	
2S2	ESRS	15.924	7	4.356,0	14,07	Rejeitar H_0	18,48	Rejeitar H_0
	ESRD	15.924	16	4.334,4	26,30		32,00	
	ETD	15.924	18	1.998,5	28,87		34,80	
2C	ESRS	12.412	10	15.453,4	18,31	Rejeitar H_0	23,21	Rejeitar H_0
	ESRD	12.412	21	4.589,2	32,67		38,93	
2S1	ESRS	11.974	8	2.899,9	15,51	Rejeitar H_0	20,09	Rejeitar H_0
	ESRD1	11.974	14	1.572,6	23,68		29,14	
	ESRD2	11.974	18	14.003.420,6	28,87		34,80	
3C	ESRS	10.550	12	449,8	21,03	Rejeitar H_0	26,22	Rejeitar H_0
	ETD	10.550	17	535,5	27,59		33,41	

Nota: gl = graus de liberdade

6.5.3 Considerações finais sobre a modelagem dos espectros de carga

Apesar de todos os modelos de espectros de carga não se ajustarem aos espectros originais, de acordo com o teste K-S e qui-quadrado, não significa que os modelos definitivamente não se ajustam bem aos dados, pois os valores de R^2 demonstraram haver uma boa correlação entre os dados originais e os previstos pelos modelos. A grande quantidade de dados (amostra) influenciou para que os valores críticos fossem baixos.

Em função disso, no caso do teste K-S, os valores de $D_{crítico}$ foram muito pequenos sendo o máximo de 1,3%. Para o qui-quadrado muitos intervalos de carga apresentaram frequência absoluta inferior a 5, o que fez com que fosse necessário agrupar os dados até atingir o valor mínimo admitido pelo teste, gerando assim menores graus de liberdade e, consequentemente, menores $\chi^2_{crítico}$. Além disso, deve ser reforçada a sensibilidade do teste aos valores apresentados nas caudas, ou seja, se houver diferenças existentes entre os espectros testados nessa região o valor de χ^2_{obs} ganha maiores proporções.

De uma forma geral, na maioria das classes veiculares, os modelos do tipo Log-normal se ajustaram melhor aos ESRS e aos ESRD, mas para os ETDs e ETTs os modelos Weibull apresentaram os melhores resultados de R^2 .

6.6 Efeito dos Espectros Teóricos no Dimensionamento

6.6.1 Empírico: AASHTO e USACE

Os FEC, os FV, as solicitações e as espessuras foram calculados a partir dos modelos desenvolvidos para cada eixo das 7 classes de veículos consideradas. Uma comparação entre os resultados previstos (provenientes dos modelos) e os resultados originais (proveniente dos dados reais de pesagem no PPV01) foi executada para aumentar a confiabilidade de previsão dos modelos. Na Tabela 6.26 são apresentados os resultados obtidos pela comparação entre os FEC e FV originais e os previstos pelos modelos, de acordo com as Equações da AASHTO e USACE.

Os valores de R^2 obtidos entre os FEC, tanto para AASHTO quanto USACE, são superiores a 0,80, com exceção aos valores encontrados para o veículo tipo 2S2 (nos ESRS e ESRD para os FEC_{AASHTO} do modelo Weibull e FEC_{USACE} do modelo log-normal e Weibull), bem como para o veículo 2C (para os FEC_{USACE} do modelo Weibull). Para a combinação feita conforme comentado no final do item 6.5.3, os valores de erro nos FV para cada classe de veículos foram:

- *AASHTO*: 2S3 = 14,70%; 3D4 = -0,40%; 3S3 = 0,90%; 2S2 = -39,0%; 2C = -20,20%; 2S1 = -12,20%; e 3C = 8,40%;
- *USACE*: 2S3 = 9,30%; 3D4 = -0,10%; 3S3 = 0,4%; 2S2 = -22,40%; 2C = -13,80%; 2S1 = -7,90%; e 3C = 0,0%.

Tabela 6.26 - Comparação entre FEC e FV originais e previstos

Classe	Tipo eixo	Log-normal _{AASHTO}		Weibull _{AASHTO}		Log-normal _{USACE}		Weibull _{USACE}	
		R ² (FEC)	Erro FV (%)	R ² (FEC)	Erro FV (%)	R ² (FEC)	Erro FV (%)	R ² (FEC)	Erro FV (%)
2S3	ESRS	0,944		0,847		0,946		0,858	
	ESRD	0,857	29,80	0,986	8,70	0,813	41	0,983	14,60
	ETT	0,867		0,959		0,849		0,961	
3D4	ESRS	0,893		0,990		0,895		0,990	
	ETD1	0,999	0,60	0,990	-1,10	1,000	-0,50	1,000	-1,90
	ETD2	0,999		0,996		0,999		0,995	
	ETD3	0,987		0,997		0,988		0,997	
3S3	ESRS	0,969		0,964		0,971		0,965	
	ETD	0,975	10,20	0,985	-0,20	0,970	14,70	0,983	0,80
	ETT	0,941		0,998		0,928		0,998	
2S2	ESRS	0,992		0,953		0,992		0,958	
	ESRD	0,862	-7,00	0,785	-28,10	0,768	19,30	0,705	-41,60
	ETD	0,818		0,754		0,573		0,332	
2C	ESRS	0,910	-13,80	0,540	-35,30	0,861	-20,20	0,545	-44,60
	ESRD	0,933		0,746		0,891		0,578	
2S1	ESRS	0,990		0,987		0,991		0,988	
	ESRD1	0,978	-7,90	0,960	-7,70	0,969	-12,20	0,946	-11,20
	ESRD2	0,966		0,938		0,949		0,921	
3C	ESRS	0,911	12,10	0,978	-4,80	0,919	15,60	0,979	-9,30
	ETD	0,952		0,994		0,934		0,986	

A partir da comparação dos erros nos FV constantes na Tabela 6.26 com os resultados relativos ao dimensionamento da Tabela 6.27, foi observado que a maior porcentagem de erro de aproximadamente 45% no FV_{USACE} não foi responsável por uma grande diferença na espessura do pavimento. No uso do modelo log-normal a espessura do pavimento pelo USACE/DNIT foi diferente da original em menos de 0,4 cm (erro máximo de 0,6%), quando que do modelo Weibull uma menor diferença foi obtida: 0,04cm.

O mesmo pode ser dito para as espessuras obtidas pelo método da AASHTO; o erro máximo no FV de 29,80% para o modelo log-normal não gerou diferença de mais de 2 cm (erro de 2,7%) na espessura e para o modelo Weibull não alcançaram diferença superior a 0,5 cm (erro de 0,7%). E com a combinação dos modelos dentro de cada classe de veículo as diferenças entre as espessuras também foram pequenas ficando em 0,07 cm, segundo o método USACE/DNIT, e de acordo com o método da AASHTO a diferença entre a

espessura obtida com os dados originais e a obtida com os dados previstos foi de 1 cm (erro de 1,3%).

Tabela 6.27 - Comparação do dimensionamento entre espectros originais e modelos

Espectro de Carga	N ₂₀₂₈		Espessura (cm)		% erro H _t	
	AASHTO	USACE	AASHTO	USACE	AASHTO	USACE
Original	2,01E+08	8,55E+08	74,5	56,25	-	-
Log-normal	2,24 E+08	9,66 E+08	76,5	56,58	2,7%	0,6%
Weibull	2,02 E+08	8,68 E+08	75,0	56,29	0,7%	0,1%
Log-normal +Weibull	2,05 E+08	8,76 E+08	75,5	56,32	1,3%	0,1%

6.6.2 Empírico-mecanístico: ELSYM5

Os FEC, os FV e as solicitações (aqui referidos como empírico-mecanísticos) foram calculados com os dados previstos pelos modelos desenvolvidos para cada eixo das 7 classes de veículos a partir dos resultados obtidos no ELSYM5. A comparação entre os resultados previstos e os resultados originais foi realizada para verificar a adequação de previsão dos modelos. Na Tabela 6.28 são apresentados os resultados obtidos pela comparação entre os valores de FEC empírico-mecanísticos originais e previstos. De uma forma geral os valores de R² obtidos foram muito bons, sendo a maioria superior a 0,90; resultados estes melhores que aqueles obtidos para os FEC empíricos (AASHTO e USACE), embora em certas ocasiões fossem apenas levemente melhores.

Nas Tabelas 6.29 e 6.30, os erros nos FV empírico-mecanísticos proveniente dos dados previstos por cada modelo usado nos eixos dos veículos são apresentados. A maior porcentagem de erro calculada foi de 32,3% para o FV_{afundamento} do veículo 2C, mas de uma forma geral os erros apresentados não foram muito grandes. Os erros nos FV_{trincas} em todos os casos foram menores que erros FV_{afundam} refletindo com isso que os modelos capturam (exprimem) melhor os efeitos relativos ao trincamento.

Nos veículos 2S3, 3D4, 3S3 e 3C os modelos Weibull apresentaram menor erro que o Log-normal, o que leva a conclusão que para esses veículos seu poder de previsão é melhor que o do modelo log-normal. Quando comparado o resultado proveniente da alternância dos modelos por entre os eixos dos veículos (Tabela 6.30) com os resultados da Tabela 6.29 percebeu-se que os erros são, na maioria, inferiores aos erros observados quando se aplica o somente o modelo Log-normal ou o Weibull em todos os eixos dos veículos, ou seja, a previsão dos fatores de veículos individuais utilizando tal alternância se mostrou mais satisfatória em termos de percentuais de erros.

Tabela 6.28 - Valores de R^2 para os FEC empírico-mecanísticos

Classe	Tipo Eixo	Log-normal		Weibull	
		R^2 FEC _{trincas}	R^2 FEC _{afundamento}	R^2 FEC _{trincas}	R^2 FEC _{afundamento}
2C	ESRS	0,96	0,92	0,84	0,58
	ESRD	0,97	0,94	0,88	0,77
2S1	ESRS	0,99	0,99	0,99	0,99
	ESRD 1	0,98	0,98	0,96	0,96
	ESRD 2	0,98	0,97	0,95	0,94
2S2	ESRS	0,99	0,99	0,98	0,96
	ESRD	0,94	0,88	0,88	0,80
	ETD	0,98	0,85	0,98	0,81
2S3	ESRS	0,96	0,95	0,92	0,86
	ESRD	0,88	0,87	0,99	0,99
	ETT	0,88	0,87	0,97	0,96
3C	ESRS	0,98	0,93	0,99	0,98
	ETD	0,96	0,96	0,99	0,99
3D4	ESRS	0,91	0,90	0,99	0,99
	ETD 1	1,00	1,00	0,99	0,99
	ETD 2	1,00	1,00	1,00	1,00
	ETD 3	0,99	0,99	1,00	1,00
3S3	ESRS	0,98	0,97	0,97	0,96
	ETD	0,98	0,98	0,99	0,99
	ETT	0,95	0,94	1,00	1,00

Tabela 6.29 - Comparação entre FV originais e previstos (modelos Log-normal e Weibull)

Classe	Log-normal – 80 psi		Weibull – 80 psi		Log-normal – 120 psi		Weibull – 120 psi	
	Erro FV _{trincas}	Erro FV _{afundam}	Erro FV _{trincas}	Erro FV _{afundam}	Erro FV _{trincas}	Erro FV _{afundam}	Erro FV _{trincas}	Erro FV _{afundam}
2S3	12,4%	27,3%	2,6%	8,8%	13,0%	27,5%	4,3%	8,8%
3D4	1,4%	0,9%	-0,2%	-0,9	1,8%	0,9%	-0,1%	-1,0%
3S3	3,1%	9,9%	-1,8%	0,2%	4,1%	10,%	-1,1%	0,2%
2S2	-3,2%	6,8%	-10,2%	-24,6%	-3,2%	-6,8%	-10,6%	-24,8%
2C	-4,4%	-11,8%	-16,6%	-32,3%	-4,5%	-11,9%	-18,3%	-32,3%
2S1	-1,8%	-6,5%	-3,2%	-6,8%	-1,7%	-6,6	-3,6%	-6,8%
3C	4,3%	11,4%	-2,8%	-4,5%	5,1%	11,5%	-3,1%	-4,5%

Tabela 6.30 - Comparação entre FV originais e previstos (junção modelos Log-normal e Weibull)

Classe	Log-normal + weibull – 80 psi		Log-normal + weibull – 120 psi	
	Erro FV _{trincas}	Erro FV _{afundam}	Erro FV _{trincas}	Erro FV _{afundam}
2S3	3,6%	9,5%	5,6%	9,5%
3D4	0,2%	0,0%	0,3%	0,0%
3S3	-0,7%	1,0%	0,2%	1,0%
2S2	-6,3%	-18,9%	-6,1%	-19,1%
2C	-4,4%	-11,8%	-4,5%	-11,9%
2S1	-1,8%	-6,5%	-1,7%	-6,6%
3C	1,9%	1,3%	2,8%	1,2%

Os FV médios da frota, o número de solicitações no final do período de projeto e os erros percentuais relativos aos FV estão na Tabela 6.31 e 6.32. Nota-se que entre os modelos, para uma mesma pressão de enchimento dos pneus, não houve grandes variações nos valores médios da frota, estando nesse caso o modelo Weibull com menor erro tanto para FV_{trincas} como FV_{afundamento}, portanto os Ns obtidos por esse modelo são os mais próximos do obtido com os espectros originais. Além disso, também é importante observar que entre as pressões de enchimento dos pneus de 80 e 120 psi os FV_{afundamento} apresentam variações praticamente inexpressivas, reforçando que o aumento de pressão nos pneus contribui apenas para o aumento da deterioração trincamento. Quando a diferença causada no FV_{trincas} foi avaliada em termos percentuais percebeu-se que houve um aumento de mais de 50% no fator deixando claro que pressões de enchimento dos pneus de 120 psi são mais danosas ao pavimento.

Tabela 6.31 - Comparação de FV e “Ns” entre espectros originais e previstos (pressão de enchimento de pneus de 80 psi)

Espectro de Carga	FV médio da frota		N ₂₀₂₈		% erro FV	
	Trincas	Afundam.	Trincas	Afundam.	Trincas	Afundam.
Original	2,77	3,29	1,59E+08	1,89E+08	-	-
Log-normal	2,90	3,65	1,66 E+08	2,09 E+08	4,7	10,9
Weibull	2,75	3,32	1,58 E+08	1,90 E+08	-0,7	0,9
Log-normal +Weibull	2,79	3,37	1,60 E+08	1,93 E+08	0,7	2,4

Tabela 6.32 - Comparação de FV e “Ns” entre espectros originais e previstos (pressão de enchimento de pneus de 120 psi)

Espectro de Carga	FV médio da frota		N ₂₀₂₈		% erro FV	
	Trincas	Afundam.	Trincas	Afundam.	Trincas	Afundam.
Original	4,67	3,37	2,68E+08	1,93E+08	-	-
Log-normal	4,91	3,75	2,82 E+08	2,15 E+08	5,1%	11,3%
Weibull	4,66	3,41	2,67 E+08	1,95 E+08	-0,2%	1,2%
Log-normal +Weibull	4,74	3,45	2,72 E+08	1,98 E+08	1,5%	2,4%

Os valores relativos aos FV individuais e o valor médio da frota, além do cálculo das solicitações ao longo dos 20 anos para os dados originais e os dados previstos pelos modelos podem ser visualizados no APÊNDICE E. Ainda, se for considerado que as deformações resultantes da passagem de um eixo padrão sobre o pavimento em estudo geram pelos modelos de ruptura que $N_f = 4,01E+06$ e $N_f = 5,95E+05$, a partir de uma rápida comparação às Tabelas do APÊNDICE E (com os cálculos de solicitações para os FV empírico mecânicos), observaram-se que estes foram ultrapassados logo no início da vida útil do pavimento.

6.6.3 Empírico-mecânico: MEPDG

O efeito dos modelos desenvolvidos para os espectros de carga por eixo das sete classes de veículos foi verificado com o uso do programa da AASHTO 2002 de acordo com o relatado no capítulo 5. Neste item estão apresentados nas Figuras 6.44 a 6.51 os gráficos gerados relativos ao desempenho do pavimento para os espectros originais e para os espectros modelados pela distribuição de probabilidades Weibull; os gráficos gerados com o uso dos espectros de carga por eixo, para cada classe veicular, previstos pelos modelos Log-normal e pela combinação dentro de cada uma das classes dos espectros Log-normal e Weibull estão apresentados no APÊNDICE F.

Figura 6.44 - Evolução das trincas longitudinais (propagação de cima para baixo) para pressão de enchimento dos pneus de 80 e 120 psi – Espectros de carga por eixo originais

Figura 6.45 - Evolução das trincas por fadiga (propagação de baixo para cima) para pressão de enchimento dos pneus de 80 e 120 psi – Espectros de carga por eixo originais

Figura 6.46 - Evolução de afundamento nas trilhas de rodas para pressão de enchimento dos pneus de 80 e 120 psi – Espectros de carga por eixo originais

Figura 6.47 - Evolução de Irregularidade Longitudinal (IRI) para pressão de enchimento dos pneus de 80 e 120 psi – Espectros de carga por eixo originais

Figura 6.48 - Evolução das trincas longitudinais (propagação de cima para baixo) para pressão de enchimento dos pneus de 80 e 120 psi – Espectros de carga por eixo Weibull

Figura 6.49 - Evolução das trincas por fadiga (propagação de baixo para cima) para pressão de enchimento dos pneus de 80 e 120 psi – Espectros de carga por eixo Weibull

Figura 6.50 - Evolução de afundamento nas trilhas de rodas para pressão de enchimento dos pneus de 80 e 120 psi – Espectros de carga por eixo Weibull

Figura 6.51 - Evolução de Irregularidade Longitudinal (IRI) para pressão de enchimento dos pneus de 80 e 120 psi – Espectros de carga por eixo Weibull

De uma forma geral, observou-se que quando comparado ao uso da pressão de enchimento dos pneus de 80 psi, a consideração da pressão igual a 120 psi provocou que as deteriorações atingissem os valores limites de projeto em menos tempo. Na Tabela 6.33 apresentam-se os erros percentuais tendo-se como referência os valores obtidos para as pressões de enchimento de 80 psi. Nota-se para cada forma de deterioração que os erros entre os modelos relativos à época em que os limites são atingidos não diferem muito,

estando a maior porcentagem de erro relacionada às deformações permanentes nas trilhas de rodas no concreto asfáltico e em seguida o afundamento total.

Tabela 6.33 - Erros de previsão dos resultados provenientes do uso da pressão de enchimento de 120 psi em relação aos resultados provenientes do uso da pressão de 80 psi

Espectro	Trinca_{Longitudinal}	Trinca_{Fadiga}	Afundamento_{Tot}	Afundamento_{CA}	IRI
Original	-17,0%	-24,0%	-49,0%	-59,7%	-19,5%
Log-normal	-11,0%	-21,0%	-50,0%	-61,0%	-21,0%
Weibull	-17,0%	-24,0%	-52,0%	-59,95%	-19,5%
Lognormal+Weibull	-16,0%	-26,0%	-53,0%	-59,9%	-20,0%

A partir dos dados originais foi possível observar que todos os valores limites foram atingidos bem antes do final da vida útil do pavimento, portanto não satisfazendo os critérios de desempenho propostos. Dessa forma, tomando a situação mais crítica que é aquela obtida para pressões de 120 psi, tem-se que: o valor limite de trincas longitudinais de 189,0 m/km (1000ft/mi) será atingido antes do 5º mês de vida útil; o limite para trincas por fadiga de 25% será atingido antes do 6º ano (antes de 2014); a deformação permanente nas trilhas de rodas apenas no revestimento terá seu limite de 6,35 mm (0,25 in) atingido antes do 4º ano (antes de 2012); a deformação permanente nas trilhas de rodas levando-se em conta todo o pavimento terá o limite de 19,5 mm (0,75 in) atingido antes do 3º ano (antes de 2011) e a irregularidade longitudinal final de 4 m/km (172 in/mi) será atingida antes do 13º ano, ou seja, por volta de 152 meses. O único critério de desempenho satisfeito foi o relacionado às trincas térmicas o qual não terá seu limite atingido até o final da vida útil.

Quando comparadas as proximidades das previsões dos modelos desenvolvidos para os espectros de carga por eixo aos valores obtidos para os espectros originais o resultado foi considerado satisfatório para o modelo Weibull, ou seja, a previsão de desempenho gerada a partir do modelo não apresentou diferenças de grande vulto, sendo responsáveis pelos menores erros. Nas Tabelas 6.34 e 6.35 estão listados os erros obtidos entre as previsões (ou seja, os meses em que o limite de determinado critério é atingido), considerando que os meses para este cálculo foram tomados de forma aproximada. Os valores constantes nas tabelas são todos negativos, o que significa que pelos modelos o momento em que o limite de projeto será atingido ocorrerá antes ao previsto pelo uso dos dados originais. Assim, a partir de uma comparação entre o momento em que se atinge o limite de projeto com os espectros originais e com os espectros Weibull, tem-se que a diferença não é superior a dois meses de antecedência. Diferentemente do que ocorre com os outros modelos.

Tabela 6.34 - Erros nas previsões dos modelos para pressões de enchimento de pneus de 80 psi, a partir do uso do MEPDG

Modelo	Trincas_{Longitudinais}	Trincas_{Fadiga}	Afundamento_{Total}	IRI
Log-normal	-16,0%	-11,0%	-20,0%	-4,7%
Weibull	-4,2%	-1,3%	-2,4%	-0,85%
Log-normal+Weibull	-5,8%	-1,3%	-3,6%	-0,94%

Tabela 6.35 - Erros nas previsões dos modelos para pressões de enchimento de pneus de 120 psi, a partir do uso do MEPDG

Modelo	Trincas_{Longitudinais}	Trincas_{Fadiga}	Afundamento_{Total}	IRI
Log-normal	-10,3%	-8,0%	-21,0%	-6,6%
Weibull	-4,8%	-1,7%	-7,1%	-1,3%
Log-normal+Weibull	-4,8%	-3,3%	-10,7%	-1,3%

6.6.4 Considerações finais sobre os efeitos dos espectros teóricos

A partir dos resultados empíricos (AASHTO e USACE/DNIT), verificou-se que as diferenças obtidas nas espessuras do pavimento foram praticamente insignificantes quando adotados os modelos desenvolvidos para representar o tráfego do PPV01, onde o melhor resultado foi obtido quando o modelo Weibull foi utilizado.

Quando os FV e número de solicitações foram obtidos a partir das deformações calculadas pelo ELSYM5 e comparados por entre os resultados oriundos dos espectros previstos pelos modelos e dos espectros originais, a conclusão foi que da mesma forma que para os métodos empíricos, os espectros modelados apresentaram boa proximidade de resultados sendo os melhores obtidos a partir do uso do modelo Weibull.

A partir da análise feita pelo MEPDG tem-se que a estrutura de pavimento utilizada no estudo dos efeitos dos espectros de carga por eixo no desempenho dos pavimentos não satisfaz os critérios de desempenho propostos, onde os relativos aos fenômenos mais relevantes (trincas por fadiga e afundamento nas trilhas de rodas) foram atingidos muito antes do término da vida útil do pavimento. Ou seja, a estrutura utilizada nas simulações não apresentou condições de suportar os esforços provenientes do tráfego e atinge a ruína antes do prazo previsto para o término de sua vida estando, portanto, subdimensionada. Ressalta-se ainda o efeito do aumento de pressão de enchimento dos pneus na aceleração da deterioração no pavimento; tendo como referência a pressão de enchimento de 80 psi e

de acordo com os resultados do MEPDG a deformação permanente no concreto asfáltico (CA) é a que apresenta maior erro percentual.

No que se refere ao efeito do espectro teórico na previsão do desempenho utilizando o MEPDG, verificou-se que novamente o modelo Weibull apresentou maior proximidade aos resultados originais. Assim como os outros modelos, o uso do espectro previsto pelo modelo Weibull indicou que os critérios de desempenho foram atingidos em momento anterior àquele resultante das simulações com os espectros originais, mas de forma diferente do modelo Log-normal e Log-normal + Weibull, o desempenho previsto não apresentou diferença superior a dois meses sendo assim considerado satisfatório.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

7.1 Introdução

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões do trabalho, com base nos procedimentos e resultados obtidos, bem como algumas sugestões para trabalhos futuros. Os tópicos estão organizados de acordo com o procedimento adotado e a apresentação dos resultados no capítulo anterior.

O principal objetivo da pesquisa desenvolvida foi analisar os efeitos sobre o desempenho dos pavimentos do uso de modelos estatísticos de espectros de carga por eixo de veículos rodoviários. O desenvolvimento de modelos estatísticos com boa capacidade de caracterização do tráfego e que possibilitem adequadas previsões de desempenho dos pavimentos pode contribuir para a minimização dos custos das coletas de dados a serem usados no projeto de pavimentos e em sistemas de gerência de pavimentos. Pois deve ser levado em consideração os limitados recursos dos organismos rodoviários, não só para a implementação e operação dos sistemas de coletas de dados de tráfego, mas, também, para o processamento da grande quantidade de dados necessários a uma coerente caracterização do tráfego.

Foi necessária a coleta de dados de pesagem por eixo de veículos comerciais para que as distribuições de carga por eixo pudessem ser geradas e, posteriormente, ajustadas aos modelos estatísticos. No início do trabalho encontrou-se certa dificuldade na aquisição dos dados necessários ao desenvolvimento dos espectros de carga, tendo sido o volume de dados solicitados às concessionárias de rodovias, primeiramente no Estado do Paraná, o principal fator por eles apontado como entrave ao fornecimento de dados, pois demandaria muitas horas para busca dos dados no sistema.

No Estado de São Paulo os dados relativos à pesagem no PPV do km 28, sentido sul, na rodovia dos Imigrantes (SP-160) foram fornecidos pela concessionária que o administra e usados neste trabalho. Posteriormente, os dados de pesagem do PPV localizado no km 179,4 da pista sul da Rodovia Presidente Dutra (BR-116) também foram recebidos da concessionária, mas optou-se por usá-los em pesquisa posterior e complementar, quando já houver agilidade decorrente da experiência adquirida.

7.2 Espectros de Carga por Eixo

No desenvolvimento mensal dos espectros de carga por eixo foram observadas, em alguns meses, certas variações que podem ter sido causadas, entre outros motivos, por problemas operacionais. Na pesquisa aqui abordada, optou-se em não se fazer afirmações mais aprofundadas por não se dispor de dados suficientes para o estabelecimento da causa real da variação. Além disso, não foram feitas exclusões, em função de ter sido verificado que tal variabilidade não causou, em termos práticos, diferenças significativas.

De uma forma geral, os espectros desenvolvidos para os ESRS de todas as classes de veículos do PPV01 apresentaram as melhores conformações e menores variabilidades entre os meses, apresentando, em geral, similaridade entre as classes de veículos. Uma similaridade entre os espectros dos ETT também foi observada. Já para os ESRD e ETD foram observadas diferenças entre os espectros das diversas classes e até mesmo dentro da própria classe. Além disso, comparando os espectros dos ESRS e dos ESRD percebe-se que estes são diferentes e que considerá-los em conjunto, como faz o Método da AASHTO 2002, pode gerar diferenças práticas pela simplificação adotada.

Quanto aos excessos de carga por eixo, infelizmente, ainda são muito frequentes e esse cenário não mudará enquanto houver a vantagem econômica (relação frete-multa), a inexistência de controle de peso na maioria absoluta das estradas brasileiras, o baixo risco de detecção da infração e a falta de consciência dos motoristas e das transportadoras. Nos ESRS foram observados casos de cerca de 20 a 50% dos eixos com excesso de peso, nos ESRD foram observados, nos piores casos, que 70 a 80% dos eixos estavam acima do limite, em alguns ETD foram observadas situações com 20 a 40% dos eixos acima do máximo permitido e os ETT apresentaram excessos em aproximadamente 40% dos eixos.

7.3 FEC, FV e Número de Solicitações

Os pontos médios dos intervalos de classe de carga foram considerados aceitáveis, nesta pesquisa, para o cálculo dos FEC e FV para que, assim, pudesse ficar representado o espectro de carga desenvolvido para cada eixo dos veículos estudados. Embora os valores de FEC tenham se apresentado superiores aos encontrados com o uso de todas as cargas individuais, a diferença entre as espessuras totais do pavimento obtidas empiricamente foi inferior a 1 cm e, portanto, insignificante em termos práticos.

De forma comparativa, os FEC empírico-mecanísticos, para as pressões de enchimento de 80 psi são, na maioria das situações, inferiores aos empíricos e, como já era previsto, os FEC empírico-mecanísticos, para as pressões de 120 psi são superiores aos obtidos com a pressão de enchimento de 80 psi, evidenciando o maior dano ao pavimento causado pelo aumento de pressão de enchimento dos pneus. Os valores empírico-mecanísticos obtidos para o ESRS, para ambas as pressões de enchimento dos pneus, são superiores aos FEC empíricos em todas as classes de veículos, refletindo um maior dano ao pavimento.

Considerando somente os FEC empírico-mecanísticos, os maiores valores observados para as deformações horizontais de tração na fibra inferior do revestimento associados aos ESRS permitem a conclusão da sua maior contribuição ao aparecimento e propagação de trincas por fadiga no revestimento asfáltico, inclusive em relação ao que é considerado pelos métodos tradicionais (AASHTO e USACE). Os ESRD apresentaram, em alguns casos, a tendência de serem mais críticos em termos de acúmulo de deformação permanente nas trilhas de roda, mas, em geral, houve uma proximidade entre os efeitos danosos. Os ETD e ETT apresentaram-se críticos em termos da resposta estrutural deformação vertical de compressão no topo do subleito, ou seja, aos afundamentos nas trilhas de rodas.

Finalmente, verificou-se que os FV empírico-mecanísticos médios, para toda a frota, são inferiores aos FV empíricos, em até 25% para AASHTO e mais de 70% para USACE, ou seja, os métodos empíricos superestimam o número de solicitações equivalentes ao eixo padrão durante o período de projeto, mesmo quando a pressão de enchimento dos pneus é a mesma considerada para o eixo padrão (80 psi).

Com relação à comparação feita entre os números de solicitações resultantes do aumento de pressão de enchimento dos pneus, percebeu-se que a mudança de 80 psi para 120 psi não tem influência no **N** relativo ao critério afundamentos nas trilhas de rodas (apenas 2%), mas a situação é diferente no que diz respeito ao **N** referente ao critério trincas por fadiga, onde a diferença supera 60%.

7.4 Modelagem

Os modelos dos espectros de carga por eixo foram desenvolvidos somente para as sete classes de veículos que contabilizavam cerca de 90% do tráfego comercial, usando-se as distribuições de probabilidade Log-normal e Weibull, escolhidas por serem semelhantes às distribuições obtidas originalmente, além de não proporcionarem carregamentos negativos quando usadas no primeiro pico, como pode ocorrer com a distribuição Normal.

Os espectros médios anuais foram utilizados nesta etapa e, como já mencionado anteriormente, sem fazer exclusão de nenhum dos meses do ano de 2008. A decisão tomada está principalmente apoiada em que ao longo dos meses de 2008 não houve grandes variações de FV e, portanto, as diferenças entre as espessuras totais do pavimento calculadas empiricamente não ultrapassaram 0,5 cm. Além disso, apesar de os testes de hipóteses apontarem uma diferença estatística entre os espectros, em termos práticos os resultados não significaram a mesma coisa. Portanto, para o desenvolvimento dos modelos estatísticos de distribuição de carga por eixo os espectros médios anuais foram considerados aceitáveis e representativos das características do tráfego de caminhões comerciais de carga do PPV01.

7.5 Efeito dos Espectros

O mesmo pode ser dito para a comparação entre os espectros originais e os previstos pelos modelos desenvolvidos. Os testes K-S e qui-quadrado que foram conduzidos para verificar o ajuste dos dados (aderência) também não apresentaram resultados favoráveis relativos à similaridade estatística das distribuições, mas a correlação entre as distribuições teóricas e originais foram consideradas satisfatórias, apresentando correlações superiores a 90% (R maior que 0,90).

Para os FEC empíricos foram obtidas correlações acima de 80%, as diferenças de espessuras a partir do método USACE/DNIT foram inferiores a 0,4 cm e, a partir do método da AASHTO, inferiores a 2 cm. Para ambos os métodos os melhores resultados para as espessuras do pavimento (menores diferenças) foram obtidos a partir do emprego do modelo Weibull.

Os resultados empírico-mecanísticos obtidos com o uso dos modelos e os obtidos a partir dos valores de deformações calculadas pelo ELSYM5 também apresentaram boa correlação aos originais. Os coeficientes de determinação (R^2) para os FEC empírico-mecanísticos foram, na maioria, superiores a 0,90 (R maiores que 0,81), e muitas vezes foram melhores que os empíricos. Os erros nos FV individuais para as deteriorações do tipo trincas por fadiga foram menores, o que refletiu que os modelos apresentam melhor representação (se aproximam mais dos resultados originais) dos efeitos para esse defeito. Os resultados de FV empírico-mecanísticos médios da frota e número de solicitações que mais se aproximaram dos valores obtidos com os espectros originais (menor erro percentual) foram aqueles obtidos, assim como no método empírico, a partir do emprego do modelo Weibull.

Os efeitos dos espectros de carga previstos pelos modelos aqui desenvolvidos também foram avaliados com o uso do software empírico-mecanístico MEPDG disponibilizado online. Nos resultados das análises foi observado que a estrutura de pavimento utilizada não satisfaz os critérios de desempenho propostos, pois os valores limites adotados como dados de entrada no software foram atingidos muito antes do término da vida útil do pavimento. Assim, a estrutura não apresenta condições de suportar os esforços provenientes do tráfego e atinge a ruína antes do prazo previsto para o término de sua vida, estando, portanto, de acordo com o MEPDG, subdimensionada. Novas simulações com variação não só nas espessuras, mas também nas características dos materiais usados, precisariam ser realizadas para se chegar a um dimensionamento adequado.

Na comparação realizada entre as previsões do MEPDG, a partir dos modelos desenvolvidos, verificou-se que o modelo Weibull apresentou maior proximidade aos resultados originais. Embora os critérios de desempenho tenham sido atingidos em momento anterior àquele resultante das simulações com os espectros originais, a diferença não superou dois meses, sendo assim considerado satisfatório e com boa capacidade de representação do espectro original de campo.

Ainda relativo às considerações dos efeitos do aumento da pressão de enchimento dos pneus, a pressão igual a 120 psi provocou que as deteriorações atingissem os valores limites de projeto em menos tempo, ou seja, o pavimento tem menor período de vida útil.

Tomando-se como referência os valores obtidos para as pressões de enchimento de 80 psi, os erros de previsão entre os modelos para cada forma de deterioração, relativos à época em que os limites são atingidos, não diferem muito. As maiores porcentagens de erros nas previsões estão relacionadas às deformações permanentes nas trilhas de rodas em todo o pavimento e também apenas no concreto asfáltico. Logo se conclui, pelos valores obtidos, que a vida prevista do pavimento sofre uma redução, respectivamente, de cerca de 50 a 60%, quando são usadas pressões de enchimento dos pneus de 120 psi. E com relação às trincas por fadiga, sua vida fica reduzida em 24%.

7.6 Conclusões Finais

A principal conclusão do estudo aqui conduzido, que reflete o alcance do objetivo proposto, é que, a partir dos resultados, ficou evidenciada a possibilidade de desenvolvimento de modelos estatísticos que sejam capazes de caracterizar de forma adequada os espectros de carga por eixo do PPV do km 28, pista sul, da SP-160, bem como de refletir com pequena

margem de erro o desempenho previsto para os dados originais. A preocupação de Prozzi e Hong (2007) com a carência de trabalhos que expressem a relação entre o desempenho e o ajuste aos dados é algo que deve ser considerado, pois ao longo da literatura pesquisada muitos se preocupavam apenas com a precisão do ajuste. E, como foi visto, nem sempre os resultados estatísticos refletem o comportamento prático, pois modelos que embora apresentassem bons ajustes aos dados originais foram responsáveis por maiores erros de previsão.

Para os dados utilizados nessa pesquisa os modelos desenvolvidos pela distribuição de probabilidade Weibull forneceram melhores resultados e, portanto, são os mais indicados para aplicação na região de estudo, sustentando tal afirmação pelos valores obtidos de correlações com os espectros originais da ordem de 80% e erros de previsão que não ultrapassaram 2 meses. É importante ressaltar que o fato dos testes estatísticos K-S e qui-quadrado não apresentarem resultados satisfatórios para aderência dos espectros previstos aos originais não significou um resultado definitivamente negativo para a aplicabilidade dos modelos, fato este comprovado pelos testes práticos.

Ao longo dos resultados ficou evidenciado o efeito nocivo à vida dos pavimentos que o aumento da pressão de enchimento dos pneus provoca, pois juntamente com a redução da área de aplicação da carga por eixo há o aumento dos esforços atuantes, principalmente no revestimento asfáltico. A um item deve ser dada atenção: conclusões provenientes dos resultados do ELSYM5 sustentaram que o aumento de pressão de inflação dos pneus tem um efeito maior nos resultados relacionados às trincas por fadiga no revestimento asfáltico provenientes das deformações horizontais de tração na fibra inferior do pavimento. Já no MEPDG, a conclusão aponta para o acúmulo das deformações permanentes ao longo de todas as camadas do pavimento e no concreto asfáltico (CA).

A diferença acima relatada pode ser atribuída às diferenças de considerações, pois no ELSYM5 foram obtidas as deformações verticais de compressão no topo do subleito, que não refletem apropriadamente a deformação permanente total no pavimento e a deformação no concreto asfáltico, conforme é adotado no método empírico-mecanístico da AASHTO. Isso não diminui em nada os resultados e conclusões obtidos, pois o aumento de pressões continuou apresentando no MEPDG um efeito significativo na deterioração trincas por fadiga do tipo *bottom-up*. Assim, a consideração das deformações ao longo das camadas do pavimento e o conseqüente acúmulo dos seus efeitos devem ser considerados em detrimento da generalização do efeito provocado apenas pela deformação vertical de compressão no topo do subleito.

Ainda em termos comparativos do método empírico, com os resultados do ELSYM5 valores de solicitações inferiores aos obtidos empiricamente foram verificados (mesmo quando a pressão de enchimento nos pneus era de 80 psi). Dessa forma, o método empírico majorou o carregamento refletindo-o no aumento do número de solicitações equivalentes ao eixo padrão durante o período de projeto.

O programa MEPDG se mostrou uma ferramenta interessante, eficiente e relativamente rápida para o objetivo proposto nesta pesquisa, pois o tempo para cada análise foi inferior a 40 minutos (desde o preenchimento dos dados de entrada até os resultados finais). Um item importante é a consideração dos dados climáticos das regiões que serão estudadas, fato não refletido nos métodos empíricos e no ELSYM5. Por se tratar de um método novo, pois até há pouco tempo estava em fase de testes, não deixa de ser promissor, e, apesar de algumas características envolvidas e os modelos usados no programa serem apoiados numa base de dados de seções de testes dos EUA, há a possibilidade de adaptação à realidade brasileira com o aumento de pesquisas sobre o tema.

A contribuição deste trabalho não se restringe ao meio acadêmico, pois trouxe, para a área técnica, uma forma de caracterizar de maneira satisfatória os dados de tráfego, necessários ao projeto de pavimentos e aos sistemas de gerência de pavimentos. Assim, os custos das coletas de dados podem ser minimizados, pois a diminuição do período de coleta, por exemplo, não será um item prejudicial; além disso, os locais que carecem de fontes de dados para análise também poderão ser beneficiados.

7.7 Sugestões

Levando em consideração os resultados obtidos, são listadas, a seguir, sugestões para trabalhos futuros:

- Adoção de outros tipos de função de distribuição de probabilidade, bem como a composição num mesmo espectro (com mais de um pico) de diferentes distribuições de probabilidade;
- Uso de outras técnicas para a definição dos parâmetros dos modelos, como, por exemplo, a análise multicritério;
- Uso de menores intervalos de classe de carga por eixo para simular o espectro de carga no ELSYM5 ou em outro programa similar;

- Utilização de propriedades mecânicas obtidas em laboratório, com amostras de solo e de material de revestimento, para que não sejam utilizados valores padrões do programa;
- Comparação entre os resultados obtidos para a situação brasileira e os obtidos com os valores padrões do programa (realidade norte-americana);
- Adaptação dos modelos de desempenho de acordo com a realidade do país, usando-se, para isso, dados reais de campo relativos às deteriorações;
- Uso de outros programas de dimensionamento empírico-mecanísticos, para fins de comparação entre os resultados de desempenho e praticidade, como, por exemplo, o programa PerRoad;
- Desenvolvimento de um espectro de carga por eixo geral para todo o Estado, com posterior comparação do efeito dos espectros de diferentes regiões do Estado, usando-se diferentes estruturas de pavimento (variação de espessuras e materiais).

REFERÊNCIAS

AASHTO – AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A manual of practice**. Interim edition. Washington, D. C., 2008.

ALBANO, J. F. Excessos de carga e pesagem de veículos rodoviários de carga. **Anais da III Semana de Engenharia de Produção e Transportes**. Porto Alegre: UFRGS, 2004.

AL-QADI, I. L.; ELSEIFI, M. A.; YOO, P. J. Characterization of pavement damage due to different tire configurations. **Journal of the Association of Asphalt Pavement Technologists**, vol. 84, 2005.

AL-YAGOUT, M. A.; MAHONEY, J. P.; PIERCE, L. M.; HALLENBECK, M. E. **Improving traffic characterization to enhance pavement design and performance: load spectra development**. Technical Report WA-RD 600.1, Washington State Department of Transportation, Olympia, Washington, 2005.

BANERJEE, A.; PROZZI, J. A.; FREIMAN, A. Regional calibration of the permanent deformation performance models for rehabilitated flexible pavements. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. TRB 2011 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C., 2011.

BANERJEE, A.; AGUIAR-MOYA, J. P.; PROZZI, J. A. Texas experience using LTPP for calibration of the MEPDG permanent deformation models. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. TRB 2009 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C., 2009.

BRASIL. Lei nº 7.408 de 25/11/85. **Estabeleceu uma tolerância máxima de 5% sobre o Peso Bruto Total (PBT) e Peso Bruto Total Transmitido por Eixo (PBTE)**. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 26/11/1985.

BUCHANAN, M. S. **Traffic load spectra development for the 2002 AASHTO pavement design guide**. Report FHWA/MS-DOT-RD-04-165. U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Mississippi Department of Transportation e Mississippi State University: Construction Materials Research Center, 2004.

BUSTUS, M.; CORDO, O.; GIRARDI, P.; PEREIRA, M. Calibration of MEPDG distress models for rigid pavement design in Argentina. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. TRB 2011 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C., 2011.

CARVALHO, R. L.; SCHWARTZ, C.W. Comparisons of flexible pavement designs: AASHTO empirical vs. NCHRP 1-37A mechanistic-empirical. **Transportation Research Record:**

Journal of the Transportation Research Board. TRB 2006 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C., 2006.

CENTRAN - CENTRO DE EXCELÊNCIA EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES. **Plano Diretor Nacional Estratégico de Pesagem – PDNEP.** Disponível em: http://www.centran.eb.br/plandir_pesagem.htm. Acesso em: Mar. 2008.

CHOU, C. J. Effect of overloaded heavy vehicles on pavement and bridge design. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.** Washington, D. C., n. 1539, p. 58-65, 1996.

CONTRAN. Resolução nº 104/99 de 21/12/1999. **Dispõe sobre a tolerância máxima de peso bruto de veículos e estabelece critérios para aplicação de multas.** Brasília, 1999. 2p.

_____. Resolução nº 114/00 de 05/05/2000. **Acrescentar Parágrafo único ao art. 4º da Resolução nº 104/99-CONTRAN.** Brasília, 2000. 1p.

_____. Resolução 210/06 de 13/11/2006. **Estabelece os limites de peso e dimensões para veículos que transitem por vias terrestres e dá outras providências.** Brasília, 2006. 7 p.

_____. Resolução 211/06 de 13/11/2006. **Requisitos necessários à circulação de Combinações de Veículos de Carga – CVC, a que se referem os arts. 97, 99 e 314 do Código de Trânsito Brasileiro.** Brasília, 2006. 7 p.

_____. Resolução 301/08 de 18/12/2008. **Dispõe sobre a tolerância máxima de 7,5% (sete e meio por cento) de peso bruto, transferidos por eixo ao pavimento das vias públicas para efeitos da aplicação da Resolução CONTRAN nº 258/2007.** Brasília, 2008. 1 p.

_____. Resolução 329/09 de 14/08/2009. **Altera o prazo previsto no artigo 17 da Resolução CONTRAN nº 258/2007, que regulamenta os artigos 231, X e 323 do Código de Trânsito Brasileiro, fixa metodologia de aferição de peso de veículos, estabelece percentuais de tolerância e dá outras providências.** Brasília, 2009. 1 p.

_____. Resolução 329/09 de 14/08/2009. **Altera o prazo previsto no artigo 17 da Resolução CONTRAN nº 258/2007, que regulamenta os artigos 231, X e 323 do Código de Trânsito Brasileiro, fixa metodologia de aferição de peso de veículos, estabelece percentuais de tolerância e dá outras providências.** Brasília, 2009. 1 p.

_____. Resolução 337/09 de 17/12/2009. **Altera o prazo previsto no artigo 17 da Resolução CONTRAN nº 258/2007, que regulamenta os artigos 231, X e 323 do Código de Trânsito Brasileiro, fixa metodologia de aferição de peso de veículos, estabelece percentuais de tolerância e dá outras providências.** Brasília, 2009. 1 p.

_____. Resolução 337/09 de 17/12/2009. **Altera o prazo previsto no artigo 17 da Resolução CONTRAN nº 258/2007, que regulamenta os artigos 231, X e 323 do Código de Trânsito Brasileiro, fixa metodologia de aferição de peso de veículos, estabelece percentuais de tolerância e dá outras providências.** Brasília, 2009. 1 p.

_____. Resolução 353/10 de 24/06/2010. **Altera o prazo previsto no artigo 17 da Resolução CONTRAN nº 258/2007, que regulamenta os artigos 231, X e 323 do Código de Trânsito Brasileiro, fixa metodologia de aferição de peso de veículos, estabelece percentuais de tolerância e dá outras providências.** Brasília, 2010. 1 p.

_____. Resolução 365/10 de 24/12/2010. **Altera o prazo previsto no artigo 17 da Resolução CONTRAN nº 258/2007, que regulamenta os artigos 231, X e 323 do Código de Trânsito Brasileiro, fixa metodologia de aferição de peso de veículos, estabelece percentuais de tolerância e dá outras providências.** Brasília, 2010. 1 p.

COUNCIL FOR CIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH – CSIR. **The damaging effects of overloaded heavy vehicles on roads.** Pad27, pp 1-20, Pretoria, Africa do Sul, 1997. Disponível em: http://overload.csir.co.za/pad27/docs/pad27_A4.pdf. Acesso em: Jan. de 2011.

CUNAGIN, W.; MICKLER, W. A.; WRIGHT, C. Evasion of weight-enforcement stations by trucks. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.** Washington, D. C., n. 1570, p. 181-190, 1997.

DENATRAN. Portaria nº 86/06 de 20/12/2006. **Homologar os veículos e as combinações de veículos de transporte de carga constantes do APÊNDICE desta Portaria, com seus respectivos limites de comprimento, peso bruto total – PBT e peso bruto total combinado – PBTC.**

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **Glossário de Termos Técnicos Rodoviários.** Rio de Janeiro, 1997.

_____. **O Sistema Gerencial de Pavimentos do DNER.** Rio de Janeiro, 2000.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE - DNIT. **Manual de projeto de interseções.** 2 ed. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **Manual de pavimentação.** Pub. IPR-719. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos.** Pub. IPR-720. Rio de Janeiro, 2006b.

_____. **Manual de Estudos de Tráfego.** Rio de Janeiro: IPT, 2006c.

_____. **Postos de Pesagem.** Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/Pesagem/postos/index.html>. Acesso em: maio 2010.
 DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT; UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA; LABORATÓRIO DE TRANSPORTES E LOGÍSTICA – LABTRANS; NÚCLEO DE ESTUDOS DE PESAGEM – NEP. **Identificação de Sistemas de Pesagem em Movimento: Fase 1 – Avaliação das Metodologias de Pesagem em Movimento Existentes.** Convênio 102/2007. Novembro de 2007. Disponível em: <https://gestao.dnit.gov.br/rodovias/operacoes-rodoviaras/convenios-com-a-ufsc/tt-102-2007-fase-1.pdf>. Acesso em: Out. de 2010.

_____. **Quadro de Fabricantes de Veículos.** Brasília, 2007. 109p.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DE SÃO PAULO/DER SP. **Malha Rodoviária: Pontos para pesagem de veículos.** Disponível em: http://www.der.sp.gov.br/malha/pontos_pesagem.aspx. Acesso em: Set. 2010.

DESSOUKY, S. H.; AL-QADI, I. L.; YOO, P. J. Full-depth flexible pavement response to different truck tire loadings. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.** TRB 2007 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C., 2007.

ELSEIFI, M. A.; AL-QADI, I. L.; YOO, P. J.; JANAJREH, I. Quantification of pavement damage caused by dual and wide base tires. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 1940, pp. 125-135, Washington, D. C., 2005.

FEKPE, E. S. K.; CLAYTON, A. M.; HAAS, R. C. G. Evaluating pavement impacts of truck weight limits and enforcement levels. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.** Washington, D. C., n. 1508, p. 39-44, 1995.

FERNANDES JUNIOR, J. L. **Investigação dos Efeitos das Solicitações do Tráfego sobre o Desempenho de Pavimentos.** 1994. 293 f. Tese (Doutorado) – Pós-graduação em Engenharia Civil – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 1994.

FERNANDES JUNIOR, J. L.; SÓRIA, M. H. A. S. Investigação dos Efeitos das Solicitações do Tráfego sobre o Desempenho de Pavimentos. **Anais da 30ª Reunião anual de Pavimentação.** Salvador: ABPv, 1996.

FERNANDES JUNIOR, J. L.; FABBRI, G. T. P.; PARREIRA, A. B.; SÓRIA, M. H. A.; GIGANTE, A. C. Efeito dos pneus Trelleborg sobre pavimentos asfálticos. **Revista Minerva: Pesquisa e Tecnologia**, n. 2, vol. 1, pp. 13-24, São Carlos, 2002.

FERNANDES JUNIOR, J. L.; PAES, J. C.; PEREIRA, P. A. A. Effects of traffic loading on portuguese and brasilian pavements performance. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.** TRB 2006 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C., 2006.

FERNANDES JUNIOR, J. L.; PAES, J. C.; PEREIRA, P. A. A. Avaliação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos flexíveis portugueses e brasileiros. **Revista Pavimentação**, Ano II, n. 5, pp. 28-38. Associação Brasileira de Pavimentação – ABPv, Rio de Janeiro, 2007.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION – FHWA. **Traffic Monitoring Guide**. Washington, DC, 2001. Disponível em: <http://www.fhwa.dot.gov/ohim/tmguide/>. Acesso em: 05 Maio 2011.

_____. **Effective Use of Weight-in-Motion Data: The Netherlands Case Study**. Publication n° FHWA-PL-07-028 HPIP/10-07(3.5) EW. U. S. Department of Transportation, Washington, DC, 2007. Disponível em: <http://international.fhwa.dot.gov/pubs/pl07028/pl07028.pdf>. Acesso em: Ago. 2010.

_____. **Swiss Heavy Goods Vehicle Control Centers: A Closer Look at Facility Characteristics and Supporting Technologies**. Federal Highway Administration, DOT, Washington, DC, 2009.

_____. **State of the practice: Truck size and weight enforcement technologies**. Final Report. 2009.

FREEMAN, T. E.; CLARK, T. Performance of pavements subjected to higher truck weight limits in Virginia. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. Washington, D. C., n. 1806, p. 95-100, 2002.

FWA, T. F.; ANG, B. W.; TOH, H. S.; GOH, T. N. Estimation of axle loads of heavy vehicles for pavement studies. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. Washington, D. C., n. 1388, p. 70 - 79, 1993.

GUO, R; PROZZI, J. A.; TUDTUD, F. Effect on pavement performance of characterizing traffic loading by means of ESALs and Axle load spectra. **Proceedings of the International Innovation Forum for Doctoral Students in Transportation Engineering**, p. 156-173, Shanghai, 2005.

HAAS, R.; HUDSON, W.R.; ZANIEWSKI, J. **Modern Pavement Management**. Krieger Publishing Co. Malabar, Florida – 1994.

HAIDER, S. W.; HARICHANDRAN, R. S. Characterizing axle load spectra by using gross vehicle weights and truck traffic volumes. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. TRB 2007 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C., 2007a.

HAIDER, S. W.; HARICHANDRAN, R. S. Quantifying the effects of truck weights on axle load spectra of single and tandem axle configurations. **Proceedings of the Fifth**

Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, pp. 73-78. Park City, Utah, 2007b.

HAIDER, S. W.; HARICHANDRAN, R. S. Relating axle load spectra to truck gross vehicle weights and volumes. **Journal of Transportation Engineering**, vol. 133, n° 12, pp. 696-705. American Society of Civil Engineers, 2007c.

HAIDER, S. W.; HARICHANDRAN, R. S. Effect of axle load spectra characteristics on flexible pavement performance. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. TRB 2009 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C., 2009.

HAIDER, S. W.; HARICHANDRAN, R. S.; DWAIKAT, M. B. The effect of axle load measurement errors on pavement performance and design reliability. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. TRB 2010 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C., 2010.

HALL, K. D; XIAO, D. X.; WANG, K. C. P. Calibration of the MEPDG for flexible pavement design in Arkansas. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. TRB 2011 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C., 2011.

HALLENBECK, M.E. **WSDOT Traffic Forecasting Guide** — Volumes 1 and 2, Research Report WA-RD 219.1, Washington State Department of Transportation, Olympia, Washington, 1991.

HALLENBECK, M.E. Long Term Pavement Performance Traffic Monitoring Protocol: Revised Data collection Plan for LTPP Test sites. Federal Highway Administration, 1998. Disponível em: <http://fhwa.dot.gov/ohim/tvtmw/natmec/00010.pdf>. Acesso em: maio 2011.

HALLENBECK, M.; WEINBLATT, H. **Equipment for Collecting Traffic Load Data**. NCHRP REPORT 509. Washington, D. C., 2004.

HOEGH, K.; KHAZANOVICH, L.; JENSEN, M. Local calibration of MEPDG rutting model for MnRoad test sections. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. TRB 2010 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C., 2010.

HONEFANGER, J.; STRAWHORN, J.; ATHEY, R.; CARSON, J. CONNER, G.; JONES, D.; KEARNEY, T.; NICHOLAS, J; THURBER, P.; WOOLLEY, R. **Commercial motor vehicle size and weight enforcement in Europe**. Report n. FHWA-PL-07-002, 2007.

HONG, F.; PEREIRA, F. M; PROZZI, J. A. Comparison of equivalent single axle loads from empirical and mechanistic-empirical approaches. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. TRB 2006 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C., 2006.

HONG, F.; PROZZI, J. P.; PROZZI, J. A. **Characterizing truck traffic in the U.S.-Mexico Highway trade corridor and the load associated pavement damage**. Research Report SWUTC/07/167555-1. Southwest Region University Transportation Center. Austin, Texas, 2007.

HONG, F.; PROZZI, J. A.; LEUNG, A. Sampling Schemes for weight-in-motion traffic data collection. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2049, pp. 38-44. Washington, D.C., 2008.

HRB - HIGHWAY RESEARCH BOARD. **The AASHO Road Test: Report 5 Pavement Research**. HRB Special Report 61E. Washington, D.C., 1962.

HUSSAIN, S.; PARKER, N. A. Pavement damage and road pricing. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. TRB 2006 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C., 2006.

ISHAK, S.; SHIN, H. C.; SRIDHAR, B.; ZHANG, Z. Characterization and Development of Truck Axle Load Spectra for Future Implementation of New Pavement Design Practices in Louisiana. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. TRB 2010 Annual Meeting CD-ROM, Washington, D.C., 2010.

JEONGHO OH, A. M.; FERNANDO, E. G.; LYTTON, R. L. Evaluation of damage potential for pavements due to overweight truck traffic. **Journal of Transportation Engineering**, vol. 133, n. 5, p. 308-317. American Society of Civil Engineers - ASCE, 2007.

JIANG, Y.; LI, S.; NANTUNG, T.; MANGOLD, K.; MacARTHUR, S. A. Creation of truck axle load spectra using weigh-in-motion data. **Journal of the transportation Research Forum**, vol. 47, n. 4, pp. 45-61. Transportation Research Forum, 2008. Disponível em: <http://www.trforum.org/journal>. Acesso em: Jan. de 2011.

KIM, J. R; TITTUS-GLOVER, L; DARTER, M. I. KUMAPLEY, R. K. Axle load distribution characterization for mechanistic pavement design. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. Washington, D. C., n. 1629, p. 13-23, 1998.

KULKARNI, R. B.; MILLER, R. W. Pavement Management Systems: Past, Present and Future. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. Washington, D. C., n. 1853, p. 65-71, 2003.

LI, S.; JIANG, Y; ZHU, K.; NANTUNG, T. Truck traffic characteristics for mechanistic-empirical flexible pavement design: evidences, sensitivities, and implications. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. TRB 2007 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C., 2007.

LU, Q.; ZHANG, Y; HARVEY, J. T. Estimations of truck traffic inputs for M-E pavement design in California. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. TRB 2009 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C., 2009.

MACHEMEHL, R. B.; WANG, F.; PROZZI, J. A. Analytical study of effects of truck tire pressure on pavements using measured tire-pavement contact stress data. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. TRB 2005 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C., 2005.

MARTINS, R.; SERRAVALLE, A. Gerenciamento do controle de pesagem dos veículos de carga nas rodovias estaduais do estado da Bahia: o futuro de nossas rodovias. **Anais da 38ª Reunião anual de Pavimentação/12º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária**. Manaus: ABPv, 2007.

MEHTA, Y. A.; SAUBER, R. W.; OWAD, J.; KRAUSE, J. Lessons learned during implementation of mechanistic-empirical pavement design guide. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. TRB 2008 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C., 2008.

MINER, M. N. Cumulative damage in fatigue. **Transactions, American Society of Mechanics Engineers**, v. 67, p. A159-A 164, New York ,1945.

NCHRP - NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures**. Final Report NCHRP 1-37 A. Champaign, Illinois, 2004.

_____. **Traffic data collection, Analysis, and Forecasting for Mechanistic Pavement Design**. NCHRP Report 538 - Project 1-39. Washington, DC, 2005.

NEIDIGH, J. D.; CRAWFORD, J. A. Expanding the Texas weigh-in-motion program to meet AASHTO 2002 traffic data needs. **North American Travel Monitoring Exposition and Conference**, San Diego, California, 2004.

PARK, D.; FERNANDO, E. LEIDY, J. Evaluation of predicted pavement response using measured tire contact stresses. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. TRB 2005 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C., 2005.

PETERLINI, P. S. **Cargas por eixo e fatores de veículos obtidos em rodovias federais concessionadas do Estado do Paraná**. 2006. 192 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2006.

PROZZI, J. A.; AGUIAR-MOYA, J. P. Design, response and performance of cement-treated materials. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. TRB 2010 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C., 2010.

PROZZI, J. A.; HONG, F. Hierarchical axle load data for mechanistic-empirical design. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. TRB 2005 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C., 2005.

PROZZI, J. A.; HONG, F. Optimum statistical characterization of axle load spectra based on load-associated pavement damage. **International Journal of Pavement Engineering**, vol. 8, n. 4, p. 323-330, Taylor & Francis Group, 2007.

PROZZI, J. A.; HONG, F.; LEUNG, A. Effect of traffic load measurement bias on pavement life prediction: A mechanistic-empirical perspective. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2087, pp.91-98 Washington, D. C., 2008.

RETFERFORD, J. Q.; MCDONALD, M. A study of reliability methods applicable to mechanistic-empirical pavement design method. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. TRB 2010 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C., 2010

SADEGHI, J. M.; FATHALI, M. Deterioration analysis of flexible pavements under overweight vehicles. **Journal of Transportation Engineering**, vol. 133, n. 11, p. 625-633. American Society of Civil Engineers - ASCE, 2007.

SALAMA, H. K.; HAIDER, S. W.; CHATTI, K. Evaluation of New mechanistic-empirical pavement design guide rutting models for multiple-axle loads. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2005, pp.112-123 Washington, D. C., 2007.

SHIYAB, A. M. S. H. **Optimum use of the flexible pavement condition indicators in Pavement Management System**. 2007. 382 f. Thesis (Doctor of Philosophy) – Curtin University of Technology, Bentley, Perth, Western Australia, 2007.

SMITH, B. C.; DIFENDERFER, B.K. **Development of Truck Equivalent Single-Axle Load (ESAL) Factors Based on Weigh-in-Motion Data for Pavement Design in Virginia**. Final Report VTRC 09-R18. Virginia, 2009. Disponível em: http://www.virginiadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/09-r18.pdf. Acesso: 27 out. de 2009.

SMITH, B. C.; DIFENDERFER, B.K. Analysis of Virginia-specific traffic data for use with the mechanistic-empirical pavement design guide. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. TRB 2010 Annual Meeting CD-ROM, Washington, D.C., 2010.

SOULIMAN, M.; MAMLOUK, M.; EL-BASYOUNY, M.; ZAPATA, C. E. Calibration of the AASHTO MEPDG for flexible pavement for Arizona conditions. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. TRB 2010 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C., 2010.

SRIDHAR, B. K. **Characterization and development of axle load spectra to enhance pavement design and performance on the basis of new mechanistic-empirical design guide in Louisiana**. 2008. 188 f. Thesis (Master of Science in Civil Engineering). Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College - Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana, 2008.

SUNG, Y.; HUANG, W.; WANG, K.; LIN, J. Axle load distribution model for heavy vehicles on Sun Yat-Sen freeway in Taiwan. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Annual Meeting CD-ROM, paper 08-2372. Washington, D.C., 2008.

SWAN, D. J.; TARDIF, R.; HAJEK, J. J.; HEIN, D. K. Development of regional traffic data for the mechanistic-empirical pavement design guide. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2049, pp.54-62, Washington, D. C, 2008.

TIMM, D. H.; NEWCOMB, D. E. Calibration of flexible pavement performance equations for MnRoad. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. TRB 2003 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C., 2003.

TIMM, D. H.; NEWCOMB, D. E; SELVARAJ, I. A practical guide to low-volume road perpetual pavement design. **International Conference on Perpetual Pavement Ohio Research Institute for Transportation and the environment**, 2006.

TIMM, D. H.; NEWCOMB, D. E. Perpetual pavement design for flexible pavements in the U. S. **International Journal of Pavement Engineering**, vol. 7, n. 2, pp. 111-119, 2006.

TIMM, D. H.; TISDALE, S. M.; TUROCHY, R. E. Axle Load Spectra Characterization by Mixed Distribution Modeling. **Journal of Transportation Engineering**, vol. 131, n. 2, p. 83-88. American Society of Civil Engineers, 2005.

TIMM, D. H.; BOWER, J. M.; TUROCHY, R. E. Effect of load spectra on mechanistic-empirical flexible pavement design. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. TRB 2006 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C., 2006.

TRAN, N. H.; HALL, K.D. Development and influence of statewide axle load spectra on flexible pavement performance. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Annual Meeting CD-ROM, paper 07-0696. Washington, D.C., 2007.

TRB - TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. **New trucks for greater productivity and less road wear: an evaluation of the Turner proposal.** National Research Council. Special Report 227. Washington, D.C., 1990.

TRISCHUCK, D.; BERTHELOT, C.; TAYLOR, B. Weigh-in-motion applications for intelligent transportation systems-commercial vehicle operations. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 1816, pp.87-95 Washington, D. C, 2002.

TUROCHY, R. E.; TIMM, D. H.; TISDALE, S. M. **Truck Equivalency Factors, Load Spectra Modeling and Effects on Pavement Design.** Highway Research Center, Final Report - Project 930-564. Auburn, Alabama, 2005.

TUROCHY, R. E.; BAKER, S. M.; TIMM, D. H.; Spatial and temporal variations in axle load spectra and impacts on pavement design. **Journal of Transportation Engineering**, vol. 131, n. 10, p. 802-808. American Society of Civil Engineers, 2005.

WANG, F. **Mechanistic-empirical study of effects of truck tire pressure on asphalt pavement performance.** 2005. 188 f. Dissertation (Doctor of Philosophy). Faculty of the Graduate School of the University of Texas at Austin, 2005.

WANG, F.; MACHEMEHL, R. B. Development of quick solutions for prediction of critical asphalt pavement responses due to measured tire-pavement contact stresses. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.** TRB 2006 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C., 2006.

WANG, F.; MACHEMEHL, R. B. Monte Carlo simulation approach to mechanistic-empirical analysis of flexible pavement. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.** TRB 2008 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C., 2008.

WANG, G.; ROQUE, R. Three-dimensional finite element modeling of static tire-pavement interaction. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.** TRB 2010 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C., 2010.

WIDMER, J. A. Compatibilidade de Tráfego de bitrens de 25 m com a infraestrutura viária brasileira. **2º Colóquio Internacional de Suspensões e 1º Colóquio de Implementos Rodoviários da SAE-Brasil.** Caxias do Sul, 2002.

XUE, W.; WEAVER, E. Pavement shear strain response to dual and wide-base tires. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.** TRB 2011 Annual Meeting CD-ROM. Washington, D. C., 2011.

YODER, E.; WITCZACK, M. **Principles of pavement design.** 2 ed. New York: John Willey & Sons, 1975.

APÊNDICE A – Sumário com dados de entrada gerado pelo MEPDG

Project:
original_120psi_LDF48_linear.dgp

General Information

Design Life: 20 years
Base/Subgrade construction: October, 2008
Pavement construction: November, 2008
Traffic open: December, 2008
Type of design: Flexible

Description:

Analysis Parameters

Performance Criteria

	Limit	Reliability
Initial IRI (in/mi)	63	
Terminal IRI (in/mi)	172	90
AC Surface Down Cracking (Long. Cracking) (ft/mile):	1000	90
AC Bottom Up Cracking (Alligator Cracking) (%):	25	90
AC Thermal Fracture (Transverse Cracking) (ft/mi):	1000	90
Chemically Stabilized Layer (Fatigue Fracture)	25	90
Permanent Deformation (AC Only) (in):	0,25	90
Permanent Deformation (Total Pavement) (in):	0,75	90
Reflective cracking (%):	100	

Location: Imigrantes
Project ID:
Section ID:

Date: 16/09/2011

Station/milepost format:
Station/milepost begin:
Station/milepost end:
Traffic direction: South bound

Default Input Level

Default input level: Level 3, Default and historical agency values.

Traffic

Initial two-way AADTT: 10993
Number of lanes in design direction: 4
Percent of trucks in design direction (%): 50
Percent of trucks in design lane (%): 48
Operational speed (mph): 60

Traffic -- Volume Adjustment Factors

Monthly Adjustment Factors (Level 3, Default MAF)

Month	Vehicle Class									
	Class 4	Class 5	Class 6	Class 7	Class 8	Class 9	Class 10	Class 11	Class 12	Class 13
January	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
February	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
March	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
April	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
May	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
June	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
July	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
August	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
September	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
October	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
November	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
December	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Vehicle Class Distribution

(Level 1, Site Specific Distribution)

AADTT distribution by vehicle class

Class 4: 0,0%
Class 5: 8,7%
Class 6: 7,4%
Class 7: 0,0%
Class 8: 19,6%
Class 9: 27,4%
Class 10: 13,3%
Class 11: 0,0%
Class 12: 0,0%
Class 13: 23,6%

Hourly truck traffic distribution

by period beginning:

Midnight	2,3%	Noon	5,9%
1:00 am	2,3%	1:00 pm	5,9%
2:00 am	2,3%	2:00 pm	5,9%
3:00 am	2,3%	3:00 pm	5,9%
4:00 am	2,3%	4:00 pm	4,6%
5:00 am	2,3%	5:00 pm	4,6%
6:00 am	5,0%	6:00 pm	4,6%
7:00 am	5,0%	7:00 pm	4,6%
8:00 am	5,0%	8:00 pm	3,1%
9:00 am	5,0%	9:00 pm	3,1%
10:00 am	5,9%	10:00 pm	3,1%
11:00 am	5,9%	11:00 pm	3,1%

Traffic Growth Factor

Vehicle Class	Growth Rate	Growth Function
Class 4	4,0%	Linear
Class 5	4,0%	Linear
Class 6	4,0%	Linear
Class 7	4,0%	Linear
Class 8	4,0%	Linear
Class 9	4,0%	Linear
Class 10	4,0%	Linear
Class 11	4,0%	Linear
Class 12	4,0%	Linear
Class 13	4,0%	Linear

Traffic -- Axle Load Distribution FactorsLevel 1: [Site Specific](#)**Traffic -- General Traffic Inputs**

Mean wheel location (inches from the lane marking): 18
 Traffic wander standard deviation (in): 10
 Design lane width (ft): 12

Number of Axles per Truck

Vehicle Class	Single Axle	Tandem Axle	Tridem Axle	Quad Axle
Class 4	0,00	0,00	0,00	0,00
Class 5	2,00	0,00	0,00	0,00
Class 6	1,00	1,00	0,00	0,00
Class 7	0,00	0,00	0,00	0,00
Class 8	2,43	0,57	0,00	0,00
Class 9	2,00	0,00	1,00	0,00
Class 10	1,00	1,00	1,00	0,00
Class 11	0,00	0,00	0,00	0,00
Class 12	0,00	0,00	0,00	0,00
Class 13	1,00	3,00	0,00	0,00

Axle Configuration

Average axle width (edge-to-edge) outside dimensions,ft): 8,5
 Dual tire spacing (in): 13,11

Axle Configuration

Tire Pressure (psi) : 120

Average Axle Spacing

Tandem axle(psi): 47,24
 Tridem axle(psi): 47,24
 Quad axle(psi): 47,24

Climate

C:\Users\Heliana\Documents\Heliana_computador_casa\DOCTORADO\2007-
 icm file: 2011\Tese_espectros_carga\tratamento_dados\IMIGRANTES\Analise_ME
 PDG\original_120psi_LDF48_linear\dados_clima_gerados.icm
 Latitude (degrees.minutes) 28,26
 Longitude (degrees.minutes) -81,19
 Elevation (ft) 98
 Depth of water table (ft) 32,8

Structure--Design Features

HMA E* Predictive Model: NCHRP 1-37A viscosity based model.
 HMA Rutting Model coefficients: NCHRP 1-37A coefficients
 Endurance Limit (microstrain): None (0 microstrain)

Structure--Layers**Layer 1 -- Asphalt concrete**

Material type: Asphalt concrete
 Layer thickness (in): 5

General Properties

General
 Reference temperature (F°): 77

Volumetric Properties as Built

Effective binder content (%): 6
 Air voids (%): 4

Total unit weight (pcf): 142

Poisson's ratio: 0.3 (user entered)

Thermal Properties

Thermal conductivity asphalt (BTU/hr-ft-F°): 0,67

Heat capacity asphalt (BTU/lb-F°): 0,23

Asphalt Mix

Cumulative % Retained 3/4 inch sieve: 0

Cumulative % Retained 3/8 inch sieve: 20

Cumulative % Retained #4 sieve: 42

% Passing #200 sieve: 6

Asphalt Binder

Option: Conventional penetration grade

Viscosity Grade: Pen 60-70

A: 10.6508 (correlated)

VTS: -3.5537 (correlated)

Thermal Cracking Properties

Average Tensile Strength at 14°F: 626,53

Mixture VMA (%): 10

Aggregate coeff. thermal contraction (in./in.): 0,000005

Mix coeff. thermal contraction (in./in.°F): 0,000013

Load Time (sec)	Low Temp. -4°F (1/psi)	Mid. Temp. 14°F (1/psi)	High Temp. 32°F (1/psi)
1	1,18E-07	1,96E-07	2,74E-07
2	1,27E-07	2,24E-07	3,39E-07
5	1,4E-07	2,67E-07	4,49E-07
10	1,5E-07	3,05E-07	5,55E-07
20	1,61E-07	3,49E-07	6,87E-07
50	1,77E-07	4,16E-07	9,09E-07
100	1,91E-07	4,76E-07	1,12E-06

Layer 2 -- Crushed stone

Unbound Material: Crushed stone

Thickness(in): 8

Strength Properties

Input Level: Level 3

Analysis Type: ICM inputs (ICM Calculated Modulus)

Poisson's ratio: 0,4

Coefficient of lateral pressure, Ko: 0,5

Modulus (input) (psi): 60000

ICM Inputs

Gradation and Plasticity Index

Plasticity Index, PI: 0

Liquid Limit (LL): 6

Compacted Layer: Yes

Passing #200 sieve (%): 10

Passing #40: 22,5

Passing #4 sieve (%): 50

D10(mm): 0,075

D20(mm): 0,3004

D30(mm): 0,922

D60(mm): 7,058

D90(mm): 15,35

Sieve	Minimum Percent Passing	Maximum Percent Passing
0.001mm		
0.002mm		
0.020mm		
#200	5	15
#100		
#80		
#60		
#50		
#40	15	30
#30		
#20		
#16		
#10	25	50
#8		
#4	35	65
3/8"	50	85
1/2"		
3/4"	100	100

1"	100	100
1 1/2"	100	100
2"	100	100
2 1/2"		
3"		
3 1/2"		
4"		

Calculated/Derived Parameters

Maximum dry unit weight (pcf): 138.4 (derived)
 Specific gravity of solids, Gs: 2.70 (derived)
 Saturated hydraulic conductivity (ft/hr): 0.01519 (derived)
 Optimum gravimetric water content (%): 6.1 (derived)
 Calculated degree of saturation (%): 76.4 (calculated)

Soil water characteristic curve parameters: Default values

Parameters	Value
a	5,3794
b	1,8292
c	0,65431
Hr.	100

Layer 3 -- A-2-6

Unbound Material: A-2-6
 Thickness(in): 10

Strength Properties

Input Level: Level 3
 Analysis Type: ICM inputs (ICM Calculated Modulus)
 Poisson's ratio: 0,4
 Coefficient of lateral pressure, Ko: 0,5
 Modulus (input) (psi): 30000

ICM Inputs

Gradation and Plasticity Index

Plasticity Index, PI: 15
 Liquid Limit (LL): 32
 Compacted Layer: Yes
 Passing #200 sieve (%): 24,8
 Passing #40: 43,5
 Passing #4 sieve (%): 67,2
 D10(mm): 0,001443
 D20(mm): 0,02083
 D30(mm): 0,1527
 D60(mm): 2,138
 D90(mm): 18,56

Sieve	Percent Passing
0.001mm	
0.002mm	
0.020mm	
#200	24,8
#100	
#80	32,4
#60	
#50	
#40	43,5
#30	
#20	
#16	
#10	59,4
#8	
#4	67,2
3/8"	78,8
1/2"	83,3
3/4"	90,4
1"	94,5
1 1/2"	97,7
2"	99,4
2 1/2"	
3"	
3 1/2"	99,9
4"	99,9

Calculated/Derived Parameters

Maximum dry unit weight (pcf): 122.5 (derived)
 Specific gravity of solids, Gs: 2.70 (derived)
 Saturated hydraulic conductivity (ft/hr): 7.363e-006 (derived)
 Optimum gravimetric water content (%): 10.0 (derived)
 Calculated degree of saturation (%): 72.1 (calculated)

Soil water characteristic curve parameters:

Default values

Parameters	Value
a	75,574
b	0,93514
c	0,43152
Hr.	500

Layer 4 -- A-7-6

Unbound Material:

A-7-6

Thickness(in):

Semi-infinite

Strength Properties

Input Level:

Level 3

Analysis Type:

ICM inputs (ICM Calculated Modulus)

Poisson's ratio:

0,45

Coefficient of lateral pressure,Ko:

0,5

Modulus (input) (psi):

10000

ICM Inputs

Gradation and Plasticity Index

Plasticity Index, PI:

30

Liquid Limit (LL)

51

Compacted Layer

No

Passing #200 sieve (%):

79,1

Passing #40

88,8

Passing #4 sieve (%):

94,9

D10(mm)

0,0002309

D20(mm)

0,0005333

D30(mm)

0,001231

D60(mm)

0,01516

D90(mm)

0,6616

Sieve	Percent Passing
0.001mm	
0.002mm	
0.020mm	
#200	79,1
#100	
#80	84,9
#60	
#50	
#40	88,8
#30	
#20	
#16	
#10	93
#8	
#4	94,9
3/8"	96,9
1/2"	97,5
3/4"	98,3
1"	98,8
1 1/2"	99,3
2"	99,6
2 1/2"	
3"	
3 1/2"	99,9
4"	99,9

Calculated/Derived Parameters

Maximum dry unit weight (pcf):

97.7 (derived)

Specific gravity of solids, Gs:

2.70 (derived)

Saturated hydraulic conductivity (ft/hr):

8.946e-006 (derived)

Optimum gravimetric water content (%):

22.2 (derived)

Calculated degree of saturation (%):

82.7 (calculated)

Soil water characteristic curve parameters:

Default values

Parameters	Value
a	136,42
b	0,51828
c	0,032384
Hr.	500

Distress Model Calibration Settings - Flexible

Level 3: NCHRP 1-37A coefficients (nationally calibrated values)

AC Fatigue

k1

0,007566

k2

3,9492

k3

1,281

APÊNDICE B – Gráficos de espectros de carga e frequências acumuladas

Figura B 1 - Espectros mensais e frequências acumuladas do veículo 2C (ano 2008)

Figura B 2 - Espectros anuais e frequências acumuladas do veículo 2C (ano 2008)

Figura B 3 - Espectros mensais e frequências acumuladas do veículo 212 (ano 2008)

Figura B 4 - Espectros anuais e frequências acumuladas do veículo 212 (ano 2008)

Figura B 5 - Espectros mensais e frequências acumuladas do ESRS e dos ESRD 1 a ESRD 3 do veículo 2I3 (ano 2008)

Figura B 6 - Espectros mensais e frequências acumuladas do ESRD4 do veículo 213 (ano 2008)

Figura B 7 - Espectros anuais e frequências acumuladas do ESRS, ESRD1 e 2 do veículo 213 (ano 2008)

Figura B 8 - Espectros anuais e frequências acumuladas do ESRD3 e 4 do veículo 2I3 (ano 2008)

Figura B 9 - Espectros mensais e frequências acumuladas do ESRS e ESRD1 do veículo 2S1 (ano 2008)

Figura B 10 - Espectros mensais e frequências acumuladas do eixo ESRD2 do veículo 2S1 (ano 2008)

Figura B 11 - Espectros anuais e frequências acumuladas do veículo 2S1 (ano 2008)

Figura B 12 - Espectros mensais e frequências acumuladas do veículo 3C (ano 2008)

Figura B 13 - Espectros anuais e frequências acumuladas do veículo 3C (ano 2008)

Figura B 14 - Espectros mensais e frequências acumuladas do ESRS, ETD e ESRD 1 e 2 do veículo 313 (ano 2008)

Figura B 15 - Espectros mensais e frequências acumuladas do ESRD 3 do veículo 3I3 (ano 2008)

Figura B 16 - Espectros anuais e frequências acumuladas do ESRD 3 do veículo 3I3 (ano 2008)

Figura B 17 - Espectros anuais e frequências acumuladas do ESRD 2 e 3 do veículo 313 (ano 2008)

Figura B 18 - Espectros mensais e frequências acumuladas do ESRS e ETD 1 do veículo 3T6 (ano 2008)

Figura B 19 - Espectros mensais e frequências acumuladas do ETD 2, 3 e 4 do veículo 3T6 (ano 2008)

Figura B 20 - Espectros anuais e frequências acumuladas do ESRs do veículo 3T6 (ano 2008)

Figura B 21 - Espectros anuais e frequências acumuladas do ETD 2, 3 e 4 do veículo 3T6
(ano 2008)

APÊNDICE C – Gráficos de Fatores de Equivalência Individuais

Figura C 1 - Comparação entre FEC_i empírico e empírico-mecanístico para o ESRS e ERSD

Figura C 2 - Comparação entre FEC_i empírico e empírico-mecanístico para o ETD

Figura C 3 - Comparação entre FEC_i empírico e empírico-mecanístico para o ETT

Figura C 4 - Comparação entre FEC_i para o ESRD, ETD e ETT entre os diferentes níveis de pressão de enchimento dos pneus

APÊNDICE D – Gráficos de distribuições teóricas e original

Figura D 1 - Distribuições teóricas para os espectros de carga e frequências acumuladas do ESRD e ETT do veículo 2S3

Figura D 2 - Distribuições teóricas para os espectros de carga e frequências acumuladas do ESRS e ETD1 do veículo 3D4

Figura D 3 - Distribuições teóricas para os espectros de carga e frequências acumuladas do ETD2 e ETD3 do veículo 3D4

Figura D 4 - Distribuições teóricas para os espectros de carga e frequências acumuladas do veículo 2C

Figura D 5 - Distribuições teóricas para os espectros de carga e frequências acumuladas do veículo 3S3

Figura D 6 - Distribuições teóricas para os espectros de carga e frequências acumuladas do veículo 2S1

Figura D 7 - Distribuições teóricas para os espectros de carga e frequências acumuladas do veículo 3C

**APÊNDICE E – Cálculo dos FV e solicitações empírico-mecanísticos
(dados originais e previstos)**

Tabela E 1 - FV empírico-mecanísticos para espectros originais - 80 psi

Tipo veículo	%	FV _{trincas}		FV _{afundamento}	
		Individual	Total	Individual	Total
2C	8,72%	0,969	0,084	0,610	0,05
2S1	8,41%	2,032	0,171	1,407	0,12
2S2	11,18%	1,659	0,185	1,064	0,12
2S3	27,40%	3,336	0,914	4,252	1,16
3C	7,41%	1,448	0,107	1,188	0,09
3D4	23,56%	4,258	1,003	5,536	1,30
3S3	13,32%	2,762	0,368	3,298	0,44
FV médio da frota		2,83		3,29	

Tabela E 2 - Número de solicitações com uso dos FV empírico-mecanísticos para os espectros originais - 80 psi

Anos	VDMA	Número de solicitações no ano		Número de solicitações acumuladas	
		N _{trincas}	N _{afundamento}	N _{trincas}	N _{afundamento}
2009	10993	5,46E+06	6,33E+06	5,46E+06	6,33E+06
2010	11433	5,67E+06	6,58E+06	1,11E+07	1,29E+07
2011	11890	5,90E+06	6,85E+06	1,70E+07	1,98E+07
2012	12366	6,14E+06	7,12E+06	2,32E+07	2,69E+07
2013	12860	6,38E+06	7,41E+06	2,96E+07	3,43E+07
2014	13375	6,64E+06	7,70E+06	3,62E+07	4,20E+07
2015	13910	6,90E+06	8,01E+06	4,31E+07	5,00E+07
2016	14466	7,18E+06	8,33E+06	5,03E+07	5,83E+07
2017	15045	7,47E+06	8,66E+06	5,77E+07	6,70E+07
2018	15646	7,77E+06	9,01E+06	6,55E+07	7,60E+07
2019	16272	8,08E+06	9,37E+06	7,36E+07	8,54E+07
2020	16923	8,40E+06	9,75E+06	8,20E+07	9,51E+07
2021	17600	8,74E+06	1,01E+07	9,07E+07	1,05E+08
2022	18304	9,09E+06	1,05E+07	9,98E+07	1,16E+08
2023	19036	9,45E+06	1,10E+07	1,09E+08	1,27E+08
2024	19798	9,83E+06	1,14E+07	1,19E+08	1,38E+08
2025	20590	1,02E+07	1,19E+07	1,29E+08	1,50E+08
2026	21413	1,06E+07	1,23E+07	1,40E+08	1,62E+08
2027	22270	1,11E+07	1,28E+07	1,51E+08	1,75E+08
2028	23161	1,15E+07	1,33E+07	1,62E+08	1,89E+08

Tabela E 3 - FV empírico-mecanísticos para espectros originais - 120 psi

Tipo veículo	%	FV _{trincas}		FV _{afundamento}	
		Individual	Total	Individual	Total
2C	8,72%	1,523	0,13	0,628	0,05
2S1	8,41%	3,224	0,27	1,443	0,12
2S2	11,18%	2,661	0,30	1,089	0,12
2S3	27,40%	5,499	1,51	4,374	1,20
3C	7,41%	2,437	0,18	1,216	0,09
3D4	23,56%	7,081	1,67	5,679	1,34
3S3	13,32%	4,603	0,61	3,374	0,45
FV médio da frota		4,67		3,37	

Tabela E 4 - Número de solicitações com uso dos FV empírico-mecanísticos para os espectros originais - 120 psi

Anos	VDMA	Número de solicitações no ano		Número de solicitações acumuladas	
		N _{atrincas}	N _{afundamento}	N _{trincas}	N _{afundamento}
2009	10993	8,99E+06	6,50E+06	8,99E+06	6,50E+06
2010	11433	9,35E+06	6,76E+06	1,83E+07	1,33E+07
2011	11890	9,73E+06	7,03E+06	2,81E+07	2,03E+07
2012	12366	1,01E+07	7,31E+06	3,82E+07	2,76E+07
2013	12860	1,05E+07	7,60E+06	4,87E+07	3,52E+07
2014	13375	1,09E+07	7,91E+06	5,97E+07	4,31E+07
2015	13910	1,14E+07	8,22E+06	7,10E+07	5,13E+07
2016	14466	1,18E+07	8,55E+06	8,29E+07	5,99E+07
2017	15045	1,23E+07	8,89E+06	9,52E+07	6,88E+07
2018	15646	1,28E+07	9,25E+06	1,08E+08	7,80E+07
2019	16272	1,33E+07	9,62E+06	1,21E+08	8,76E+07
2020	16923	1,38E+07	1,00E+07	1,35E+08	9,76E+07
2021	17600	1,44E+07	1,04E+07	1,50E+08	1,08E+08
2022	18304	1,50E+07	1,08E+07	1,65E+08	1,19E+08
2023	19036	1,56E+07	1,13E+07	1,80E+08	1,30E+08
2024	19798	1,62E+07	1,17E+07	1,96E+08	1,42E+08
2025	20590	1,68E+07	1,22E+07	2,13E+08	1,54E+08
2026	21413	1,75E+07	1,27E+07	2,31E+08	1,67E+08
2027	22270	1,82E+07	1,32E+07	2,49E+08	1,80E+08
2028	23161	1,90E+07	1,37E+07	2,68E+08	1,93E+08

Tabela E 5 - FV empírico-mecanísticos para espectros do modelo log-normal - 80 psi

Tipo veículo	%	FV _{trincas}		FV _{afundamento}	
		Individual	Total	Individual	Total
2C	8,72%	0,926	0,081	0,538	0,05
2S1	8,41%	1,996	0,168	1,316	0,11
2S2	11,18%	1,605	0,179	0,992	0,11
2S3	27,40%	3,791	1,039	5,411	1,48
3C	7,41%	1,511	0,112	1,324	0,10
3D4	23,56%	4,317	1,017	5,587	1,32
3S3	13,32%	2,872	0,383	3,624	0,48
FV médio da frota		2,98		3,65	

Tabela E 6 - Número de solicitações com uso dos FV empírico-mecanísticos para os espectros modelo log-normal - 80 psi

Anos	VDMA	Número de solicitações no ano		Número de solicitações acumuladas	
		N _{atrincas}	N _{afundamento}	N _{trincas}	N _{afundamento}
2009	10993	5,74E+06	7,03E+06	5,74E+06	7,03E+06
2010	11433	5,97E+06	7,31E+06	1,17E+07	1,43E+07
2011	11890	6,20E+06	7,60E+06	1,79E+07	2,19E+07
2012	12366	6,45E+06	7,90E+06	2,44E+07	2,98E+07
2013	12860	6,71E+06	8,22E+06	3,11E+07	3,81E+07
2014	13375	6,98E+06	8,55E+06	3,80E+07	4,66E+07
2015	13910	7,26E+06	8,89E+06	4,53E+07	5,55E+07
2016	14466	7,55E+06	9,25E+06	5,29E+07	6,47E+07
2017	15045	7,85E+06	9,62E+06	6,07E+07	7,44E+07
2018	15646	8,16E+06	1,00E+07	6,89E+07	8,44E+07
2019	16272	8,49E+06	1,04E+07	7,74E+07	9,48E+07
2020	16923	8,83E+06	1,08E+07	8,62E+07	1,06E+08
2021	17600	9,18E+06	1,12E+07	9,54E+07	1,17E+08
2022	18304	9,55E+06	1,17E+07	1,05E+08	1,29E+08
2023	19036	9,93E+06	1,22E+07	1,15E+08	1,41E+08
2024	19798	1,03E+07	1,27E+07	1,25E+08	1,53E+08
2025	20590	1,07E+07	1,32E+07	1,36E+08	1,67E+08
2026	21413	1,12E+07	1,37E+07	1,47E+08	1,80E+08
2027	22270	1,16E+07	1,42E+07	1,59E+08	1,94E+08
2028	23161	1,21E+07	1,48E+07	1,71E+08	2,09E+08

Tabela E 7 - FV empírico-mecanísticos para espectros do modelo log-normal - 120 psi

Tipo veículo	%	FV _{trincas}		FV _{afundamento}	
		Individual	Total	Individual	Total
2C	8,72%	1,455	0,13	0,553	0,05
2S1	8,41%	3,169	0,27	1,348	0,11
2S2	11,18%	2,577	0,29	1,015	0,11
2S3	27,40%	6,214	1,70	5,576	1,53
3C	7,41%	2,562	0,19	1,356	0,10
3D4	23,56%	7,211	1,70	5,730	1,35
3S3	13,32%	4,794	0,64	3,711	0,49
FV médio da frota		4,91		3,75	

Tabela E 8 - Número de solicitações com uso dos FV empírico-mecanísticos para os espectros modelo log-normal - 120 psi

Anos	VDMA	Número de solicitações no ano		Número de solicitações acumuladas	
		N _{atrincas}	N _{afundamento}	N _{trincas}	N _{afundamento}
2009	10993	9,46E+06	7,22E+06	9,46E+06	7,22E+06
2010	11433	9,84E+06	7,51E+06	1,93E+07	1,47E+07
2011	11890	1,02E+07	7,81E+06	2,95E+07	2,25E+07
2012	12366	1,06E+07	8,12E+06	4,02E+07	3,06E+07
2013	12860	1,11E+07	8,44E+06	5,12E+07	3,91E+07
2014	13375	1,15E+07	8,78E+06	6,27E+07	4,79E+07
2015	13910	1,20E+07	9,13E+06	7,47E+07	5,70E+07
2016	14466	1,24E+07	9,50E+06	8,72E+07	6,65E+07
2017	15045	1,29E+07	9,88E+06	1,00E+08	7,64E+07
2018	15646	1,35E+07	1,03E+07	1,14E+08	8,67E+07
2019	16272	1,40E+07	1,07E+07	1,28E+08	9,73E+07
2020	16923	1,46E+07	1,11E+07	1,42E+08	1,08E+08
2021	17600	1,51E+07	1,16E+07	1,57E+08	1,20E+08
2022	18304	1,58E+07	1,20E+07	1,73E+08	1,32E+08
2023	19036	1,64E+07	1,25E+07	1,89E+08	1,45E+08
2024	19798	1,70E+07	1,30E+07	2,06E+08	1,58E+08
2025	20590	1,77E+07	1,35E+07	2,24E+08	1,71E+08
2026	21413	1,84E+07	1,41E+07	2,43E+08	1,85E+08
2027	22270	1,92E+07	1,46E+07	2,62E+08	2,00E+08
2028	23161	1,99E+07	1,52E+07	2,82E+08	2,15E+08

Tabela E 9 - FV empírico-mecanísticos para espectros do modelo weibull - 80 psi

Tipo veículo	%	FV _{trincas}		FV _{afundamento}	
		Individual	Total	Individual	Total
2C	8,72%	0,807	0,070	0,413	0,04
2S1	8,41%	1,967	0,165	1,312	0,11
2S2	11,18%	1,490	0,167	0,802	0,09
2S3	27,40%	3,488	0,956	4,624	1,27
3C	7,41%	1,407	0,104	1,135	0,08
3D4	23,56%	4,251	1,002	5,484	1,29
3S3	13,32%	2,736	0,364	3,305	0,44
FV médio da frota		2,83		3,32	

Tabela E 10 - Número de solicitações com uso dos FV empírico-mecanísticos para os espectros modelo weibull - 80 psi

Anos	VDMA	Número de solicitações no ano		Número de solicitações acumuladas	
		N _{atrincas}	N _{afundamento}	N _{trincas}	N _{afundamento}
2009	10993	5,45E+06	6,39E+06	5,45E+06	6,39E+06
2010	11433	5,67E+06	6,65E+06	1,11E+07	1,30E+07
2011	11890	5,89E+06	6,91E+06	1,70E+07	2,00E+07
2012	12366	6,13E+06	7,19E+06	2,31E+07	2,71E+07
2013	12860	6,37E+06	7,48E+06	2,95E+07	3,46E+07
2014	13375	6,63E+06	7,78E+06	3,61E+07	4,24E+07
2015	13910	6,89E+06	8,09E+06	4,30E+07	5,05E+07
2016	14466	7,17E+06	8,41E+06	5,02E+07	5,89E+07
2017	15045	7,46E+06	8,75E+06	5,77E+07	6,77E+07
2018	15646	7,75E+06	9,10E+06	6,54E+07	7,68E+07
2019	16272	8,06E+06	9,46E+06	7,35E+07	8,62E+07
2020	16923	8,39E+06	9,84E+06	8,19E+07	9,61E+07
2021	17600	8,72E+06	1,02E+07	9,06E+07	1,06E+08
2022	18304	9,07E+06	1,06E+07	9,96E+07	1,17E+08
2023	19036	9,43E+06	1,11E+07	1,09E+08	1,28E+08
2024	19798	9,81E+06	1,15E+07	1,19E+08	1,40E+08
2025	20590	1,02E+07	1,20E+07	1,29E+08	1,51E+08
2026	21413	1,06E+07	1,25E+07	1,40E+08	1,64E+08
2027	22270	1,10E+07	1,30E+07	1,51E+08	1,77E+08
2028	23161	1,15E+07	1,35E+07	1,62E+08	1,90E+08

Tabela E 11 - FV empírico-mecanísticos para espectros do modelo weibull - 120 psi

Tipo veículo	%	FV _{trincas}		FV _{afundamento}	
		Individual	Total	Individual	Total
2C	8,72%	1,245	0,11	0,425	0,04
2S1	8,41%	3,109	0,26	1,344	0,11
2S2	11,18%	2,380	0,27	0,818	0,09
2S3	27,40%	5,737	1,57	4,759	1,30
3C	7,41%	2,362	0,18	1,160	0,09
3D4	23,56%	7,074	1,67	5,625	1,33
3S3	13,32%	4,553	0,61	3,382	0,45
FV médio da frota		4,66		3,41	

Tabela E 12 - Número de solicitações com uso dos FV empírico-mecanísticos para os espectros modelo weibull - 120 psi

Anos	VDMA	Número de solicitações no ano		Número de solicitações acumuladas	
		N _{atrincas}	N _{afundamento}	N _{trincas}	N _{afundamento}
2009	10993	8,97E+06	6,56E+06	8,97E+06	6,56E+06
2010	11433	9,33E+06	6,82E+06	1,83E+07	1,34E+07
2011	11890	9,70E+06	7,10E+06	2,80E+07	2,05E+07
2012	12366	1,01E+07	7,38E+06	3,81E+07	2,79E+07
2013	12860	1,05E+07	7,68E+06	4,86E+07	3,55E+07
2014	13375	1,09E+07	7,98E+06	5,95E+07	4,35E+07
2015	13910	1,13E+07	8,30E+06	7,08E+07	5,18E+07
2016	14466	1,18E+07	8,64E+06	8,26E+07	6,05E+07
2017	15045	1,23E+07	8,98E+06	9,49E+07	6,94E+07
2018	15646	1,28E+07	9,34E+06	1,08E+08	7,88E+07
2019	16272	1,33E+07	9,71E+06	1,21E+08	8,85E+07
2020	16923	1,38E+07	1,01E+07	1,35E+08	9,86E+07
2021	17600	1,44E+07	1,05E+07	1,49E+08	1,09E+08
2022	18304	1,49E+07	1,09E+07	1,64E+08	1,20E+08
2023	19036	1,55E+07	1,14E+07	1,80E+08	1,31E+08
2024	19798	1,62E+07	1,18E+07	1,96E+08	1,43E+08
2025	20590	1,68E+07	1,23E+07	2,13E+08	1,56E+08
2026	21413	1,75E+07	1,28E+07	2,30E+08	1,68E+08
2027	22270	1,82E+07	1,33E+07	2,48E+08	1,82E+08
2028	23161	1,89E+07	1,38E+07	2,67E+08	1,95E+08

Tabela D 13 - FV empírico-mecanísticos para espectros do modelo log-normal + weibull - 80 psi

Tipo veículo	%	FV _{trincas}		FV _{afundamento}	
		Individual	Total	Individual	Total
2C	8,72%	0,926	0,081	0,538	0,05
2S1	8,41%	1,996	0,168	1,316	0,11
2S2	11,18%	1,555	0,174	0,863	0,10
2S3	27,40%	3,519	0,964	4,654	1,28
3C	7,41%	1,475	0,109	1,204	0,09
3D4	23,56%	4,268	1,006	5,535	1,30
3S3	13,32%	2,765	0,368	3,330	0,44
FV médio da frota		2,87		3,37	

Tabela D 14 - Número de solicitações com uso dos FV empírico-mecanísticos para os espectros modelo log-normal + weibull - 80 psi

Anos	VDMA	Número de solicitações no ano		Número de solicitações acumuladas	
		N _{atrincas}	N _{afundamento}	N _{trincas}	N _{afundamento}
2009	10993	5,53E+06	6,48E+06	5,53E+06	6,48E+06
2010	11433	5,75E+06	6,74E+06	1,13E+07	1,32E+07
2011	11890	5,98E+06	7,01E+06	1,73E+07	2,02E+07
2012	12366	6,22E+06	7,29E+06	2,35E+07	2,75E+07
2013	12860	6,47E+06	7,58E+06	2,99E+07	3,51E+07
2014	13375	6,72E+06	7,89E+06	3,67E+07	4,30E+07
2015	13910	6,99E+06	8,20E+06	4,37E+07	5,12E+07
2016	14466	7,27E+06	8,53E+06	5,09E+07	5,97E+07
2017	15045	7,56E+06	8,87E+06	5,85E+07	6,86E+07
2018	15646	7,87E+06	9,23E+06	6,64E+07	7,78E+07
2019	16272	8,18E+06	9,60E+06	7,45E+07	8,74E+07
2020	16923	8,51E+06	9,98E+06	8,31E+07	9,74E+07
2021	17600	8,85E+06	1,04E+07	9,19E+07	1,08E+08
2022	18304	9,20E+06	1,08E+07	1,01E+08	1,19E+08
2023	19036	9,57E+06	1,12E+07	1,11E+08	1,30E+08
2024	19798	9,95E+06	1,17E+07	1,21E+08	1,41E+08
2025	20590	1,04E+07	1,21E+07	1,31E+08	1,54E+08
2026	21413	1,08E+07	1,26E+07	1,42E+08	1,66E+08
2027	22270	1,12E+07	1,31E+07	1,53E+08	1,79E+08
2028	23161	1,16E+07	1,37E+07	1,65E+08	1,93E+08

Tabela D 15 - FV empírico-mecanísticos para espectros do modelo log-normal + weibull - 120 psi

Tipo veículo	%	FV _{trincas}		FV _{afundamento}	
		Individual	Total	Individual	Total
2C	8,72%	1,455	0,13	0,553	0,05
2S1	8,41%	3,169	0,27	1,348	0,11
2S2	11,18%	2,497	0,28	0,881	0,10
2S3	27,40%	5,805	1,59	4,788	1,31
3C	7,41%	2,506	0,19	1,231	0,09
3D4	23,56%	7,104	1,67	5,678	1,34
3S3	13,32%	4,613	0,61	3,407	0,45
FV médio da frota		4,74		3,45	

Tabela D 16 - Número de solicitações com uso dos FV empírico-mecanísticos para os espectros modelo log-normal + weibull - 120 psi

Anos	VDMA	Número de solicitações no ano		Número de solicitações acumuladas	
		N _{atrincas}	N _{afundamento}	N _{trincas}	N _{afundamento}
2009	10993	9,12E+06	6,65E+06	9,12E+06	6,65E+06
2010	11433	9,49E+06	6,92E+06	1,86E+07	1,36E+07
2011	11890	9,87E+06	7,20E+06	2,85E+07	2,08E+07
2012	12366	1,03E+07	7,48E+06	3,87E+07	2,83E+07
2013	12860	1,07E+07	7,78E+06	4,94E+07	3,60E+07
2014	13375	1,11E+07	8,10E+06	6,05E+07	4,41E+07
2015	13910	1,15E+07	8,42E+06	7,21E+07	5,26E+07
2016	14466	1,20E+07	8,76E+06	8,41E+07	6,13E+07
2017	15045	1,25E+07	9,11E+06	9,66E+07	7,04E+07
2018	15646	1,30E+07	9,47E+06	1,10E+08	7,99E+07
2019	16272	1,35E+07	9,85E+06	1,23E+08	8,97E+07
2020	16923	1,40E+07	1,02E+07	1,37E+08	1,00E+08
2021	17600	1,46E+07	1,07E+07	1,52E+08	1,11E+08
2022	18304	1,52E+07	1,11E+07	1,67E+08	1,22E+08
2023	19036	1,58E+07	1,15E+07	1,83E+08	1,33E+08
2024	19798	1,64E+07	1,20E+07	1,99E+08	1,45E+08
2025	20590	1,71E+07	1,25E+07	2,16E+08	1,58E+08
2026	21413	1,78E+07	1,30E+07	2,34E+08	1,71E+08
2027	22270	1,85E+07	1,35E+07	2,52E+08	1,84E+08
2028	23161	1,92E+07	1,40E+07	2,72E+08	1,98E+08

APÊNDICE F – Curvas de desempenho geradas pelo MEPDG

Figura F 1 - Evolução das trincas longitudinais (propagação de cima para baixo) para as pressões de enchimento dos pneus de 80 e 120 psi - Espectros de carga por eixo dos modelos Log-Normal

Figura F 2 - Evolução das trincas por fadiga (propagação de baixo) para as pressões de enchimento dos pneus de 80 e 120 psi - Espectros de carga por eixo dos modelos Log-Normal

Figura F 3 - Evolução das deformações permanentes nas trilhas de rodas para as pressões de enchimento dos pneus de 80 e 120 psi - Espectros de carga por eixo dos modelos Log-Normal

Figura F 4 - Evolução da irregularidade longitudinal para as pressões de enchimento dos pneus de 80 e 120 psi - Espectros de carga por eixo dos modelos Log-Normal

Figura F 5 - Evolução das trincas longitudinais (propagação de cima para baixo) para as pressões de enchimento dos pneus de 80 e 120 psi - Espectros de carga por eixo dos modelos Log-normal + Weibull

Figura F 6 - Evolução das trincas por fadiga (propagação de baixo) para as pressões de enchimento dos pneus de 80 e 120 psi - Espectros de carga por eixo dos modelos Log-Normal +Weibull

Figura F 7 - Evolução das deformações permanentes nas trilhas de rodas para as pressões de enchimento dos pneus de 80 e 120 psi - Espectros de carga por eixo dos modelos Log-Normal + Weibull

Figura F 8 - Evolução da irregularidade longitudinal para as pressões de enchimento dos pneus de 80 e 120 psi - Espectros de carga por eixo dos modelos Log-Normal + Weibull