**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES**

DOUGLAS POLCARO NEGRÃO

**Contribuição para Calibração de Curva de Evolução de
Afundamentos em Trilha de Roda de Revestimentos
Asfálticos com Utilização de Resultados Obtidos de
Simulador de Tráfego em Escala Real**

São Paulo

2.012

DOUGLAS POLCARO NEGRÃO

**Contribuição para Calibração de Curva de Evolução de
Afundamentos em Trilha de Roda de Revestimentos
Asfálticos com Utilização de Resultados Obtidos de
Simulador de Tráfego em Escala Real**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do Título de Doutor em
Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia de Transportes

Orientadora:
Prof.^a Titular
Liedi Légi Bariani Bernucci

São Paulo

2.012

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 03 de Maio de 2012

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Negrão, Douglas Polcaro

Contribuição para calibração de curva de evolução de afundamentos em trilha de roda de revestimentos asfálticos com utilização de resultados obtidos de simulador de tráfego em escala real / D.P. Negrão. -- São Paulo, 2012.

211 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1. Pavimentação asfáltica 2. Ligantes 3. Asfalto 4. Deformação permanente em trilha de roda 5. Pista teste I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II. t.

DEDICATÓRIA

À minha família que me apoia incondicionalmente nos meus desafios. Minha esposa Andrea, meus filhos Fernanda, Eduardo e Patrícia e aos meus pais Maurício e Marta.

AGRADECIMENTOS

A Profa. Dra. Liedi Légi Bariani Bernucci pela confiança, orientação e tranquilidade transmitidas sempre ao longo deste trabalho.

Aos professores do Curso de Pós-Graduação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pelos ensinamentos transmitidos e ao Edson Moura, pela ajuda imprescindível na realização dos ensaios.

A OHL e Concessionária Autopista Litoral Sul que possibilitaram o desenvolvimento do estudo de caso.

A ANTT pelo financiamento da pesquisa da Pista Teste.

Aos amigos da Dynatest que sempre me incentivaram, em especial André Felipe Vale e o Felipe Flilizzola Camargo, por terem ajudado a tornar este trabalho em realidade.

Aos amigos da DuPont, em especial ao Sr. Silvério Giesteira e ao Sr. Bruno Pimentel Bezerra.

A minha família, a quem dedico este trabalho, e sempre me deu apoio para concluí-lo.

A todos que contribuíram diretamente ou indiretamente no desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

A deformação permanente em trilha de roda é uma patologia crítica de pavimentos asfálticos por afetar diretamente os custos de transporte, devido à redução de conforto ao rolamento, e a segurança dos usuários, dadas as dificuldades de dirigibilidade ou ainda o acúmulo de água nos períodos chuvosos comprometendo a aderência pneu-pavimento. Em pavimentos de rodovias concessionadas, onde existem limites máximos de afundamentos nas trilhas de roda bem rígidos para a aceitação da condição dos pavimentos, o monitoramento deve ser periódico por força contratual. Esta pesquisa tem como objetivo central propor uma metodologia para calibração de curvas de desempenho que prevejam a evolução dos afundamentos da trilha de roda de pavimentos asfálticos, com a utilização de resultados de deformação permanente obtidos de forma acelerada por meio de Simuladores de Tráfego em escala real, como contribuição aos projetos de pavimentação/restauração, aos programas de gerencia de pavimentos e ao planejamento rodoviário. Para tanto, foram dosadas e determinadas propriedades mecânicas de três diferentes misturas asfálticas a quente em laboratório, que foram aplicadas como revestimento asfáltico de três trechos consecutivos, em pista ascendente da BR 376/PR, na 3ª. faixa de tráfego, utilizada por veículos comerciais muito pesados e lentos. As três soluções diferentes para a camada de rolamento são compostas por: um concreto asfáltico com ligante modificado por SBS, um concreto asfáltico com ligante modificado por RET e um GAP-GRADED com ligante modificado por borracha de pneu moído. As pistas testes foram solicitadas de forma acelerada com um equipamento simulador de tráfego móvel, em tamanho real, que simulou 500 mil semiciclos de carga ou a quantidade de semiciclos necessários para atingir o limite de deformação em trilha de roda constante no contrato da Concessionária Autopista Litoral Sul, que administra o segmento onde se encontram as pistas testes, com o poder concedente. Com as medidas periódicas dos afundamentos em trilha de roda realizadas durante a aplicação de carga do simulador de tráfego em cada um dos três trechos, foram calibradas as equações de evolução de afundamentos em trilha de roda, empregando o modelo do HDM IV. Com base nos procedimentos adotados nesta pesquisa, foi proposto um método de calibração das curvas de desempenho para futuros estudos em que se empregam simuladores de tráfego em escala real.

ABSTRACT

Permanent deformation, or rutting, is a critical type of pavement distress given that it is directly associated with transportation costs, due to a reduction of the ride quality, and user safety, due to poor driving conditions or water build-up during rainy periods that affect the tire-pavement interaction. In the case of pavements of highways belonging to concessionaries, where strict limits are required by contract for acceptance of the pavement conditions, the pavement's monitoring must be frequent. The present study's main objective is to propose a methodology for calibration of performance curves that can predict the behavior of permanent deformation in asphalt pavements using results obtained from Full-Scale Accelerated Pavement Testing (APT) by means of a Traffic Simulator as a contribution to pavement design and rehabilitation projects, to pavement management software, and to highway planning. In order to do so, the mechanical properties of three different hot-mix asphalt (HMA) mixtures were determined in the laboratory and the mixtures were used as the surface course of three consecutive test sections in an ascending, slow lane on highway BR 376 used mainly by heavy commercial vehicles. The test sections were loaded using an HVS large scale mobile traffic simulator machine for up to 500 thousand loading cycles or until the permanent deformation limits defined in contract for the Concessionária Autopista Litoral Sul concession, which manages the highway sections where the test sections were built, were met. The results of the periodic monitoring of the permanent deformation of the three test sections under HVS loading were then used to calibrate the equations for predicting the pavement deformation behavior for each of the three types of mixtures tested using the HDM IV model. A method for future calibration of performance curves using full scale traffic simulators was proposed based on the procedures used in this study.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ilustração e vista geral da Pista Circular do IPR/DNER. Fonte: SILVA (2001)	17
Figura 2.2 – Área da UFRGS em que se encontra o simulador UFRGS-DAER/RS e vista do equipamento. Fonte: (NUÑEZ, 2006)	20
Figura 2.3 – Esquema Simplificado da Produção de Asfalto (PINTO, 1998)	40
Figura 2.4 – Esquema Simplificado da Produção de Asfalto (2 Estágios de Destilação) (PINTO, 1998)	41
Figura 2.5 – Esquema Simplificado da Produção de Asfalto (3 Estágios de Destilação) (PINTO, 1998)	42
Figura 2.6 – Conformação planar das moléculas de EVA (LEITE, 1999)	48
Figura 2.7 – Representação do Polímero SBS (DNER, 1998).....	49
Figura 2.8 – Polímero do tipo RET	50
Figura 2.9 – Representação do Polímero RET	51
Figura 2.10 - Reação do Asfalteno com Polímero do Tipo RET	51
Figura 2.11 - Asfalto Modificado com polímero não reativo, por ser uma modificação mecânica existe a possibilidade de segregação	52
Figura 2.12 - O polímero RET se mistura fisicamente com o asfalto evitando futuras separações	52
Figura 2.13 – Evolução do HDM ao longo do tempo (NDLI, 1995).....	59
Figura 3.1 – Mapa da localização da pista teste	77
Figura 3.2 – Curvas Granulométricas dos Agregados Empregados	83
Figura 3.3 – Curva Granulométrica - SPV 12,5 mm com SBS.....	85
Figura 3.4 – Curva Granulométrica - SPV 12,5 mm com RET	85
Figura 3.5 – Curva Granulométrica - GAP-GRADED com Borracha.....	86
Figura 3.6 – Misturadora.....	91

Figura 3.7 – Mesa Compactadora tipo LCPC	92
Figura 3.8 – Simulador LPC	93
Figura 3.9 – Vista geral do local das Pistas Teste.....	95
Figura 3.10 - Vista do Falling Weight Deflectometer Dynatest 8000 E.....	98
Figura 3.11 – Equipamento Perfilômetro Laser Utilizado	100
Figura 3.12 – Ficha de Campo do Levantamento Visual Detalhado (LVD)	102
Figura 3.13 – Levantamento da Trilha de Roda com a utilização da Trelça	102
Figura 3.14 – Perfil Deflectométrico	103
Figura 3.15 – Perfil de Irregularidade Longitudinal em termos de IRI	104
Figura 3.16 – Perfil das Trilhas de Roda	105
Figura 3.17 – Fotos da Pista 1 – GAP – Janeiro 2011	105
Figura 3.18 – Fotos da Pista 2 – SBS – Janeiro 2011	106
Figura 3.19 – Fotos da Pista 3 - RET– Janeiro 2011	106
Figura 3.20 – Controle Automatizado para Aquisição dos Dados.....	107
Figura 3.21 – Célula de Carga no Semi-Eixo do Simulador.....	107
Figura 3.22 – Fechamento e Colocação de Lâmpadas para Controle da Temperatura	108
Figura 3.23 – Transporte e posicionamento do Simulador de Tráfego Linear Móvel	108
Figura 3.24 – Locação da seção teste.....	109
Figura 3.25 – Calibração / Aferição de cargas.....	109
Figura 3.26 – Pluviômetro	111
Figura 3.27 – Monitoramento dos pavimentos com ensaios deflectométricos	112
Figura 3.28 – Controle da evolução de defeitos na superfície	112
Figura 3.29 – Monitoramento de flecha em trilha de roda com trelça metálica	113
Figura 3.30 – Ensaios com Pêndulo Britânico e de mancha de areia	113
Figura 3.31 – Modelo da Planilha de Acompanhamento das Avaliações.....	114

Figura 3.32 – Acompanhamento da Temperatura no Simulador no Trecho 2 – SBS	115
Figura 3.33 – Pluviometria no Simulador no Trecho 2 – SBS	116
Figura 3.34 – Deflexões no Simulador no Trecho 2 – SBS	116
Figura 3.35 – Evolução da Trilha de Roda no Trecho 2 - SBS.....	117
Figura 3.36 – Evolução da Trilha de Roda no Bordo Externo Trecho 2 - SBS	118
Figura 3.37 – Evolução VRD no Trecho 2 – SBS	119
Figura 3.38 – Evolução da Mancha de Areia no Trecho 2 – SBS	119
Figura 3.39 – Temperatura no Simulador no Trecho 1 – RET	120
Figura 3.40 – Pluviometria no Simulador no Trecho 1 - RET.....	121
Figura 3.41 – Deflexões no Simulador no Trecho 1 – RET	121
Figura 3.42 – Evolução da Trilha de Roda no Trecho 1 - RET	122
Figura 3.43 – Evolução da Trilha de Roda no Bordo Externo do Trecho 1 - RET..	123
Figura 3.44 – Acompanhamento da Evolução da Trilha de Roda no Bordo Interno do Trecho 1 - RET.....	123
Figura 3.45 – Acompanhamento da Evolução VRD no Trecho 1 - RET	124
Figura 3.46 – Evolução da Mancha de Areia no Trecho 1 – RET	125
Figura 3.47 – Temperatura no Simulador no Trecho 3 – GAP.....	126
Figura 3.48 – Pluviometria no Simulador no Trecho 1 – RET	126
Figura 3.49 – Deflexões no Simulador no Trecho 3 – GAP	127
Figura 3.50 – Evolução da Trilha de Roda no Eixo Trecho 3 – GAP.....	128
Figura 3.51 – Evolução da Trilha de Roda no Bordo Interno do Trecho 3 - GAP ..	128
Figura 3.52 – Evolução da Trilha de Roda no Bordo Externo do Trecho 3 - GAP .	129
Figura 3.53 – Evolução VRD no Trecho 3 - GAP	129
Figura 3.54 – Evolução da Mancha de Areia no Trecho 3 – GAP.....	130
Figura 4.1 – Evolução da Deflexão Máxima nas Pistas Experimentais.....	131
Figura 4.2 – Evolução da Irregularidade Longitudinal	132

Figura 4.3 – Evolução da Deformação da Trilha de Roda.....	133
Figura 4.4- Estrutura do Pavimento na Seção 2 – SBS.....	139
Figura 4.5- HDM para a Seção 2 – SBS com o $K_{rst}=1/K_{rpd}=0$, padrões do sistema.....	140
Figura 4.6 – Calibração Curva SBS – Tentativas 1 a 6.....	141
Figura 4.7 – Calibração Curva SBS – Tentativas 7 a 11.....	142
Figura 4.8 – Calibração Curva SBS – Tentativas 12 a 17.....	143
Figura 4.9 – Calibração Curva SBS – Tentativas 18 a 23.....	144
Figura 4.10 – Calibração Curva SBS – Tentativas 24 a 29.....	145
Figura 4.11 – Curva que melhor aproximou na Seção 2 – SBS.....	147
Figura 4.12 - Estrutura do Pavimento na Seção 1 – RET	149
Figura 4.13- HDM para a Seção 1 – RET com o $K_{rst}=1/K_{rpd}=0$, padrões do sistema.....	150
Figura 4.14 – Calibração Curva RET – Tentativas 1 a 6	151
Figura 4.15 – Calibração Curva RET – Tentativas 7 a 11	152
Figura 4.16 – Calibração Curva RET – Tentativas 12 a 17	153
Figura 4.17 – Calibração Curva RET – Tentativas 18 a 23	154
Figura 4.18 – Calibração Curva RET – Tentativas 24 a 29	155
Figura 4.19 – Curva que melhor aproximou na Seção 1 – RET	157
Figura 4.20 - Estrutura do Pavimento na Seção 3 – GAP.....	159
Figura 4.21- HDM para a Seção 3 – GAP com o $K_{rst}=1/K_{rpd}=0$, padrões do sistema.....	160
Figura 4.22 – Calibração Curva GAP – Tentativas 1 a 6.....	161
Figura 4.23 – Calibração Curva GAP – Tentativas 7 a 11.....	162
Figura 4.24 – Calibração Curva GAP – Tentativas 12 a 17.....	163
Figura 4.25 – Calibração Curva GAP – Tentativas 18 a 23.....	164
Figura 4.26 – Calibração Curva GAP – Tentativas 24 a 29.....	165

Figura 4.27 – Curva que melhor aproximou na Seção 3 – GAP.....	167
Figura 4.28 – Curvas Calibradas para as três pistas teste	167
Figura 4.29 – Evolução da Trilha de Roda para Rodovia de Tráfego Elevado	168
Figura 5.1 – Método para Calibração de Curvas de Desempenho com Simulador de Tráfego de Verdadeira Grandeza	170

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – A matriz de transporte do Brasil (Site ANTT, 2011).....	1
Tabela 1.2 – Condição da Malha Rodoviária Brasileira (Site CNT, 2011)	2
Tabela 2.1 – Síntese das Pesquisas realizadas na Pista Circular do IPR/DNER.....	17
Tabela 2.2 – Resumo das principais pesquisas com o simulador UFRGS-DAER/RS.....	21
Tabela 2.3 – Características do Simulador de Tráfego Linear Móvel	22
Tabela 2.4 – Pesquisas realizadas com Simulador de Tráfego Linear Móvel no Brasil	23
Tabela 2.5 – Critérios decisórios a serem observados na Concepção da Pesquisa com o Simulador de Tráfego Linear Móvel (VALE, 2008)	25
Tabela 2.6 – Critérios decisórios a serem observados na Definição dos Locais com o Simulador de Tráfego Linear Móvel (VALE, 2008)	26
Tabela 2.7 – Critérios decisórios a observar na Definição do Tráfego a ser aplicado pelo Simulador Linear Móvel (VALE, 2008).....	29
Tabela 2.8 – Critérios decisórios em relação às Condições Climáticas em pesquisas com Simulador Linear Móvel (VALE, 2008).....	32
Tabela 2.9 – Critérios para Execução das Pistas Experimentais destinadas a ensaios com Simulador Linear Móvel (VALE, 2008).....	33
Tabela 2.10 – Critérios de Operação do Simulador de Tráfego Linear Móvel e monitoramento do Pavimento de seção-teste (VALE, 2008).....	34
Tabela 2.11 – Ensaio complementares e posteriores a simulação de tráfego com o Simulador de Tráfego Linear Móvel.....	37
Tabela 2.12 – Configuração dos polímeros.....	45
Tabela 2.13 – Fatores a serem calibrados no HDM (Manual do HDM).....	61
Tabela 2.14 - Níveis de Qualidade da Informação (Pettersen e Scullion, 1990)	62
Tabela 2.15: Escopos dos estudos no Kenya e Brasil (NDLI, 1995).....	63

Tabela 2.16 – Tipos de Pavimentos do HDN (NDLI, 1995)	65
Tabela 2.17 - Valores padrões para os coeficientes do modelo de consolidação inicial.....	69
Tabela 2.18 - Valores padrões para os coeficientes do modelo de deformação estrutural.....	71
Tabela 2.19 - Valores padrões para os coeficientes do modelo de deformação plástica.....	72
Tabela 3.1 – Tipos de Cimentos Asfálticos utilizados.....	76
Tabela 3.2 – Identificação e localização de cada trecho da pista teste	77
Tabela 3.3 – Análise Granulométrica dos Agregados.....	83
Tabela 3.4 – Análise Granulométrica dos Agregados.....	84
Tabela 3.5 – Características dos Ligantes	86
Tabela 3.6 – Características da Mistura Asfáltica.....	94
Tabela 3.7 – Segmentos do Trecho Experimental	95
Tabela 3.8 – Controle de Execução da Pista 1 (km 672 ao km 671,3) – GAP-GRADED com asfalto-borracha	96
Tabela 3.9 – Controle de Execução da Pista 2 (km 671,3 ao km 670,6) – CA com ligante modificado por SBS	96
Tabela 3.10 – Controle de Execução da Pista 3 (km 670,6 ao km 670,0) - CA com ligante modificado por RET.....	97
Tabela 3.11 – Resumo das Deflexões Encontradas	103
Tabela 3.12 – Resumo dos valores de IRI encontrados	104
Tabela 3.13 – Resumo dos valores de Trilha de Roda encontrados	105
Tabela 3.14 – Ordem de Avaliação das Seções Teste.....	115
Tabela 4.1 – Resumo da Área com Defeitos – Fevereiro 2011	133
Tabela 4.2 – Comparação Entre os Resultados do Monitoramento de do HVS	135
Tabela 4.3 – Tráfego AASHTO ao ano com Taxa de Crescimento de 3% ao ano..	136
Tabela 4.4 – Semiciclos Equivalentes ao NAASHTO calc. para Seção2–SBS.....	138
Tabela 4.5 – Evolução da Deformação da Trilha de Roda em mm - SBS.....	139

Tabela 4.6 – Tentativas para calibração da curva de evolução da trilha de roda - SBS.....	140
Tabela 4.7 – Valores do RMS - SBS.....	146
Tabela 4.8 – Coeficiente de Variação - SBS.....	146
Tabela 4.9 – Semiciclos Equivalentes ao NAASHTO calc. para Seção1–RET	148
Tabela 4.10 – Evolução da Deformação da Trilha de Roda em mm – RET.....	149
Tabela 4.11 – Tentativas para calibração da curva de evolução da trilha de roda - RET	150
Tabela 4.12 – Valores do RMS - RET	156
Tabela 4.13 – Coeficiente de Variação - RET	156
Tabela 4.14 – Semiciclos Equivalentes ao NAASHTO calc. para Seção 3 – GAP. 158	
Tabela 4.15 – Evolução da Deformação da Trilha de Roda em mm – GAP	159
Tabela 4.16 – Tentativas para calibração da curva de evolução da trilha de roda- GAP.....	160
Tabela 4.17 – Valores do RMS - GAP.....	166
Tabela 4.18 – Coeficiente de Variação - GAP.....	166

LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALF	<i>Accelerated Loading Facility</i>
APA	Analisador de Pavimento Asfáltico
APT	Ensaio acelerados de pavimentos
ARTESP	Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transporte do Estado de São Paulo
ASFALCHILE	Empresa Asfaltos Chilenos S/A
ASTM	<i>American Society of Testing Materials</i>
Autovias	Concessionária Autovias S/A
CA	Concreto Asfáltico
CalTrans	Departamento de Transporte do Estado da Califórnia
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
Capflex-B	Asfalto borracha produzido pela BR Distribuidora
CBR	California Bearing Ratio
CBUQ	Concreto betuminoso usinado a quente
CCP	Concreto Cimento Portland
CCR	Concreto Compactado a Rolo
CEDEX	Centro de Estudos e Experimentos de Obras Públicas
CIENTEC	Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul
COPPE/UFRJ	Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro
CRT	Concessionária Rio Teresópolis
CSIR	<i>Council for Cientific and Industrial Research</i>
CST	Companhia Siderúrgica de Tubarão
CV	Coefficiente de variação

DAER/RS	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul
DERSA	Desenvolvimento Rodoviário S/A
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes
Ecoflex-b	Asfalto borracha produzido pela Greca Asfaltos
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
FABAC	<i>Fatigue du béton armé contin</i>
FC	Fator de Carga
FEC	Fator de Equivalência de Carga
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FCL	Fator campo-laboratório
FORCE	<i>First OCDE Research Common Experiment</i>
FV	Fator de veículo
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
GC	Grau de compactação
GEIPOT	Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes
GPR	<i>Ground Penetrating Radar</i>
HDM	<i>Highway Design and Maintenance Model</i>
HS	Altura de areia
HVS	<i>Heavy Vehicle Simulator</i>
ICPF	Índice de Condição de Pavimentos Flexíveis
IES	Índice de Estado de Superfície
IFI	<i>International Friction Index</i>
IGG	Índice de Gravidade Global
Intervias	Concessionária Rodovias Interior Paulista SA
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
IRI	<i>International Roughness Index</i>
IS	Índice de Suporte Califórnia
ISSA	<i>International Slurry Surfacing Association</i>
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Lisboa

LTPP	<i>Long-Term Pavement Performance Program</i>
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformers</i>
LWT	<i>Loaded Wheel Test</i>
MICRO	Microrrevestimento asfáltico a frio
Mn/DOT	Departamento de Transportes de Minesota
Mn/ROAD	<i>Minnesota Road Research Project</i>
MR	Módulo de resiliência
NCAT	<i>National Center for Asphalt Technology</i>
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
NDT	Ensaio não-destrutivo
NovaDutra	Concessionária da Rodovia Presidente Dutra
OCDE	Organização de Cooperação e Desenvolvimento Econômico
PIARC	<i>Permanent International Association of Road Congress</i>
PICR	Pesquisa de Inter-relacionamento de Custos Rodoviários
PVC	<i>Polyvinyl Chloride</i>
QI	Quociente de Irregularidade
RT	Resistência à tração por compressão diametral
RRT	Razão da resistência à tração
SAMI	Camada intermediária anti-reflexão de trincas
SBS	Estireno-butadieno-estireno
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
Superpave	<i>Superior Performance Asphalt Pavements</i>
TFHRC	<i>Turner Fairbank Highway Research Center</i>
TSD	Tratamento Superficial Duplo
TSS	Tratamento Superficial Simples
TSSpol	Tratamento Superficial Simples com polímero
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
USACE	<i>United States Corp of Engineers</i>
USAE-WES	<i>Waterways Experiment Station</i>
USP	Universidade de São Paulo
VAM	Vazios do agregado mineral
VDM	Volume diário médio de tráfego

VRD	Valor de resistência a derrapagem
VV	Volume de vazios
WTUD	<i>Whitetopping</i> ultradelgado

LISTA DE SÍMBOLOS

$\pm$	Mais ou menos
#	Número
%	Porcentagem
”	Polegadas
cm	Centímetro
cm/s	Centímetro por segundo
cP	Centipoise
CV	Cavalo vapor
D	Diâmetro do corpo-de-prova
Df1	Deflexão medida sob a ação da carga
Df1-Df4	Diferença entre a deflexão medida sob a ação da carga e a medida a 45cm da mesma
E	Módulo de elasticidade estático
e	Deformação específica de tração
eV	Deformações verticais de compressão do subleito
FC-1	Trinca classe 1
FC-2	Trinca classe 2
FC-3	Trinca classe 3
fck	Resistência característica à compressão simples
fctM,k	Resistência característica à tração na flexão
g/m ²	Grama por metro quadrado
H	Altura do corpo-de-prova
HP	Cavalo de força
Hz	Hertz
kg	Quilograma
kg cm N	Quilograma centímetro Newton
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
kgf/cm ²	Quilograma força por centímetro quadrado

kgf/dm ²	Quilograma força por decímetro quadrado
kgf/m ²	Quilograma força por metro quadrado
km	Quilômetro
km/h	Quilômetro por hora
kN	Quilonewton
kPa	Quilopascal
l	Litro
l/m ²	Litro por metro quadrado
m	Metro
ν	Coefficiente de Poisson
m/km	Metro por quilômetro
m/m ²	Metro por metro quadrado
m ²	Metro quadrado
l/m ³	Litro por metro cúbico
ml/m ³	Mililitro por metro cúbico
mm	Milímetro
mm ²	Milímetro quadrado
MPa	Megapascal
N	Número equivalente de operações do eixo padrão rodoviário
Nm	Newton metro
O/C	Relação operação-cobertura
oC	Graus Celsius
P	Poise
RPM	Rotações por minuto
s	Desvio padrão
sSF	Segundo Saybolt Furol
t	Tonelada
tf	Tonelada força
V	Volt
W	Trabalho total
Wi	Carga por eixo genérica
Wp	Carga por eixo tomada como padrão

WRO Energia de ligação por unidade de volume

SUMÁRIO

1. APRESENTAÇÃO.....	1
1.1. Introdução.....	1
1.2. Objetivos	4
1.3. Estrutura do Trabalho.....	4
2. Revisão Bibliográfica	7
2.1. O Estudo com Simuladores de Tráfego.....	7
2.1.1. Simuladores de tráfego em escala real	9
2.1.1.1. Introdução.....	9
2.1.1.2. Histórico	14
2.1.1.3. Experiências Nacionais com Simuladores de Tráfego	15
2.1.1.3.1. Pista Circular do IPR	15
2.1.1.3.2. Simulador UFRGS-DAER/RS	18
2.1.1.3.3. Simulador de Tráfego Linear Móvel	21
2.1.1.4. Método para Simulações de Tráfego com Equipamento Móvel	24
2.2. Ligantes Asfálticos de Alto Desempenho	38
2.2.1. Asfaltos	38
2.2.2. Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP).....	42
2.2.3. Asfaltos Modificados.....	43
2.2.4. Polímeros Modificadores de Asfalto.....	43
2.2.4.1. Polímero SBR	47
2.2.4.2. Polímero EVA.....	47

2.2.4.3.	Polímero SBS	49
2.2.4.4.	Polímero RET	50
2.2.4.5.	Borracha	53
2.3.	Previsão de Desempenho (HDM IV)	57
2.3.1.	Modelos Mecanísticos e Empíricos	66
2.3.2.	Modelo Absoluto e Incremental	67
2.3.3.	Curva de Evolução da Trilha de Roda do HDM-4	68
2.3.3.1.	Consolidação Inicial	68
2.3.3.2.	Deformação Estrutural (DRDST)	70
2.3.3.3.	Deformação Plástica	71
2.3.3.4.	Desgaste de Superfície	72
2.3.3.5.	Deformação Permanente Total (DRDM)	73
3.	Materiais, Métodos e Resultados dos Estudos em Laboratório e em Pista	75
3.1.	Antecedentes	75
3.2.	Estudo em Laboratório e em Pista	81
3.2.1.	Estudo em Laboratório	81
3.2.1.1.	Agregados	82
3.2.1.1.1.	Origem	82
3.2.1.1.2.	Análise Granulométrica	82
3.2.1.1.3.	Curvas Granulométricas	83
3.2.1.2.	Ligantes Asfálticos	86
3.2.1.3.	Dosagem dos Teores Ótimos	87
3.2.1.3.1.	Métodos de Caracterização das Misturas	87
3.2.2.	Estudo em Pista	94
3.2.2.1.	Campanhas de Acompanhamento das Pistas Experimentais	97
3.2.2.1.1.	Equipamentos e Ensaios Realizados	98

3.2.2.1.1.1.	Levantamento Deflectométrico (FWD)	98
3.2.2.1.1.2.	Irregularidade Longitudinal (IRI).....	99
3.2.2.1.1.3.	Levantamento Visual Detalhado e Medição da Trilha de Roda..	101
3.2.2.1.2.	Resultados Encontrados	102
3.2.2.1.2.1.	Levantamento Deflectométrico (FWD)	103
3.2.2.1.2.2.	Irregularidade Longitudinal (IRI).....	103
3.2.2.1.2.3.	Deformação Permanente da Trilha de Roda (mm).....	104
3.2.2.2.	Simulador de Tráfego Linear Móvel	106
3.2.2.2.1.	Acompanhamento no Simulador	110
3.2.2.2.1.1.	Identificação da seção-teste	110
3.2.2.2.1.2.	Identificação do carregamento	110
3.2.2.2.1.3.	Condicionantes Ambientais.....	111
3.2.2.2.1.4.	Condição Estrutural	111
3.2.2.2.1.5.	Condição Funcional	112
3.2.2.2.1.6.	Condição de Segurança	113
3.2.2.2.1.7.	Comentários Adicionais.....	114
3.2.2.2.2.	Resultados	114
3.2.2.2.2.1.	Seção 2 – SBS – km 671+186	115
3.2.2.2.2.2.	Seção 1 – RET – km 670+231	120
3.2.2.2.2.3.	Seção 3 – GAP-GRADED – km 671+618	125
4.	Resultados da Pesquisa	131
4.1.	Análise dos Resultados.....	131
4.1.1.	Resultados do Monitoramento das Pistas Teste	131
4.1.2.	Resultados do Simulador de Tráfego	134
4.2.	Calibração dos Modelos de desempenho de flecha de trilha de roda.....	136
4.2.1.	Calibração da Seção 2 – SBS – km 671+186.....	137

4.2.2.	Calibração da Seção 1 – RET – km 670+231	147
4.2.3.	Calibração da Seção 3 – GAP-GRADED – km 671+618.....	157
4.2.4.	Observações Referentes às Calibrações Realizadas.....	167
5.	Metodologia Proposta	170
6.	Conclusões e Recomendações.....	175
6.1.	Resultados do Monitoramento das Pistas Teste	175
6.2.	Resultados do Simulador de Tráfego	176
6.3.	Calibração das Curvas.....	177
6.4.	Metodologia Proposta	178
6.5.	Recomendações e Sugestões de Continuidade de Pesquisa	178
	REFERÊNCIAS	179

1. APRESENTAÇÃO

1.1. Introdução

O transporte rodoviário no Brasil é a principal forma de escoamento da produção e de deslocamento de passageiros. Segundo dados do Site da ANTT, no ano de 2006 (Tabela 1.1) cerca de 60% da carga no país foram transportadas por nossas rodovias. O PNTL – Plano Nacional de Transporte e Logística do governo federal conta com um reequilíbrio na matriz de transporte de carga até 2025, com um aumento expressivo das cargas transportadas pelo modo ferroviário. No entanto, uma vez que o sistema rodoviário se encontra saturado, os investimentos neste setor pelo Estado e pelas empresas privadas por meio de concessões deverão ser crescentes pois o déficit da malha pavimentada é ainda um dos gargalos econômicos do país. A malha rodoviária é uma das maiores do mundo com mais de 1,8 milhão de quilômetros, embora apenas 220.000 sejam pavimentadas.

Tabela 1.1 – A matriz de transporte do Brasil (Site ANTT, 2011)

Modal	Brasil (%)
Rodoviário	58,0
Ferrovário	25,0
Aquaviário	13,0
Aeroviário/Dutoviário	4,0

Em 1954 o Brasil registrava 1.200 quilômetros de rodovias pavimentadas, em 1970 este número atingiu 50.590 km e em 1990 chegou a 148.121 km. Atualmente são pouco mais de 212.000 km (Ministério dos Transportes, 2005/ Site CNT, 2011).

Em pesquisa realizada regularmente pela Confederação Nacional dos Transportes (CNT), constatou-se que, dos 92.747 km de rodovias percorridos em 2011, 14% dos pavimentos encontravam-se em condições “Ruim”/“Péssimo”, 33,9% em estado “Regular”, 5,5% “Bom” e 46,6% “Ótimo” (Site CNT, 2011 – Tabela 1.2). Números ainda tímidos pela importância econômica do setor. Segundo estudos da Cepal, as

rodovias em más condições estão causando prejuízos ao Brasil da ordem de 3% do valor do PIB (Ministério dos Transportes, 2005).

Tabela 1.2 – Condição da Malha Rodoviária Brasileira (Site CNT, 2011)

Pavimento	2011		2010	
	km	%	km	%
Ótimo	43.223	46,6	40.471	44,5
Bom	5.035	5,5	8.738	9,6
Regular	31.429	33,9	29.810	32,8
Ruim	10.432	11,2	9.706	10,7
Péssimo	2.618	2,8	2.220	2,4
Total	92.747	100,0	90.945	100,0

Informações do DNIT (2010) mostram que somente em 2010 entre, nas rodovias federais pavimentadas 8.616 pessoas perderam a vida e 102.896 ficaram feridas, em 317.711 veículos acidentados.

Por este cenário, pode-se perceber a importância de uma política séria voltada à manutenção das rodovias existentes, fator imprescindível para a melhoria das condições de segurança e conforto aos usuários. A melhoria do conforto ao rolamento implicará também na redução dos custos operacionais.

Neste contexto a utilização de novas tecnologias e a otimização dos processos existentes torna-se um fator imprescindível. Para tanto é muito importante que as ações de planejamento, gerenciamento e projeto de pavimentos utilizem modelos matemáticos que prevejam o desempenho das rodovias com mais precisão. Apenas a aplicação dos modelos existentes, da forma como foram concebidos, com materiais e condições climáticas distintas das nossas atuais, faz com que os erros sejam majorados e o planejamento fique muito distante da realidade, diminuindo o nível de confiabilidade das previsões de comportamento dos pavimentos.

Existem diversos modelos matemáticos desenvolvidos para previsão de desempenho de pavimentos, estes modelos se dividem primordialmente em dois tipos: os modelos

empíricos, que levam em consideração o comportamento de pavimentos existentes para preverem evoluções futuras e os modelos mecanísticos, que através das características intrínsecas dos materiais tentam prever como o pavimento deve se comportar quando solicitados pelo tráfego.

Um dos modelos mais utilizados é o proposto pelo HDM (*Highway Design and Management*). Os modelos do HDM são amplamente utilizados por consultores, agências e departamentos governamentais para avaliar as consequências econômicas de investimentos na infraestrutura rodoviária. Desde 1987, quando foi lançada a versão 3 do programa este é utilizado em mais de 98 países (NDLI, 1995).

O HDM teve seu estudo iniciado em 1969, em países da África, Ásia, Caribe e América Latina, objetivando a qualificação empírica rigorosa do equilíbrio dos custos de construção e manutenção da rodovia e operação dos veículos, e o desenvolvimento de modelos de planejamento que incorporassem a simulação dos custos totais no ciclo de vida de um pavimento como base de tomada de decisão rodoviária.

O modelo de evolução de trilha de roda do HDM é bastante utilizado no Brasil em gerência de pavimentos e na análise financeira de investimentos com financiamento dos bancos de fomento internacionais, porém os fatores de calibração utilizados são sempre os propostos como padrão pelo programa.

Entendendo a importância do emprego de modelos de desempenho consistentes com as realidades locais, a presente pesquisa propõe uma metodologia para a calibração de curvas de previsão de desempenho. Para tanto realizou-se um estudo com três tipos de revestimentos asfálticos empregando três diferentes ligantes asfálticos de elevado desempenho mecânico que foram solicitados por meio de um simulador de tráfego linear móvel; os resultados de afundamentos obtidos serviram como base para a calibração do modelo do HDM para evolução da deformação da trilha de roda. O sucesso deste estudo permite a proposição da metodologia em questão.

1.2. Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo central propor uma metodologia para calibração de modelos matemáticos de evolução da deformação permanente em trilha de roda de pavimentos asfálticos com a utilização de resultados obtidos com a aplicação de Simulador Linear Móvel de Tráfego como recurso de aceleração das solicitações de carga. Para tanto foram estudados em laboratório três tipos de misturas asfálticas usinadas a quente: concreto asfáltico com ligante modificado por SBS, concreto asfáltico com ligante modificado por RET e um GAP-GRADED com asfalto-borracha. Estas três misturas foram selecionadas, dentre 10 soluções asfálticas pesquisadas anteriormente no mesmo local, por apresentarem os três melhores desempenhos para resistirem à deformação permanente em trilha de roda. As três misturas asfálticas foram aplicadas como camada de rolamento em uma pista teste na BR-376/PR, em via com elevado aative, localizada na terceira faixa de tráfego, normalmente utilizada por veículos comerciais pesados e lentos. As pistas testes foram solicitadas com equipamento simulador de tráfego linear móvel em tamanho real do tipo HVS, que simulou 500 mil semiciclos de carga ou a quantidade de semiciclos necessários para atingir o limite máximo de afundamento em trilha de roda de acordo com o contrato de concessão da Autopista Litoral Sul, que administra o segmento onde se encontram as pistas testes. Com os resultados obtidos por monitoramentos periódicos durante os ensaios com o Simulador de tráfego, calibraram-se as curvas do modelo de evolução da trilha de roda obtidas através de simulações computacionais, utilizando-se o software computacional HDM IV. Com base nos estudos efetuados, propôs-se um método para futuras pesquisas que objetivam a calibração de modelos matemáticos de curvas de desempenho de pavimentos com a utilização de simuladores de tráfego.

1.3. Estrutura do Trabalho

A “Contribuição para Calibração de Curva de Evolução de Afundamentos em Trilha de Roda de Revestimentos Asfálticos com Utilização de Resultados Obtidos de

Simulador de Tráfego em Escala Real” está consubstanciada nos seis capítulos desta pesquisa.

O Capítulo 1 - Apresentação - Introduz o tema da tese no contexto do desenvolvimento tecnológico rodoviário e apresenta os objetivos e as etapas do estudo.

O Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica - Discorre sobre as experiências na realização de estudos com a utilização de simuladores de tráfego no Brasil e no Exterior. Neste capítulo são abordados também temas como os tipos de ligantes utilizados na pesquisa e o modelo constante no programa HDM.

No Capítulo 3 - Estudo em Laboratório e em Pista – Apresenta inicialmente a pesquisa que precedeu o presente trabalho e orientou a definição dos tipos de ligantes/mistura asfálticas que foram utilizados no presente estudo. Este capítulo aborda os estudos realizados em laboratório e as pistas testes, incluindo os aspectos relevantes da dosagem das misturas asfálticas, os ensaios laboratoriais realizados, os segmentos experimentais executados, bem como os controles tecnológicos efetuados durante a sua execução. São mostrados todos os resultados dos ensaios acelerados realizados em pista com o simulador de tráfego linear móvel e os ensaios de acompanhamento realizados, além dos monitoramentos nos segmentos não simulados.

O Capítulo 4 - Resultados da Pesquisa – Analisa os resultados encontrados no monitoramento dos trechos simulados e apresenta a calibração das curvas de evolução da trilha de roda do HDM IV para cada um dos revestimentos asfálticos estudados.

O Capítulo 5 - Proposição de um Método para utilização de Simuladores Lineares Móveis de Tráfego como recurso de aceleração de solicitação de carga para calibração de Curvas de Desempenho de pavimentos asfálticos.

O Capítulo 6 – São apresentadas as conclusões obtidas através da análise dos resultados e as sugestões para as próximas pesquisas a serem realizadas sobre este assunto.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. O Estudo com Simuladores de Tráfego

As atuais práticas para o dimensionamento de estruturas de pavimentos, tanto no que se refere à seleção de materiais quanto no que tange à determinação de suas espessuras, estão fundamentadas nos resultados de diversos experimentos em escala real por todo o mundo, alguns executados de forma acelerada e a maioria em pistas testes em rodovias em serviço (METCALF, 1996).

Muitos são os estudos realizados com o objetivo de propiciar informações e ferramentas aos técnicos responsáveis pelo processo de tomada de decisão, capazes de auxiliá-los nas atividades de projeto e manutenção dos pavimentos. Os procedimentos que podem ser utilizados para prever o comportamento dos pavimentos, sob o efeito das cargas e do clima, são quatro: ensaios de laboratório, simuladores de tráfego de laboratório, simuladores de tráfego de campo e pistas testes com tráfego real (FRITZEN, 2005a).

Deve-se observar que a escolha de um ou outro procedimento para prever o comportamento de um pavimento deve ser feita em função dos objetivos a serem alcançados, do grau de detalhamento desejado e dos recursos disponíveis. Contudo, muitas vezes é empregado mais de um procedimento para se prever o comportamento de um pavimento.

O desenvolvimento de modelos que representem o comportamento de um pavimento inicia-se com os ensaios laboratoriais, para se simular tensões e deformações em determinada situação particular, empregando-se cargas estáticas nos materiais de pavimentação, confinados em condições pré-estabelecidas. Tais procedimentos evoluíram a partir da década de 1930 para o emprego de ensaios com cargas repetidas e de sistemas de múltiplas camadas, além do emprego de cargas de roda de forma a melhor simular o tráfego rodoviário, muito embora não em escala real.

Os estudos de desempenho, tais como pistas experimentais e acompanhamentos de rodovias em serviço, têm como inconveniente o longo período de tempo necessário para que ocorram variações no comportamento do pavimento, devido ao volume de tráfego atuante na rodovia. O próximo estágio foi o desenvolvimento de pistas testes, com o tráfego imposto por veículos reais conhecidos, trafegando repetidas vezes sobre o pavimento e, praticamente simultaneamente, o surgimento dos primeiros equipamentos para realização de ensaios acelerados. Estes equipamentos foram usados com cargas de roda em verdadeira grandeza em pistas de pavimentos circulares ou lineares, construídas em escala real em laboratórios ou em campo (METCALF, 1996). Assim, podem ser testadas as seções com a aplicação de cargas definidas em maior frequência, o que possibilita a redução do tempo necessário para o desenvolvimento de variações no desempenho do pavimento. Todavia é importante que seja observado que o emprego de ensaios acelerados de pavimentos não consistem diretamente no desempenho que será constatado em uma rodovia em serviço, especialmente em função impossibilidade de se acelerar o processo de deterioração causado pelos fatores ambientais e pela variação de tráfego que ocorre em pistas sob tráfego real.

Neste ponto vale observar que o programa SHRP conduzido pelo *Federal Highway Administration* (FHWA) vem desenvolvendo o subprograma LTPP que acompanha o desempenho dos pavimentos ao longo do tempo, através do estudo de 2.200 seções de teste (trechos rodoviários em serviço), nos Estados Unidos e Canadá, por um período de 20 anos. O objetivo principal deste programa é aumentar a vida de serviço dos pavimentos novos e reabilitados usando diferentes materiais e operando com diversas cargas, condições ambientais, variedades de materiais e programas de manutenção. Para alcançar este objetivo, dois tipos de estudos foram estabelecidos. O primeiro é um estudo geral do pavimento com grande número de seções, localizações e fatores de projeto e o segundo, é um estudo específico do pavimento destinado a um acompanhamento intensivo, com poucas variáveis independentes. Como o primeiro tem um grande número de amostras da população de pavimentos, serve também como uma referência para os resultados do segundo. As seções do estudo geral foram escolhidas de rodovias existentes enquanto que as seções do

específico foram especialmente projetadas e construídas. Os principais responsáveis pelo programa são os Departamentos de Transportes dos Estados que operam as seções de testes dos pavimentos em serviço, as universidades, a AASHTO, as associações de indústrias e o FHWA (SILVA, 2001).

Nos próximos subitens, descrevem-se os simuladores de tráfego em escala real existentes. Neste ponto, deve-se destacar a maior ênfase dada aos simuladores de tráfego em escala real, atualmente já em operação no Brasil e que foi utilizado na presente pesquisa.

2.1.1. Simuladores de tráfego em escala real

2.1.1.1. Introdução

A utilização dos simuladores de tráfego para a realização de ensaios acelerados foi uma alternativa criada pela necessidade dos pesquisadores de obterem dados mais precisos sobre o desempenho, em escala real, de estruturas de pavimentos construídos com equipamentos convencionais, em curto período de tempo (FRITZEN, 2005b).

Os ensaios acelerados de pavimentos em verdadeira grandeza consistem na “aplicação controlada de uma carga de roda igual ou acima da carga máxima legal permitida em um pavimento estruturado, seja ele um pavimento-teste ou uma via existente, para se determinar a resposta do sistema e seu desempenho sob condições controladas e aceleradas de acúmulo de danos num espaço limitado de tempo” (METCALF, 1996).

A aceleração do dano no pavimento pode ser atingida por meio do incremento das repetições de cargas, da modificação do carregamento, da imposição de condições climáticas específicas (tais como umidade e temperatura), do emprego de pavimentos delgados com reduzida capacidade estrutural e menor vida útil de dimensionamento, ou pela combinação de dois ou mais destes fatores (METCALF, 1996).

Os ensaios acelerados através da utilização de simuladores de tráfego em escala real têm sido cada vez mais difundido como uma ferramenta de apoio ao processo de tomada de decisões e para o entendimento quanto ao real comportamento dos pavimentos e de novos materiais, determinando assim uma melhor escolha e uma melhor solução para o problema (FRITZEN, 2005a).

A realização desses ensaios, com a utilização de simuladores de tráfego, visa contribuir para diminuir as incertezas dos modelos de desempenho utilizados para o dimensionamento de pavimentos novos ou projetos de restauração de pavimentos. Estes equipamentos permitem a obtenção de dados mais precisos na modelagem das condições futuras dos pavimentos e os investimentos associados que se farão necessários, permitindo assim programar as estratégias de manutenção preventiva e corretiva, bem como a reabilitação dos pavimentos ao longo de um determinado período de análise (FRITZEN, 2005b).

Os simuladores de tráfego permitem a realização de ensaios acelerados de pavimento em condições de contorno mais próximas das que realmente serão submetidos os pavimentos em serviço, podendo ser empregado para diversos fins, tais como os apresentados por METCALF (1996):

- Avaliar pavimentos existentes para níveis de tráfego mais elevados, visto que a maioria dos métodos de dimensionamento vigentes foram desenvolvidos com base em cargas e frequências de aplicação inferiores às atuais;
- Permitir o emprego de novos materiais e estruturas de pavimento em métodos de dimensionamento;
- Avaliar os materiais de pavimentação não-tradicionais tais como os provenientes de reciclagens;
- Avaliar os processos de estabilização e tratamentos geossintéticos para o subleito;
- Determinar o processo de deterioração dos pavimentos;
- Avaliar os efeitos dos novos eixos, cargas e configurações de rodas;

- Investigar os efeitos ambientais;
- Determinar a vida remanescente de um pavimento.

Na década de 1940, este tipo de instalação para simular a ação do tráfego em escala real, cujo início se remonta a 1909, foi construído em diversos locais e vem sendo amplamente difundida nas últimas seis décadas. Há basicamente três tipos de equipamentos, além dos simuladores de laboratório:

- Os simuladores de campo fechado, que aplicam a carga de roda através da rotação em torno de um pilar central, em uma pista circular (como o *Mànege de Fatigue* em Nantes, França);
- Os simuladores lineares, nos quais os dispositivos de rodas se movem linearmente através de uma seção-teste linear como os diversos simuladores móveis de tráfego, como o *Heavy Vehicle Simulator* (HVS);
- Os simuladores em pistas experimentais fechadas, nos quais os movimentos de rodas se dão de forma livre ao longo da pista teste de forma circular ou oval, como o localizado no Centro de Estudos e Experimentos de Obras Públicas (CEDEX), em Madrid, e os com veículos operados de forma remota, como o *Public Works Research Institute*, no Japão.

Uma quarta categoria de instalações de ensaios acelerados poderia ser incluída com os equipamentos de carga estática ou pulsante aplicadas em um prato ou um dispositivo não rolante sobre o pavimento, como o da *German Road Research Laboratory of Bundesanstalt für Strassenwesen* (METCALF, 1996).

Os simuladores de tráfego em verdadeira grandeza podem ser classificados em função das suas dimensões em dois tipos: os de grande porte e os de médio porte.

Alguns exemplos de simuladores de grande porte (FRITZEN (2005b) apud MOTTA (1995)), são:

- Universidade Canterbury (1970), na Nova Zelândia: possui um anel octogonal com diâmetro de 20m e dois conjuntos de rodas duplas; o deslocamento lateral da carga é realizado através de pesos de concreto e esta carga varia de 13,3 a 40kN, a uma velocidade de 20km/h.
- Universidade do Estado de Washington (1970), nos Estados Unidos: possui três conjuntos de rodas duplas, tem diâmetro de 26 m; as rodas externas são livres e as internas são tracionadas, deslocando-se lateralmente.
- Universidade do Estado da Pensilvânia (1970), nos Estados Unidos: é um circuito oval com mil e trezentos metros de extensão.
- Suíça (1970): possui três braços radiais com rodas duplas, com diâmetro de 32m e carga de 50kN.
- LCPC (1984), em Nantes, França: circular, com diâmetro de 41m, largura de 6m e com 4 braços com rodas duplas – denominado *Manège de Fadigue*.
- CEDEX (1987), na Espanha: uma pista oval composta de dois segmentos em tangente de 75m de comprimento, permitindo ensaiar simultaneamente até seis seções de 25m.

Alguns exemplos de simuladores de médio porte são:

- Alemanha (1960): apresenta duas vigas metálicas paralelas que suportam uma plataforma móvel que carrega uma roda de 1,0m de diâmetro e sua velocidade chega a 50km/h. A carga varia de 4kN a 20kN, as seções de pavimento são de 10m úteis e 30m de aceleração e desaceleração (CERATTI; OLIVEIRA, 1993).
- *Accelerated Loading Facility* (AFL), na Austrália e USA (1980): possui uma estrutura metálica de suporte, sua carga varia de 40 a 80kN com rodas duplas, a uma velocidade de 20km/h em pistas testes de 12m. Tem um sistema de aceleração e desaceleração por rampas, carregamento em um sentido e o deslocamento transversal é dado pelo equipamento como um todo;
- África do Sul (1970): denominado HVS, difere dos demais por ser montado em uma estrutura sobre rodas, que podem deslocá-lo por meios próprios até o local de testes, realizando o carregamento na pista real. Sua aplicação de

carga pode variar de 20 a 80kN a uma velocidade de 10km/h, com carregamento nos dois sentidos numa pista de seis metros úteis de extensão por um metro de largura;

- França (desenvolvido entre 1995 e 1999): dois simuladores de tráfego pesado lineares desenvolvidos no âmbito do projeto nacional francês de investigação FABAC (*Fatigue du béton armé continu*). Os simuladores LCPC do FABAC permitem estudar em verdadeira grandeza o funcionamento e deterioração de pavimentos sob a ação cíclica de cargas de roda (idênticas as dos veículos pesados) movimentadas por um sistema de esteira rolante. Estes ensaios podem ser realizados independentemente, ou como preparação, ou como complemento dos experimentos com o *Manège de Fatigue* (LCPC, 2008).

Estudos em pistas experimentais com a utilização dos simuladores móveis de tráfego do tipo conhecido como HVS, tiveram origem na África do Sul e desenvolveram-se em numerosos centros de pesquisa e universidades em vários países, aplicando o tráfego nos pavimentos de forma acelerada, antevendo os acontecimentos de natureza degradativa e as necessidades futuras de manutenção e reabilitação desses pavimentos. Além disso, permitem estudar a eficiência de novos materiais, produtos e processos e incorporar os seus resultados aos projetos rodoviários (FRITZEN, 2005b).

Todavia, como relatado por GUO & PROZZI (2008), os ensaios acelerados podem ser entendidos como um complemento aos ensaios de laboratório levando a avanços práticos e a ganhos econômicos no estudo de pavimentos. Embora este tipo de simulação se aproxime da condição de campo, o desempenho real de uma via em serviço não é reproduzido, pois não são considerados os efeitos da deterioração a longo prazo. Consequentemente, para utilizar inteiramente os benefícios de APT, há a necessidade de uma metodologia que associe os seus resultados aos de uma rodovia em serviço.

2.1.1.2. Histórico

Talvez o primeiro simulador de tráfego tenha sido o instalado em Detroit, denominado *Paving Determinator*, construído em 1909, seguido pela pista circular do *British Nacional Physical Laboratory* em 1912, que originalmente empregava rodas de aço, tendo sido substituídas depois por rodas de borracha (METCALF, 1996). Relatado por NÚÑEZ (1997), o precursor britânico dos simuladores de tráfego possuía oito braços radiais, com rodas em suas extremidades, que aplicavam cargas de até 13kN. O equipamento possibilitava a aplicação de 80.000 passadas em 24 horas, com trajetórias circulares.

Em 1919, em Arlington, Virginia, uma pista de teste circular carregada por um caminhão em operação, com ensaios realizados até meados da década de 1930, permitiu grandes avanços no dimensionamento de pavimentos de concreto. Em 1920 teve início a *Bates Road Test*, em Illinois, a primeira pista de tráfego controlado com cargas de uma a seis toneladas por eixo, atuando em 68 seções ao longo de uma extensão total de quatro quilômetros. Esta pista permitiu o estudo de diversos materiais, tais como blocos intertravados, asfalto e concreto. Outra pesquisa com pavimentos de concreto foi conduzida em uma pista de 168 m de concreto em Pittsburg, Califórnia, entre 1920 e 1923. O primeiro experimento de âmbito nacional nos Estados Unidos foi denominado *Hybla Valley Non Rigid Pavement*, conduzido entre 1944 e 1954. Neste experimento foi construída uma pista oval com duas curvas circulares e tangentes de 240 m, onde se constatou as deflexões nos pavimentos quando carregados (METCALF, 1996).

A *Road Test One Maryland* foi concebida em 1949, com os testes conduzidos em uma pista de concreto com 1,8 km de extensão, que permitiram avançar nas conclusões acerca da relação entre o incremento nas cargas e o bombeamento observado no pavimento (METCALF, 1996).

Todavia, os estudos em escala real, estão a requerer atualizações, já que o nível de tráfego e os tipos de veículos em operação têm crescido e se alterado de forma

significativa. Além disso, a prática da engenharia rodoviária tenta adaptar-se às mudanças com o desenvolvimento e o emprego de novos materiais de pavimentação.

2.1.1.3. Experiências Nacionais com Simuladores de Tráfego

Em todo o mundo foram realizados vários estudos utilizando-se simuladores de tráfego, principalmente na África do Sul – país idealizador dos simuladores de tráfego lineares móveis.

No Brasil as primeiras tratativas para o emprego desses simuladores remontam à década de 1990, quando foi programada uma avaliação do comportamento dos pavimentos de um trecho experimental na rodovia Carvalho Pinto com HVS. Porém, depois de todo o esforço de implantação de vários segmentos, lamentavelmente, por motivos não técnicos, não se concretizou a importação de um simulador HVS, que seria utilizado em uma pesquisa de desempenho de pavimentos novos de forma acelerada, o que seria um marco na história da engenharia rodoviária brasileira.

Existem dois simuladores fixos no Brasil: o do IPR construído na década de 70 (SILVA, 2001) e da UFRGS, em convênio com o DAER-RS, construído na década de 90 (NUÑEZ, 1997). Além dos dois simuladores de tráfego em campos de prova, destinados a este único fim, existem atualmente dois simuladores móveis de tráfego em verdadeira grandeza, construídos à semelhança dos HVS originários da África do Sul.

Neste item serão discutidos três tipos de equipamentos disponíveis para estudos e pesquisas em APT no Brasil, com especial atenção ao modelo móvel desenvolvido no final da década de 1990.

2.1.1.3.1. Pista Circular do IPR

O primeiro simulador de tráfego em verdadeira grandeza construído no Brasil é nacionalmente conhecido como Pista Circular do IPR (Instituto de Pesquisas

Rodoviárias). Na década de 1970, após exame de diferentes tipos de pistas experimentais e simuladores de tráfego, analisando suas vantagens e desvantagens através de detalhes de projeto, fotografias, publicações e visitas a trechos experimentais nos Estados Unidos, Portugal, Inglaterra e França e a pistas experimentais circulares dos Estados Unidos, Inglaterra, Tchecoslováquia, Argentina, México e Hungria, o IPR/DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem) optou pela construção de uma pista circular, do tipo carrossel, semelhante a existente na *Washington State University*, na cidade de Pulmann, no Estado de Washington, EUA (SILVA, 2001).

Em 1975 iniciou-se o projeto de construção do equipamento no Centro Rodoviário em Parada de Lucas, no km 163 da Rodovia Presidente Dutra - Rio de Janeiro, onde segue funcionando até hoje. Sua principal característica é a estrutura metálica do trem de prova, com diâmetro de 33m, composta de três subestruturas treliçadas. Cada conjunto de rodas duplas recebe uma carga de aproximadamente 57kN, portanto a estrutura pesa 171kN. O conjunto de rodas duplas é composto por dois pneus inflados a 0,74MPa (105psi), de tamanho 11.00R22. O primeiro número indica a largura nominal da seção do pneu em polegadas, a letra R indica pneus de construção radial e o último número representa o diâmetro nominal do aro em polegadas (SILVA, 2001).

O equipamento de comando é alojado na sala de controle, construída próxima à pista, de modo a permitir uma visão completa do trem de prova e da pista. O centro do trem de prova é constituído por uma armadura hexagonal, sob a qual está montada o mecanismo do excêntrico que permite o deslocamento lateral do trem de prova, com uma amplitude regulável até 0,83m a cada giro deste. A propulsão do carrossel é feita por três motores de corrente contínua de 60CV cada, acoplados diretamente, através de um sistema de redução adequado a cada conjunto de rodas duplas. Isto faz com que as rodas representem um eixo trator real e não um eixo rebocado, (SILVA, 2001). A Figura 2.16 ilustra o simulador do IPR/DNER.

Figura 2.1 – Ilustração e vista geral da Pista Circular do IPR/DNER. Fonte: SILVA (2001)

A velocidade máxima do trem de prova é de 80km/h, com uma velocidade média de operação de 40km/h. Nesta velocidade, os três conjuntos de rodas aplicam ao pavimento, aproximadamente, 1.500 carregamentos por hora. Para que se tenha uma cobertura completa da área transversal útil do pavimento, o centro de rotação da estrutura pode ser colocado excêntricamente à pista girando lentamente, completando um círculo médio a cada perímetro de 80m e raio de 12,7m (SILVA, 2001).

Este equipamento passou a operar efetivamente com enfoque em pesquisas de desempenho de pavimentos na década de 1980, tendo sido realizados sob a coordenação do DNER/DNIT, até a presente data, os estudos resumidos na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Síntese das Pesquisas realizadas na Pista Circular do IPR/DNER

Nº.	Objetivo da Pesquisa	Ano	Participante
1	Estudo de revestimentos em TSD e CBUQ	01/10/82 a 05/07/82	SET Sist. Eng. Transp. Ltda.
2	Estudo de diferentes espessuras de CBUQ	23/04/91 a 20/08/91	Máxima Consultora S.A.

Nº.	Objetivo da Pesquisa	Ano	Participante
3	Concreto Rolado para Pavimentação	1992	ABCP / Inspector Eng. Ltda.
4	Concreto Rolado para Tráfego Pesado	1993	ABCP / Inspector Eng. Ltda.
5	<i>Whitetopping</i>	04/97 a 06/98	ABCP / Prodec S.A.
6	Asfalto do tipo Multigrade	12/02 a 12/03	Empresa Asfaltos Chilenos S/A-ASFALCHILE
7	Escória de Aciaria como Base e Sub-base de Pavimentos	Início em 30/04/2004	Companhia Siderúrgica de Tubarão - CST

Fonte: Adaptado de VALE (2008).

2.1.1.3.2. Simulador UFRGS-DAER/RS

O equipamento da UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) e do DAER/RS (Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul) começou a ser desenvolvido no início da década de 1990 pelo grupo de Projeto Mecânico e Automação Industrial do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS e foi construído pelo DAER/RS. A execução do equipamento contou com o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio Grande do Sul - FAPERGS e do DAER/RS (NUÑEZ, 1997).

A intenção de desenvolver o equipamento de ensaios acelerados surgiu da necessidade de conhecer o comportamento estrutural de camadas de basalto alterado quando empregado em rodovias de baixo volume de tráfego, em pesquisa desenvolvida pelo DAER/RS e pela UFRGS. O DAER/RS, em seu programa de execução, planejava pavimentar rodovias vicinais e coletoras, já que a rede de rodovias troncais e semitroncais estava quase totalmente pavimentada no início da década de 1990. Por outro lado, o estado do Rio Grande do Sul possui aproximadamente 40% de seu território coberto por um derrame basáltico, sendo importantes as ocorrências de basaltos com diferentes graus de alteração. Este material, até então, não era utilizado em pavimentos devido à variabilidade e ao

pouco conhecimento de seu comportamento mecânico (CERATTI; OLIVEIRA, 1993).

No desenvolvimento do simulador foram preliminarmente estudadas as características dos principais simuladores em operação no mundo, tendo-se optado por um de tamanho médio que reproduzisse com confiabilidade o efeito do tráfego sobre uma estrutura de pavimento. Foi definida a aplicação de carga de forma retilínea para eliminar o efeito de curva existente nos simuladores circulares de diâmetro menores. Optou-se pelo desenvolvimento de um equipamento semelhante ao ALF norte-americano (CERATTI; OLIVEIRA, 1993). Este equipamento foi construído entre 1992 e 1994 e possui aproximadamente 15m de comprimento, 2,5m de largura e 4,3m de altura, como pode ser observado na figura 2.17.

Localizado em uma área de 5.000m² no campus da UFRGS, o simulador conta com uma infra-estrutura composta de prédio de controle de operações, processamento das informações e armazenamento de materiais e de equipamentos, além de uma área que permite a execução de até doze pistas experimentais com 20m de comprimento e 3,5m de largura, como ilustrado na figura 2.17 (SILVA, 2001). Cargas de eixo que variam entre 82 e 130kN são aplicadas hidraulicamente, com variação correspondente de 0,56 a 0,73MPa na pressão dos pneus. As cargas de roda e a pressão dos pneus são controladas admitindo-se variações de até $\pm 2\%$. As rodas trafegam à velocidade de 6km/h sobre o pavimento em uma extensão de aproximadamente 7m. Para simular o tráfego, as cargas são aplicadas em um único sentido sobre uma trilha, seguindo uma distribuição normal (NUÑEZ; CERATTI; GEHLING, 2000). O controle eletrônico do sistema permite ajustar a velocidade e o deslocamento transversal do rodado, ou seja, a trilha das rodas pode variar até $\pm 0,5m$ a partir do eixo de simetria do carregamento (NUÑEZ; CERATTI; GEHLING, 2000).

Figura 2.2 – Área da UFRGS em que se encontra o simulador UFRGS-DAER/RS e vista do equipamento. Fonte: (NUÑEZ, 2006)

Um grau acentuado de aceleração pode ser alcançado aumentando-se a carga de eixo, em relação ao correspondente ao tráfego normal, e aplicando essa carga a uma frequência de 260 ciclos por hora. Assim, o equipamento é capaz de simular o tráfego de 10^5 operações de eixo padrão rodoviário em uma semana (NUÑEZ; CERATTI; GEHLING, 2000).

A Tabela 2.2 resume as pesquisas realizadas com o simulador de tráfego UFRGS-DAER/RS.

Tabela 2.2 – Resumo das principais pesquisas com o simulador UFRGS-DAER/RS

Nº.	Objetivo da Pesquisa	Ano
1	Uso de Basaltos Alterados em Pavimentos de Baixo Volume de Tráfego	Maio de 1996 a abril de 1998
2	Pavimentos Delgados com Bases de Brita Graduada e Sub-bases de Basaltos Alterados	Novembro de 1998 a agosto de 1999
3	Influência da Sucção nos Módulos de Resiliência de Subleitos	Maio de 1996 a abril de 1998
4	Efeito da Carga de Eixo e da Pressão dos Pneus na Resposta Elástica de Pavimentos Delgados	Agosto de 1997
5	Uso de geotêxteis com SAMI para retardar o processo de reflexão de trincas em reforços de pavimento	Maio de 2000 a Março de 2001
6	Estudo do desempenho de pavimentos flexíveis com simulador de tráfego empregando instrumentação	Abril de 2001 a Setembro de 2002
7	Análise do comportamento estrutural de sistemas de drenagem viária constituídos por tubos plásticos flexíveis envolvidos por areia	Janeiro de 2002 a Dezembro de 2002
8	Medidas de temperaturas em pavimentos asfálticos	Outubro de 2002 a Outubro de 2003
9	Concreto asfáltico com ligante modificado com borracha	Junho de 2003 a fevereiro de 2005
10	Efeito da umidade do subleito no comportamento mecânico do pavimento	Março de 2004 a Maio de 2006

Fonte: VALE (2008).

2.1.1.3.3. Simulador de Tráfego Linear Móvel

O desafio de desenvolver um simulador móvel de tráfego no Brasil, para aumentar a versatilidade dos ensaios acelerados realizados em pesquisas no país, foi concretizado pela empresa CIFALI com a colaboração da UFRGS, em um projeto iniciado no ano de 2003 e a conclusão de duas máquinas em 2004. Esses equipamentos baseiam-se nas características do simulador da UFRGS associados aos simuladores da África do Sul, ou seja, são equipamentos lineares de ensaio acelerado de pavimento deslocáveis sobre rodas (CIFALI, 2006).

Este simulador apresenta fácil mobilidade, possibilitando o deslocamento sobre rodas para qualquer trecho experimental e a realização de ajustes no sistema de aplicação de cargas, conforme a necessidade do pesquisador (FRITZEN, 2005a).

A combinação da velocidade de deslocamento longitudinal do semieixo com o deslocamento transversal, a carga aplicada, o tipo de pneu atuante e a aspersão de água, o equipamento permite reproduzir, em curtos períodos de tempo e com boa aproximação da realidade, as consequências da ação das cargas do tráfego nas estruturas de pavimento. Cumpre destacar, entretanto, as outras variáveis não reproduzíveis em testes acelerados, tais como a oxidação dos ligantes asfálticos e a “história de tensões” nas camadas constituintes das mesmas, que influem no desempenho dos pavimentos, cuja ação é fortemente dependente da idade dessas estruturas (NOVADUTRA, 2007).

De acordo com CIFALI (2006), as principais características do Simulador de Tráfego Linear Móvel desenvolvido no Brasil, denominado Hércules Veículo Simulador, são resumidas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Características do Simulador de Tráfego Linear Móvel

Item	Característica
Comprimento	20,1 m
Largura	3,1 m
Altura	4,4 m
Peso	32 t sem lastro 58 t com lastro
Tanques d'água	3 tanques de 8.850 l
Pista de ensaio (extensão)	12 m (máximo) 7 m úteis
Largura de simulação	Até 1,0 m
Frequências de aplicação de carga	800 semiciclos por hora (unidirecional) 400 semiciclos por hora (bidirecional)
Carga máxima	10.000 kgf
Pneus	900, 1000 e <i>super single</i>
Tensão de comando	220/380 V
Frequência do motor elétrico	50/60 Hz

O simulador de tráfego linear móvel fabricado no Brasil tem como principal característica sua mobilidade, podendo, sempre que necessário, deslocar-se através de reboque para a realização de testes e de estudos em pistas reais de rodovias, de vias urbanas ou de pistas de aeroportos, onde pode ser operado hidraulicamente e os carregamentos podem ser aplicados com rodas simples ou dupla. Esta característica é única em simuladores de tráfego semelhantes, existentes no Brasil, e de grande importância considerando-se as dimensões do país e as distâncias a serem percorridas para se alcançar locais de características distintas (FRITZEN, 2005b).

A maioria dos ensaios foi realizada em segmentos experimentais de rodovias em operação caracterizados anteriormente à execução da reabilitação e após as mesmas, seguindo-se a utilização do simulador e monitoramento das pistas testes, resultando em definições de soluções de reabilitação e/ou calibrações de modelos nos contextos em que se inserem.

A Tabela 2.4 ilustra as pesquisas já realizadas com o emprego do Simulador de Tráfego Linear Móvel no Brasil até 2009 e os locais em que as mesmas foram realizadas, incluindo-se uma breve descrição de seu enfoque.

Tabela 2.4 – Pesquisas realizadas com Simulador de Tráfego Linear Móvel no Brasil

Nº.	Interessado	Local	Ano	Descrição	Seções com Simulador
1	DAER/RS	RS-122	2003	Emprego de ligante asfáltico modificado por borracha.	3
2	AUTOVIAS	SP-330	2003/2004	Misturas delgadas aplicadas a frio com polímero.	2
3	CRT	BR-116/RJ	2004	Técnicas de restauração de pavimentos: fresagem e recomposição, asfalto borracha, geogrelha e reconstrução com CCR.	4
4	Intervias	SP-147	2004/2005	Desempenho da reciclagem a frio <i>in situ</i> do revestimento.	1

Nº.	Interessado	Local	Ano	Descrição	Seções com Simulador
5	NovaDutra	BR-116/SP	2005/2006	Influência do tipo de da quantidade de ligante no desempenho do CBUQ faixa C.	5
6	Concepa	BR-290/RS	2008	Estudo de estrutura de pavimento novo para ampliação de capacidade da rodovia.	2
7	COPPE	Campus da UFRJ	2008	Avaliação do Comportamento de diferentes tipos de ligantes asfálticos	-
8	Autopista Régis Bittencourt	BR-116/SP	2008	Avaliação da Técnica de Reciclagem a Frio de Capa com Emulsão Polimerizada	2
9	Autopista Litoral Sul	BR-376/PR	2009	Estudo da Deformação em trilha de roda em diversas misturas e ligantes	2

Fonte: VALE (2008), atualizado por Douglas em 2011.

2.1.1.4. Método para Simulações de Tráfego com Equipamento Móvel

Atualmente não existe um método oficial para o emprego dos Simuladores Móveis de Tráfego nos ensaios acelerados de pavimentos. Todavia, a partir dos aspectos relacionados ao planejamento e aos procedimentos de ensaios adotados nos trabalhos realizados no Brasil até meados do ano de 2006 com este tipo de equipamento Vale, em 2008, propôs um método para o emprego do simulador de tráfego em futuras pesquisas, como resumido nas Tabelas 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10 e 2.11 a seguir.

Tabela 2.5 – Critérios decisórios a serem observados na Concepção da Pesquisa com o Simulador de Tráfego Linear Móvel (VALE, 2008)

Item	Atividades	Produtos
Definir os objetivos da pesquisa	Definir o que se planeja estudar e com qual finalidade.	Definição dos objetivos propostos.
	Definir quais as variáveis dependentes e independentes da pesquisa.	Definição do tipo de estudo (comparativo de materiais, avaliação de desempenho, efeitos do carregamento ou estudo de métodos de dimensionamento)
Definir a malha em que os resultados serão aplicados	Definir qual a malha a ser representada no estudo, incluindo o tráfego em operação na mesma.	Definição do número de pistas testes.
		Características desejadas da seção-teste.
		Tráfego equivalente para se atingir a vida de projeto.
		Expectativa preliminar de tempo de estudo.
Definir a malha em que os resultados serão aplicados	Coletar dados históricos do pavimento da malha e suas características ao nível de rede, incluindo aspectos funcionais (trincamento, irregularidade, etc.) e estruturais (deflexões, sondagens, etc.).	Caracterização do sistema rodoviário e do tráfego solicitante por segmento.
	Coletar informações referentes ao tráfego no local (volume médio diário por tipo de veículo, número “N”, dados sobre os valores de cargas e tipos de eixo e pneus).	Caracterização climática da região em estudo, incluindo definição dos regimes térmicos e pluviométricos, com indicações das variações sazonais.
	Coletar dados climáticos, com dados pluviométricos e de temperaturas previstos ao longo do ano.	

Tabela 2.6 – Critérios decisórios a serem observados na Definição dos Locais com o Simulador de Tráfego Linear Móvel (VALE, 2008)

Item	Atividades	Produtos
Aspectos operacionais	Identificar trechos em tangente em que há baixa incidência de acidentes, boa visibilidade para identificação do obstáculo na pista. Verificar se nestes locais o fechamento de uma das faixas não irá prejudicar a operação da rodovia.	Identificação dos locais na malha favoráveis em termos de aspectos operacionais, com especial atenção a segurança dos técnicos envolvidos na pesquisa e usuários da rodovia e na manutenção do nível de serviço com a interdição de uma faixa para realização dos estudos.
	Preferencialmente, selecionar locais em que o tráfego opera sentido único e há duas faixas de tráfego no local.	Definição das necessidades de infraestrutura para operacionalização dos ensaios: forma de energização (transformador ou gerador), sinalização para desvio de tráfego, aparato de apoio (contêiner), transporte dos técnicos e sistema de segurança.
	Verificar se nos locais há rede elétrica com iluminação, infraestrutura de apoio próxima e condição de segurança patrimonial (não obrigatórios, podendo ser suprido por recursos externos).	
	Definir o que será feito com a seção-teste após a pesquisa (ou a pista será recuperada ou continuará a ser monitorada).	Definição das ações futuras no que tange aos pavimentos que serão submetidos aos ensaios acelerados.

 Continua

Item	Atividades	Produtos
Clima	Estudo da sazonalidade climática dos locais pré-selecionados pelo critério operacional – especialmente associada ao regime pluviométrico e às variações de temperaturas.	<p>Seleção dos locais com atendimento aos requisitos climáticos da pesquisa (em consonância com o clima a ser representado).</p> <p>Definição da época do ano em que se realizarão os ensaios.</p> <p>Definição da necessidade de aspersão de água.</p> <p>Definição da necessidade de saturação artificial da infraestrutura ou mesmo de drenagem adicional do trecho.</p> <p>Optar ou não pela alternância do simulador móvel de tráfego entre as pistas testes, durante uma mesma estação do ano em ensaios de maior duração.</p> <p>Estabelecimento de gatilhos para a interrupção temporária dos ensaios acelerados.</p>
Continuação		

Item	Atividades	Produtos
Pavimento Existente	Consultar dados históricos e de projetos para os segmentos pré-selecionados em função de critérios operacionais e climáticos listados, identificando os locais que representam as condições pretendidas para a extrapolação de dados.	
	Caracterizar em detalhes os pavimentos dos locais selecionados através de sondagens e prospecções, registrando-se as espessuras e os materiais constituintes, além de realizar ensaios de caracterização <i>in situ</i> e em laboratório.	Identificar os pavimentos que representam a condição da malha em estudo e caracterização de sua condição estrutural e funcional.
	Realizar ensaios de caracterização com métodos não-destrutivos, utilizando-se inspeções funcionais e ensaios defletoométricos com FWD, empregando múltiplas cargas, e retroanálise das bacias de deflexão medidas. Eventualmente, caracterizar a infraestrutura com GPR, para verificação da homogeneidade e da integridade da estrutura ao longo do trecho.	Identificar eventuais necessidades de adequações na estrutura, tais como implantação de drenos e execução de pré-trincamento artificial.
	Caracterizar a seção transversal existente e as condições de drenagem.	

Conclusão

Tabela 2.7 – Critérios decisórios a observar na Definição do Tráfego a ser aplicado pelo Simulador Linear Móvel (VALE, 2008)

Item	Atividades	Produtos
Carga de Roda	Fixar carga (ou eventualmente sequência de cargas) a ser aplicada em cada seção-teste, verificando se esta é adequada ao pavimento a ser ensaiado, tanto no que se refere à capacidade de cada camada de suportá-la e distribuí-la (sem romper imediatamente) quanto para se garantir a representatividade dos resultados obtidos.	Definição das cargas a serem empregadas nos APT em cada seção-teste.
	Determinar os fatores de equivalência de carga pelos métodos correntes (USACE e AASHTO, ou outros que venham a substituí-los).	Fatores de carga pelos métodos correntes (USACE e AASHTO, ou outros que venham a substituí-los).
	Definir os FEC com base em modelos de falha, devidamente identificados, e na determinação de tensões e deformações na estrutura a partir dos resultados da retroanálise das bacias de deflexão obtidas com FWD empregando-se múltiplas cargas.	Detalhamento do FEC com base em modelos de falha selecionados.
		Auxiliar na previsão do número total de ciclos que serão necessários no ensaio acelerado.
		Obs. Em estudos de efeitos das cargas e de métodos de dimensionamento considerar a carga como mais uma das variáveis, executando-se ensaios em seções de mesmo pavimento com cargas diferentes. Em estudos comparativos evitar sequências diferentes de cargas em pistas testes distintas.

 Continua

Item	Atividades	Produtos
Deslocamento lateral transversal do trem de carga	Definir o valor total a ser deslocado transversalmente, desde um mínimo de 100mm (em semieixos simples de rodas duplas) até a largura total das trilhas de roda que vêm sendo observadas na malha representativa.	Definição a relação operação-cobertura
	Definir como o mesmo se dará (no início do semiciclo – preferencial - ou ao longo de todo o seu curso - eventual).	Definição do perfil transversal do carregamento imposto. Auxiliar na previsão do número total de ciclos que serão necessários no ensaio acelerado.
Sentido de Carregamento	Definir se os movimentos de cargas em sentido único ou em ambos os sentidos. A alteração do sentido de carregamento até o momento não tem demonstrado influência nas pesquisas com este equipamento quando se quer estudar a deformação permanente, não tendo sido seu efeito avaliado (até então) no processo de fadiga do material.	Registrar a opção de sentido de carregamento da pesquisa. Auxiliar na previsão do número total de ciclos que serão necessários no ensaio acelerado.
	Obs. Esta etapa exige estudos complementares para melhor conhecimento do efeito desta variável nos ensaios acelerados. Todavia, a opção pelo tipo de movimento é extremamente sensível em relação ao prazo total da pesquisa em pista.	
Continuação		

Item	Atividades	Produtos
Tipo e configuração do eixo	Definir a necessidade de alternância do semieixo do trem de prova (originalmente um semieixo simples de roda dupla), definindo-se seu tipo e sua configuração, sempre considerando-se a limitação de carga que pode ser imposta pelo equipamento (10tf).	No caso de substituição do tipo ou configuração do semieixo, recalcular os fatores de carga pelos métodos correntes (USACE e AASHTO, ou outros que venham a substituí-los) e recalcular o FEC com base em modelos de falha selecionados. Auxiliar na previsão do número total de ciclos que serão necessários no ensaio acelerado.
Características do Pneu e Pressão de Contato	Verificar a eventual necessidade de alteração do tipo de pneu a ser empregado no simulador. Definir a pressão de inflação do pneu, preferencialmente respeitando-se os limites estabelecidos pelo fabricante.	Recalcular o FEC com base em modelos de falha selecionados em função de alterações no pneu e na pressão de contato. Auxiliar na previsão do número total de ciclos que serão necessários no ensaio acelerado
Suspensão e efeitos dinâmicos	Não há como ser alterada neste equipamento, em geral sendo viável em pistas fechadas, dedicadas exclusivamente a ensaios acelerados.	Não gera produtos.
Velocidade do carregamento	Definir a velocidade limitada a um valor médio máximo de 10km/h (não reduzir por ser menor do que as de operação).	Registrar a velocidade selecionada.
Conclusão		

Tabela 2.8 – Critérios decisórios em relação às Condições Climáticas em pesquisas com Simulador Linear Móvel (VALE, 2008)

Item	Atividades	Produtos
Temperatura	<p>Definir o padrão de monitoramento da temperatura do pavimento (obrigatoriamente na junto à seção-teste) e do ar, com frequência horária (no mínimo). Preferencialmente, o registro se deve dar de forma automática e associando-se também o número de semiciclos aplicados no momento do registro.</p> <p>Fixar os gatilhos de paralisação temporária dos ensaios para temperaturas excessivamente elevadas ou excessivamente baixas.</p>	<p>Registro contínuo das condições de temperatura.</p> <p>Limitação das condições de contorno dos ensaios em padrão controlado.</p>
Umidade	<p>Infiltração: decidir pelo espargimento de água na superfície ou não e, em caso de se optar pela aspersão, determinar qual a taxa a ser empregada e em que frequência será realizada.</p> <p>Saturação da infraestrutura: optar pela saturação ou não das camadas da infraestrutura (base, sub-base, reforço do subleito e subleito), o que é conseguindo pela alimentação constante de água por pressão de água positiva em uma ou mais camadas. Em contraposição também se pode optar pela drenagem do pavimento de forma a se evitar que a presença de umidade no mesmo influencie nos resultados.</p>	<p>Controle das condições de infiltração de água na superfície.</p> <p>Controle das condições de infiltração de água na superfície.</p> <p>Limitação das condições de contorno dos ensaios em padrão controlado.</p>
Envelhecimento do Ligante	Não pode ser simulado diretamente pelo equipamento.	Não gera produtos.

Tabela 2.9 – Critérios para Execução das Pistas Experimentais destinadas a ensaios com Simulador Linear Móvel (VALE, 2008)

Item	Atividades	Produtos
Características da Pista	Definir a extensão do trecho teste, optando-se preferencialmente por segmentos com no mínimo 250m e largura de uma faixa de rolamento.	Eliminando-se problemas comuns no início e fim de “panos” de obra.
	Definir o local exato da simulação (área de 7,0m x 1,0m) para caracterização minuciosa do pavimento por meio de NDT e para eventual instrumentação a ser implantada.	Detalhamento do comportamento do pavimento na seção-teste
Controle de Qualidade	Controle de qualidade intenso em todas as etapas (desde projeto, seleção de materiais, dosagem até o acompanhamento da produção e da aplicação). Obs. Caso os padrões de qualidade especificados em projeto não sejam atingidos recomenda-se nova execução da solução proposta para não se descaracterizar a pesquisa.	Pistas testes atendendo aos requisitos de projeto da pesquisa.
Instrumentação	Instalar a instrumentação, caso a mesma seja incluída na pesquisa (item opcional).	Pista instrumentada para a simulação de tráfego (opcional)

Tabela 2.10 – Critérios de Operação do Simulador de Tráfego Linear Móvel e monitoramento do Pavimento de seção-teste (VALE, 2008)

Item	Atividades	Produtos
Transporte e Posicionamento	Transportar o equipamento, preferencialmente sem o lastro de água e com carretas com pneus 900R20, até a seção-teste.	Simulador posicionado para o ensaio, com toda a infraestrutura e condições de segurança para a realização dos ensaios acelerados.
	Providenciar a infraestrutura de apoio (contêiner, segurança, transporte, etc.).	
	Sinalizar a pista e desviar o tráfego.	
	Posicionamento e locação da seção-teste.	Seção-teste demarcada para as campanhas de monitoramento.
	Providenciar a energização e o abastecimento de água, obrigatória para o contrapeso e eventualmente para o tanque de aspersão de água.	
	Demarcar a seção-teste a ser ensaiada com tinta a cada 0,5m nos bordos da pista.	

Continua

Item	Atividades	Produtos
Ajustes iniciais	Regular a taxa de espargimento (caso seja empregada) através da verificação da vazão dada pelo sistema e definindo-se os horários de início e fim dos ciclos de molhagem.	Atendimento às premissas propostas no planejamento, tanto no que se refere ao carregamento quanto ao “controle” das condições climáticas.
	Regular o sistema de alimentação de água de estrutura (caso seja empregado).	
	Ajuste do sistema de dispersão lateral conforme planejado.	
	Ajuste no sistema de carregamento conforme planejado (em sentido único ou bidirecional).	
	Calibrar o pneu na pressão desejada.	
	Verificar a velocidade média de carregamento.	Correlação Viga Benkelman x FWD para a seção-teste.
	Ajuste do carregamento com auxílio de balança móvel (somente após o óleo do o sistema hidráulico ser pré-aquecido através da utilização do equipamento por aproximadamente 30 minutos), ou pela instrumentação da seção. No momento da aferição de cargas, devem-se realizar leituras de bacias de deflexões com o emprego da viga Benkelman (convencional ou eletrônica) a vários níveis de carregamento.	
	Realizar a impressão do pneu para a verificação da área de contato.	
	Definir o sistema de <i>backup</i> para as informações coletadas no monitoramento.	

Continuação

Item	Atividades	Produtos
Campanhas de Monitoramento do Pavimento	<p>Realizar as campanhas de monitoramento dos pavimentos em cada uma das sete subseções (necessariamente a primeira antes do início da simulação e a última ao final do ensaio acelerado). Nestas campanhas, realizadas preferencialmente no mesmo horário, com periodicidade máxima de dois dias, cadastrar:</p> <ul style="list-style-type: none"> - identificação da seção avaliada; - identificação do carregamento imposto: número de semiciclos, valor da carga, tipo eixo, tipo de movimento, dispersão lateral e velocidade média; - registro da temperatura do ar e do pavimento, bem como taxa de aspersão de água; - avaliação estrutural: medidas de bacias de deflexão com a viga Benkelman ou com viga eletrônica com a carga de simulação de tráfego - condição funcional: cadastro visual de defeitos em escala com apoio de gabarito metálico, demarcação do trincamento com tinta, avaliação do perfil transversal da seção com perfilógrafo e, opcionalmente, determinar o perfil transversal com perfilógrafo ou <i>dipstick</i>; <p>Realizar o monitoramento da temperatura ambiente no máximo em frequência horária, sempre associando-se os dados ao número de semiciclos de carga.</p> <p>Registrar em livro específico as observações julgadas pertinentes.</p>	<p>Cadastro detalhado das ocorrências ao longo de toda a simulação de tráfego para posterior análise e interpretação.</p>

Continuação

Item	Atividades	Produtos
Instrumentação (opcional)	Registro periódico das leituras dos instrumentos instalados, caso seja previsto o emprego destes recursos, por técnico especializado que possa identificar e filtrar eventuais ruídos.	Informações complementares ao monitoramento.
Apresentação dos Resultados	Tabular os resultados de forma sistemática com o máximo de detalhes e publicar as tabelas de dados como anexo aos relatórios da pesquisa. Alimentação de um banco de dados, com formato compatível e universal.	Padronização da formatação das informações e maior possibilidade de intercâmbio e análise dos resultados.

Conclusão

Tabela 2.11 – Ensaio complementares e posteriores a simulação de tráfego com o Simulador de Tráfego Linear Móvel

Item	Atividades	Produtos
Ensaio Complementares Pós Simulação de Tráfego	Definir e realizar os ensaios de laboratório complementar à pesquisa, preferencialmente sempre incluindo comparações entre as amostras não submetidas ao simulador de tráfego e as amostras solicitadas por este.	Possibilidade de análises mais aprofundadas e embasamento teórico para os resultados práticos das seções submetidas a ensaios acelerados.

2.2. Ligantes Asfálticos de Alto Desempenho

2.2.1. Asfaltos

Os asfaltos são materiais aglutinantes de consistência variável, cor pardo-escuro ou negra e nos quais o constituinte predominante é o betume, podendo ocorrer na natureza em jazidas ou ser obtido pela destilação do petróleo.

Segundo a NBR 7208 (1998) o betume é uma mistura de hidrocarbonetos de consistência sólida, líquida ou gasosa, de origem natural ou pirogênica, completamente solúvel em bissulfeto de carbono (CS_2), frequentemente acompanhado de seus derivados não metálicos.

Os asfaltos naturais podem ocorrer em depressões da crosta terrestre, constituindo os lagos de asfaltos (Trinidad, Bermudas), ou aparecerem impregnando os poros de algumas rochas, formando as denominadas rochas asfálticas (gilsonita e asphaltita). Encontram-se também misturados com impurezas minerais (areias e argilas), em quantidades variáveis, sendo geralmente submetidos a processos de purificação para serem aplicados em pavimentação (IBP, 1999).

No início do século 20, a descoberta do asfalto refinado do óleo cru do petróleo e a popularidade do automóvel criaram uma indústria em expansão. O asfalto parecia ser uma fonte barata e inesgotável que seria usada em estradas modernas de rolamento suave e em numerosas outras aplicações (Instituto do Asfalto, 1989).

A produção do asfalto constitui-se como um dos produtos finais da destilação do petróleo cru, no qual as frações mais leves (gasolina, querosene, diesel) são separadas do asfalto por vaporização, fracionamento e condensação (IBP, 1999).

Segundo GUARÇONI (DNER, 1998), no Brasil a maioria das refinarias operam com os mais variados tipos de crus disponíveis, sendo que para isso deve-se empregar distintos processos nas unidades refinadoras:

- Se o rendimento em asfalto for alto (cru de base naftênica), basta o estágio de destilação a vácuo no processo de refinação;
- Se o rendimento em asfalto for médio (cru de base intermediária), o processo é o de destilação em dois estágios: pressão atmosférica e vácuo;
- Se o rendimento em asfalto for baixo (petróleos leves), além da destilação em dois estágios, inclui-se o processo de desasfaltação a propano.

Nos dois últimos processamentos, obtém-se asfaltos muito duros, necessitando de adição de outras frações do próprio refino para transformá-lo num produto que atenda às especificações brasileiras no tocante às características físicas, o que não exclui uma variação na sua constituição química, devido ao sensível desequilíbrio da estabilidade coloidal do asfalto (DNER, 1998).

Segundo o IBP (1999), dos processos apresentados o mais utilizado é o da destilação em duas etapas, pois produz o asfalto normalmente sem a necessidade de instalações especiais e permite o uso de um maior número de tipos de petróleo, consistindo, basicamente, de uma separação física dos vários constituintes do petróleo pela diferença entre seus pontos de ebulição e de condensação.

São apresentados nas Figuras 2.3, 2.4 e 2.5 a seguir os esquemas simplificados da produção de asfalto pelos três métodos citados acima:

Figura 2.3 – Esquema Simplificado da Produção de Asfalto (PINTO, 1998)

Figura 2.4 – Esquema Simplificado da Produção de Asfalto (2 Estágios de Destilação) (PINTO, 1998)

Figura 2.5 – Esquema Simplificado da Produção de Asfalto (3 Estágios de Destilação) (PINTO, 1998)

Segundo LEITE (1999) os tipos de asfalto existentes no mercado brasileiros são denominados:

- a) Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP);
- b) Asfaltos Diluídos;
- c) Asfaltos Emulsionados;
- d) Asfaltos Oxidados ou Soprados;
- f) Agentes Rejuvenecedores.
- g) Asfaltos Modificados.

2.2.2. Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP)

O cimento asfáltico é obtido especialmente para apresentar características adequadas para o uso na construção de pavimentos. Ele pode ser obtido por um dos três processos de destilação apresentados anteriormente e, sendo assim, receberá o nome

de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), ou ser obtido em Jazidas Naturais recebendo o nome de Cimento Asfáltico Natural (CAN). Estes materiais são semissólidos à temperatura ambiente, e necessitam de aquecimento para terem consistência apropriada ao envolvimento de agregados, possuem características de flexibilidade, durabilidade, aglutinação, impermeabilização e elevada resistência à maioria dos ácidos, sais e álcalis (SOUZA, 1995).

Os cimentos asfálticos de petróleo brasileiros são classificados pelo seu “grau de dureza” retratado no seu ensaio de penetração a 25°C. O Instituto Brasileiro de Petróleo e o Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre (DNIT) especificam 4 tipos de CAP pela sua penetração: CAP 30-45, CAP 50-70, CAP 85-100 e CAP 150-200.

2.2.3. Asfaltos Modificados

Para ampliar sua resistência, os cimentos asfálticos de petróleo podem ser modificados através de adições de asfaltos naturais como gilsonita (EUA), asfaltita (Argentina) e Asfalto de Trinidad ou ainda por adição de fíleres (cal, cimento, sílica etc), fibras (fibra de vidro, asbestos, fibras de celulose e fibras poliméricas) ou por enxofre elementar. A modificação mais empregada atualmente é através do uso de polímeros (SBR, SBS, EVA, RET, etc) e por borracha moída de pneu (LEITE, 1999).

2.2.4. Polímeros Modificadores de Asfalto

Segundo Mano (1986), as moléculas que contém um número de átomos encadeados superior a uma centena são denominados macromoléculas. Tais moléculas adquirem características próprias que passam a predominar sobre as características inerentes a natureza dos átomos que as constituem. Essas propriedades decorrem de interações envolvendo segmentos da mesma macromolécula ou de outras.

O termo macromolécula definido anteriormente engloba os compostos de elevado peso molecular, considerando tanto os compostos que apresentam unidades químicas repetidas (polímeros), quanto os compostos de estruturas moleculares mais complexas (MANO, 1986).

Mano (1986) assinala que as propriedades especiais das macromoléculas, em geral, surgem a partir de um peso molecular entre 1000 e 1500, acentuando-as à medida que há crescimento deste valor.

Os polímeros são substâncias macromoleculares, que podem ser produzidas pela natureza (madeira, óleo lubrificante, cortiça, etc) ou podem ser obtidos artificialmente pela união sequenciada de pequenas moléculas, chamadas monômeros.

Os polímeros são classificados de inúmeras maneiras, de acordo com a finalidade classificatória. As principais são:

- a) quanto à ocorrência: Naturais e Sintéticos;
- b) quanto à preparação: Adição e Copolímeros;
- c) quanto à cadeia: Homogêneos e Heterogêneos;
- d) quanto à estrutura: Lineares ou Tridimensionais;
- e) industrial: Elastômeros, Plásticos e Fibras.

Nos polímeros de adição (homopolímeros) apenas uma espécie de monômero é usado na polimerização. Na copolimerização (copolímero) são usados dois ou mais monômeros diferentes. Frequentemente este tipo de produto apresenta melhores propriedades físicas e mecânicas, por esta razão, o completo domínio desta tecnologia foi um importante avanço na engenharia de construção.

Estruturalmente os polímeros são lineares (termo-sensíveis) e tridimensionais (termofixos). Monômeros bifuncionais geram polímeros lineares, enquanto os monômeros tri e tetrafuncionais geram os tridimensionais, caracterizado por uma estrutura espacial obtida pela interligação dessas unidades polifuncionais.

Quando as unidades químicas estão dispostas aleatoriamente na cadeia polimérica, têm-se os copolímeros estatísticos. Em outro extremo, quando há um perfeito escalonamento entre os monômeros têm-se os copolímeros alternados. Os copolímeros em bloco alternam sequências de unidades químicas iguais. Caso haja ramificações poliméricas na cadeia principal tem-se o copolímero enxertado ou grafitizado (DNER, 1998). No caso do acoplamento de dois copolímeros em um terceiro existente tem-se o Terpolímero.

A Tabela 2.12 exemplifica as diversas configurações.

Tabela 2.12 – Configuração dos polímeros

Tipo	Configuração
Monômero A	A
Monômero B	B
Monômero C	C
Homopolímero	^^^A-A-A-A-A-A-A-A-A^^^
Copolímero alternado	^^^A-B-A-B-A-B-A-B-A^^^
Copolímero em Bloco	^^^A-...-A-B-...-B-A-...-A^^^
Copolímero estatístico	^^^A-B-B-A-A-B-A-B-A^^^
Copolímero Grafitizado	^^^A-A-A-A-A-A-A-A-A^^^
	B
Terpolímero Grafitizado	
	B
	B
Terpolímero Grafitizado	^^^A-A-A-A-A-A-A-A-A^^^
	B
Terpolímero Grafitizado	
	B
	B

Os polímeros termofixos ou termorrígidos não adquirem movimento plástico com o aumento da temperatura, mas podem perder resistência devido à ocorrência do fenômeno da degradação.

Já os polímeros termoplásticos, por apresentarem ligações intermoleculares fracas (Van der Waals), que são facilmente superadas com a elevação da temperatura, permitem que a deformação ocorra por escorregamento nos pontos fracos das ligações entre as moléculas.

Um dos mais importantes efeitos do aumento da temperatura em um ligante asfáltico com polímero é o aumento da velocidade das reações químicas, como por exemplo, a ramificação e a reticulação. A temperatura na qual os polímeros ficam passíveis de sofrer reação química é aquela onde eles perdem sua resistência mecânica. Esta temperatura está sempre abaixo do ponto de fusão dos lineares e no começo da degradação dos tridimensionais (ou termofixos); por esta razão, os lineares podem ser reticulados.

Os polímeros termosensíveis se classificam industrialmente como : plásticos, fibras e elastômeros. Entretanto, no estudo da utilização de polímeros como melhoradores de asfalto, as classificações acadêmicas foram abandonadas e foi seguido um caminho mais objetivo, aparecendo classificações mais direcionadas ao meio rodoviário. A mais utilizada é a de Disnnem, que classifica os polímeros em quatro grupos distintos (DNER,1998):

- a) Termorrígidos: são aqueles que não se fundem, degradam numa temperatura limite e endurecem irreversivelmente quando aquecidos a uma temperatura que depende de sua estrutura química. Cadeias moleculares formam rede tridimensional que resiste a qualquer mobilidade térmica (LEITE, 1999). Como exemplos, tem-se a resina epóxi, poliuretano, etc.
- b) Termoplásticos: são aqueles que se fundem e se tornam maleáveis reversivelmente quando aquecidos. Normalmente consistem de cadeias lineares, mas podem ser também ramificadas. São incorporados aos asfaltos à alta temperatura (LEITE, 1999). Como exemplo, tem-se o polietileno, polipropileno atático e o policloreto de vinila.

- c) Elastômeros: são aqueles que quando aquecidos se decompõem antes de amolecer, e apresentam propriedades elásticas que lembram a borracha. Como exemplo, tem-se o SBR, etc. (DNER, 1998)
- d) Elastômero-termoplásticos: são aqueles que ao serem aquecidos se comportam como termoplásticos, mas em temperaturas mais baixas apresentam propriedades elásticas. Como exemplos, tem-se o SBS e o RET. (DNER, 1998)

2.2.4.1. Polímero SBR

O polímero SBR é um copolímero aleatório de estireno e butadieno, obtido principalmente por processo de polimerização em emulsão. Apresentam propriedades elastoméricas de resiliência e boa compatibilidade com os betumes. Suas propriedades mecânicas são intrinsecamente baixas, porém podem ser grandemente melhoradas com a vulcanização, que é conseguida pela reação com enxofre ou peróxidos. O processo de preparação do SBR em emulsão produz um polímero finamente dividido, na forma de um látex, que facilita sua dispersão no asfalto. A técnica de dispersão do látex pode também ser utilizada a partir de borracha natural. (LEITE, 1999)

Atualmente no Brasil o polímero SBR tem sido muito utilizado para a fabricação de emulsões modificadas por polímeros.

2.2.4.2. Polímero EVA

O polímero EVA é um copolímero de etileno e acetato de vinila cuja composição pode variar de uns poucos por cento de acetato até cerca de 50%. De acordo com esta proporção, as propriedades variam de um termoplástico muito semelhante ao polietileno de baixa densidade até um elastômero. Os segmentos de etileno são semicristalinos, enquanto os que contém os grupos acetato constituem a fase amorfa,

conforme a Figura 2.6. Suas maiores vantagens são a resistência à flexão e a estabilidade térmica, aliadas a um custo razoável. (LEITE, 1999)

Nestes copolímeros a redução do teor de acetato de vinila acarreta aumento da cristalinidade e, em consequência, do módulo de rigidez, das temperaturas de amolecimento e de fusão e a diminuição da temperatura de fragilidade. É dito um termoplástico plastômero, ou seja, escoia irreversivelmente quando se aplica uma tensão cisalhante, pois não possui reticulação como SBR. O EVA se solubiliza nas frações saturadas devido a sua natureza alifática em virtude da existência de sequências etilênicas de elevado peso molecular, modificando o escoamento do material (LEITE, 1999).

Figura 2.6 – Conformação planar das moléculas de EVA (LEITE, 1999)

Segundo Freitas (1996) o EVA como modificador de ligantes é muito utilizado em alguns países, destacando-se, por exemplo, a França e a Espanha.

2.2.4.3. Polímero SBS

O copolímero SBS pode ser obtido sob diferentes formas estruturais, dependendo da natureza dos monômeros e do tipo de associação entre eles, tais como: lineares e radiais. Os lineares podem ser obtidos de forma sequencial distinta, como: estatístico, alternado e sequenciado (RAMOS, 1995).

O tipo de SBS mais usado no mundo para modificação do asfalto é o sequenciado, obtido pelo acoplamento de duas extremidades poliestirênicas e uma longa sequência butadiênica. Como a sequência butadiênica tem forma enovelada, o conjunto se apresenta na forma de verdadeiro “halteres” como visto na Figura 2.7 (DNER, 1998).

Figura 2.7 – Representação do Polímero SBS (DNER, 1998)

A molécula de SBS é dividida em regiões de natureza química completamente diferentes: nas duas extremidades as regiões são de caráter aromático e a longa cadeia butadiênica é de caráter alifático. Em virtude disso, os conjuntos de moléculas de SBS, para diminuir a energia livre total, precisam evitar o contato aromático-alifático, para o que se ligam pelas extremidades estirênicas, formando conjuntos que se comportam como verdadeiros “domínios” aromático e alifático (DNER, 1998).

A ligação das extremidades estirênicas formando os “domínios” aromáticos, funciona como uma verdadeira vulcanização, o que garante ao produto excelentes características mecânicas sem nenhum prejuízo de sua altíssima elasticidade entrópica de conformação.

2.2.4.4. Polímero RET

O polímero RET, que em português quer dizer Terpolímero Elastomérico Reativo, é relativamente novo e projetado especificamente para a modificação de asfaltos. O desenvolvimento do polímero se deu a partir de 1988 quando se buscou um modificador de asfalto que pudesse ser facilmente incorporado e cujas propriedades viscoelásticas fossem similares a de asfaltos com outros modificadores utilizados como os Copolímeros de Estireno Butadieno (NEGRÃO et al., 2005).

Figura 2.8 – Polímero do tipo RET

Em 1989 foi desenvolvido o primeiro polímero do tipo RET de reação lenta e a partir de 1991 inicia-se a pavimentação de trechos experimentais nos Estados Unidos. De 1994 até os dias de hoje, foram desenvolvidos vários tipos de polímeros RET, entre eles o de alta reação com catalisador, que atualmente se utiliza no Brasil (NEGRÃO et al., 2005).

O RET é um polímero cuja composição se diferencia dos elastômeros formados por blocos de estireno – butadieno. Como o próprio nome já diz, ele é um “Terpolímero”, ou seja, é um polímero formado por três monômeros, sendo eles a coluna de Etileno, o n-Butil Acrilato e o Glicidil Metacrilato. Sua estrutura química é apresentada na Figura 2.9.

Figura 2.9 – Representação do Polímero RET

No seu nome também temos a palavra “Reativo”, pois sua distribuição química faz com que ele reaja quimicamente com os asfaltenos do asfalto para formar um composto inseparável. A reação entre o RET e o asfalto é representada na Figura 2.10.

Figura 2.10 - Reação do Asfalto com Polímero do Tipo RET

Nota-se que a reação entre o polímero RET e o asfalto se dá através do copolímero Glicidil Metacrilato e ainda que esta é uma reação de adição e, portanto, não gera subprodutos como vapor d’água ou gases voláteis. As Figuras 2.11 e 2.12 foram obtidas com um microscópio eletrônico, sendo que a primeira ilustra uma amostra de asfalto modificado com polímero não reativo e a segunda um asfalto modificado com polímero RET (NEGRÃO *et al.*, 2005).

Figura 2.11 - Asfalto Modificado com polímero não reativo, por ser uma modificação mecânica existe a possibilidade de segregação

Figura 2.12 - O polímero RET se mistura fisicamente com o asfalto evitando futuras separações

Segundo a *Task Force 31* da AASTHO, o RET é classificado como polímero do TIPO I (Elastomérico) e a sua utilização, bem como a utilização de qualquer outro polímero do TIPO I na modificação de ligantes asfálticos, tem como objetivo a melhoria das seguintes características:

- I. Diminuição da suscetibilidade térmica (a consistência do asfalto modificado permanece inalterada sob larga faixa de temperaturas. Em clima frio, seu caráter flexível aumenta a resistência às trincas e fissuras na superfície do revestimento. Em clima quente, o incremento do ponto de amolecimento e da viscosidade do ligante reduz o risco de exsudação, afundamentos em trilhas de roda e perda da macrotextura do revestimento);

- II. Melhor característica adesiva e coesiva (aumenta a resistência à desagregação do pavimento. A resistência coesiva faz com que o ligante asfáltico mantenha os agregados unidos, quando sujeitos à ação das cargas de tráfego, em especial nas baixas temperaturas);
- III. Maior resistência ao envelhecimento (aumenta a vida útil do ligante);
- IV. Elevação do Ponto de Amolecimento – PA (diminui a deformação permanente);
- V. Diminuição do Ponto de Ruptura Fraass – PF, temperatura em que o asfalto sofre trincas quando submetido à tensão (diminui as trincas térmicas);
- VI. Aumento do intervalo de plasticidade, faixa de temperatura na qual o asfalto pode ser utilizado (consequência do Ponto de Amolecimento elevado e Ponto de Ruptura Fraass baixo);
- VII. Maior resistência à deformação permanente (aumento da elasticidade);
- VIII. Excelente comportamento reológico (a resistência à fluência e/ou boa recuperação elástica do ligante modificado sob tensões de tração mantém a integridade do revestimento, mesmo quando sujeito a níveis elevados de carga e deslocamento).

2.2.4.5. Borracha

De acordo com a definição dada pela ASTM, o asfalto borracha é a mistura de cimento asfáltico, borracha recuperada de pneus e alguns aditivos no qual o componente de borracha equivale à ao menos 15 % do peso total da mistura e tenha reagido com o cimento asfáltico suficientemente para causar o inchamento das partículas de borracha. Por definição, o asfalto borracha é preparado através de

“processo úmido.” As propriedades físicas requeridas são listadas na norma ASTM D 6114 *Standard Specification for Asphalt Rubber Binder*, no livro anual das normas da ASTM de 2001, e na norma técnica da Caltrans denominada *Caltrans Standard Special Provisions for Asphalt Rubber Binder*. A produção do asfalto borracha é dada a partir da agitação do mesmo em altas temperaturas (superiores a 177° C) para promover a interação física do ligante asfáltico e a borracha, bem como manter as partículas de borracha suspensas na mistura. Vários petróleos destilados ou óleos extensores podem ser adicionados para reduzir a viscosidade, facilitando a sua aplicação por espargidor e promover trabalhabilidade.

A reciclagem de borracha de pneus é utilizada para a recuperação da borracha e são denominadas *Crumb Rubber Modifier* (CRM – Modificador em Pó de Borracha). As borrachas dos pneus são compostas de borracha sintética, borracha natural, negro de fumo, antioxidantes e óleos extensores que são solúveis em ligantes asfálticos quando estes são aquecidos.

Na Califórnia, o asfalto borracha especificado deve ter entre 18% e 22% de Pó de Borracha por peso total da mistura de asfalto borracha. O Pó de Borracha também deverá conter $25\% \pm 2\%$ em peso de borracha natural. As especificações da Caltrans para as propriedades físicas do asfalto borracha estão dentro dos limites listados na ASTM D 6114. A Caltrans exige o uso de óleos extensores como um modificador do asfalto na mistura.

O asfalto borracha não deve ser confundido com outros produtos de asfalto contendo borracha, como, por exemplo, no processo a seco onde o pó de borracha é substituído por uma porção pequena do agregado utilizado e não reage com o ligante asfáltico antes da mistura ou os processos *Terminal Blends*, apesar de também serem processos úmidos, diferem do asfalto borracha por não conterem, geralmente, mais do que 10% de pó de borracha, neste caso o ligante deve ser chamado de modificados por borracha.

Baixos conteúdos de pó de borracha não implicam em viscosidades adequadas para o desempenho desejado nas misturas asfálticas. Contudo, novas técnicas de Terminal Blend incorporam até 15% de pó de borracha e podem ter um desempenho semelhante com o do asfalto borracha.

O concreto asfáltico modificado por borracha pode ser produzido utilizando-se uma variedade de ligantes modificados por borracha, incluindo-se o asfalto borracha, terminal blends modificados por borracha, materiais de ligantes modificados por borracha ou pelo processo a seco.

A elaboração de materiais asfálticos modificados por borracha para uso como selantes de juntas, remendos e membranas começou em meados de 1930. Já no começo de 1950, Lewis e Welborn do *Bureau of Public Roads* (BPR) conduziram um estudo extensivo de laboratório para avaliar os efeitos de vários tipos de borracha nas propriedades de asfaltos denominado “The Effect of various Rubbers on the Properties of Petroleum Asphalts”. Eles utilizaram 14 tipos de pó de borracha e três asfaltos. Os resultados foram publicados no volume de Outubro de 1954 da revista *Public Roads* juntamente com os resultados de outra pesquisa contemporânea “*Laboratory Study of Rubber Asphalt Paving Mixtures*” conduzidos por Rex e Peck no BPR. As misturas estudadas incluíam uma grande variedade de borrachas vulcanizadas ou não vulcanizadas, incluindo bandas de rodagem de pneus, estireno butadieno (SBR), borracha natural, polibutadieno e borracha recuperada para ambos os processos secos e molhados. Em Março de 1960, o Asphalt Institute sediou o primeiro Simpósio de Asfalto Borracha em Chicago, IL. O mesmo constituiu em 5 apresentações de trabalhos e discussões.

Charles H. McDonald, da cidade de Phoenix no Arizona, trabalhou extensivamente com asfalto e borrachas nos anos 60 e 70 e foi fundamental no desenvolvimento do processo úmido (também denominado de Processo McDonald) de se produzir asfalto borracha. Ele foi o primeiro a utilizar rotineiramente o asfalto borracha em remendos e tratamentos superficiais para reparos e manutenção de pavimentos. Tratamentos superficiais com asfalto borracha serviram como a principal estratégia de

manutenção e preservação da cidade de Phoenix para ruas arteriais por quase 20 anos.

Em 1978, o primeiro pavimento com concreto asfáltico modificado por borracha pelo processo seco foi construído na SR 50 em Meyers Flat, CA. O mesmo incluía 1% de pó de borracha por peso adicionado aos agregados secos antes da mistura com o ligante asfáltico. O desempenho foi dado como bom.

2.3. Previsão de Desempenho (HDM IV)

Os modelos de previsão de desempenho têm a finalidade de determinar como deverão variar as condições do pavimento de uma via ao longo do tempo, ou seja, a partir do conhecimento das condições atuais projetar a deterioração do pavimento em função das solicitações de tráfego no tempo, permitindo a caracterização da vida remanescente em função dos níveis de aceitação estabelecidos. (Vale, 2002)

Estes modelos são utilizados correntemente em programas de manutenção e gerência de pavimentos, consistindo-se em ferramentas que permitem avaliar com maior precisão as necessidades futuras de uma via e, conseqüentemente, realizar a otimização do aporte de recursos para a manutenção.

Há diversos tipos de modelos de previsão de desempenho de pavimentos, baseados em premissas e condições de contorno diferenciadas. Os modelos usualmente são classificados em conformidade com a origem em mecanísticos ou empíricos. (Vale, 2002)

Os modelos mecanísticos têm apresentado destaque internacional nas últimas décadas, contemplando equações de fadiga dos materiais de pavimentação obtidas por estudos de laboratórios, associadas ao desenvolvimento de *softwares* que permitem a determinação de tensões e deformações em qualquer ponto da estrutura em função da carga aplicada.

Entretanto, observa-se a dificuldade no meio rodoviário em se associar o desempenho do pavimento em pista aos modelos mecanísticos, o que muitas vezes é suprido, ou minimizando, pela definição de um fator campo/laboratório.

Os modelos empíricos de previsão de desempenho são definidos a partir do acompanhamento periódico de parâmetros técnicos obtidos diretamente da avaliação dos pavimentos, tais como o afundamento da trilha de roda, a serventia, a irregularidade longitudinal e o percentual de área trincada, e, pela facilidade de

obtenção dos dados e pela associação a dados em pista, são amplamente utilizados em gerência de pavimentos dos diversos órgãos e agências nacionais. (Vale, 2002)

Um dos maiores esforços realizados para a obtenção de modelos de previsão de desempenho de pavimentos foi a AASHTO Road Teste, conduzido durante dois anos (1959-1960) nas proximidades de Ottawa, Illinois (QUEIROZ, 1981).

Infelizmente, estes modelos e outros desenvolvidos em situações similares muitas vezes não são aplicáveis a rodovias de outras regiões, em função das diferenças no espectro de cargas, dos materiais de pavimentação empregados e das particularidades do subleito, e dos aspectos construtivos e climáticos envolvidos (QUEIROZ, 1981).

Dentre os modelos empíricos amplamente aplicados no Brasil, destacam-se os obtidos na Pesquisa de Inter-relacionamento de Custos Rodoviários, publicados na norma rodoviária DNER-PRO 159/85, obtidos a partir do monitoramento de trechos rodoviários em operação, concentrados nas regiões Centro-Oeste e Sudeste.

Os modelos do HDM (*Highway Design and Management*) são amplamente utilizados por consultores, agências e departamentos governamentais para avaliar as consequências econômicas de investimentos na infraestrutura rodoviária.

O HDM teve seu estudo iniciado em 1969, em países da África, Ásia, Caribe e América Latina, objetivando a qualificação empírica rigorosa do equilíbrio dos custos de construção e manutenção da rodovia e operação dos veículos, e o desenvolvimento de modelos de planejamento que incorporassem a simulação dos custos totais no ciclo de vida de um pavimento como base de tomada de decisão rodoviária.

A Figura 2.13 apresenta a evolução do HDM ao longo do tempo. (NDLI, 1995)

Figura 2.13 – Evolução do HDM ao longo do tempo (NDLI, 1995)

Têm-se como resultado final modelos que correlacionam o padrão de construção, a previsão de desempenho dos pavimentos, o padrão e o tipo de manutenção aplicáveis ao longo do tempo, e os custos dos usuários.

Os modelos combinam os efeitos de tráfego, meio ambiente, características geométricas e características estruturais e funcionais do pavimento, bem como os custos associados ao transporte e às atividades de manutenção. Faz-se, a partir destes dados, a previsão, ano a ano, das mudanças das condições do pavimento diante de uma política de manutenção e reabilitação pré-definida e a determinação dos custos totais envolvidos que incluem custos de operação, investimentos e manutenção.

Dentre as principais aplicações do modelo HDM, destacam-se (i) planejamento rodoviário para o estabelecimento de políticas e padronização; (ii) gerência de pavimentos; (iii) definição de preços e tarifas de pedágio; e (iv) verificação de métodos de dimensionamento (PATERSON, 1987).

Cumprе ressaltar que as equações relativas à previsão de desempenho de pavimentos flexíveis disponíveis na última versão do HDM (versão 4) não se alteraram em relação à terceira versão, que incorporou os resultados da pesquisa PICR.

Estes modelos foram estruturados baseados em conceitos mecanísticos do comportamento do pavimento e quantificadas estatisticamente a partir de dados de monitoramento de um banco de dados baseados nos estudos do Brasil (PATERSON, 1987).

Para rodovias de pavimento flexível o HDM apresenta os modelos de previsão de desempenho quanto a evolução da irregularidade longitudinal e de trilhas de roda, a ocorrência e evolução de trincamento, panelas e desgaste.

A evolução ocorrida em termos de materiais e equipamentos de pavimentação desde meados da década de 80, quando foram implementados os modelos de previsão de desempenho de pavimentos flexíveis do HDM, até os dias atuais, implica na necessidade de novos modelos ou de adaptações nos atuais. (Vale, 2002)

As equações de desempenho em questão possuem constantes de calibração que podem e devem ser empregadas no ajuste dos modelos em função das peculiaridades em questão, tais como clima e materiais de pavimentação. Estas constantes são listadas a seguir:

Tabela 2.13 – Fatores a serem calibrados no HDM (Manual do HDM)

Coeficiente	Defeito	Efeito
Kcia / Kcpa	Trincas totais	Aparição / Evolução
Kciw / Kcpw	Trincas largas	Aparição / Evolução
Kcit / Kcpt	Trincas térmicas	Aparição / Evolução
Keb	Erosão de borda	Evolução
Kf	Relação SNP úmido/seco	
Kgm / Kgp	Evolução Irregularidade	Com: Meio ambiente / Defeitos
Kpi / Kpp	Panelas	Aparição / Evolução
Krid / Krst / Krpd / Krsw	Trilhas	Compactação inicial / deterioração da estrutura / deformação plástica / desgaste da superfície
Ksfc / Ksfcs	Aderência	Evolução / Efeitos da velocidade
Ksnpk	Número Estrutural corrigido	Evolução com trincas
Ktd	Macro Textura	Evolução
Kvi / Kvp	Arrancamentos	Aparição / Evolução
Kddf	Fator deterioração drenagem	Degradação anual das valetas
Kdrain	Fator drenagem	Vida

Outros valores que são parâmetros importantes das leis de evolução para a previsão de comportamento ao longo do tempo são a intensidade do tráfego pela repetição das cargas por eixo e tipo de veículo e características das técnicas de manutenção/reabilitação, tais como: durabilidade e padrões técnicos obtidos após as obras em função das características das mesmas.

Para determinação dos fatores de calibração do HDM podem ser utilizados quatro níveis de qualidade da informação, “Information Quality Level (IQL)” em inglês, sugeridos por Paterson e Scullion (1990).

Os níveis propostos refletem a variação das necessidades de informação dependendo da abordagem a ser feita, conforme apresentado na Tabela 2.14.

Tabela 2.14 - Níveis de Qualidade da Informação (Pettersen e Scullion, 1990)

Nível	Nível de Detalhe
I	Nível de detalhe mais abrangente, do tipo que seria utilizado como ponto de referência para outros métodos de medida e em pesquisa fundamental. Seria também utilizado para investigações em campo detalhadas para um diagnóstico denso do problema e em projetos de primeira linha. Normalmente utilizado em nível de projeto em casos especiais e sua utilização em nível de rede é improvável. Requer alto nível de aptidão da equipe e recursos institucionais para apoiar e utilizar os métodos de coleção de dados.
II	Um nível de detalhe suficiente para modelos de programação abrangentes e para métodos de dimensionamentos padrão. Para planejamento, seria utilizado somente em uma cobertura de amostragem. Suficiente para distinguir o desempenho e retorno econômico de diferentes opções técnicas com diferenças práticas em dimensões e materiais. Métodos de aquisições padrão para coleção de dados em nível de projeto. Tipicamente requereria aquisição de dados automatizados para nível de rede e seria utilizado para programação em nível de rede. Requer de apoio institucional confiável e de recursos.
III	Detalhe suficiente para modelos de planejamento e modelos de programação padrão para cobertura total da rede. Para projetos de dimensionamento, seria adequado para métodos elementares com pouca necessidade de dados e projetos para vias de baixo volume. Apto a ser coletado em pesquisas de rede por uma combinação de métodos automatizados e manuais, ou a combinação dos mesmos.
IV	Estatísticas básicas de inventário, desempenho e utilização de interesse dos usuários e fornecedores. Adequado para planejamento simples e modelos de programação, mas é adequado para projetos somente para projetos padronizados the vias com volume muito baixo. O mais simples meio de coleção de dados, seja manual ou combinação de manual e automatizado, fornece medidas diretas, mas aproximadas, e é adequado para agências pequenas ou de recursos escassos. Como alternativa, a estatística pode ser computada de dados mais detalhados.

O ponto chave da tabela apresentada acima é que há uma hierarquia de dados necessários, bem como métodos de coleta/análise.

Não adianta utilizar um método de coleta de dados sofisticado quando o necessário são informações gerais da malha. Ao mesmo tempo, quando a ideia é desenvolver modelos de desempenho de pavimento é imperativo que métodos extremamente acurados sejam utilizados na aquisição da informação.

O HDM-III contém equações para prever a deterioração de rodovias e os efeitos da manutenção (RDME) em função das características dos pavimentos, tráfego e meio ambiente (Watanatada, et al., 1987). Os modelos RDME do HDM-III vieram de dois estudos pioneiros conduzidos em países tropicais. (NDLI, 1995). O primeiro estudo foi no Kenya conduzido entre 1971 e 1975. Os resultados formaram a base para as equações do HDM-II. O segundo e grande estudo foi realizado no Brasil entre 1975 e 1984, a Tabela 2.15 resume o escopo destes dois estudos (NDLI, 1995).

Tabela 2.15: Escopos dos estudos no Kenya e Brasil (NDLI, 1995)

Característica	Estudo de Desempenho de Pavimento	
	Kenya (1971-1974)	Brasil (1977-1982)
Média Anual de Precipitação (mm/ano)	400-2.000	1.200-2.000
Período de Observação (anos)	5	5
Número de Observações	N/A	500.000
Total de Seções	49	116
Número de Seções com Base Granular	10	74
Número de Seções c/ Base Cimentada	39	11
Número de Seções com Recapeamento	0	33
Comprimento das Seções (m)	1.000	720
Volume de Tráfego (VMD)	323-1.618	73 – 5.700
N AASHTO ano (milhões/faixa/ano)	0,012 – 3,6	0,0003-1,7
Idade do Pavimento (anos)	0 - 14	0 - 24
Número Estrutural Corrigido (SNC)	2,5 - 5,1	1,5 - 7,0
Deflexão Viga Benkelman (mm)	0,18 – 1,12	0,20 – 2,02
Irregularidade Longitudinal IRI (m/km)	2,9 - 6,0	1,8 – 10,2

As equações tiradas do estudo no Brasil formaram a base para os modelos RDME no HDM-III (Paterson, 1987). No entanto, mesmo que o HDM-III tenha se baseado largamente nos dados obtidos neste estudo, como descrito por Paterson (1987) estas equações foram validadas utilizando-se dados de diversos países com diferentes climas, tendo as equações sido confirmadas. Sendo assim, este modelo não deve ser visto como limitado a países de clima tropical.

Segundo a NDLI (1995) os modelos do HDM IV foram formulados para diferentes tipos de pavimentos, levando-se em consideração os diversos tipos de materiais, incluindo revestimentos asfálticos, bases, etc. como pode ser observado na Tabela 2.16.

Tabela 2.16 – Tipos de Pavimentos do HDM (NDLI, 1995)

Categoria da Superfície	Classe da Superfície	Tipo da Base	Tipo da Superfície	Material da Superfície	
Pavimentadas	Betuminosa	Granular	Mistura Asfáltica	Concreto Asfáltico	
				Pré Misturado a Quente	
				Asfalto Modificado por Polímero	
		Asfáltica		Asfalto Modificado por Borracha	
				Pré Misturado a Frio	
				Camada Porosa de Atrito	
	Pavimento Asfáltico	SMA			
		Tratamento Superficial Simples			
		Estabilizada	Tratamento Superficial		Cape Seal
					Lama Asfáltica
Concreto	Granular	Placas de Concreto Simples sem Barras de Transferência		Concreto de Cimento Portland	
		Placas de Concreto Simples com Barras de Transferência			
		Placas de Concreto Armado			
		Placas de Concreto Continuamente Armado			
Não Pavimentadas	Não Pavimentadas	-	Granular	Laterítico	
			Terra	Quartzito	
				Vulcânico	
				Sedimentar	

2.3.1. Modelos Mecanísticos e Empíricos

Para modelos de previsão da deterioração de rodovias e os efeitos da manutenção (modelos RDME) existem duas classes: modelos mecanísticos e modelos empíricos. (NDLI, 1995).

Modelos mecanísticos utilizam teorias fundamentais do comportamento dos pavimentos para a modelagem, por outro lado os modelos empíricos geralmente são baseados em análises estatísticas da deterioração observada e sua tendência.

Existem vantagens e desvantagens de cada uma das formas, enquanto os modelos mecanísticos têm uma base teórica forte, eles se baseiam em parâmetros que são difíceis de serem quantificados em campo. Já os modelos empíricos, muitas vezes são válidos apenas para situações localizadas não podendo ser aplicados em condições distintas àquelas as quais foi baseado.

Paterson (1987) minimizou este problema adotando uma abordagem empírica estrutural para desenvolver os modelos RDME do HDM III. Esta abordagem se baseou na identificação da forma funcional das variáveis de fontes externas e utilizou diversas técnicas estatísticas para quantificar seus impactos.

As equações do HDM foram formuladas baseadas em conceitos mecanísticos das propriedades e comportamento dos materiais sob a ação de um certo tráfego e fatores climáticos e resultados de pesquisas experimentais (Peterson, 1987). Esta técnica trouxe a vantagem de resultar em modelos que combinam a base teórica e experimental dos modelos mecanísticos com o comportamento observado em estudos empíricos.

O sucesso desta abordagem pode ser visto na flexibilidade dos modelos resultados e no sucesso de sua aplicação em prever o desempenho do pavimento em muitos países (Chakrabarti and Bennett, 1994, *apud* NDLI, 1995).

2.3.2. Modelos Absoluto e Incremental

Existem dois tipos de modelos em termos de evolução que podem ser utilizados para previsão de desempenho: modelos absolutos e incrementais.

Com o modelo absoluto as variáveis independentes dão a condição como função destas variáveis. Modelos incrementais dão a mudança de condição de um estado inicial como uma função de variáveis independentes. Modelos absolutos têm a desvantagem de serem usualmente confinados a condições específicas às quais eles são baseados e não podem ser aplicados em diferentes condições. Por outro lado, modelos incrementais podem ser aplicados em diferentes condições de início e oferecer muito mais flexibilidade de aplicação. (NDLI, 1995)

Por estas vantagens, os modelos incrementais foram adotados como base para os modelos de deterioração dos pavimentos no HDM. Os modelos trabalham em termos de mudança de condição ao longo de um período que pode ser de tempo ou passagem de tráfego.

A deterioração do pavimento pode ser expressa em termos de uma função dos defeitos ou pelo desenvolvimento e progressão da condição atual da rodovia. Como descrito por Paterson (1987), uma função de defeitos expressa o desempenho de um pavimento com relação a dois padrões, a qualidade da construção original e o nível terminal de defeitos no qual a manutenção ou a reabilitação são necessárias. Assim, funções de defeitos se apoiam em padrões prescritos que variam com uma frequência significativa entre países e até mesmo em diferentes regiões de um mesmo país.

A abordagem alternativa de prever o desenvolvimento dos defeitos-chaves e expressar estes desenvolvimentos da mesma forma que os defeitos são quantificados (por exemplo, trilhas de roda são expressas em mm, trincas em percentagem da área, irregularidade longitudinal em m/km) não só oferece uma grande versatilidade, mas também facilita o entendimento do que está acontecendo com o pavimento. O HDM

trabalha no desenvolvimento e progresso da condição atual do pavimento em termos de defeitos chave. (NDLI, 1995)

2.3.3. Curva de Evolução da Trilha de Roda do HDM-4

A deformação permanente de um pavimento pode ser definida como a deformação permanente ou irreversível de uma ou mais camadas que, caso canalizada nas trilhas de rodas, acumula com o tempo e se manifesta na forma de afundamento (Paterson, 1987).

Segundo o Manual do HDM-4, a modelagem da deformação permanente é realizada depois que os valores de todas as demais patologias (ou seja, trincamento, desagregação, panelas e quebra de bordo) ao final do ano forem calculados.

O modelo de deformação permanente utilizado é baseado em quatro componentes:

- Consolidação inicial;
- Deformação estrutural;
- Deformação plástica;
- Desgaste devido a pneus com pregos.

A deformação permanente em qualquer momento é dada pela soma dos quatro componentes acima.

2.3.3.1. Consolidação Inicial

A consolidação inicial depende do grau de compactação da base, sub-base e do subleito, ou seja, o parâmetro COMP. No HDM a consolidação inicial é dada pela seguinte equação:

$$RDO = Krid [a_0 (\text{Nano})^{(a1+a2Df)} \text{SNC}^{a3} \text{COMP}^{a4}]$$

onde:

RDO: Deformação permanente em função da consolidação inicial (mm);

Krid: Fator de calibração para a consolidação inicial;

Nano: Número de eixos padrão equiv. por ano AASHTO (milhões/faixa);

Df: Deflexão média anual pela viga Benkelman (mm);

SNC: Número estrutural corrigido médio anual do pavimento;

COMP: Grau de compactação (%);

a_1 , a_2 , a_3 , a_4 : Coeficientes numerais definidos para o modelo em função do tipo de pavimento.

Os valores padrões sugeridos para os coeficientes a_0 a a_4 para o modelo de consolidação inicial são dados na tabela 2.17.

Tabela 2.17 - Valores padrões para os coeficientes do modelo de consolidação inicial

Tipo de Pavimento		Coeficiente				
		a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
Mistura Asfáltica	Base Granular					
Tratamento Superficial	Base Asfáltica	51740	0,09	0,0384	-0,502	-2,30
	Base Estabilizada					
Mistura Asfáltica	Base de					
Tratamento Superficial	Pavimento	0	0	0	0	0
	Asfáltico					

A consolidação inicial só se aplica para o caso de implantação ou reconstrução que envolve a construção de uma nova camada de base (ou seja, quando $AGE_4 = 0$) para um período de um ano, sendo AGE_4 definido como a vida desde a reconstrução (incluindo-se a base) ou implantação em anos.

2.3.3.2. Deformação Estrutural (DRDST)

O modelo de deformação estrutural utilizado no HDM-III foi simplificado para uma forma linear para o HDM-4 (Morosiuk, 1998). Termos separados foram propostos para a deformação estrutural sem trincamento e para a deformação estrutural após o trincamento conforme apresentado a seguir:

- **Deformação estrutural sem trincamento (DRDST_{UC}):**

$$DRDST_{UC} = K_{RST} (a_0 SNC^{a1} Nano^{a2} COMP^{a3})$$

onde:

DRDST_{UC}: Deformação estrutural sem trincamento;

K_{rst}: Fator de calibração para a deformação estrutural;

SNC: Número estrutural corrigido médio anual do pavimento;

Nano: Número de eixos padrão equiv. por ano AASHTO (milhões/faixa);

COMP: Grau de compactação (%);

a₁, a₂, a₃, a₄: Coeficientes numerais definidos para o modelo em função da existência ou não de trincas.

- **Deformação estrutural após trincamento (DRDST_{crk}):**

$$DRDST_{crk} = K_{RST} (a_0 SNC^{a1} Nano^{a2} MMP^{a3} ACX_a^{a4})$$

onde:

DRDST_{crk}: Deformação estrutural após trincamento;

K_{rst}: Fator de calibração para a deformação estrutural;

SNC: Número estrutural corrigido médio anual do pavimento;

Nano: Número de eixos padrão equiv. por ano AASHTO (milhões/faixa);

MMP: Precipitação média anual (mm/mês);

ACX_a: Área trincada no início do ano de análise (% da área total);

a_1, a_2, a_3, a_4 : Coeficientes numerais definidos para o modelo em função da existência ou não de trincas.

Os valores padrões sugeridos para os coeficientes a_0 a a_4 para o modelo de deformação estrutural são dados na Tabela 2.18.

Tabela 2.18 - Valores padrões para os coeficientes do modelo de deformação estrutural

Revestimento	Coeficiente				
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
Sem trincamento	44950	-1,14	0,11	-2,3	-
Com trincamento	0,0000248	-0,84	0,14	1,07	1,11

- **Aumento Anual Incremental da Deformação Estrutural (DRDST)**

O aumento anual incremental da deformação estrutural é dado pela seguinte equação:

a) Nos casos onde a Área de Trincamento for igual a zero:

$$DRDST = DRDST_{UC}$$

a) Nos casos onde a Área de Trincamento for maior do que zero:

$$DRDST = DRDST_{UC} + DRDST_{CRK}$$

2.3.3.3. Deformação Plástica

O modelo de deformação plástica inclui a variável associada aos defeitos na fase de construção (CDS), que indica se a superfície é susceptível a deformação plástica.

O modelo de deformação plástica utilizado é apresentado a seguir:

$$DRDPD = K_{rpd} CDS^3 a_0 Nano V_p^{a_1} H^{a_2}$$

Onde:

DRDPD: Aumento incremental da deformação plástica no ano de análise (mm);

Krpd: Fator de calibração para deformação plástica;

CDS: Indicador de defeitos de construção na superfície betuminosa;

Nano: Número de eixos padrão equiv. por ano AASHTO (milhões/faixa);

Vp: Velocidade dos veículos pesados (km/h);

H: espessura da camada betuminosa (mm);

a_0 , a_1 , a_2 : Coeficientes numerais definidos para o modelo em função do tipo de superfície.

Os valores padrões sugeridos para os coeficientes do modelo de deformação plástica são dados na Tabela 2.19.

Tabela 2.19 - Valores padrões para os coeficientes do modelo de deformação plástica.

Tipo de Superfície	Coeficientes		
	a_0	a_1	a_2
Mistura Asfáltica	2,46	-0,78	0,71
Tratamento Superficial	0	-0,78	0,71

2.3.3.4. Desgaste de Superfície

O modelo de deformação em trilha de roda associado ao desgaste da superfície (Djarf, 1995) é aplicável para situações onde os pneus dos veículos contém pregos ou correntes durante o período de congelamento, típicos em países de inverno rigoroso. A equação do HDM para este fenômeno é a seguinte:

$$RDW = Krsw [0,0000248 \text{ PASS } L^{-0,46} V^{1,22} \text{ SAL}^{0,32}]$$

Onde:

RDW: Aumento incremental da deformação permanente em função do uso de pneus com pregos/correntes no ano de análise (mm);

K_{rsw}: Fator de calibração para desgaste da superfície;

PASS: Número anual de passagens de veículos com pneus com pregos/correntes em uma direção (1000s);

L : Largura da via incluindo o acostamento (m);

V: Velocidade média do tráfego (km/h);

SAL: Parâmetro para vias salgadas ou não salgadas (Vias salgadas =2; Vias não salgadas =1);

a₁, a₂, a₃, a₄: Coeficientes numerais definidos para o modelo em função da existência ou não de trincas.

2.3.3.5. Deformação Permanente Total (DRDM)

O aumento anual incremental da deformação permanente total (DRDM) é dado a partir das seguintes equações:

- Caso de implantação ou reconstrução que envolve a construção de uma nova camada de base em menos de um ano (AGE4 ≤ 1):

$$DRDM = RDO + DRDPD + DRDW$$

- Caso contrário:

$$DRDM = DRDST + DRDPD + DRDW$$

Onde:

DRDM: Aumento incremental da deformação permanente média total nas duas trilhas de rodas no ano de análise (mm);

RDO: Deformação permanente em função da consolidação inicial (mm);

DRDST: Aumento incremental da deformação estrutural no ano de análise (mm);

DRDPD: Aumento incremental da deformação plástica no ano de análise (mm);

DRDW: Aumento incremental da deformação da trilha de roda em função do desgaste da superfície devido à pneus com pregos/correntes no ano de análise (mm).

A deformação permanente total (RDMb) para um dado período é apresentada a seguir:

$$RDMb = RDMa + DRDM$$

Onde:

RDMb: Deformação permanente total média nas duas trilhas de rodas no final do ano análise (mm);

RDMa: Deformação permanente total média nas duas trilhas de rodas no início do ano análise (mm).

Ressalta-se que no presente estudo, durante a calibração da curva de evolução da trilha de roda do HDM foram utilizados apenas os K_{rpd} e K_{rst} que estão nas equações de evolução da deformação da trilha de roda da camada asfáltica e do restante da estrutura do pavimento respectivamente. Os coeficientes de calibração K_{rid} e K_{rsw} não foram utilizados já que estão nas equações para pavimentos novos e regiões com neve, o que não representam a realidade dos segmentos estudados.

3. Materiais, Métodos e Resultados dos Estudos em Laboratório e em Pista

3.1. Antecedentes

No período entre 2.008 e 2009, com recursos de desenvolvimento tecnológico RDT da ANTT, realizou-se uma pesquisa com diversos tipos de ligantes e misturas asfálticas no segmento da Pista Norte da BR-376, do km 675,2 ao km 673,2, com administração da Autopista Litoral Sul, do Grupo OHL Brasil. Esta pesquisa foi realizada em conjunto pela Escola Politécnica da USP, Dynatest, JMChaves e CDT – Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Paulista (OHL Brasil). Graças a relevância desta pesquisa, os dados puderam ser empregados em uma tese de doutoramento de Moura (2010).

No segmento escolhido para realização da pesquisa, havia como camada de rolamento, antes do estudo de 2008, concreto asfáltico, predominantemente enquadrado na faixa C do DNER (na época DNER-ES 313/97 atualmente DNIT 031/2006-ES). O monitoramento da pista mostrou numerosos pontos com formação de trilha de rodas significativas, atingindo até 10 cm de afundamento. Dado o volume elevado de tráfego pesado na região, que atualmente chega a 10.500 veículos por dia, sendo 60% comerciais, notou-se a necessidade de avaliar diferentes tipos de misturas asfálticas para buscar quais tipos de revestimentos asfálticos seriam menos susceptíveis à formação de trilha de rodas.

Inicialmente foi construída uma pista teste com a extensão de 2.000m, dividida em 10 trechos com diferentes tipos de revestimentos asfálticos, no que tange à granulometria e ligantes asfálticos.

Utilizaram-se quatro tipos de composição granulométrica sendo: uma considerada como mistura de referência a saber, Faixa Mix IVb I.A. (Instituto do Asfalto norte-americano), que tangencia a parte mais grossa da distribuição granulométrica do DNIT – Faixa C (DNIT 031/2006-ES), duas faixas contínuas bem-graduadas do tipo SUPERPAVE denominadas de SPV 12,5 mm parte grossa e outra SPV 9,5 mm

(sendo esta dimensão referente ao diâmetro nominal máximo do agregado graúdo) e uma quarta faixa semi-descontínua, o GAP-GRADED, faixa da Caltrans norte-americana.

Foram utilizados cinco tipos de ligantes asfálticos, sendo: dois tipos convencionais (CAP 50/70 e CAP 30/45), e outros três modificados, um por 1,2% de polímero RET (Elvaloy®), um segundo modificado por 4% de polímero SBS e um terceiro modificado por borracha de pneus – AMB, tipo AB8. A Tabela 3.1 apresenta um resumo com os cimentos asfálticos utilizados.

Tabela 3.1 – Tipos de Cimentos Asfálticos utilizados

Ligante	Especificação/ Resolução	Tipo Utilizado
CAP 50/70	ANP 19 (Jul/2005)	CAP 50 70
CAP 30/45	ANP 19 (Jul/2005)	CAP 30 45
1,2% de polímero RET	ANP 32 (Set/2010)	55/75-E
4% de polímero SBS	ANP 32 (Set/2010)	60/85-E
AMB	ANP 39 (Dez/2008)	AB8

A pista teste localiza-se no Município de Guaratuba – PR, entre os kms 675+200 e 673+200 da Rodovia BR 376 PR, pista norte, 3ª faixa, trecho em aclive, direção de Joinville-SC para Curitiba-PR, conforme ilustrado na Figura 3.1. O local escolhido para implantação da pista teste possui características representativas de tráfego e de estrutura de pavimento de maior parte do trecho onde se precisa dar uma solução adequada aos problemas de trilhas de roda. A seleção de soluções de revestimentos que suportem o tráfego de veículos comerciais pesados e lentos, em aclives, auxiliará na escolha do tipo de revestimento asfáltico a ser aplicado em condições semelhantes da rodovia, ou em locais de solicitação expressiva pelo tráfego e potencialidade de surgimento de deformação permanente.

O clima do Município de Guaratuba – PR, região onde a pista teste foi construída, é classificado como subtropical superúmido, sem estação seca definida e isento de geadas. A média de temperatura dos meses mais quentes é superior a 30°C, e nos meses mais frios inferior a 15°C (PREFEITURA MUNICIPAL DE GUARATUBA, 2009).

Figura 3.1 – Mapa da localização da pista teste

A Tabela 3.2 apresenta um resumo das pistas testes executadas na primeira etapa do estudo.

Tabela 3.2 – Identificação e localização de cada trecho da pista teste

Trecho	Localização (km)		Tipo de CAP	Faixa Granulométrica
	Início	Fim		
1	675+200	675+000	CAP 50/70	Mix lvb (I.A.)
2	675+000	674+800	CAP 50/70	Fx. SPV – 12,5 mm
3	674+800	674+600	CAP mod. por 4% de SBS	Fx. SPV – 12,5 mm
4	674+600	674+400	CAP mod. por 4% de SBS	Fx. SPV – 9,5 mm
5	674+400	674+200	CAP mod. por 1,2% de Elvaloy	Fx. SPV – 9,5 mm

Trecho	Localização (km)		Tipo de CAP	Faixa Granulométrica
6	674+200	674+000	CAP mod. por 1,2% de Elvaloy	Fx. SPV – 12,5 mm
7	674+000	673+800	CAP mod. por borracha	GAP-GRADED
8	673+800	673+600	CAP 30/45	Fx. SPV – 12,5 mm
9	673+600	673+400	CAP 30/45	Fx. SPV – 9,5 mm
10	673+400	673+200	CAP 30/45	GAP-GRADED

Para o desenvolvimento do estudo foram cumpridas as seguintes atividades, descritas abaixo em ordem cronológica.

- Projetos de dosagens Marshall com os materiais empregados na pista teste;
- Levantamentos deflectométricos com o equipamento Falling Weight Deflectometer –FWD antes e após a execução da pista teste;
- Determinação da textura com ensaio de mancha de areia;
- Levantamento da irregularidade longitudinal;
- Deformação permanente em trilha de roda em laboratório de misturas asfálticas usinadas em laboratório;
- Extração de placas da pista teste para ensaio de deformação permanente em trilha de roda em laboratório com o simulador francês tipo LCPC;
- Deformação permanente em trilha de roda com emprego do simulador de tráfego móvel - no trecho T10;
- Deformação permanente em trilha de roda de campo com emprego do simulador de tráfego móvel - no trecho T04;
- Comparação dos resultados de deformação permanente em trilha de roda do simulador de campo com o simulador de laboratório dos trechos T04 e T10;

- Deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas usinadas no teor de ligante asfáltico e na distribuição granulométrica encontradas em pista;
- Espessuras das camadas que compõem a estrutura dos pavimentos correspondente aos trechos submetidos ao simulador de tráfego, T01, T04 e T10;
- Recuperação do ligante asfáltico pelo método de Abson, ensaios de caracterização do ligante recuperado, determinação do teor de ligante asfáltico e granulometria das misturas asfálticas de placas extraídas de pista; ,
- Deformação permanente em trilha de roda de campo com emprego do simulador de tráfego móvel - no trecho T01;
- Aptidão de compactação com emprego da prensa de cisalhamento giratório - PCG (francesa) das misturas asfálticas usinadas nos teores de pista e teores corrigidos para os trechos T01 ao T05;
- Deformação permanente em trilha de roda de placas usinadas em laboratório e compactadas em laboratório com distribuição granulométrica e teor de ligante asfáltico de projeto;
- Avaliação da aptidão de compactação das misturas asfálticas com emprego da prensa de cisalhamento giratório - PCG francesa para os trechos T06 ao T10;
- Deformação permanente em trilha de roda de placas usinadas em laboratório e compactadas em laboratório com distribuição granulométrica de pista e teor de ligante asfáltico corrigido após estudo de laboratório;
- Levantamentos das flechas (afundamentos) para os períodos de 1, 6 e 13 meses após abertura do tráfego;
- Levantamento do IGG após 6 meses de tráfego.

Devido à evolução das flechas observadas ao longo de todo os trechos da pista teste, após mais de um ano de testes, ultrapassando o limite superior de 7 mm especificado pela ANTT através do Programa de Estruturação de Rodovias – PER, sugeriu-se a remoção com fresagem de 50 mm da camada de rolamento e recomposição com outros três tipos de misturas asfálticas:

- a) faixa SPV 12,5 mm com ligante asfáltico modificado por SBS;
- b) faixa SPV 12,5 mm com ligante asfáltico modificado por 1,2% de RET;
- c) faixa GAP-GRADED do Caltrans com ligante asfáltico modificado por borracha.

A sugestão desses três tipos de misturas asfálticas baseia-se nos resultados obtidos com a deformação permanente em trilha de roda. As misturas asfálticas descontínuas constituem-se uma alternativa importante para a resistência à deformação permanente, porém devem ser bem concebidas quanto à graduação e o ligante adequadamente selecionado. O trabalho mostrou a importância de uma seleção prévia criteriosa da graduação e do tipo de ligante asfáltico, além de uma dosagem rigorosa, de preferência realizada com ensaios que possam prever comportamento mecânico, principalmente no caso de revestimentos asfálticos para vias de tráfego pesado.

Como conclusão da pesquisa, indicou-se a adoção do limite máximo de 5% de deformação permanente em trilha de roda, obtido com o equipamento francês tipo LCP, em placas de 5 cm de espessura, para as misturas asfálticas brasileiras que serão submetidas a tráfego considerado pesado, com baixas velocidades e temperaturas médias de serviço elevadas. Para essas condições climáticas e de tráfego, não se deve utilizar ligantes asfálticos cujas características reológicas indiquem baixas consistências.

Também face aos resultados desta pesquisa, em que pesem as flechas observadas ao longo de todo o trechos da pista teste ultrapassando o limite superior de 7 mm

especificado pela ANTT através do Programa de Estruturação de Rodovias – PER, e as sugestões de remoção com fresagem de 50 mm da camada de rolamento e recomposição com outros três tipos de misturas asfálticas, iniciou-se a partir de abril de 2010 uma nova etapa, com três novas pistas testes.

3.2. Estudo em Laboratório e em Pista

Segundo Vale, 2008, o primeiro passo para o sucesso de uma pesquisa é o seu planejamento. Assim, recomenda-se que o mesmo seja realizado de forma minuciosa e consistente, o que poderá poupar recursos ao longo da execução da simulação de tráfego. O ponto chave do planejamento é compreender qual o objetivo da pesquisa em questão e para qual malha rodoviária se destina a aplicação de seus resultados.

Esta pesquisa tem como objetivo central propor uma metodologia para calibração de modelos matemáticos de evolução da deformação permanente em trilha de roda do pavimento com a utilização de Simulador Linear Móvel de Tráfego. Para tanto foram estudados em laboratório e em pista teste na BR-376/PR a deformação permanente em trilha de roda de revestimentos asfálticos de alto desempenho que compõem pavimentos sujeitos a tráfego muito pesado rodoviário. Duas soluções diferentes de concreto asfáltico usinado a quente para a camada de rolamento foram estudados: uma por Polímero RET e uma por Polímero SBS, e uma composição semi-descontínua, um GAP-GRADED com ligante modificado por Borracha,. Estes três tipos de ligantes foram selecionados a partir dos resultados da pesquisa realizada por Moura (2010).

3.2.1. Estudo em Laboratório

A etapa de laboratório compreende uma etapa importante dentro do planejamento do estudo, já que estes resultados servirão de guia para os próximos passos da pesquisa, interferindo diretamente nas decisões com relação aos segmentos testes que serão executados na rodovia.

Durante as pesquisas em laboratório foram executadas as seguintes atividades:

- Caracterização dos Agregados a serem empregados na pesquisa;
- Caracterização dos Ligantes Asfálticos a serem empregados na pesquisa;
- Definição das dosagens das misturas a serem aplicados, com agregados locais e os diferentes ligantes que serão usados na obra;
- Ensaios no Laboratório para verificação do comportamento das misturas asfálticas estudadas em Simulador de Tráfego de pequena escala.

No que se refere às misturas asfálticas estudadas, o primeiro passo é o estudo dos materiais disponíveis na região da pista teste para a execução dos serviços.

3.2.1.1. Agregados

3.2.1.1.1. Origem

Neste estudo foram empregados agregados de origem mineralógica gnáissica, proveniente da Pedreira Rudnick, localizada no estado de Santa Catarina.

Os materiais britados foram coletados diretamente dos estoques da pedreira a partir de diversos pontos da pilha de modo a se obter uma amostra representativa do material (DNER-PRO 120/97). A redução das amostras em laboratório foi realizada com a utilização do separador mecânico (DNER-PRO 199/96).

3.2.1.1.2. Análise Granulométrica

Para composição da curva granulométrica do projeto foram selecionadas três frações dos agregados britados: Brita 1, pedrisco e pó de pedra além da Cal CH I. As características granulométricas dos agregados graúdos e miúdos são apresentadas na Tabela 3.3 e na Figura 3.2.

Tabela 3.3 – Análise Granulométrica dos Agregados

Peneiras		% em peso passando			
ASTM	mm	Brita 1	Pedrisco	Pó de Pedra	Cal CH "I"
3/4"	19,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,5	74,8	100,0	100,0	100,0
3/8"	9,5	30,5	100,0	100,0	100,0
Nº 4	4,8	4,4	30,7	99,2	100,0
Nº 10	2,0	3,0	6,6	68,5	100,0
Nº 40	0,42	2,2	2,6	28,3	98,0
Nº 80	0,18	1,9	2,0	17,6	98,0
Nº 200	0,075	1,5	1,5	10,7	90,0

Figura 3.2 – Curvas Granulométricas dos Agregados Empregados

3.2.1.1.3. Curvas Granulométricas

As curvas granulométricas foram selecionadas a partir da pesquisa que precedeu o presente estudo, tendo sido escolhidos dois tipos de curvas granulométricas e três tipos de ligantes asfálticos conforme listados abaixo.

- a) faixa SPV 12,5 mm (SUPERPAVE 12,5mm – concreto asfáltico denso, curva bem-graduada) com ligante asfáltico modificado por SBS tipo 60/85 E;
- b) faixa SPV 12,5 mm (SUPERPAVE 12,5mm – concreto asfáltico denso, curva bem-graduada) com ligante asfáltico modificado por 1,2% de RET tipo 55/75 E;
- c) faixa GAP-GRADED Caltrans com ligante asfáltico modificado com borracha tipo AB8.

As curvas granulométricas de cada uma das misturas foram definidas pelo CDT OHL Brasil e são apresentadas na Tabela 3.4 e nas Figuras 3.3, 3.4 e 3.5 na sequência. As curvas granulométricas dos concretos asfálticos são iguais, com variações não significativas decorrentes de pequenas variações de material.

Tabela 3.4 – Análise Granulométrica dos Agregados

Composição da Mistura				
Descrição	Unid.	Asfalto Borracha	Asfalto com SBS	Asfalto com polímero RET
Brita 1	%	30,1	27,3	27,4
Pedrisco	%	44,2	29,9	30,0
Pó de pedra	%	17,9	36,4	36,5
Cal Hidratada CH-1	%	1,9	1,4	1,4

Figura 3.3 – Curva Granulométrica - SPV 12,5 mm com SBS

Figura 3.4 – Curva Granulométrica - SPV 12,5 mm com RET

Figura 3.5 – Curva Granulométrica - GAP-GRADED com Borracha

3.2.1.2. Ligantes Asfálticos

Para o desenvolvimento da pesquisa foram considerados três diferentes tipos de ligantes asfálticos, dois cimentos asfálticos modificados por polímero e um modificado por borracha, caracterizados no CDT-OHL, conforme apresentado na Tabela 3.5 .

Tabela 3.5 – Características dos Ligantes

Descrição			Asfalto com SBS		Asfalto com polímero RET		Asfalto Borracha	
Material	Nome Comercial		CAP 60/85 - FLEXPAVE		CAP 50/70 + 1,2% de RET		Ecoflex B	
	Classificação ANP		60/85 E		55/75 E		AB-8	
Ensaio	Unid.	Método	Resultado	Especificação	Resultado	Especificação	Resultado	Especificação
Penetração (100g, 5 s, 25°C) (Pen)	0,1mm	NBR 6576	48	Mínimo 45	38	Mínimo 45	54	30 - 70
Ponto de Amolecimento (Pa)	°C	NBR 6560	64	Mínimo 60	65	Mínimo 60	57	55 - 62
Recuperação Elástica por Torção	%	OHL T-329	74	Mínimo 70	54	Mínimo 70	60	Mínimo 50
Viscosidade Brookfield a 135°C (SP-21 - 20 RPM)	cP	NBR 15184	1163	-	1500	-	1833	-
Viscosidade Brookfield a 150°C (SP-21 - 20 RPM)	cP	NBR 15184	618	-	628	-	783	-
Viscosidade Brookfield a 177°C (SP-21 - 50 RPM)	cP	NBR 15184	221	-	181	-	313	800 - 2000
Densidade	g/dm3	DNIT ME-193	1,003	-	N/A	-	1,022	-
Ponto de fulgor	°C	NBR 11341	300	Mínimo 235	285	Mínimo 235	339	Mínimo 235
Espuma a 177°	-	ANP-R19	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo
Faixa de Temperatura de Mistura	°C	-	182 a 189	-	176 a 181	-	190 a 197	-
Faixa de Temperatura para Compactação	°C	-	168 a 174	-	165 a 170	-	176 a 182	-

O ensaio de Recuperação Elástica realizado é o da especificação da OHL, ou seja, Recuperação Elástica por Torção, sendo este o único disponível no Laboratório CDT-OHL. Os valores apresentados como limite não têm relação os da Resolução ANP 32 que especifica os Asfaltos Modificados por Polímeros Elastoméricos no Brasil.

3.2.1.3. Dosagem dos Teores Ótimos

Para a determinação do teor de projeto de ligante, foram elaborados projetos de misturas nas faixas granulométricas selecionadas através da metodologia Marshall (DNER ME 043/95), executados no CDT-OHL.

Os corpos de prova foram moldados segundo a metodologia Marshall com 75 golpes em cada face, em diferentes teores de ligantes. Buscou-se obter corpos-de-prova com as mesmas características de homogeneidade obtida na usina, ou seja, as diversas frações (brita 0, brita 1 e pó de pedra) eram quarteadas e em seguida misturadas de forma a se obter uma granulometria similar para todos corpos-de-prova.

3.2.1.3.1. Métodos de Caracterização das Misturas

a) Moldagem com Compactador Marshall

Foram moldados corpos-de-prova (cps) no compactador Marshall para realização da dosagem do teor “ótimo”, incluindo a realização de ensaios resistência à tração. Preparou-se um traço da mistura com aproximadamente 1.200g de material para confecção de cada corpo-de-prova. O ensaio, em linhas gerais, consiste em aquecer o ligante e os agregados nas temperaturas pré-definidas em função da curva de viscosidade do ligante.

Misturou-se o ligante aos agregados e fíler, previamente já dosados e misturados, durante dois a três minutos na temperatura de usinagem e, em seguida, a mistura permaneceu em estufa, dentro de um recipiente, regulada na temperatura de

compactação, pelo período de duas horas, para simular o efeito do condicionamento de curto prazo equivalente ao período de usinagem e transporte entre a usina e a pista. Decorrido este período, preencheu-se o molde cilíndrico metálico com mistura asfáltica para compactação de cada um dos corpos-de-prova, com 75 golpes em cada uma das faces.

b) Densidade Aparente (DNER-ME 117/94)

Após o desmolde do corpo-de-prova cilíndrico são efetuadas quatro medidas de altura e diâmetro para obter um valor médio das dimensões dos corpos de prova.

A densidade aparente foi determinada, pesando-se os corpos-de-prova primeiramente secos e depois submersos, e empregando o peso específico da água para correção.

c) Densidade Máxima Medida (ASTM D 2041/00 - Método Rice)

Este método permite determinar a massa específica máxima medida e a densidade da mistura asfáltica não compactada a 25°C (Gmm). A massa específica máxima é usada no cálculo dos vazios com ar na mistura asfáltica compactada, no cálculo da quantidade de ligante absorvido pelo agregado, além de fornecer valores de projeto para compactação das misturas asfálticas. O ensaio consiste em colocar uma amostra de mistura asfáltica, em condição solta em um recipiente com água (25°C) até submersão total da amostra. Em seguida aplica-se gradualmente vácuo para reduzir a pressão residual dentro do recipiente para 30mmHg ou menos que será mantido por dois minutos sob agitação mecânica. Ao fim deste período de tempo, o vácuo é gradualmente eliminado. O volume da amostra da mistura é obtido complementando o nível do recipiente com água e pesando-se ao ar. A massa e a temperatura são anotadas. A partir das medidas de massa, calcula-se a massa específica ou densidade real da mistura corrigindo-a para a temperatura de 25°C.

d) Resistência à Tração Indireta Estática (DNER-ME 138/94)

O ensaio de compressão diametral ou tração indireta, conhecido internacionalmente como “ensaio brasileiro”, foi desenvolvido pelo Professor Fernando Luiz Lobo Carneiro para determinar a resistência à tração de corpos de prova de concreto através de carregamento estático. O corpo de prova cilíndrico é posicionado diametralmente em relação à direção da compressão, resultando numa tração, agindo perpendicularmente ao longo do plano diametral que promove a ruptura do corpo nesta direção. É realizado numa prensa Marshall, sendo o corpo de prova apoiado ao longo de suas geratrizes por dois frisos de carga posicionados na parte superior e inferior do corpo-de-prova, devidamente padronizados.

e) Ensaio de dano por umidade induzida

A avaliação do dano nas misturas asfálticas causado pela umidade é grande importância, uma vez que afeta o desempenho e a vida de serviço dos pavimentos. Na realidade o dano por umidade evidencia os possíveis problemas de adesividade agregado-ligante asfáltico. Embora seja reconhecida a dificuldade de associar resultados de ensaios laboratoriais ao desempenho das misturas em campo (Epps *et al.*, 2000), existem diversos ensaios para identificação do potencial ao dano por umidade em misturas não-compactadas e realizados em misturas compactadas (Moura, 2001; Solaimanian *et. al.*, 2004, apud Bernucci et al, 2008).

O teste de sensibilidade à ação deletéria da água mais usado no Brasil segue o procedimento descrito em AASHTO T 283, baseado no trabalho por R.P. Lottman (NCHRP Project 4-08), e um trabalho posterior realizado por D.G. Tunnicliff e R.E. Root (NCHRP Project 10-17) (Epps et al., 2000). Segundo esse procedimento, os corpos-de-prova de misturas asfálticas de graduação densa podem ser preparados em laboratório segundo os métodos Marshall, e pode ser resumido nos passos descritos a seguir:

- Moldar seis CPs similares com 1.200g de mistura asfáltica na faixa de projeto e teor de ligante asfáltico de projeto, com vazios entre 6 e 8%;
- Separar um primeiro conjunto de três corpos-de-prova, colocando-os dentro de sacos plásticos para proteção e imersão em banho de água a 25°C por ± 1 h;
- Separar um segundo conjunto de três desses CPs, colocando-os em um recipiente com água destilada e aplicando-se uma pressão de 25-600mmHg, a fim de obter grau de saturação dos vazios entre 55 e 80% de água;
- Colocar o segundo conjunto de três CPs para congelamento (-18°C) por um período mínimo de 16h. Os CPs devem permanecer cobertos por um filme plástico, colocados dentro de um saco vedado com 10ml de água adicionais;
- Imergir o segundo conjunto de três CPs em um banho de 60° C por um período de 24 ± 1 h, mantendo-se o filme e o saco plástico;
- Retirar o segundo conjunto de CPs do banho de 60° C e imergi-los em um banho a 25°C por um período de 2 ± 1 h, mantendo-os ainda dentro do saco plástico;
- Realizar ensaios de resistência a tração no primeiro conjunto de três CPs não-condicionados (RT) e no segundo conjunto de três corpos-de-prova após todo o ciclo de condicionamento (RT_u);
- Calcular a resistência à tração retida por umidade induzida, RRT que é razão entre RT_u e RT.

No caso de misturas contínuas, o valor mínimo de RRT para que amostra seja aprovada é de 70%.

f) Ensaio de Deformação Permanente no Simulador de Tráfego Tipo LPC – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

O ensaio de deformação permanente é realizado para verificar a resistência da mistura estudada à ação do tráfego em relação à deformação da trilha de roda. Este ensaio é composto por três partes distintas, sendo estas descritas a seguir.

☑ Misturação

O processo de usinagem da mistura asfáltica segue este procedimento: pesagem do material já pré-aquecido em estufa na quantidade exata do traço; quando os agregados atingem a temperatura de usinagem, são colocados dentro do tacho da misturadora, (tacho já aquecido previamente) e, após a homogeneização dessas partes, adiciona-se o ligante asfáltico na temperatura de usinagem, conforme o projeto descrito anteriormente.

Misturam-se esses materiais até homogeneização visual. Todo esse processo decorre no período de 5 a 8 minutos. A Figura 3.6 mostra a misturadora desenvolvida para esta finalidade.

Figura 3.6 – Misturadora

Transfere-se a mistura asfáltica do tacho da misturadora para uma bandeja, mede-se a temperatura que a mistura apresenta imediatamente após a usinagem, em seguida é colocada dentro de uma estufa regulada com temperatura para moldagem (temperatura correspondente à compactação).

☑ Compactação das Placas

As placas de misturas asfálticas do tipo CBUQ foram compactadas por amassamento, simulando a compactação de campo, por meio de um equipamento denominado “mesa compactadora tipo LCPC francês (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) – Figura 3.7, conforme especificação francesa NF P 98-250-2 Preparation des Mélanges Hydrocarbonés. As placas possuem as dimensões de 500mm de comprimento x 180 mm de largura por 50mm de espessura.

Figura 3.7 – Mesa Compactadora tipo LCPC

Foram usinadas quantidades exatas de misturas asfálticas segundo o projeto Marshall, e quando compactadas ocuparam todo o volume do molde, obtendo assim a densidade desejada. As temperaturas de compactação são as apresentadas no projeto.

☑ Deformação Permanente nas Trilhas de Roda

Os ensaios de Deformação Permanente nas trilhas de roda foram realizados em simulador de tráfego tipo LPC francês (Laboratoire des Ponts et Chaussées). A Figura 3.8 mostra duas placas sendo testadas de cada vez. Os ensaios foram realizados conforme especificação Norma Europeia EN 12697-22: *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22 : wheel tracking*.

Os ensaios de deformação permanente em trilhas de roda foram conduzidos a 60°C, até 30.000 ciclos, como especificado na norma europeia anteriormente mencionada. Foram realizadas medidas intermediárias de afundamentos em trilha de roda, conforme preconizado na norma. As medidas de afundamentos na superfície são realizadas em cinco diferentes seções transversais da placa, com três leituras ao longo de cada seção, totalizando quinze pontos medidos em cada etapa de ciclos. O afundamento medido em cada determinado número de ciclos refere-se à média destes quinze pontos medidos, referenciados à primeira leitura.

Figura 3.8 – Simulador LPC

A Tabela 3.6 apresenta um resumo dos ensaios realizados para os teores ótimos de projeto.

Tabela 3.6 – Características da Mistura Asfáltica

Parâmetros Marshall				
Descrição	Unid.	Asfalto com SBS	Asfalto com polímero RET	Asfalto Borracha
Teor ótimo de ligante	%	5,0	4,7	6,0
Massa específica aparente	g/cm ³	2,372	2,394	2,302
Massa específica máxima $v(VV = 0\%)$	g/cm ³	2,492	2,515	2,454
Volume de vazios	%	4,8	4,8	6,2
Vazios do agregado mineral	%	16,1	15,1	19,4
Vazios cheios de asfalto	%	70,3	68,3	68,0
Estabilidade	kg	1644	1569	960
Fluência	mm	4,17	2,88	2,69
Absorção de CAP	%	0,2	0,4	0,2
Resistencia à Tração por compressão Diametral	kgf/cm ²	15,2	16,3	7,3
Dano por umidade induzida (DUI)	%	Negativo	Negativo	Negativo
Observação - teor de asfalto no ensaio de DUI	°C	182 a 189	176 a 181	190 a 197
Deformação Permanente após 30.000 ciclos a 60°C	%	2,6	3,8	5,5

Apesar de ter sido estipulado que a deformação permanente em trilha de roda determinada em laboratório com simulador de tráfego tipo LCP não deveria ter excedido 5% aos 30.000 ciclos, não foi possível alterar o projeto de dosagem, pois a composição granulométrica e materiais disponíveis não ofereciam as condições necessárias para melhorar a granulometria de projeto. A redução no teor de ligante não foi empregada, pois o volume de vazios já se encontrava na faixa de valores admissíveis.

3.2.2. Estudo em Pista

A pista teste localiza-se na 3ª Faixa da Pista Norte entre os kms 672 e 670 da Rodovia BR-376/PR, que liga Florianópolis a Curitiba, com aclive de cerca de 6%. O local escolhido é o mesmo em que se realizaram as pistas-teste do estudo de Moura (2010) e possui características representativas da rodovia quanto ao tráfego e à estrutura de pavimento, tornando possível o uso dos resultados obtidos com a pista teste em outros locais da rodovia. A Figura 3.9 ilustra o segmento em questão.

Figura 3.9 – Vista geral do local das Pistas Testes

Como dito anteriormente, a intervenção executada foi a fresagem do revestimento existente na espessura de 5cm e aplicação de uma nova camada de revestimento no tipo de mistura e ligante a ser estudado. A Tabela 3.7 apresenta um resumo com os quilômetros iniciais e finais de cada segmento, além da data de execução e do tipo de mistura asfáltica aplicada. Ressalta-se que entre as duas pesquisas, a atual e a de Moura, houve uma alteração na posição dos marcos quilométricos, sendo apresentadas abaixo as duas referências.

Tabela 3.7 – Segmentos do Trecho Experimental

Pista	Referência ANTIGA		Referência ATUAL		Data de Execução	Solução Adotada na Pesquisa Atual
	Km	Km	Km	Km		
	inicial	final	inicial	final		
1	675,2	674,5	672,0	671,3	22/07/2010	Faixa GAP-GRADED do Caltrans CAP borracha AMB
2	674,5	673,8	671,3	670,6	07/06/2010	Faixa SPV 12,5mm - CAP modificado SBS AMP – SBS
3	673,8	673,2	670,6	670,0	18/06/2010	Faixa SPV 12,5mm - CAP modificado RET AMP - RET

Durante a execução do segmento foram extraídos corpos de prova com a utilização de sonda rotativa e foram controlados os parâmetros definidos no projeto de mistura.

Os resultados do controle de execução das pistas são apresentados nas Tabelas 3.8, 3.9 e 3.10. Ressalta-se que em função de uma mudança no agregado durante a execução da Pista 2 (SBS) foi realizado um ajuste no teor ótimo de ligante no projeto desta mistura, tendo este sido alterado de 5% para 4,8%.

Tabela 3.8 – Controle de Execução da Pista 1 (km 672 ao km 671,3) – GAP- GRADED com asfalto-borracha

Posição		Dados de Campo				Projeto			
km	Lado	Grau de Compactação (%)	Teor de Betume (%)	Volume de Vazios (%)	Espessura (cm)	Grau de Compactação (%)	Teor de Betume (%)	Volume de Vazios (%)	Espessura (cm)
671,400	LD	103	6,0	3,75	5,6	> 97	6 ± 0,2	6,2	5
671,450	LD	102	5,9	4,36	5,5	> 97	6 ± 0,2	6,2	5
671,475	EX	100	6,0	6,19	5,1	> 97	6 ± 0,2	6,2	5
671,500	LD	99	5,9	6,93	5	> 97	6 ± 0,2	6,2	5
671,650	LD	101	5,9	5,62	5,8	> 97	6 ± 0,2	6,2	5
671,675	EX	99	5,9	7,42	5,6	> 97	6 ± 0,2	6,2	5

Tabela 3.9 – Controle de Execução da Pista 2 (km 671,3 ao km 670,6) – CA com ligante modificado por SBS

Posição		Dados de Campo				Projeto			
km		Grau de Compactação (%)	Teor de Betume (%)	Volume de Vazios (%)	Espessura (cm)	Grau de Compactação (%)	Teor de Betume (%)	Volume de Vazios (%)	Espessura (cm)
670,922		100	5,3	5,3	5,3	> 97	4,8 ± 0,2	4,8	5
670,980		98	4,1	7,1	5,2	> 97	4,8 ± 0,2	4,8	5
671,005		101	5,2	4,0	5,4	> 97	4,8 ± 0,2	4,8	5
671,030		102	4,7	5,6	5,6	> 97	4,8 ± 0,2	4,8	5
671,100		100	3,9	6,8	5,7	> 97	4,8 ± 0,2	4,8	5
671,130		100	4,7	7,4	5,6	> 97	4,8 ± 0,2	4,8	5
671,160		103	4,5	5,6	5,3	> 97	4,8 ± 0,2	4,8	5
671,190		98	4,7	7,0	5,6	> 97	4,8 ± 0,2	4,8	5
671,220		102	4,7	6,7	5,4	> 97	4,8 ± 0,2	4,8	5

Tabela 3.10 – Controle de Execução da Pista 3 (km 670,6 ao km 670,0) - CA com ligante modificado por RET

Posição	Dados de Campo				Projeto			
km	Grau de Compactação (%)	Teor de Betume (%)	Volume de Vazios (%)	Espessura (cm)	Grau de Compactação (%)	Teor de Betume (%)	Volume de Vazios (%)	Espessura (cm)
670,352	100	4,5	6,2	5,3	> 97	4,7 ± 0,2	4,8	5
670,322	99	4,6	7,1	5,5	> 97	4,7 ± 0,2	4,8	5
670,300	101	4,5	4,9	5,8	> 97	4,7 ± 0,2	4,8	5
670,275	99	4,6	6,8	5,6	> 97	4,7 ± 0,2	4,8	5
670,262	100	4,9	6,4	5,3	> 97	4,7 ± 0,2	4,8	5

Os resultados do controle tecnológico afirmam que os novos revestimentos asfálticos para a restauração das pistas-teste foram executados dentro das premissas de projeto.

3.2.2.1. Campanhas de Acompanhamento das Pistas Experimentais

Para caracterização do segmento em questão foram realizados ensaios deflectométricos (FWD), de Irregularidade longitudinal (IRI), levantamento visual e avaliação da deformação da trilha de roda. Estes ensaios foram realizados conforme programação apresentada abaixo:

- Julho de 2010 - FWD, IRI, Visual;
- Outubro de 2010 - FWD, IRI, Visual e Trilha de Roda;
- Dezembro de 2010 - Visual e Trilha de Roda;
- Janeiro de 2011 - FWD, IRI, Visual e Trilha de Roda;
- Fevereiro de 2011 - Trilha de Roda.

Apresenta-se na sequência um breve descritivo de cada um dos levantamentos realizados e os resultados encontrados.

3.2.2.1.1. Equipamentos e Ensaios Realizados

3.2.2.1.1.1. Levantamento Deflectométrico (FWD)

Os Levantamentos Deflectométricos foram realizados com o emprego do Falling Weight Deflectometer Dynatest 8000 (FWD – Figura 3.10), que é um deflectômetro de impacto projetado para simular o efeito de cargas de roda em movimento. Isto é obtido pela queda de um conjunto de massas, a partir de alturas pré-fixadas, sobre um sistema de amortecedores de borracha, que transmitem a força aplicada a uma placa circular apoiada no pavimento.

Figura 3.10 - Vista do Falling Weight Deflectometer Dynatest 8000 E.

Os deslocamentos recuperáveis gerados na superfície do pavimento (bacia de deflexões) são medidos por 7 geofones (transdutores de velocidade) instalados na placa de carga e ao longo de uma barra metálica. As distâncias dos geofones ao centro da placa de carga são fixadas visando maximizar a acurácia em função da estrutura do pavimento ensaiado, procurando-se posicioná-los de forma que as deflexões neles registradas reflitam a contribuição das diversas camadas na deformabilidade total do pavimento e defina completamente a geometria da bacia.

Neste estudo foram empregados os seguintes espaçamentos para os geofones: 0, 20, 30, 45, 65, 90, 120 cm. Tem-se então que o primeiro geofone mede a deflexão sob a

ação da carga (Df1), o segundo geofone mede a deformação do pavimento a 20 cm do ponto de aplicação da carga (Df2) e assim sucessivamente.

A carga empregada no presente estudo simula a passagem do semi-eixo padrão rodoviário brasileiro – eixo simples de roda dupla carregado com 8,2tf. Os ensaios foram realizados na faixa externa de rolamento.

3.2.2.1.1.2. Irregularidade Longitudinal (IRI)

A determinação da irregularidade longitudinal de um pavimento é uma característica que influi na interação da superfície da via com veículos, gerando efeito sobre os próprios veículos, sobre os passageiros e o motorista, e sobre a carga transportada. Ela afeta a dinâmica dos veículos, tem influência sobre o custo operacional dos mesmos e ainda aumenta o seu desgaste.

As condições de conforto são avaliadas através da medição da irregularidade associada à via. A norma estabelecida pelo DNER define a irregularidade como sendo o desvio da superfície da rodovia em relação a um plano de referência, que afeta a dinâmica dos veículos, a qualidade de rolamento e as cargas dinâmicas sobre a via.

A segurança e o conforto ao rolamento que um pavimento proporciona estão intimamente ligados ao perfil longitudinal, à existência ou não de trilhas de roda severas e à suavidade que a superfície apresenta, ou seja, são inversamente proporcionais ao grau de irregularidade dessa superfície.

Os levantamentos de campo foram realizados com o perfilômetro laser DYNATEST 5051 Mk-III RSP (Figura 3.11). O sistema RSP foi desenvolvido para ser bastante flexível, incorporando um conceito modular que permite uma variedade de combinação de sensores e configurações. Essas combinações podem variar de um a três acelerômetros e de dois até vinte e um sensores a laser.

Figura 3.11 – Equipamento Perfilômetro Laser Utilizado

Este equipamento é considerado como sendo um perfilômetro de Classe I da norma ASTM E950, o que implica em medidas de elevada repetitividade e precisão.

O RSP Mark III empregado é composto por três sensores lasers para medição de “altura” ou “profundidade” da pista, dois acelerômetros para compensação de esforços inerciais e um sensor óptico de partida assentados em uma barra transdutora. Há também um hodômetro de precisão montado na roda dianteira para definição da posição longitudinal.

Todos estes sensores são ligados à Unidade de processamento (DPU - Data Processing Unit) através de módulos de conexão, sendo as informações processadas, armazenadas e visualizadas em “tempo real” em um notebook posicionado na cabine do veículo.

Os parâmetros de medição são calculados em tempo real e apresentados em intervalos mínimos de 25 mm (1 polegada) até um máximo de 1,6 km (1 milha). Uma das escalas da irregularidade do pavimento é o International Roughness Index (IRI) que consiste num tratamento estatístico do perfil longitudinal na trilha de roda de uma superfície de pavimento. O índice é uma média retificada das variações computadas do perfil absoluto, sendo representativo dos movimentos verticais induzidos aos veículos por uma banda de frequência percebida tanto nas respostas dos veículos quanto no conforto sentido por seus ocupantes.

O IRI é definido pela simulação matemática de um quarto-de-carro, isto é, uma roda associada às características dinâmicas da suspensão e os impactos da massa de um veículo de passeio típico. A escala de medida é adimensional e utiliza um fator de escala igual a 1.000, podendo, portanto ser representada em m/km.

3.2.2.1.1.3. Levantamento Visual Detalhado e Medição da Trilha de Roda

A fim de se quantificar com maior precisão as áreas deterioradas existentes ao longo da via e, assim, determinar o percentual de cada uma das ocorrências em relação à área total, realizaram-se para o presente estudo, quatro campanhas de Levantamento Visual Detalhado (LVD).

Este levantamento tem o objetivo de analisar a condição de superfície dos pavimentos de maneira detalhada, sendo realizado por técnicos que locam e caracterizam os defeitos existentes no pavimento da pista e do acostamento em ficha específica, determinando as áreas com presença de trincamentos, remendos, panelas, erosões, afundamentos, etc., ou seja, cadastrando as áreas em que há necessidade de intervenção, subsidiando a definição de soluções de recuperação e manutenção.

Desta forma, uma ficha de campo representa um quilômetro de pista e os defeitos são locados e descritos na tabela abaixo do croqui. O modelo da ficha utilizada é apresentado na Figura 3.12.

3.2.2.1.2.1. Levantamento Deflectométrico (FWD)

A Figura 3.14 e a Tabela 3.11 apresentam um resumo dos valores encontrados nas três campanhas realizadas de deflexão no ponto de aplicação da carga.

Figura 3.14 – Perfil Deflectométrico

Tabela 3.11 – Resumo das Deflexões Encontradas (10^{-2} mm)

Segmento			Mês Avaliação								
			jul/10			out/10			jan/11		
Tipo	km inicial	km final	Df1	Desvio Padrão	CV	Df1	Desvio Padrão	CV	Df1	Desvio Padrão	CV
1 - GAP	672,0	671,3	36,4	12,0	33%	38,9	14,2	37%	54,8	16,1	29%
2 -SP-12.5 - SBS	671,3	670,6	31,4	13,4	43%	33,5	13,5	40%	47,2	15,6	33%
3 -SP-12.5 - RET	670,6	670,0	19,5	7,2	37%	23,1	9,8	42%	33,1	14,2	43%

3.2.2.1.2.2. Irregularidade Longitudinal (IRI)

A Figura 3.15 e a Tabela 3.12 apresentam os resultados de IRI encontrados durante as monitorações.

Figura 3.15 – Perfil de Irregularidade Longitudinal em termos de IRI

Tabela 3.12 – Resumo dos valores de IRI encontrados

Resumo dos Valores de IRI Observados											
Segmento			Mês Avaliação								
			jul/10			out/10			jan/11		
Tipo	km inicial	km final	IRI	Desvio Padrão	CV	IRI	Desvio Padrão	CV	IRI	Desvio Padrão	CV
1 - GAP	672,0	671,3	2,7	0,9	33%	3,0	1,1	37%	3,6	1,2	35%
2 -SP-12.5 - SBS	671,3	670,6	2,6	0,7	28%	2,6	0,6	25%	2,9	1,3	45%
3 -SP-12.5 - RET	670,6	670,0	2,3	0,4	17%	2,4	0,5	22%	2,9	1,1	38%

Observa-se que os Coeficientes de Variação são elevados em todos os segmentos e avaliações o que indica que o segmento do km 672 ao km 670 não tem um comportamento homogêneo em termos de Irregularidade Longitudinal. Apesar desta variação, mantiveram-se as tendências de aumento do IRI médio com o tempo/tráfego.

3.2.2.1.2.3. Deformação Permanente da Trilha de Roda (mm)

A Figura 3.16 e a Tabela 3.13 apresentam os resultados de deformação permanente da trilha de roda em mm encontrados durante as monitorações.

Figura 3.16 – Perfil das Trilhas de Roda

Tabela 3.13 – Resumo dos valores de Trilha de Roda encontrados

Segmento			Mês Avaliação											
			out/10			dez/10			jan/11			fev/11		
Tipo	km inicial	km final	Trilha de Roda (mm)	Desvio Padrão	CV	Trilha de Roda (mm)	Desvio Padrão	CV	Trilha de Roda (mm)	Desvio Padrão	CV	Trilha de Roda (mm)	Desvio Padrão	CV
1 - GAP	672,00	671,30	3,7	1,27	34%	4,4	4,24	95%	10,3	12,91	126%	13,5	10,5	78%
2 - SP-12.5 - SBS	671,30	670,60	1,6	1,33	84%	1,9	1,50	78%	2,2	1,86	85%	4,3	4,5	104%
3 - SP-12.5 - RET	670,60	670,00	1,9	1,26	66%	2,1	1,05	50%	1,8	2,76	153%	4,6	5,3	113%

As Figuras 3.17 a 3.19 ilustram os segmentos durante as avaliações visuais.

Figura 3.17 – Fotos da Pista 1 – GAP – Janeiro 2011

Figura 3.18 – Fotos da Pista 2 – SBS – Janeiro 2011

Figura 3.19 – Fotos da Pista 3 - RET– Janeiro 2011

3.2.2.2. Simulador de Tráfego Linear Móvel

O Simulador de Tráfego consiste de um semi-eixo rodoviário com rodas duplas e cargas de até 6 tf, o qual corresponde a um eixo simples de rodas duplas com carga total de até 12 tf, que se movimenta alternadamente no sentido longitudinal com deslocamentos de até 9 m e, transversalmente, até 1 m, com capacidade de executar 1.000 passagens ou aplicações de carga em uma determinada área da seção de ensaio.

Dessa forma, a combinação da velocidade de deslocamento longitudinal do semi-eixo com os demais recursos do equipamento, ou seja, deslocamento transversal e carga aplicada permite reproduzir em curtos períodos de tempo e com bastante aproximação da realidade as consequências da ação das cargas do tráfego nas estruturas de pavimento.

Para a presente pesquisa o Simulador de Tráfego sofreu algumas adaptações, sendo estas recomendações feitas por Moura em sua pesquisa de 2009, sendo elas:

- Automatização da Coleta de Dados (Figura 3.20)
- Colocação de uma Célula de Carga no Semi-eixo (Figura 3.21);
- Fechamento das Laterais e colocação de lâmpadas para controlar a temperatura interna no Simulador (Figura 3.22).

Figura 3.20 – Controle Automatizado para Aquisição dos Dados

Figura 3.21 – Célula de Carga no Semi-Eixo do Simulador

Figura 3.22 – Fechamento e Colocação de Lâmpadas para Controle da Temperatura

A simulação de tráfego iniciou-se em cada seção-teste com o transporte do equipamento (sem o lastro de água) e o posicionamento do equipamento de Simulador de Tráfego Linear Móvel após a devida sinalização da pista e desvio do tráfego. Também nesta etapa foram providenciadas a energização e o abastecimento de água para as caixas d'água de contrapeso. O transporte do equipamento e a locação da seção propriamente dita, com demarcação com tinta nos bordos da pista a cada 0,5m, são ilustrados nas Figuras 3.23 e 3.24.

Figura 3.23 – Transporte e posicionamento do Simulador de Tráfego Linear Móvel

Figura 3.24 – Locação da seção teste

Em seguida, são ajustados e aferidos os parâmetros associados ao tráfego a ser simulado, definindo-se os limites laterais do curso do equipamento, selecionando-se o tipo de solicitação a ser empregada (dois sentidos) e calibrando-se os pneus, de forma a se atender o planejamento proposto.

A etapa seguinte consistiu-se no ajuste da pressão hidráulica para atingir a carga a ser aplicada no pavimento durante o ensaio acelerado, ou seja, da carga a ser empregada. O valor da carga aplicada foi de 6 toneladas, definida no planejamento da pesquisa, que foi verificada no início da simulação de cada seção-teste com o emprego de balança móvel e monitorada durante toda a aplicação com a utilização da Célula de Carga. A Figura 3.25 ilustra a etapa de aferição dos valores de carga aplicada com o emprego de uma balança móvel.

Figura 3.25 – Calibração / Aferição de cargas

Realizou-se a primeira campanha de monitoramento do pavimento antes da operação do simulador de tráfego. O monitoramento passa a ser periodicamente repetido diariamente até o fim do ensaio acelerado. Normalmente, em cada uma destas campanhas são determinadas as informações gerais, como o registro da data, da hora e do número de ciclos realizados pelo equipamento, e as informações técnicas, com o objetivo de acompanhar o desempenho do pavimento em cada seção de sete metros em que a carga opera com velocidade praticamente constante.

Cada seção-teste possui aproximadamente 7,0m de comprimento 0,80m de largura. Portanto, a mesma foi subdivida em sete seções de análise com $0,8m^2$, o que permite a comparação de resultados entre as sete subseções de referência, verificando-se, inclusive, a homogeneidade dos resultados.

3.2.2.2.1. Acompanhamento no Simulador

Buscou-se realizar as seguintes medidas e/ou as determinações em cada uma das subseções de $0,8m^2$ durante a campanha de monitoramento das subseções, em campanhas realizadas sempre no mesmo horário do dia, buscando harmonizar os parâmetros mínimos a serem obtidos em pesquisas com o Simulador de Tráfego Linear Móvel e o posterior emprego dos dados em novas análises e estudos:

3.2.2.2.1.1. Identificação da seção-teste

Neste ponto é identificado o local em que está sendo realizado o ensaio acelerado, incluindo-se a data e o horário de cada avaliação, bem como o nome do avaliador.

3.2.2.2.1.2. Identificação do carregamento

É identificado o número de semiciclos que é aplicado no momento do monitoramento do pavimento, incluindo-se também o valor da carga aplicada e o tipo de semi-eixo empregado, bem como o grau de dispersão lateral empregado.

3.2.2.2.1.3. Condicionantes Ambientais

As temperaturas do ar e do pavimento são medidas no momento dos ensaios de monitoramento. Todavia, visto que os estudos acelerados de pavimentos são, geralmente, realizados de forma ininterrupta durante um determinado período de tempo, as campanhas de monitoramento da temperatura são realizadas a cada hora, incluindo-se o período noturno, associando-se os valores ao horário em que foram registrados e o número de semiciclos impostos ao pavimento naquele momento.

A quantidade de chuva, em mm, é medida diariamente utilizando-se um pluviômetro instalado próximo ao simulador de tráfego, descartando-se a quantidade acumulada do dia anterior antes de cada leitura. O pluviômetro utilizado é apresentado na Figura 3.26.

Figura 3.26 – Pluviômetro

3.2.2.2.1.4. Condição Estrutural

A condição estrutural do pavimento expressa por sua deflexão é monitorada nas campanhas de monitoramento da seção-teste. A determinação da deflexão sob a ação da carga é realizada com o emprego de viga Benkelman com a mesma carga utilizada para a simulação de tráfego. A Figura 3.27 ilustra este tipo de ensaio.

Figura 3.27 – Monitoramento dos pavimentos com ensaios deflectométricos

3.2.2.2.1.5. Condição Funcional

A condição funcional é monitorada a partir do cadastro visual dos defeitos observados na superfície da seção-teste, empregando-se a terminologia padronizada pelo DNIT na norma rodoviária DNIT 005/2003 PRO.

A cada inspeção periódica, as trincas e os demais defeitos são desenhados em papel milimetrado, empregando-se uma grade metálica de 1,0 m x 1,0 m, subdividida em quadrados de 100 mm de lado sobre o revestimento, sempre que é realizada a inspeção visual. Para facilitar a visualização do surgimento e da evolução do trincamento, as trincas são pintadas com tinta spray, sendo que cada cor representa um número de semiciclos de carga aplicados pelo simulador. Estes procedimentos são ilustrados na Figura 3.28.

Figura 3.28 – Controle da evolução de defeitos na superfície

3.2.2.2.1.7. Comentários Adicionais

Todas as informações são devidamente registradas na forma de observações ou mesmo na forma de um livro de ocorrências, como um meio adicional para subsidiar a análise e a interpretação dos resultados. Neste ponto, as atividades de manutenção preventiva e corretiva no equipamento ou mesmo os eventos que, por ventura, possam interferir nos resultados observados em pista, são mencionadas. Estas observações são datadas e associadas ao número de semiciclos de carga impostos à seção-teste.

O modelo da ficha de campo utilizada nos estudos é apresentada na Figura 3.31.

Monitoramento do Pavimento - Simulador de Tráfego																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
Rodovia:		Descrição:										Observações:																																																																																																																																																																																																																																																																																										
Pista:		Data:					Temp. do Pav. (°C):																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Faixa:		Horário:					Temp. do Ar (°C):																																																																																																																																																																																																																																																																																															
Km:		Nº de Semi-ciclos:					Manômetro:																																																																																																																																																																																																																																																																																															
<div style="display: flex; justify-content: space-between; font-weight: bold; font-size: 0.8em;"> 00.511.522.533.544.555.566.57 </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between; font-size: 0.7em;"> 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 </div>																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 20px; height: 100px; border: 1px solid black; position: relative; margin-right: 5px;"> <div style="position: absolute; top: 0; left: 0; right: 0; height: 100%; background: linear-gradient(to bottom, black 49%, white 49%, white 51%, black 51%, black 100%); background-size: 2px 100%;"></div> </div> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: 0.6em;"> <tr><td>1</td><td></td></tr><tr><td>2</td><td></td></tr><tr><td>3</td><td></td></tr><tr><td>4</td><td></td></tr><tr><td>5</td><td></td></tr><tr><td>6</td><td></td></tr><tr><td>7</td><td></td></tr><tr><td>8</td><td></td></tr><tr><td>9</td><td></td></tr><tr><td>10</td><td></td></tr></table> </div>																									1		2		3		4		5		6		7		8		9		10																																																																																																																																																																																																																																																											
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
2																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
3																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
4																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
5																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
6																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
7																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
8																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
9																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
10																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: 0.7em;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Posição (m)</th> <th colspan="3">Recha (mm)</th> <th colspan="6">Mancha de Areia - diâmetro (cm)</th> <th colspan="2">K viga =</th> <th rowspan="2">D (0,01 mm)</th> <th colspan="3">Inventário de Defeitos</th> </tr> <tr> <th>int</th> <th>cen</th> <th>ext</th> <th>D1</th> <th>D2</th> <th>D3</th> <th>D4</th> <th>Dm (cm)</th> <th>Esp (mm)</th> <th>Li</th> <th>Lf</th> <th>nº</th> <th>Tipo</th> <th>Descrição</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>0,5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0,0</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1,0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1,5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0,0</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2,0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2,5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0,0</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3,0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3,5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0,0</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4,0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4,5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0,0</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>5,0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>5,5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0,0</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>6,0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>6,5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>0,0</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>7,0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>																									Posição (m)	Recha (mm)			Mancha de Areia - diâmetro (cm)						K viga =		D (0,01 mm)	Inventário de Defeitos			int	cen	ext	D1	D2	D3	D4	Dm (cm)	Esp (mm)	Li	Lf	nº	Tipo	Descrição	0,0																0,5												0,0				1,0																1,5												0,0				2,0																2,5												0,0				3,0																3,5												0,0				4,0																4,5												0,0				5,0																5,5												0,0				6,0																6,5												0,0				7,0															
Posição (m)	Recha (mm)			Mancha de Areia - diâmetro (cm)						K viga =		D (0,01 mm)	Inventário de Defeitos																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	int	cen	ext	D1	D2	D3	D4	Dm (cm)	Esp (mm)	Li	Lf		nº	Tipo	Descrição																																																																																																																																																																																																																																																																																							
0,0																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
0,5												0,0																																																																																																																																																																																																																																																																																										
1,0																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
1,5												0,0																																																																																																																																																																																																																																																																																										
2,0																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
2,5												0,0																																																																																																																																																																																																																																																																																										
3,0																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
3,5												0,0																																																																																																																																																																																																																																																																																										
4,0																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
4,5												0,0																																																																																																																																																																																																																																																																																										
5,0																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
5,5												0,0																																																																																																																																																																																																																																																																																										
6,0																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
6,5												0,0																																																																																																																																																																																																																																																																																										
7,0																																																																																																																																																																																																																																																																																																						

Figura 3.31 – Modelo da Planilha de Acompanhamento das Avaliações

3.2.2.2.2. Resultados

Os resultados abaixo serão apresentados na ordem em que foram ensaiados, conforme apresentado na Tabela 3.14.

Tabela 3.14 – Ordem de Avaliação das Seções Teste

Seção	Ordem da Avaliação	Km inicial	Km final	Identificação da Seção
1	3	672,0	671,3	GAP
2	1	671,3	670,6	SBS
3	2	670,6	670,0	RET

3.2.2.2.1. Seção 2 – SBS – km 671+186

A primeira seção-teste submetida à ação do simulador de tráfego é a seção de “Faixa SPV 12,5 mm com ligante asfáltico modificado por SBS”. Nesta seção, o simulador foi posicionado no km 671+186 da terceira faixa da rodovia BR 376/PR.

Durante a simulação de tráfego desta seção, o acompanhamento das condições climáticas permitiu observar que, até então, as temperaturas médias do pavimento desta seção teste durante os ensaios acelerados foi de 24,7°C, com desvio padrão de 3,7°C, e valores máximos e mínimos de 41,7°C e 13,4°C respectivamente.

Os ensaios foram realizados até 500.000 semiciclos entre os dias 05/08/2010 e 13/09/2010 com uma pressão aproximada de 90 bar. O registro das temperaturas ao longo do período de simulação de tráfego, associado o número de semiciclos de carga, encontra-se sintetizado na Figura 3.32.

Figura 3.32 – Acompanhamento da Temperatura no Simulador no Trecho 2 – SBS

O acompanhamento da pluviometria, ilustrado na Figura 3.33, indicou uma precipitação total de 119,0 mm ao longo dos 38 dias de registros.

Figura 3.33 – Pluviometria no Simulador no Trecho 2 – SBS

O acompanhamento das condições estruturais do pavimento, Figura 3.34, indicou um aumento inicial das deflexões da estrutura nos primeiros ciclos de carga, decorrentes, provavelmente, do efeito das chuvas, com aumento da umidade do subleito, sendo que a partir de então os valores das deflexões medidas com viga Benkelman e retificadas linearmente para a carga padrão (8,2 tf no eixo simples de rodagem dupla) e a temperatura de 25°C se mantiveram da ordem de 45×10^{-2} mm (versus os 36×10^{-2} mm).

Figura 3.34 – Deflexões no Simulador no Trecho 2 – SBS

O revestimento asfáltico executado também se mostrou resistente à deformação permanente em trilha de roda durante o período de ensaio, com valores médios em torno de 0,1 mm no início dos levantamentos e valores médios em torno de 1,7 mm ao final dos 500.000 semiciclos conforme o gráfico da Figura 3.35.

Figura 3.35 – Evolução da Trilha de Roda no Trecho 2 - SBS

Durante o acompanhamento da deformação da trilha de roda observou-se que a deformação no centro da trilha, conforme especificado para utilização da treliça, não representava o maior afundamento encontrado no pavimento, isto se deve à configuração do eixo utilizado no simulador, eixo simples de roda dupla, que faz com que o meio da trilha de roda possa inclusive se elevar, “escondendo” uma deformação que pode ser muito maior nos “bordos” da trilha. Sendo assim, após esta observação passou-se a controlar também as deformações das trilhas no seu “bordo”, conforme apresentado do Gráfico da Figura 3.36.

Para medição da Trilha de Roda nos “bordos” da trilha posicionou-se o centro da treliça no ponto mais profundo da deformação permanente. Na presente pesquisa foram observados dois pontos por seção já que o eixo utilizado é um eixo simples de roda dupla, estes pontos foram nomeados de “Bordo Externo” e “Bordo Interno” tendo como referencia a extremidade da pista. Recomenda-se que em estudos futuros

seja utilizado algum instrumento que meça o perfil transversal da Trilha de Roda e assim determine precisamente o valor máximo do afundamento existente.

Figura 3.36 – Evolução da Trilha de Roda no Bordo Externo Trecho 2 - SBS

Os valores de VRD, determinados a partir do ensaio de pêndulo britânico e acompanhados a cada 100 mil semiciclos, encontravam-se inicialmente próximos a 56 e encerraram com valores médios de 43, como observado na Figura 3.37. Os valores decaem abaixo do estipulado pela ANTT pelo PER, cujo limite mínimo é de 47. Este fato pode ser explicado pelo polimento acelerado dos agregados que se dá pelo elevado atrito entre os pneus de caminhões e agregados, pois o eixo se encontra tracionado para poder realizar o movimento na ascendente dos caminhões.

Figura 3.37 – Evolução VRD no Trecho 2 – SBS

Já os valores da macrotextura, determinados no ensaio de mancha de areia, encontravam-se inicialmente próximos a 0,61 mm e atualmente são de 0,66 mm, como pode ser observado no gráfico apresentado na Figura 3.38.

Figura 3.38 – Evolução da Mancha de Areia no Trecho 2 – SBS

Os resultados mostram uma certa variação de textura na superfície do trecho, causadas possivelmente por algum tipo de segregação das misturas asfálticas.

3.2.2.2.2. Seção 1 – RET – km 670+231

A segunda seção teste submetida à ação do simulador de tráfego é a seção de “Faixa SPV 12,5 mm com ligante asfáltico modificado por 1,2% de RET”. Nesta seção, o simulador foi locado no km 670+231 da terceira faixa da rodovia BR 376.

Durante a simulação de tráfego desta seção, o acompanhamento das condições climáticas permitiu observar que a temperatura média do pavimento desta seção teste durante os ensaios acelerados foi de 24,7°C, com desvio padrão de 2,6°C, e valores máximos e mínimos de 30,5°C e 19,1°C respectivamente. Na média, as temperaturas são similares nos trechos da seção de SBS e de RET testadas.

Os ensaios foram realizados até 500.088 semiciclos entre os dias 17/09/2010 e 24/10/2010 com uma pressão aproximada de 90 bar. O registro das temperaturas ao longo do período de simulação de tráfego, associado o número de semiciclos de carga, encontra-se sintetizado no gráfico da Figura 3.39.

Figura 3.39 – Temperatura no Simulador no Trecho 1 – RET

O acompanhamento da pluviometria, ilustrado no gráfico da Figura 3.40, indicou uma precipitação total até então de 457,0 mm ao longo dos 38 dias de registros.

Figura 3.40 – Pluviometria no Simulador no Trecho 1 - RET

O acompanhamento das condições estruturais do pavimento ilustrado na Figura 3.41 indicou que os valores das deflexões medidas com viga Benkelman e retificadas para a carga padrão (8,2 tf no eixo simples de rodagem dupla) e a temperatura de 25°C se mantiveram estáveis, sendo os mesmos na ordem de $15,0 \times 10^{-2}$ mm durante os 500.000 semiciclos acompanhados.

Figura 3.41 – Deflexões no Simulador no Trecho 1 – RET

Neste trecho, apesar de ter estado mais sujeito à pluviometria que o de SBS, mostra menor efeito da água nos resultados de deflexão. O revestimento asfáltico executado também se mostrou resistente à deformação permanente em trilha de roda durante o período de ensaio, com valores médios em torno de 0,8 mm no início da simulação e valores médios de 1,3 mm nas últimas medições realizadas conforme o gráfico da Figura 3.42.

Figura 3.42 – Evolução da Trilha de Roda no Trecho 1 - RET

Para a seção em questão, acompanhou-se também a trilha de roda nos bordos externo e interno da seção simulada para melhor monitorar as trilhas de roda durante a simulação do tráfego. Os resultados para o bordo interno e externo se mostraram similares aos resultados do centro da seção teste conforme resumido nas Figuras 3.43 e 3.44 a seguir, este comportamento homogêneo com valores baixos tanto no centro como nos bordos da trilha evidencia o bom comportamento em termos de evolução da deformação permanente da trilha de roda da mistura analisada.

Figura 3.43 – Evolução da Trilha de Roda no Bordo Externo do Trecho 1 - RET

Figura 3.44 – Acompanhamento da Evolução da Trilha de Roda no Bordo Interno do Trecho 1 - RET

Os valores de VRD, determinados a partir do ensaio de pêndulo britânico e acompanhados a cada 100.000 semiciclos, encontravam-se inicialmente próximos a 48 e encerraram com valores médios de 45, como pode ser observado na Figura 3.45.

Figura 3.45 – Acompanhamento da Evolução VRD no Trecho 1 - RET

O decréscimo é similar ao encontrado no trecho de SBS por ser uma graduação similar da mistura e os agregados de mesma origem.

Já os valores da macrotextura, determinados no ensaio de mancha de areia, encontravam-se inicialmente próximos a 0,61 mm e finalizaram com valores de 0,74 mm, como pode ser observado na Figura 3.46. Os resultados mostram maior homogeneidade na textura superficial neste trecho.

Figura 3.46 – Evolução da Mancha de Areia no Trecho 1 – RET

3.2.2.2.3. Seção 3 – GAP-GRADED – km 671+618

A terceira e última seção teste a ser submetida à ação do simulador de tráfego foi a seção de “GAP-GRADED do Caltrans com ligante asfáltico modificado por borracha”. Nesta seção, o simulador foi locado no km 671+618 da terceira faixa da rodovia BR 376.

Durante a simulação de tráfego desta seção, o acompanhamento das condições climáticas permitiu observar que a temperatura média do pavimento desta seção teste durante os ensaios acelerados foi de 27,0°C, com desvio padrão de 1,8°C, e valores máximos e mínimos de 32,3°C e 21,2°C, respectivamente. A média é de 2,3 °C superior aos dois primeiros trechos.

Os ensaios foram realizados até 396.498 semiciclos entre os dias 28/10/2010 e 26/11/2010 com uma pressão aproximada de 90 bar. O registro das temperaturas ao longo do período de simulação de tráfego, associado o número de semiciclos de carga, encontra-se sintetizado na Figura 3.47.

Figura 3.47 – Temperatura no Simulador no Trecho 3 – GAP

O acompanhamento da pluviometria, ilustrado na Figura 3.48 a seguir, indicou uma precipitação total de 268,0 mm ao longo dos 29 dias de registro.

Figura 3.48 – Pluviometria no Simulador no Trecho 1 – RET

O acompanhamento das condições estruturais do pavimento, conforme ilustrado na Figura 3.49, indicou que os valores das deflexões medidas com viga Benkelman e

retificadas para a carga padrão (8,2 tf no eixo simples de rodagem dupla) e a temperatura de 25°C se mantiveram da ordem de 50×10^{-2} mm durante toda a simulação do pavimento. Neste caso as deflexões também não sofreram acréscimo com a estação chuvosa, demonstrando a eficiência do sistema de drenagem neste trecho. No entanto, os valores de deflexão são bastante superiores aos trechos com SBS e RET.

Figura 3.49 – Deflexões no Simulador no Trecho 3 – GAP

O revestimento asfáltico executado se mostrou pouco resistente à deformação permanente em trilha de roda durante o período de ensaio, com valores médios em torno de 0,1 mm no início dos levantamentos e valores médios em torno de 5,8 mm ao final dos 396.498 semiciclos para o bordo interno do pavimento, valores médios em torno de 0,8 mm no início dos levantamentos e valores médios em torno de 5,4 mm ao final dos 396.498 semiciclos para o bordo externo do pavimento e valores médios em torno de 0,0 mm no início dos levantamentos e valores médios em torno de 0,1 mm ao final dos 396.498 para o centro do pavimento, conforme as Figuras 3.50, 3.51 e 3.52.

Figura 3.50 – Evolução da Trilha de Roda no Eixo Trecho 3 – GAP

Figura 3.51 – Evolução da Trilha de Roda no Bordo Interno do Trecho 3 - GAP

Figura 3.52 – Evolução da Trilha de Roda no Bordo Externo do Trecho 3 - GAP

Os valores de VRD, determinados a partir do ensaio de pêndulo britânico e acompanhados a cada 100.000 semiciclos, encontravam-se inicialmente próximos a 49 e encerraram com valores médios de 44, como pode ser observado na Figura 3.53. Valores seguindo tendência similar aos trechos com SBS e RET.

Figura 3.53 – Evolução VRD no Trecho 3 - GAP

Já os valores da macrotextura, determinados no ensaio de mancha de areia, encontravam-se inicialmente próximos a 0,82 mm e atualmente são de 0,92 mm, como pode ser observado no gráfico da Figura 3.54. Como era de se esperar, devido à textura superficial característica do GAP-GRADED, a altura média de mancha de areia é superior neste trecho que nos dois anteriores.

4. Resultados da Pesquisa

Com os resultados obtidos durante os monitoramentos das pistas testes e os ensaios acelerados com o Simulador de Tráfego foi possível cumprir as seguintes etapas:

- Comparação dos três materiais aplicados de forma direta;
- Calibração do modelo de evolução dos afundamentos em trilha de roda do HDM, a partir dos dados monitorados nos trechos solicitados pelo Simulador de Tráfego, para utilização dos mesmos em futuros projetos e estudos.

4.1. Análise dos Resultados

4.1.1. Resultados do Monitoramento das Pistas Testes

Os resultados obtidos durante o monitoramento das pistas testes foram sintetizados em gráficos para facilitar a sua análise, para tanto, calculou-se a média para cada um dos três segmentos em termos de Deflexão Máxima (medidas por meio do FWD), Irregularidade Longitudinal (expressa em termos do IRI) e de Deformação permanente da Trilha de Roda (expressa em termos de profundidade dos afundamentos, medidos com auxílio de uma treliça metálica). A porcentagem de defeitos superficiais encontrada ao final das avaliações visuais também foi detalhada na Tabela 4.1. As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam estes resultados.

Figura 4.1 – Evolução da Deflexão Máxima nas Pistas Experimentais

Os dados deflectométricos dos três segmentos apresentaram tendência de incrementos com comportamento muito similares, sendo que as deflexões sofrem uma pequena elevação após a recuperação do trecho e uma elevação maior na última avaliação, realizada em Dezembro de 2010, ou seja, no período de chuvas mais intensas.

Figura 4.2 – Evolução da Irregularidade Longitudinal

A condição de Irregularidade Longitudinal em termos de IRI apresentou duas situações distintas, a primeira nos segmentos na Faixa SP-12.5-SBS e SP-12.5-RET, onde o IRI praticamente não sofreu alteração entre a primeira e a segunda avaliação, mas que na sequência, evoluiu gradativamente ao longo do tempo.

Já no segmento em GAP-GRADED – asfalto-borracha houve uma evolução acelerada da Irregularidade, indicando que o segmento sofreu uma deterioração elevada.

Figura 4.3 – Evolução da Deformação da Trilha de Roda

O afundamento da trilha de roda das monitorações foi similar ao das pistas testes, ou seja, houve evolução da deformação permanente da trilha de roda nos três segmentos, sendo esta pequena para os segmentos aplicados na Faixa SP-12.5-SBS e SP-12.5-RET e muito elevada no trecho com o GAP-GRADED – Borracha.

Tabela 4.1 – Resumo da Área com Defeitos – Fevereiro 2011

Segmento			% da Área com Defeitos
Tipo	km inicial	km final	Faixa Externa
1 - GAP - Borracha	672,0	671,3	18,2
2 -SP-12.5 - SBS	671,3	670,6	5,0
3 -SP-12.5 - RET	670,6	670,0	7,3

Há a presença de alguns defeitos superficiais nos segmentos na Faixa SP-12.5-SBS e SP-12.5-RET, com áreas deteriorada em ambos bastante similares, sendo de 5,0% e 7,3%. Respectivamente. No segmento em GAP-GRADED – Borracha, por sua vez, a

área deteriorada representa 18,2%, corroborando os dados de Irregularidade e confirmando que este segmento efetivamente sofreu uma deterioração maior que os dois anteriores, de forma mais acelerada.

4.1.2. Resultados do Simulador de Tráfego

Foram observados os seguintes comportamentos com base nos resultados obtidos empregando o Simulador de Tráfego:

- As características de macrotextura não se alteraram de forma significativa. A altura da mancha de areia dos segmentos com SBS e RET partiram de 0,61 mm e terminaram em 0,66 mm e 0,74 mm respectivamente. Já o segmento em GAP-GRADED partiu de um valor 0,84 mm e terminou em 0,92 mm. Nos três casos, os resultados mostram que as misturas asfálticas sofrem um pequeno desgaste superficial com o tráfego do pneu do simulador, com perda de mastique asfáltico.
- Em termos de microtextura, ao final dos ensaios os valores de todas as pistas testes foram muito similares com VRD para o SBS, RET e GAP variando entre 43 e 45, tal comportamento está associado ao fato deste parâmetro estar diretamente ligado ao agregado, que foi o mesmo para as três pistas testes e estavam expostos em função do desgaste superficial sofrido durante as simulações.
- Os dados de deflexão permaneceram no mesmo patamar durante toda a aplicação dos ciclos nos segmentos com RET e GAP com valores de deflexão em torno de $15 \times 0,01\text{mm}$ e $49 \times 0,01\text{mm}$ respectivamente. O segmento com SBS apresentou evolução nas deflexões que passaram de $36 \times 0,01\text{mm}$ no início para $47 \times 0,01\text{mm}$ no final das passadas, este comportamento está associado a uma possível deficiência na drenagem na posição do Simulador já que o aumento na deflexão é mais significativo nos primeiros ciclos momento em que houve uma concentração maior de chuva;

- Houve evolução da deformação da trilha de roda nos três segmentos, sendo esta pequena para os segmentos aplicados na Faixa SP-12.5-SBS e SP-12.5-RET com os valores médios passando de 0,13¹mm para 1,67 e de 0,77mm para 1,3mm respectivamente. No segmento em GAP esta evolução foi muito elevada com a deformação da trilha de roda passando de 2,5mm para 10,5mm antes da aplicação dos 500.000 semiciclos já que a deformação de trilha de roda foi superior a 7mm, que é o limite máximo para este parâmetro para esta concessão.

Sendo assim, conclui-se que as misturas na Faixa SP-12.5-SBS e SP-12.5-RET tiveram um comportamento muito superior ao trecho com o GAP-GRADED, sendo estas mais adequadas para recuperação de segmentos com o perfil de tráfego e geometria similares ao trecho do estudo. Ressalta-se que esta é uma conclusão válida para os agregados utilizados na pesquisa, faixas granulométricas estudadas e ligantes utilizados, bem como para a dosagem das misturas empregadas.

Apresenta-se a Tabela 4.2 que compara os resultados encontrados no monitoramento das Pistas Testes e no Simulador de Tráfego. Observa-se que a tabela mostra a consistência entre os resultados encontrados nas duas situações.

Tabela 4.2 – Comparação Entre os Resultados do Monitoramento de do HVS

Tipo	Monitoramento das Pistas Testes	Simulador de Tráfego
Deflexão	Comportamento Similar nos três segmentos com elevação das deflexões no período chuvoso	Nos segmentos em RET e GAP os valores permaneceram constantes ao longo da simulação e no SBS há evolução no início em função das chuvas
Deformação da Trilha de Roda	Evolução nos segmentos SBS, RET e GAP. No último caso atingindo o limite de 7mm	Evolução nos segmentos SBS, RET e GAP. No último caso atingindo o limite de 7mm
Defeitos Superficiais	Evolução moderada no SBS e RET e evolução acelerada do GAP	Não foram detectados defeitos em função do número limitado de simulações

¹ Optou-se pela apresentação dos valores médios da deformação da trilha de roda com duas casas decimais para evitar que arredondamentos prejudiquem a calibração e, portanto, a previsão da evolução deste parâmetro.

Tipo	Monitoramento das Pistas Testes	Simulador de Tráfego
Irregularidade Longitudinal	Pouca Evolução no RET e SBS e evolução acelerada do GAP	Não Avaliada
Aderência	Não Avaliada	Macrot textura: pequena elevação nos segmentos. Microtextura: pequena redução no RET e GAP e maior redução no SBS

4.2. Calibração dos Modelos de desempenho de flecha de trilha de roda

De posse dos resultados obtidos com o Simulador de Tráfego Linear Móvel, corroborados pelo monitoramento das pistas testes, procedeu-se a calibração do modelo da evolução da trilha de roda do HDM IV para os três segmentos experimentais. Para tanto o tráfego obtido no Simulador que acumulou um número de repetições do eixo padrão de $2,8 \times 10^6$ segundo a metodologia da AASHTO, algo equivalente a $1,0 \times 10^7$ na metodologia USACE, foi convertido artificialmente em tempo considerando um horizonte de 8 anos e um perfil de frota típico de uma rodovia de médio volume de tráfego. A Tabela 4.3 apresenta qual seria o número N equivalente a cada um dos anos nesta conversão.

Tabela 4.3 – Tráfego AASHTO ao ano com Taxa de Crescimento de 3% ao ano

Ano	NAASHTOano	NAASHTO Acumulado
1	3,38E+05	3,38E+05
2	3,49E+05	6,87E+05
3	3,59E+05	1,05E+06
4	3,70E+05	1,42E+06
5	3,81E+05	1,80E+06
6	3,91E+05	2,19E+06
7	4,02E+05	2,59E+06
8	4,15E+05	3,01E+06

Para cada um dos segmentos experimentais encontrou-se o número de semiciclos mais próximo no Número N calculado. Com estas informações em mãos foi possível o início do processo de calibração, pois assim as informações obtidas durante a simulação com o Simulador de Tráfego puderam ser associadas a uma condição presente ao longo do tempo em termos de tráfego.

Ressalta-se que no presente estudo, durante a calibração da curva de evolução da trilha de roda do HDM foram utilizados apenas as constantes de calibração K_{rpd} e K_{rst} que influenciam as equações de evolução da deformação da trilha de roda da camada asfáltica e do restante da estrutura do pavimento respectivamente. Os coeficientes de calibração K_{rid} e K_{rsw} não foram utilizados já que estão nas equações para pavimentos novos e regiões com neve, o que não representam a realidade dos segmentos estudados.

4.2.1. Calibração da Seção 2 – SBS – km 671+186

O primeiro passo para o processo de calibração, portanto, foi a definição dos valores da trilha de roda para o número de semiciclos equivalente aos anos do Número N calculado. A Tabela 4.4 apresenta a memória de cálculo para definição deste número.

Tabela 4.4 – Semiciclos Equivalentes ao N AASHTO calculado para Seção 2 – SBS

Registro	Número de Semi-Ciclos	Data	Pressão (Bar)	Carga (ton)	FV (AASHTO)	N	N Acumulado	Ano
1	0	5-ago	90	12,12	5,499	0,00E+00	0,00E+00	
2	100	5-ago	90	12,12	5,499	5,50E+02	5,50E+02	
3	300	5-ago	90	12,12	5,499	1,10E+03	1,65E+03	
4	1.000	5-ago	90	12,12	5,499	3,85E+03	5,50E+03	
5	3.000	6-ago	91	12,25	5,750	1,15E+04	1,70E+04	
6	10.000	7-ago	92	12,37	6,010	4,21E+04	5,91E+04	
7	13.627	7-ago	91	12,25	5,750	2,09E+04	7,99E+04	
8	30.000	8-ago	90	12,12	5,499	9,00E+04	1,70E+05	
9	41.368	9-ago	92	12,37	6,010	6,83E+04	2,38E+05	
10	54.892	10-ago	92	12,37	6,010	8,13E+04	3,20E+05	1
11	65.048	11-ago	90	12,12	5,499	5,58E+04	3,75E+05	
12	69.600	12-ago	91	12,25	5,750	2,62E+04	4,02E+05	
13	81.100	13-ago	91	12,25	5,750	6,61E+04	4,68E+05	
14	93.122	14-ago	91	12,25	5,750	6,91E+04	5,37E+05	
15	100.002	14-ago	91	12,25	5,750	3,96E+04	5,76E+05	
16	106.044	15-ago	90	12,12	5,499	3,32E+04	6,10E+05	
17	119.721	16-ago	92	12,37	6,010	8,22E+04	6,92E+05	2
18	131.215	17-ago	90	12,12	5,499	6,32E+04	7,55E+05	
19	144.719	18-ago	90	12,12	5,499	7,43E+04	8,29E+05	
20	159.097	19-ago	90	12,12	5,499	7,91E+04	9,08E+05	
21	173.213	20-ago	90	12,12	5,499	7,76E+04	9,86E+05	
22	188.159	21-ago	90	12,12	5,499	8,22E+04	1,07E+06	3
23	201.353	22-ago	90	12,12	5,499	7,26E+04	1,14E+06	
24	217.512	23-ago	90	12,12	5,499	8,89E+04	1,23E+06	
25	228.504	24-ago	90	12,12	5,499	6,04E+04	1,29E+06	
26	241.984	25-ago	91	12,25	5,750	7,75E+04	1,37E+06	
27	256.204	26-ago	89	12,00	5,257	7,47E+04	1,44E+06	4
28	269.862	27-ago	90	12,12	5,499	7,51E+04	1,52E+06	
29	283.706	28-ago	89	12,00	5,257	7,28E+04	1,59E+06	
30	298.056	29-ago	90	12,12	5,499	7,89E+04	1,67E+06	
31	317.638	30-ago	90	12,12	5,499	1,08E+05	1,78E+06	5
32	325.273	31-ago	90	12,12	5,499	4,20E+04	1,82E+06	
33	337.935	1-set	91	12,25	5,750	7,28E+04	1,89E+06	
34	351.623	2-set	91	12,25	5,750	7,87E+04	1,97E+06	
35	361.639	3-set	91	12,25	5,750	5,76E+04	2,03E+06	
36	375.813	4-set	91	12,25	5,750	8,15E+04	2,11E+06	
37	391.009	5-set	91	12,25	5,750	8,74E+04	2,20E+06	6
38	400.001	6-set	92	12,37	6,010	5,40E+04	2,25E+06	
39	417.337	7-set	92	12,37	6,010	1,04E+05	2,35E+06	
40	430.755	8-set	90	12,12	5,499	7,38E+04	2,43E+06	
41	444.835	9-set	90	12,12	5,499	7,74E+04	2,51E+06	
42	458.165	10-set	90	12,12	5,499	7,33E+04	2,58E+06	7
43	472.327	11-set	90	12,12	5,499	7,79E+04	2,66E+06	
44	486.244	12-set	91	12,25	5,750	8,00E+04	2,74E+06	
45	500.000	13-set	90	12,12	5,499	7,56E+04	2,81E+06	8

Após a definição do número de semiciclos são anotados os valores da deformação da trilha de roda em milímetros para cada ano, conforme apresentado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Evolução da Deformação da Trilha de Roda em mm - SBS

Ano	N AASHTO Calculado	N AASHTO Simulador	Trilha de Roda (mm)
0			0,13
1	3,38E+05	3,20E+05	0,80
2	6,87E+05	6,92E+05	0,97
3	1,05E+06	1,07E+06	1,17
4	1,42E+06	1,44E+06	1,27
5	1,80E+02	1,78E+06	1,27
6	2,19E+06	2,20E+06	1,33
7	2,59E+06	2,58E+06	1,67
8	3,01E+06	2,81E+06	1,67

A estrutura do pavimento neste primeiro segmento é apresentada na Figura 4.4.

Figura 4.4- Estrutura do Pavimento na Seção 2 – SBS

Com estes dados de entrada procedeu-se então a primeira rodada no HDM-IV com os K_s de calibração padrões, ou seja, $K_{rst} = 1$ e $K_{rpd} = 0$, sendo assim, o gráfico resultante desta primeira rodada é apresentado na Figura 4.5.

Figura 4.5- HDM para a Seção 2 – SBS com o Krst=1/Krpd=0, padrões do sistema

Na tentativa de se melhorar a curva prevista com relação à curva medida no Simulador Móvel Linear de Tráfego foram simuladas mais 29 curvas variando-se os valores do Krst e Krpd. A Tabela 4.6 apresenta um resumo de todos os valores de K utilizados para calibração.

Tabela 4.6 – Tentativas para calibração da curva de evolução da trilha de roda - SBS

Krst \ Krpd	0	1	2	4	6
0,5	1	2	3	4	5
0,75	6	7	8	9	10
1	Padrão	11	12	13	14
1,25	15	16	17	18	19
1,5	20	21	22	23	24
2	25	26	27	28	29

Os resultados das 30 tentativas são apresentados nas Figuras 5.6 a 5.10.

Figura 4.6 – Calibração Curva SBS – Tentativas 1 a 6

Figura 4.7 – Calibração Curva SBS – Tentativas 7 a 11

Figura 4.8 – Calibração Curva SBS – Tentativas 12 a 17

Figura 4.9 – Calibração Curva SBS – Tentativas 18 a 23

Figura 4.10 – Calibração Curva SBS – Tentativas 24 a 29

Com os valores obtidos foram calculados os Erros Médios Quadráticos (RMS) e os Coeficientes de Variação (CV) para cada uma das rodadas e escolhido o menor RMS com o menor CV como sendo a melhor aproximação entre a evolução obtida no

Simulador Móvel Linear de Tráfego e o HDM IV. As Tabelas 5.7 e 5.8 apresentam os resultados de RMS e CV para todas as 30 simulações numéricas.

Tabela 4.7 – Valores do RMS - SBS

Krst \ Krpd	0	1	2	4	6
0,5	0,7632	0,4283	0,3561	1,0185	1,8236
0,75	0,6414	0,3509	0,4210	1,1444	1,9555
1	0,5206	0,3127	0,5150	1,2754	2,0872
1,25	0,4162	0,3312	0,6263	1,4044	2,2223
1,5	0,3290	0,3987	0,7431	1,5377	2,3546
2	0,3066	0,6051	0,9939	1,8021	2,6230

Tabela 4.8 – Coeficiente de Variação - SBS

Krst \ Krpd	0	1	2	4	6
0,5	60,3	33,8	28,1	80,4	144,0
0,75	50,6	27,7	33,2	90,3	154,4
1	41,1	24,7	40,7	100,7	164,8
1,25	32,9	26,1	49,4	110,9	175,4
1,5	26,0	164,8	32,9	26,1	49,4
2	110,9	175,4	78,5	142,3	207,1

Dentre as tentativas feitas a que melhor se aproximou da curva real foi a tentativa 11 com Krst e Krpd iguais à unidade. Neste caso o RMS calculado foi de 0,31 e o Coeficiente de Variação de 24,69. A Figura 4.11 apresenta o Gráfico com a tentativa 11.

Figura 4.11 – Curva que melhor aproximou na Seção 2 – SBS

4.2.2. Calibração da Seção 1 – RET – km 670+231

Para a calibração da Seção 1 – RET repetiram-se os procedimentos realizados para a Seção 2 – SBS com a definição dos valores da trilha de roda para o número de semiciclos equivalente aos anos do Número N calculado. A Tabela 4.9 apresenta a memória de cálculo para definição deste número.

Tabela 4.9 – Semiciclos Equivalentes ao N AASHTO calculado para Seção 1 – RET

Registro	Número de Semi-Ciclos	Data	Pressão (Bar)	Carga (ton)	FV (AASHTO)	N	N Acumulado	Ano
1	0	17-set	90	12,12	5,499	0,00E+00	0,00E+00	
2	100	17-set	90	12,12	5,499	5,50E+02	5,50E+02	
3	300	17-set	91	12,25	5,750	1,15E+03	1,70E+03	
4	1.000	17-set	91	12,25	5,750	4,03E+03	5,72E+03	
5	3.000	18-set	91	12,25	5,750	1,15E+04	1,72E+04	
6	10.000	18-set	90	12,12	5,499	3,85E+04	5,57E+04	
7	22.684	19-set	90	12,12	5,499	6,97E+04	1,25E+05	
8	30.000	19-set	90	12,12	5,499	4,02E+04	1,66E+05	
9	37.034	20-set	90	12,12	5,499	3,87E+04	2,04E+05	
10	50.372	21-set	91	12,25	5,750	7,67E+04	2,81E+05	
11	64.476	22-set	91	12,25	5,750	8,11E+04	3,62E+05	1
12	78.770	23-set	89	12,00	5,257	7,51E+04	4,37E+05	
13	92.810	24-set	91	12,25	5,750	8,07E+04	5,18E+05	
14	100.000	24-set	91	12,25	5,750	4,13E+04	5,59E+05	
15	106.174	25-set	92	12,37	6,010	3,71E+04	5,96E+05	
16	120.134	26-set	90	12,12	5,499	7,68E+04	6,73E+05	2
17	134.242	27-set	91	12,25	5,750	8,11E+04	7,54E+05	
18	149.202	28-set	91	12,25	5,750	8,60E+04	8,40E+05	
19	158.534	29-set	91	12,25	5,750	5,37E+04	8,94E+05	
20	173.020	30-set	90	12,12	5,499	7,97E+04	9,74E+05	
21	186.516	1-out	91	12,25	5,750	7,76E+04	1,05E+06	3
22	200.000	2-out	91	12,25	5,750	7,75E+04	1,13E+06	
23	208.779	3-out	90	12,12	5,499	4,83E+04	1,18E+06	
24	221.537	4-out	90	12,12	5,499	7,02E+04	1,25E+06	
25	231.309	5-out	89	12,00	5,257	5,14E+04	1,30E+06	
26	245.949	6-out	90	12,12	5,499	8,05E+04	1,38E+06	4
27	260.121	7-out	91	12,25	5,750	8,15E+04	1,46E+06	
28	272.853	8-out	90	12,12	5,499	7,00E+04	1,53E+06	
29	286.943	9-out	90	12,12	5,499	7,75E+04	1,61E+06	
30	300.000	10-out	90	12,12	5,499	7,18E+04	1,68E+06	
31	314.884	11-out	90	12,12	5,499	8,18E+04	1,76E+06	5
32	328.498	12-out	91	12,25	5,750	7,83E+04	1,84E+06	
33	343.286	13-out	91	12,25	5,750	8,50E+04	1,93E+06	
34	357.762	14-out	90	12,12	5,499	7,96E+04	2,00E+06	
35	372.200	15-out	91	12,25	5,750	8,30E+04	2,09E+06	
36	384.096	16-out	91	12,25	5,750	6,84E+04	2,16E+06	6
37	400.000	17-out	90	12,12	5,499	8,75E+04	2,24E+06	
38	408.845	18-out	90	12,12	5,499	4,86E+04	2,29E+06	
39	424.451	19-out	90	12,12	5,499	8,58E+04	2,38E+06	
40	438.291	20-out	91	12,25	5,750	7,96E+04	2,46E+06	
41	451.169	21-out	91	12,25	5,750	7,40E+04	2,53E+06	
42	465.249	22-out	91	12,25	5,750	8,10E+04	2,61E+06	7
43	483.451	23-out	90	12,12	5,499	1,00E+05	2,71E+06	
44	500.088	24-out	90	12,12	5,499	9,15E+04	2,80E+06	8

Após a definição do número de semiciclos são anotados os valores da deformação da trilha de roda em milímetros para cada ano, conforme apresentado na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Evolução da Deformação da Trilha de Roda em mm – RET

Ano	N AASHTO Calculado	N AASHTO Simulador	Trilha de Roda (mm)
0			0,77
1	3,38E+05	3,62E+05	0,90
2	6,87E+05	6,73E+05	0,93
3	1,05E+06	1,05E+06	0,93
4	1,42E+06	1,38E+06	1,07
5	1,80E+06	1,76E+06	1,07
6	2,19E+06	2,16E+06	1,10
7	2,59E+06	2,61E+06	1,30
8	3,01E+06	2,80E+06	1,30

A estrutura do pavimento neste segmento é apresentada na Figura 4.12.

Figura 4.12 - Estrutura do Pavimento na Seção 1 – RET

Com estes dados de entrada procedeu-se então a primeira rodada no HDM-IV com os K_s de calibração padrões, ou seja, $K_{rst} = 1$ e $K_{rpd} = 0$, sendo assim, o gráfico resultante desta primeira rodada é apresentado na Figura 4.13.

Figura 4.13- HDM para a Seção 1 – RET com o $K_{rst}=1/K_{rpd}=0$, padrões do sistema

Na tentativa de se melhorar a curva prevista com relação à curva medida no Simulador Móvel Linear de Tráfego foram simuladas mais 29 curvas variando-se os valores do K_{rst} e K_{rpd} . A Tabela 4.6 apresenta um resumo de todos os valores de K utilizados para calibração.

Tabela 4.11 – Tentativas para calibração da curva de evolução da trilha de roda -RET

$K_{rst} \backslash K_{rpd}$	0	1	2	4	6
0,5	1	2	3	4	5
0,75	6	7	8	9	10
1	Padrão	11	12	13	14
1,25	15	16	17	18	19
1,5	20	21	22	23	24
2	25	26	27	28	29

Os resultados das 30 tentativas são apresentados nas Figuras 5.14 a 5.18.

Figura 4.14 – Calibração Curva RET – Tentativas 1 a 6

Figura 4.15 – Calibração Curva RET – Tentativas 7 a 11

Figura 4.16 – Calibração Curva RET – Tentativas 12 a 17

Figura 4.17 – Calibração Curva RET – Tentativas 18 a 23

Figura 4.18 – Calibração Curva RET – Tentativas 24 a 29

Com os valores obtidos foram calculados os Erros Médios Quadráticos (RMS) e os Coeficientes de Variação (CV) para cada uma das simulações matemáticas e

escolhido o menor RMS com o menor CV como sendo a melhor aproximação entre a evolução obtida no Simulador Móvel Linear de Tráfego e o HDM IV. As Tabelas 5.12 e 5.13 apresentam os resultados de RMS e CV para todas as 30 simulações.

Tabela 4.12 – Valores do RMS - RET

Krst \ Krpd	0	1	2	4	6
0,5	0,1097	0,3151	0,7289	1,5527	2,3764
0,75	0,0541	0,3854	0,7957	1,6190	2,4476
1	0,0586	0,4541	0,8648	1,6902	2,5140
1,25	0,1130	0,5208	0,9359	1,7594	2,5839
1,5	0,1805	0,5899	1,0008	1,8267	2,6544
2	0,3151	0,7299	1,1426	1,9647	2,7908

Tabela 4.13 – Coeficiente de Variação - RET

Krst \ Krpd	0	1	2	4	6
0,5	10,2	29,3	67,8	144,4	221,1
0,75	5,0	35,8	74,0	150,6	227,7
1	5,5	42,2	80,4	157,2	233,9
1,25	10,5	48,4	87,1	163,7	240,4
1,5	16,8	54,9	93,1	169,9	246,9
2	29,3	67,9	106,3	182,8	259,6

Dentre as tentativas feitas a que melhor se aproximou da curva real foi a tentativa 6 com Krst e Krpd iguais 0,75 e 0 respectivamente. Neste caso o RMS calculado foi de 0,54 e o Coeficiente de Variação de 5,0. A Figura 4.19 apresenta o Gráfico com a tentativa 6.

Figura 4.19 – Curva que melhor aproximou na Seção 1 – RET

4.2.3. Calibração da Seção 3 – GAP-GRADED – km 671+618

Para a calibração da Seção 3 – GAP-GRADED repetiram-se os procedimentos realizados para as Seções 1 e 2 com a definição dos valores da trilha de roda para o número de semiciclos equivalente aos anos do Número N calculado. A Tabela 4.14 apresenta a memória de cálculo para definição deste número.

Tabela 4.14 – Semiciclos Equivalentes ao NAASHTO calculado para Seção 3–GAP

Registro	Número de Semi-Ciclos	Data	Pressão (Bar)	Carga (ton)	FV (AASHTO)	N	N Acumulado	Ano
1	0	28-out	90	12,12	5,499	0,00E+00	0,00E+00	
2	100	28-out	90	12,12	5,499	5,50E+02	5,50E+02	
3	300	28-out	90	12,12	5,499	1,10E+03	1,65E+03	
4	1.000	28-out	90	12,12	5,499	3,85E+03	5,50E+03	
5	3.000	29-out	90	12,12	5,499	1,10E+04	1,65E+04	
6	10.000	29-out	91	12,25	5,750	4,03E+04	5,67E+04	
7	25.942	30-out	90	12,12	5,499	8,77E+04	1,44E+05	
8	30.000	31-out	91	12,25	5,750	2,33E+04	1,68E+05	
9	35.906	31-out	91	12,25	5,750	3,40E+04	2,02E+05	
10	50.244	1-nov	91	12,25	5,750	8,24E+04	2,84E+05	
11	68.262	2-nov	91	12,25	5,750	1,04E+05	3,88E+05	1
12	81.538	3-nov	89	12,00	5,257	6,98E+04	4,58E+05	
13	100.008	4-nov	91	12,25	5,750	1,06E+05	5,64E+05	
14	109.742	5-nov	90	12,12	5,499	5,35E+04	6,17E+05	
15	124.086	6-nov	90	12,12	5,499	7,89E+04	6,96E+05	2
16	135.632	7-nov	90	12,12	5,499	6,35E+04	7,60E+05	
17	154.354	8-nov	89	12,00	5,257	9,84E+04	8,58E+05	
18	169.140	9-nov	90	12,12	5,499	8,13E+04	9,39E+05	
19	179.304	10-nov	91	12,25	5,750	5,84E+04	9,98E+05	
20	200.027	11-nov	91	12,25	5,750	1,19E+05	1,12E+06	3
21	210.377	12-nov	90	12,12	5,499	5,69E+04	1,17E+06	
22	225.972	13-nov	90	12,12	5,499	8,58E+04	1,26E+06	
23	241.268	14-nov	89	12,00	5,257	8,04E+04	1,34E+06	
24	249.670	15-nov	90	12,12	5,499	4,62E+04	1,39E+06	4
25	265.391	16-nov	90	12,12	5,499	8,65E+04	1,47E+06	
26	280.987	17-nov	90	12,12	5,499	8,58E+04	1,56E+06	
27	300.000	19-nov	91	12,25	5,750	1,09E+05	1,67E+06	
28	308.205	19-nov	90	12,12	5,499	4,51E+04	1,71E+06	
29	322.319	20-nov	90	12,12	5,499	7,76E+04	1,79E+06	5
30	340.724	21-nov	91	12,25	5,750	1,06E+05	1,90E+06	
31	351.832	22-nov	91	12,25	5,750	6,39E+04	1,96E+06	
32	365.356	23-nov	90	12,12	5,499	7,44E+04	2,03E+06	
33	373.199	24-nov	91	12,25	5,750	4,51E+04	2,08E+06	
34	387.532	25-nov	90	12,12	5,499	7,88E+04	2,16E+06	6
35	397.439	26-nov	91	12,25	5,750	5,70E+04	2,22E+06	

Após a definição do número de semiciclos são anotados os valores da deformação da trilha de roda em milímetros para cada ano, conforme apresentado na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Evolução da Deformação da Trilha de Roda em mm – GAP

Ano	N AASHTO Calculado	N AASHTO Simulador	Trilha de Roda (mm)
0			0,77
1	3,38E+05	3,88E+05	2,70
2	6,87E+05	6,96E+05	3,90
3	1,05E+06	1,12E+06	4,93
4	1,42E+06	1,39E+06	5,33
5	1,80E+02	1,79E+06	5,37
6	2,19E+06	2,16E+06	5,37

A estrutura do pavimento neste segmento é apresentada na Figura 4.20.

Figura 4.20 - Estrutura do Pavimento na Seção 3 – GAP

Com estes dados de entrada procedeu-se então a primeira rodada no HDM-IV com os K_s de calibração padrões, ou seja, $K_{rst} = 1$ e $K_{rpd} = 0$, sendo assim, o gráfico resultante desta primeira rodada é apresentado na Figura 4.21.

Figura 4.21- HDM para a Seção 3 – GAP com o $Krst=1/Krpd=0$, padrões do sistema

Na tentativa de se melhorar a curva prevista com relação à curva medida no Simulador Móvel Linear de Tráfego (HVS) foram simuladas mais 29 curvas variando-se os valores do $Krst$ e $Krpd$. A Tabela 4.6 apresenta um resumo de todos os valores de K utilizados para calibração.

Tabela 4.16 – Tentativas para calibração da curva de evolução da trilha de roda-GAP

$Krst \backslash Krpd$	0	1	2	4	6
0,5	1	2	3	4	5
0,75	6	7	8	9	10
1	Padrão	11	12	13	14
1,25	15	16	17	18	19
1,5	20	21	22	23	24
2	25	26	27	28	29

Os resultados das 30 tentativas são apresentados nas Figuras 5.22 a 5.26.

Figura 4.22 – Calibração Curva GAP – Tentativas 1 a 6

Figura 4.23 – Calibração Curva GAP – Tentativas 7 a 11

Figura 4.24 – Calibração Curva GAP – Tentativas 12 a 17

Figura 4.25 – Calibração Curva GAP – Tentativas 18 a 23

Figura 4.26 – Calibração Curva GAP – Tentativas 24 a 29

Com os valores obtidos foram calculados os Erros Médios Quadráticos (RMS) e os Coeficientes de Variação (CV) para cada uma das rodadas e escolhido o menor RMS com o menor CV como sendo a melhor aproximação entre a evolução obtida no

Simulador Móvel Linear de Tráfego (HVS) e o HDM IV. As Tabelas 5.17 e 5.18 apresentam os resultados de RMS e CV para todas as 30 rodadas.

Tabela 4.17 – Valores do RMS - GAP

Krst \ Krpd	0	1	2	4	6
0,5	3,3119	2,9071	2,5046	1,7237	1,0246
0,75	3,1447	2,7419	2,3425	1,5675	0,9083
1	2,9799	2,5769	2,1779	1,4188	0,8092
1,25	2,8103	2,4145	2,0192	1,2717	0,7402
1,5	2,6476	2,2473	1,8590	1,1342	0,7063
2	2,3213	1,9296	1,5483	0,8907	0,7569

Tabela 4.18 – Coeficiente de Variação - GAP

Krst \ Krpd	0	1	2	4	6
0,5	84,7	74,4	64,1	44,1	26,2
0,75	80,4	70,1	59,9	40,1	23,2
1	76,2	65,9	55,7	36,3	20,7
1,25	71,9	61,8	51,6	32,5	18,9
1,5	67,7	57,5	47,5	29,0	18,1
2	59,4	49,4	39,6	22,8	19,4

Dentre as tentativas feitas a que melhor se aproximou da curva real foi a tentativa 24 com Krst e Krpd iguais 1,5 e 6 respectivamente. Neste caso o RMS calculado foi de 0,71 e o Coeficiente de Variação de 18,1. A Figura 4.27 apresenta o Gráfico com a tentativa 24.

Figura 4.27 – Curva que melhor aproximou na Seção 3 – GAP

4.2.4. Observações Referentes às Calibrações Realizadas

A Figura 4.28 apresenta as calibrações para os segmentos em SBS, RET e GAP. Observa-se que para nos segmentos em SBS e RET a evolução é gradativa com os valores, após um período de 8 anos, com valores bastante inferiores ao limite de 7 mm. Já o segmento em GAP apresenta evolução acelerada e atinge este limite em 7 anos.

Figura 4.28 – Curvas Calibradas para as três pistas testes

O tráfego obtido no Simulador que acumulou um número de repetições do eixo padrão de $2,8 \times 10^6$ segundo a metodologia da AASHTO, algo equivalente a $1,0 \times 10^7$

na metodologia USACE, foi convertido artificialmente em tempo considerando um horizonte de 8 anos e um perfil de frota típico de uma rodovia de médio volume de tráfego. Fazendo agora a conversão para uma rodovia de elevado volume de tráfego, ter-se-ia a evolução da trilha de roda conforme apresentado na Figura 4.29.

Figura 4.29 – Evolução da Trilha de Roda para Rodovia de Tráfego Elevado

Observa-se que o limite de 7 mm seria atingido com número N USACE de $5,5 \times 10^6$ para o segmento em GAP; no segmento em SBS, para atingir o mesmo valor, o número N USACE seria de $3,3 \times 10^7$, e para o RET, o número N USACE seria de $8,4 \times 10^8$, sendo assim, o trecho com RET deverá ser restaurado por outros motivos, que não pela presença da trilha já que não há projeto segundo as atuais diretrizes para pavimentos asfáltico com N de $8,4 \times 10^8$. Ressalta-se que para a calibração do SBS e do RET as equações foram extrapoladas para atingir o limite de 7 mm já que a simulação não chegou a este patamar, ou seja, neste estudo mostrou-se a necessidade de se atingir valores de afundamento mais próximos do limite contratual para uma melhor calibração das curvas de desempenho.

Com relação aos fatores de calibração (Krst e Krpd) pode-se observar que de maneira geral nenhum dos revestimentos asfálticos estudados teve o Krst, que está vinculado à deterioração da estrutura, muito distante do proposto pelo modelo. Isto significa que neste caso a estrutura não é propriamente um problema, ou seja, do ponto de

vista estrutural, as estruturas são suficientemente robustas para suportar a atuação de repetições de carga.

Já para o fator de calibração K_{rpd} , que tem relação com a deformação plástica, a diferença do valor calibrado com o proposto como padrão pelo HDM ($K_{rpd}=0$) é significativa, principalmente do GAP (K_{rpd} calibrado=6) que apresentou uma evolução da deformação da trilha muito acelerada. Esta diferença pode estar relacionada com a mistura asfáltica – dosagem, curva granulométrica, e tipo e teor de ligante, ou seja, aparentemente o problema é da camada superficial asfáltica.

Desta forma, verifica-se a importância da calibração dos modelos de desempenho que neste caso descartaria a utilização do GAP para este segmento. É importante ressaltar que estes estudos estão limitados aos agregados utilizados na pesquisa, faixas granulométricas e ligantes empregados, bem como para a dosagem destas misturas.

5. Metodologia Proposta

Baseado nos estudos realizados propõe-se na Figura 5.1 uma metodologia para utilização de Simuladores de Tráfego em escala real para calibração de Curvas de Desempenho para parâmetros funcionais dos pavimentos.

Figura 5.1 – Método para Calibração de Curvas de Desempenho com Simulador de Tráfego de Verdadeira Grandeza

Seguem abaixo as recomendações a serem seguidas em cada uma das etapas apresentadas nesta metodologia.

- (1) Definição da Pista Teste e da Solução a Serem Estudados: A definição da Pista Teste e da Solução a serem estudadas estão vinculadas aos objetivos do

estudo e dependem da disponibilidade de material da região, da rodovia que se pretende estudar e das faixas granulométricas que serão utilizadas.

- (2) Projeto de Mistura em laboratório: O projeto de mistura deve atender rigorosamente todas as especificações vigentes e requisitos estipulados pela norma que o especifica, bem como as especificações particulares de projeto. Neste item estão também previstos ensaios de dano à umidade induzida.
- (3) Teste em Simulador de Pequena Escala e determinação de propriedades mecânicas: Após a elaboração dos projetos de mistura asfáltica todas as misturas devem ser ensaiadas em Simuladores de Pequena Escala. Dependendo do alvo do teste ou projeto, devem igualmente serem determinados os módulos de resiliência (eventualmente o módulo dinâmico) e a vida de fadiga em laboratório.

Esta etapa é de fundamental importância, pois pode-se descartar uma série de misturas asfálticas que, apesar de atenderem aos pré-requisitos estipulados pelas normas no projeto de mistura, podem não atender em termos de deformação de trilha de roda quando aplicados. Com a realização deste ensaio antes da execução da Pista Teste é possível se descartar projetos inadequados e otimizar tempo e recursos que poderiam estar sendo destinados à misturas de melhor desempenho. Nos outros casos de projeto, onde foram determinados os módulos de resiliência, por exemplo, as misturas asfálticas podem não atender ao projetado nas simulações mecanicistas, devendo ser alterado o projeto da mistura, com alteração de concepção ou ligante, ou mesmo espessura da camada em projeto.

Como exemplo, no presente estudo, durante os ensaios de laboratório observou-se que a Deformação Permanente nas trilhas de roda ensaiados em simulador de tráfego tipo LPC da mistura em GAP-GRADED com asfalto borracha foi superior a 5%. Segundo recomendação da Norma Europeia EN 12697-22: *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22 :*

wheel tracking, tais misturas não devem ser utilizadas em rodovias com elevado volume de tráfego e quando aplicada em pista a mistura em GAP-GRADED teve um comportamento muito aquém do desejado.

Desta forma, recomenda-se que todas as misturas asfálticas a serem estudadas para pesquisas, ou para rodovias de médio a elevado volume de tráfego sejam submetidas a ensaios de deformação em trilha de roda em simuladores de laboratório e, caso não atendam o limite especificado para o ensaio e/ou projeto, sejam reestudadas na etapa anterior (Projeto de Mistura), até que apresentem desempenho adequado na etapa em questão. O mesmo deve ser feito para projetos de misturas asfálticas para pavimentos onde a análise mecanicista é feita e os módulos de resiliência devem ser verificados. Os ensaios de fadiga são indicados em caso de projeto de tráfego pesado ou quando se deseja comparar a eficiência de dois ligantes diferentes.

(4) Execução da Obra: A Pista Teste deve ser executada atendendo a todos os parâmetros estabelecidos nas normas vigentes. Adicionalmente, sugerem-se as seguintes recomendações:

- a. A quantidade mínima recomendada de CAP a ser usinada é a capacidade máxima do tanque de armazenamento de CAP da usina, que em geral no Brasil é de 25 toneladas de ligante asfáltico. Esta prática se faz necessária para evitar que dois tipos distintos de CAP sejam misturados acidentalmente durante a execução de uma pista teste da usina de asfalto.

A quantidade de 25 toneladas de ligante asfáltico é suficiente, em um exemplo como o desta pesquisa, para execução de aproximadamente 1.000m de faixa com 3,5m de largura e 5cm de espessura.

b. Recomenda-se que sejam armazenadas amostras do ligante asfáltico e dos agregados utilizados para uma eventual verificação futura. As quantidades recomendadas para armazenamento são:

- Agregado: 200kg no total, levando em conta as proporções na mistura (os agregados devem ser armazenados separadamente na proporção correta para produção de aproximadamente 200kg de mistura);
- Ligante Asfáltico: 20kg (suficiente para ensaios de dosagens, bem como de caracterização e estocagem para rastreamento).

(5) Controle de Qualidade: o controle de qualidade durante a execução da obra deve atender aos requisitos mínimos vigentes nas Normas e/ou projeto.

Caso os requisitos mínimos estabelecidos para o controle de qualidade não sejam atendidos a Pista Teste deverá ser refeita, voltando para etapa anterior “Execução da Obra” até que o Controle de Qualidade atenda aos requisitos estabelecidos;

(6) Simulador de Tráfego: a simulação de tráfego deverá seguir o Método para Simulações de Tráfego com Equipamento Móvel proposto por Vale, 2008, incluindo as seguintes recomendações adicionais:

- a. A simulação do tráfego deverá ser realizada até o fim da vida útil do pavimento. Define-se *vida útil* como sendo os limites funcionais e/ou estruturais que caracterizam o fim da vida do pavimento, estes limites devem ser propostos pelo projetista. Não se deve fixar um período ou um número de ciclos de carga, pois pode acarretar um estudo inconclusivo;
- b. Deve-se atentar que a medida da trilha de roda deve corresponder à flecha máxima da seção transversal, já que a canalização da carga

pode fazer com que o centro da trilha não represente o maior valor. Alternativamente, a trilha de rodas poderia ser medida com a obtenção do perfil da seção transversal.

- (7) Monitoramento dos Pavimentos das Pistas Testes: Além da simulação de tráfego, é importante que se faça o monitoramento dos pavimentos sob a ação do tráfego nas pistas testes. Este monitoramento servirá para corroborar os resultados que serão encontrados no simulador de tráfego e, caso estes resultados tenham um comportamento distinto, recomenda-se que sejam feitos estudos adicionais com o intuito de se detectar a razão desta diferença passando-se assim para um passo anterior à calibração da curva (“Estudos Adicionais”).
- (8) Verificação da Consistência: Consiste na verificação da consistência entre os dados obtidos no Simulador e no Monitoramento dos Pavimentos das Pistas Testes.
- (9) Estudos Adicionais: Entende-se por estudos adicionais a investigação de campo ou de laboratório que tem por objetivo interpretar o comportamento distinto entre os resultados encontrados no Simulador de Tráfego e no Monitoramento dos Pavimentos das Pistas Testes. Estes estudos deverão encontrar os motivos das diferenças apontadas.
- (10) Calibração dos Modelos de Desempenho: Com os dados validados inicia-se o processo de calibração das Curvas de Desempenho. A calibração consiste em se aproximar a evolução dos dados obtidos no Simulador de Tráfego com os dados da curva teórica a ser calibrada.

Após a calibração as curvas obtidas podem ser utilizadas para estudos e projetos com as mesmas características do estudo em questão.

6. Conclusões e Recomendações

As seguintes conclusões podem ser tiradas do presente estudo.

6.1. Resultados do Monitoramento das Pistas Testes

- Durante o desenvolvimento da pesquisa os valores deflectométricos dos segmentos com revestimento na Faixa SP-12.5-SBS e SP-12.5-RET estiveram sempre abaixo do limite de $50 \times 0,01$ mm e sofreram evolução maior na última avaliação que coincidiu com o período de chuvas mais intensas. O comportamento do segmento com revestimento em GAP-GRADED – Borracha foi similar aos outros porém o limite de $50 \times 0,01$ mm foi atingido na última avaliação. Observa-se que o segmento em RET a estrutura é mais robusta, com a presença de placas de concreto na sub-base;

- A condição de Irregularidade Longitudinal em termos de IRI apresentou duas situações distintas, a primeira nos segmentos em SBS e RET, onde o IRI praticamente não sofreu alteração entre a primeira e a segunda avaliação, mas que na sequência, evoluiu gradativamente ao longo do tempo.

Já no segmento em GAP houve uma evolução acelerada da Irregularidade, indicando que o segmento sofreu uma deterioração elevada.

- O afundamento da trilha de roda das monitorações foi similar ao das pistas testes, ou seja, houve evolução da deformação permanente da trilha de roda nos três segmentos, sendo esta pequena para os segmentos aplicados em SBS e RET e muito elevada no trecho com o GAP.
- Os defeitos superficiais nos segmentos em SBS e RET compreendem áreas deterioradas bastante similares, sendo de 5,0% e 7,3%, respectivamente. Já no segmento em GAP, a área deteriorada representa 18,2%, corroborando os

dados de Irregularidade e confirmando que este segmento efetivamente sofreu uma deterioração acelerada.

6.2. Resultados do Simulador de Tráfego

Foram observados os seguintes comportamentos com base nos resultados obtidos empregando o Simulador de Tráfego:

- As características de macrotextura não se alteraram de forma significativa. A altura da mancha de areia dos segmentos com SBS e RET partiram de 0,61 mm e terminaram em 0,66 mm e 0,74 mm respectivamente. Já o segmento em GAP-GRADED partiu de um valor 0,84 mm e terminou em 0,92 mm. Nos três casos, os resultados mostram que as misturas asfálticas sofrem um pequeno desgaste superficial com o tráfego do pneu do simulador, com perda de mastic asfáltico.
- Em termos de microtextura, ao final dos ensaios os valores de todas as pistas testes foram muito similares com VRD para o SBS, RET e GAP variando entre 43 e 45, tal comportamento está associado ao fato deste parâmetro estar diretamente ligado ao agregado, que foi o mesmo para as três pistas testes e estavam expostos em função do desgaste superficial sofrido durante as simulações.
- Os dados de deflexão permaneceram no mesmo patamar durante toda a aplicação dos ciclos nos segmentos com RET e GAP com valores de deflexão em torno de $15 \times 0,01\text{mm}$ e $49 \times 0,01\text{mm}$ respectivamente. O segmento com SBS apresentou evolução nas deflexões que passaram de $36 \times 0,01\text{mm}$ no início para $47 \times 0,01\text{mm}$ no final das passadas, este comportamento está associado a uma possível deficiência na drenagem na posição do Simulador já que o aumento na deflexão é mais significativo nos primeiros ciclos, momento em que houve uma concentração maior de chuva;;

- Houve evolução da deformação da trilha de roda nos três segmentos, sendo esta pequena para os segmentos aplicados na Faixa SP-12.5-SBS e SP-12.5-RET com os valores médios passando de 0,13mm para 1,67 e de 0,77mm para 1,3mm respectivamente. No segmento em GAP esta evolução foi muito elevada com a deformação da trilha de roda passando de 2,5mm para 10,5mm antes da aplicação dos 500.000 semiciclos já que a deformação de trilha de roda foi superior a 7mm, que é o limite máximo para este parâmetro para esta concessão..

Sendo assim, conclui-se que as misturas na Faixa SP-12.5-SBS e SP-12.5-RET tiveram um comportamento muito superior ao trecho com o GAP-GRADED, sendo estas mais adequadas para recuperação de segmentos com o perfil de tráfego e geometria similares ao trecho do estudo. Ressalta-se que esta é uma conclusão válida para os agregados utilizados na pesquisa, faixas granulométricas estudadas e ligantes utilizados, bem como para a dosagem das misturas empregadas.

6.3. Calibração das Curvas

Para as três pistas testes foram realizadas as calibrações do modelo de desempenho do HDM IV para evolução da deformação permanente da trilha de roda. Observa-se que para atingir o limite de 7 mm na trilha de roda seria necessário um número N USACE de $5,5 \times 10^6$ para do segmento em GAP, de $3,3 \times 10^7$ para o SBS e de $8,4 \times 10^8$ para o RET , sendo assim, o trecho com RET deverá ser restaurado por outros motivos, que não pela presença da trilhas já que não há projeto segundo as atuais diretrizes para pavimentos asfáltico com N de $8,4 \times 10^8$. Ressalta-se que para a calibração do SBS e do RET as equações foram extrapoladas para atingir o limite de 7mm já que a simulação não chegou a este patamar.

Cabe lembrar que, conforme a metodologia proposta pelo presente trabalho, para o estudo das deformações permanentes da trilha de roda deveriam ser aplicados mais ciclos de forma a se atingir o fim de vida útil do pavimento, ou seja, 7mm e não haver necessidade de extrapolar valores (caso do SBS e RET).

6.4. Metodologia Proposta

Com base nos estudos realizados propôs-se uma metodologia para utilização de Simuladores de Tráfego em escala real de modo que os resultados extraídos dos monitoramentos servem para calibração de Curvas de Desempenho para parâmetros funcionais e estruturais dos pavimentos. Esta metodologia é formada por 10 etapas que devem ser seguidas para um melhor aproveitamento dos recursos, sempre escassos em pesquisas.

6.5. Recomendações e Sugestões de Continuidade de Pesquisa

As seguintes sugestões e recomendações são feitas como forma de continuidade desta pesquisa:

- Complementação do presente estudo com a utilização da metodologia proposta para calibração dos outros parâmetros do HDM IV como, por exemplo, o trincamento;
- Estudo do material pétreo da região do Município de Guaratuba para elaboração de projetos de mistura em GAP-GRADED que atendam ao desempenho em termos de evolução da trilha de roda;
- Aplicação das constantes de calibração K_{rst} e K_{rpd} obtidas no presente estudo para segmentos restaurados com os tipos de mistura ensaiados e que possuam histórico de informação da evolução da trilha de roda para verificação da sua validade;

REFERÊNCIAS

AASHTO - Task Force 31 Report - Guide Specifications for Polymer Modified Asphalt. Washington DC, 1992

AASHTO T 283 – Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induce Damage. Washington DC, 2002

ABNT NBR 7208 – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Materiais Betuminosos para Pavimentação. Rio de Janeiro, 1998

AFNOR - Association Française de Normalisation. Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés – NF P 98-253-1. Paris, 1991.

AFNOR - Association Française de Normalisation. Préparation des mélanges hydrocarbonés – NF P 98-250-2. Paris, 1991.

ANP – Agência Nacional do Petróleo. Resolução ANP Nº 19, DE 11.7.2005 – Especificação para Cimentos Asfálticos de Petróleo. Rio de Janeiro, 2005

ANP – Agência Nacional do Petróleo. Resolução ANP Nº 32, DE 21.9.2010 – Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo Modificados por Polímeros Elastoméricos. Rio de Janeiro, 2010

ANP – Agência Nacional do Petróleo. Resolução ANP Nº 39, DE 24.12.2008 – Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo modificados por Borracha Moída de Pneus - Asfaltos, 2008

ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres: <http://www.antt.gov.br/>, 2011

ASTM D 2041-00 - Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures. West Conshohocken, 2000.

ASTM D 6114 - Standard Specification for Asphalt Rubber Binder. West Conshohocken, 2001

ASTM E 303-93 - Standard Test Method for Measuring Surfacing Frictional Properties Using the British Pendulum Tester, West Conshohocken, 1998

ASTM E 950-09 - Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference. West Conshohocken, 2004

CALTRANS - Caltrans Standard Special Provisions for Asphalt Rubber Binder, Sacramento. 2003

CERATTI, J. A.; OLIVEIRA, J. A. Equipamento simulador de tráfego desenvolvido pelo DAER /RS e UFRGS. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 27 Teresina, 1993. Anais. Teresina: ABPv, 1993.

CIFALI, E. Arquivos recebidos por e-mail. Porto Alegre, 2006.

CNT – Confederação Nacional do Transporte. <http://www.cnt.org.br>, 2011

DJARF, L. Road deterioration and maintenance effects models in cold climates. Swedish Road Research Institute. Suécia, 1995

DNER/IPR - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Coletânea de Normas - Asfaltos Modificados por Polímeros. Rio de Janeiro, 1998.

DNER/IPR - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Pesquisa de Asfaltos Modificados por Polímeros – Relatório Final. Ministério dos Transportes. Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico. Tomos I, II e III. Rio de Janeiro, 1998.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Anuário Estatístico das Rodovias Federais. Brasília, 2010.

EPPS, A., T. AHMED, D.C. LITTLE, M. MIKHAIL, Performance assessment with the MMLS3 at Westrack. In: JOURNAL OF THE ASSOCIATION OF ASPHALT PAVING TECHNOLOGISTS, vol. 70, 2001, pp. 509–542. 2000.

EPPS, J. A.; LEAHY, R. B.; MITCHELL, T.; ASHMORE, C.; SEEDS, S.; ALAVI, S.; MONISMITH, C. L. Westrack - the road to performance-related specifications. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACCELERATED PAVEMENT TESTING (CD-Rom). Reno, NV. 1999. 29p.

EPPS, J., MONISMITH, C. L., SEEDS, S. B. Westrack performance – interim findings, In: JOURNAL OF THE ASSOCIATION OF ASPHALT PAVING TECHNOLOGISTS – AAPT, v. 67, pp. 738-769. 1998.

FIESP - Federação das Indústrias do Estado de São Paulo: www.fiesp.com.br, 2006

FREITAS, F.J.S. – Asfalto Modificado com EVA. Anais da 30a Reunião Anual de Pavimentação, v. 1, p. 61-74. Salvador, 1996

FRITZEN , M. A.; MOTTA, L. M. G. Ensaio acelerado envolvendo simulador de tráfego móvel – HVS, na BR-116/RJ, em Pista Experimental com Revestimento de CBUQ. 2005. In XIII CILA - CONGRESSO IBERO – LATINOAMERICANO DEL ASFALTO - San José – Costa Rica, 2005.

FRITZEN, M.A. Avaliação de soluções de reforço de pavimentos asfálticos com simulador de tráfego na rodovia Rio Teresópolis. 2005. 291 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, RJ, 2005

GUO, R., PROZ, J. A. Predicting in-service fatigue life of flexible pavements based on accelerated pavement testing. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 87th ANNUAL MEETING (CD-Rom). Washington. 2008.

GUARÇONI, D. S.– Petróleo, Refino e Fracionamento Químico de Asfalto, DNER. Rio de Janeiro, 1994

IBP - Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Combustível - Informações Básicas sobre Materiais Asfálticos. 7ª ed., IBP/Comissão do Asfalto. Rio de Janeiro, 1999

INSTITUTO DO ASFALTO - Tradução do Manual de Asfalto. Série do Manual nº 4 (MS-4). Rio de Janeiro, 1999

LABORATORIE CENTRAL DES PONTS E CHAUSSÉES - LCPC. Les machines Fabac: catálogo. [Paris]: Fivision Matériaux et Structures de Chaussées; [2008]. 2p.

LEITE, L.F.M., Estudo de Preparo e Caracterização de Asfaltos Modificados por Polímeros (Tese de Doutorado), COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1999

MANO, Eloisa B. – Introdução a Polímeros, Edgard Blucher Ltda. São Paulo, 1986.

METCALF, J. NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. - NCHRP Synthesis of Highway Practice 235: Application of full-scale accelerated pavement testing. 1996. TRB, National Research Council, Washington, U.S.A, 1996.

Ministério dos Transportes: <http://www.transportes.gov.br/>, 2005

MOTTA, L. M. G. et al (1995) “Avaliação Estrutural de Trechos Experimentais na Rodovia Carvalho Pinto – Análise Preliminar”. 29ª RAPv, pp282-309, Cuiabá – MT.

NOVADUTRA, Concessionária da Rodovia Presidente Dutra. Estudo de desempenho de pavimento com distintos ligantes asfálticos - relatório final - tomo I. 2007. 87 p. São Paulo, 2007.

MOROSIUK, G. Derivation of a new rut depth model for the structural deformation component in HDM-4 – TRL Unpublished Project Report PR/ORC/610/98 – Transport Research Laboratory. Crowthorne - UK. 1998.

MOURA, E. Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório. (Tese Doutorado). - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, EPUSP. São Paulo, 2010.

NDLI, N.D. Lea International, *RETA 5549-REG Highway Development and Management Research. Modelling Road Deterioration and Maintenance Effects in HDM-4*, 1995

NEGRÃO, D. P., Preussler, E. S et al. Asfalto Modificado com o Terpolímero Elastomérico Reativo (RET) – Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. San Jose, 2005.

NUÑEZ, W. P. Análise experimental de pavimentos rodoviários delgados com basalto alterado. 1997. 271p. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 1997.

NUÑEZ, W. P. Arquivo recebido de Marlova Grazziontin Johnston por e-mail. 9p. Porto Alegre, 2006.

NÚÑEZ, W. P.; CERATTI, J. A.; GEHLING, W. Y. Y. Ensaios acelerados de pavimentos no Rio Grande do Sul: resultados e expectativas / Accelerated pavement testing in Rio Grande do Sul State (Brazil), results and expected developments. In: GEOSUL 2000, 2000

PATERSON, W. D. O. The highway design and maintenance standards model. Baltimore / London: The World Bank, The Johns Hopkins University Press, 1987. 454p. (Road Deterioration and Maintenance Effects, Models for Planning and Management).

PATERSON, W. D. O., SCULLION, T. - Information Systems for road management: draft guidelines on system design and data issues. Infrastructure and Urban Development Department Report INU77. Washington DC., 1990.

PINTO, S. Materiais Betuminosos (Conceituação, especificações e utilização). Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 1998.

QUEIROZ, C. A. V. Performance prediction models for pavement management in Brazil. 1981. 317p. Tese (Doutorado) - Faculty of Degraduate Scholl, University of Texas. Austin: 1981.

RAMOS, C. R., GUARÇONI, D. S., MARTINHO F. G. – Curso de Química de Asfalto – IBP. Rio de Janeiro, 1995.

SILVA, P. D. Estudo do reforço de concreto de cimento (whitetopping) na pista Circular experimental do instituto de pesquisas rodoviárias. 2001. 358 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, 2001.

SOUZA, A. M., RAMOS, C. R., MOTTA, L. M. G., et al., Curso de técnicas de laboratório em ligantes e misturas asfálticas. IBP, Rio de Janeiro, 1995.

ULLIDTZ, P., HARVEY, J., TSAI, B.W., MONISMITH, C. Calibration of mechanistic-empirical models for flexible pavements using the California heavy vehicle simulators. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 87th ANNUAL MEETING (CD-Rom). Washington. 2008.

VALE, A. F. Estudo e aplicação de microrrevestimento asfáltico a frio (MRAF). 2003. 174 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, EPUSP. São Paulo, 2002.

VALE, A. F. Método de uso de simuladores de tráfego linear móvel de pista para a determinação de comportamento e previsão de desempenho de pavimentos asfálticos. Tese (Doutorado). - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, EPUSP. São Paulo, 2008

WATANATADA, T.; et al. The highway design and maintenance Standards model volume 1: Description of the HDM-III model. The Highway Design and Maintenance Standards Series. Baltimore, 1987.