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

ANDRÉ FELIPE VALE

**Método de uso de simuladores de tráfego linear móvel
de pista para a determinação de comportamento e
previsão de desempenho de pavimentos asfálticos**

São Paulo

2.008

ANDRÉ FELIPE VALE

**Método de uso de simuladores de tráfego linear móvel
de pista para a determinação de comportamento e
previsão de desempenho de pavimentos asfálticos**

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 Doutora
Liedi Légi Bariani Bernucci

São Paulo

2.008

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

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

São Paulo, 24 de abril de 2008.

Assinatura do autor _____

Assinatura do Orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Vale, André Felipe

Método de uso de simuladores de tráfego linear móvel de pista para a determinação de comportamento e previsão de desempenho de pavimentos asfálticos / A.F. Vale. -- São Paulo, 2008.

306 p.

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

1. Pavimentos flexíveis 2. Ensaios acelerados 3. Tráfego (Simulação; Métodos) I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II. t.

DEDICATÓRIA

A Bia e Leo. Meninos, vocês me mostraram como as coisas mais simples podem ser tão maravilhosas.

AGRADECIMENTOS

À minha família, pela força, pelo incentivo e por acreditar no meu trabalho, mesmo quando a conclusão pareceu tão distante. Também agradeço pela paciência e compreensão, devido à minha ausência nos momentos de estudo. Grazi, Bia e Leo obrigado. Pai, Dani e Tica obrigado a vocês também.

À professora Liedi Bernucci pela serenidade e clareza, orientação e incentivo, ainda antes do início desta jornada. Obrigado por acreditar e incentivar a pesquisa nos momentos de maior dificuldade.

Aos professores do Curso de Pós-Graduação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pelos ensinamentos transmitidos nas aulas, trabalhos, provas e conversas. Em especial, ao Prof. Dr. Carlos Suzuki, sempre disponível e pronto para qualquer tipo de apoio.

Aos funcionários da escola, em especial a toda equipe do laboratório, por toda atenção e dedicação aos alunos.

Ao professor Jorge Ceratti e ao Dr. Octávio Campos, pela presteza no auxílio e orientações de rumo no momento da qualificação desta pesquisa, cujas contribuições permitiram o enriquecimento dos estudos.

Ao Dr. Emanuelle Cifali, que acreditou no simulador de tráfego linear móvel, ferramenta de grande valia para o desenvolvimento do setor de infra-estrutura de transportes, e pelas valiosas informações a respeito da concepção deste equipamento.

A todas as pessoas envolvidas nas pesquisas com o simulador de tráfego linear móvel. Ao Dr. Adilson Vinha, pelo auxílio técnico na pesquisa de reciclagem do revestimento asfáltico. A Marlova Johnston, colega do DAER/RS, que auxiliou muito na obtenção de dados técnicos referentes aos estudos com o simulador de tráfego da UFRGS e dos artigos da pesquisa na RS-122.

A todos os meus colegas e amigos da Dynatest, pessoas que tive o privilégio de conhecer e conviver todos estes anos, onde pudemos aprender e trabalhar juntos por muitas e muitas estradas. Gostaria de agradecer especialmente ao Rui por estar sempre nos harmonizando, e nominalmente aos que, em algum momento, envolveram-se diretamente nesta pesquisa: Denise e Danielle, pelo auxílio na digitação de textos e tabelas; Agnaldo, pelo apoio para converter todas as figuras de artigos estrangeiros; Douglas, Leonardo, Daniel e Paulo, pela ajuda na revisão do texto; Pedro Murga, Cecília e Régis, tradutores oficiais.

Ao Dr. Ernesto Preussler, que desde o início se mostrou não apenas um grande pesquisador e técnico, mas uma figura humana de inestimável valor, sempre atento e disponível.

A todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a concretização deste trabalho.

RESUMO

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.** 2008. 306 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

Os ensaios acelerados de pavimentos em escala real consistem na aplicação controlada de uma carga de roda igual ou acima da carga máxima legal permitida, em uma estrutura de pavimento, seja este um pavimento-teste ou uma via existente, para se determinar a resposta do sistema e o seu desempenho sob condições controladas e aceleradas de acúmulo de danos num espaço limitado de tempo (METCALF, 1996). Esses ensaios podem ser realizados hoje, tanto por simuladores instalados em campos de prova destinados a este único fim, quanto por simuladores móveis, cuja composição é rebocável ou autopropelida e pode ser posicionada no local a ser pesquisado, o que se mostra especialmente vantajoso no estudo de materiais e técnicas de restauração de pavimentos por preservar as condições de contorno. Apresentam-se os resultados dos primeiros testes acelerados em pavimentos com simulador de tráfego linear móvel no Brasil e suas contribuições para o desenvolvimento das técnicas, processos de projeto e planejamento rodoviários. Apresenta-se também uma síntese dos ensaios acelerados de pavimentos em escala real com simuladores de tráfego lineares móveis, com o objetivo de mostrar o estágio atual do conhecimento nessa área, a partir de uma revisão bibliográfica e associando esses conhecimentos a casos práticos. Como contribuição para futuros trabalhos, com base na análise das pesquisas já finalizadas e dos resultados já obtidos, foi elaborada uma proposta de método para a realização de simulação em pista e de ensaios a serem conduzidos antes, durante e após o término da simulação, dependendo do objetivo específico dos ensaios acelerados.

Palavras-chave: Ensaos acelerados de pavimentos, Simuladores de tráfego, Método.

ABSTRACT

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.** 2008. 306 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

Full-scale accelerated pavement testing is defined as the controlled application of a wheel load in a pavement structure to determine the pavement system response and its performance under accelerated conditions of accumulated damage in a compressed time period (METCALF, 1996). Loads at or above the legal maximum allowed by highway agencies can be applied at test tracks, using simulators designed solely for this purpose, or at existent roads using mobile simulators positioned right at the road pavement structure. This layout provides an interesting advantage in the study of materials and pavement rehabilitation techniques by preserving field conditions, specially structural and environmental characteristics. This research describes the results from the first accelerated pavement tests with mobile linear traffic simulator in Brazil and their contribution for the development of design procedures, distress monitoring methods, and road planning. As part of this research, a wide literature review was done associated with practical case studies, the current stage of knowledge in this area, and a real scale synthesis of accelerated pavement experiments with linear mobile traffic simulators. This research proposes a simulation method for testing pavement sections and the evaluation tests to be performed according to the objective of the accelerated pavement test study. This research is a contribution to the state of practice of this type of accelerated pavement testing in Brazil and outlines the path for future applications of this technology in the country.

Keywords: Accelerated pavement test, Heavy vehicle simulator, Method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Inter-relação entre custos e benefícios em termos de conhecimento adquirido que as ferramentas de engenharia podem trazer a um estudo na área de pavimentação. Fonte: HUGO & MARTIN (2004).	9
Figura 2.2 – Mesa compactadora tipo LCPC (à esquerda) e Simulador de tráfego tipo LCPC (à direita).....	22
Figura 2.3 – Simulador do tipo APA - Analisador de Pavimento Asfáltico. Fonte: FRITZEN (2005b).....	23
Figura 2.4 – Ensaio LWT. Fonte: VALE (2003).	25
Figura 2.5 – Evolução das pesquisas com ensaios acelerados associadas ao tipo de material empregado em pavimentos novos e ao tráfego de projeto entre as décadas de 1950 e 1980. Fonte: HUGO & MARTIN (2004).....	31
Figura 2.6 – Ilustração das pistas-teste do <i>Minnesota Road Program</i>	33
Figura 2.7 – Pista-teste do <i>National Center for Asphalt Technology</i>	34
Figura 2.8 – Esquema das seções-teste do WesTrack e foto da pista com veículos em operação.	36
Figura 2.9 – Foto ilustrativa do <i>Manège de Fatigue</i> do LCPC e detalhe do trem-de-prova.....	38
Figura 2.10 – Adaptação realizada nas instalações do LCPC para ensaios com o <i>Manège de Fatigue</i> com controle das condições de umidade.	40
Figura 2.11 – Simulador FABAC do LCPC.	41
Figura 2.12 – Pista de ensaios em escala real e veículo simulador de tráfego pesado do CEDEX	43
Figura 2.13 – <i>Accelerated Loading Facility (ALF)</i>	44
Figura 2.14 –Esquema de funcionamento e fotos do HVS Mark-IV.....	47
Figura 2.15 – HVS “ <i>Bigfoot</i> ” do <i>Waterways Experiment Station</i> empregado para estudos de pavimentos aeroportuários.	48
Figura 2.16 – Ilustração e vista geral da Pista Circular do IPR/DNER. Fonte: SILVA (2001).	51
Figura 2.17 – Área da UFRGS em que se encontra o simulador UFRGS-DAER/RS e vista do equipamento. Fonte: (NUÑEZ, 2006).	58

Figura 2.18 – Pesquisas de tubos de PVC com o simulador UFRGS-DAER/RS. Fonte: NUÑEZ (2006).	65
Figura 2.19 – Etapas da construção do Simulador de Tráfego Linear Móvel brasileiro. Fonte: CIFALI (2006).	69
Figura 2.20 – Sistema de Guiamento do Rodado.	73
Figura 2.21 – Sistema de Aplicação de Cargas Através de um Cilindro Hidráulico.	73
Figura 2.22 – Sistema de Deslocamento Transversal.	73
Figura 2.23 – Sistema de Amortecimento.	73
Figura 2.24 – Motor Indutivo Tipo Gaiola de 60 HP.	74
Figura 2.25 – Sensores Indutivos.	74
Figura 2.26 – Sistema de Rodado.	74
Figura 2.27 – Sistema de Controle do Simulador de Tráfego Linear Móvel.	74
Figura 2.28 – Sistema de Segurança Instalados nas Laterais do Simulador.	74
Figura 3.1 – Efeito da velocidade na deflexão do pavimento. Fonte: HUGO & MARTIN (2004).	83
Figura 3.2 – Efeitos da temperatura no desempenho dos pavimentos. Fonte: HUGO & MARTIN (2004).	86
Figura 3.3 – Evolução da flecha em trilha de roda em pavimento asfáltico com base granular em ensaio com HVS. Fonte: HUGO & MARTIN (2004).	87
Figura 3.4 – Efeito da saturação no desempenho de pavimentos asfálticos de base granular ensaios com HVS. Fonte: HUGO & MARTIN (2004).	88
Figura 3.5 – Padrão de trincamento utilizado por AZAMBUJA (2004) e execução das trincas.	91
Figura 3.6 – Disposição dos sensores na pesquisa com o simulador UFRGS- DAER/RS em pesquisa sobre desempenho de recapeamento asfáltico. Fonte: AZAMBUJA (2004).	97
Figura 3.7 – Alguns instrumentos utilizados no HVS. Fonte: GONÇALVES (1999).	99
Figura 4.1 – Simulador de Tráfego Linear Móvel em operação.	104
Figura 4.2 – Curva Viscosidade x Temperatura nos ligantes da RS-122. Fonte: PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006a).	108

Figura 4.3 – Estrutura dos pavimentos nas seções-teste da RS-122. Fonte: PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006b).....	111
Figura 4.4 – Condição inicial dos pavimentos da RS-122, ANTES da execução da pista teste e DEPOIS de sua recuperação, sem a aplicação de cargas com o simulador. Fonte: PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006b).....	112
Figura 4.5 – Bacias de deflexão ao longo da simulação da Pista Convencional 1 - CA com CAP-20. Fonte: PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006b).	115
Figura 4.6 – Cargas, temperaturas e parâmetros funcionais ao longo da simulação da Pista CA com Asfalto-Borracha. Fonte: PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006b).	116
Figura 4.7 – Bacias de deflexão ao longo da simulação da Pista CA com Asfalto-Borracha. Fonte: PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006b).	117
Figura 4.8 – Cargas, temperaturas e parâmetros funcionais ao longo da simulação da Pista Convencional 2 - CA com CAP-20. Fonte: PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006b).	118
Figura 4.9 – Cargas, temperaturas e parâmetros funcionais ao longo da simulação da Pista Convencional 2 - CA com CAP-20. Fonte: PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006b).	119
Figura 4.10 – Ensaio de deformação permanente em amostras de CBUQ da RS-122. Fonte: PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006a).	126
Figura 4.11 – Dosagem do microrrevestimento a frio para a SP-330. Fonte: AUTOVIAS (2004).....	135
Figura 4.12 – Comparativo deflectométrico antes e após a obra na faixa interna da SP-330. Fonte: AUTOVIAS (2003).....	136
Figura 4.13 – Comparativo deflectométrico antes e após a obra na faixa externa da SP-330. Fonte: AUTOVIAS (2003).....	137
Figura 4.14 – Estrutura do pavimento na SP-330. Fonte: AUTOVIAS (2003).....	137
Figura 4.15 – Retroanálise da seção-teste 1 da SP-330	138
Figura 4.16 – Retroanálise da seção-teste 2 da SP-330	139
Figura 4.17 – Retroanálise da seção-teste 3 da SP-330	139
Figura 4.18 – Retroanálise da seção-teste 4 da SP-330	140

Figura 4.19 – Irregularidade da faixa interna da SP-330 antes e logo após a obra. Fonte: AUTOVIAS (2003).	141
Figura 4.20 – Irregularidade da faixa externa da SP-330 antes e logo após a obra. Fonte: AUTOVIAS (2003).	141
Figura 4.21 – Condição de superfície antes e logo após a obra na SP-330. Fonte: AUTOVIAS (2003).	142
Figura 4.22 – Evolução da microtextura (VRD) durante o ensaio acelerado na seção de TSS com polímero e microrrevestimento na SP-330. Fonte: AUTOVIAS (2004).	144
Figura 4.23 – Evolução da macrotextura (espessura de areia) durante o ensaio acelerado na seção de TSS com polímero e microrrevestimento na SP-330. Fonte: AUTOVIAS (2004).	144
Figura 4.24 – Evolução da flecha em trilha de roda no ensaio acelerado na seção de TSS com polímero na SP-330.	147
Figura 4.25 – Evolução da microtextura (VRD) no ensaio acelerado na seção de TSS com polímero na SP-330.	148
Figura 4.26 – Evolução da macrotextura (espessura de areia) no ensaio acelerado na seção de TSS com polímero na SP-330.	148
Figura 4.27 – Deflexões anteriores a fresagem e deflexões sobre o pavimento fresado no segmento experimental da BR-116/RJ. Fonte: FRITZEN (2005b).	155
Figura 4.28 – Célula de Pressão Total (Tipo Pastel) 40 cm x 40 cm. Fonte: FRITZEN (2005b).	156
Figura 4.29 – Célula de Pressão Total de 15 cm de diâmetro. Fonte: FRITZEN (2005b).	157
Figura 4.30 – Mapeamento da superfície fresada, antes do recapeamento, realizado em papel, em verdadeira grandeza. Fonte: FRITZEN (2005b).	159
Figura 4.31 – Instrumentação do trecho 3 da BR-116/RJ. Fonte: FRITZEN (2005b).	159
Figura 4.32 – Trincas no revestimento do trecho 2 antes da simulação de tráfego. Fonte: FRITZEN (2005b).	167
Figura 4.33 – Comparativo da evolução da flecha em trilha de roda com semicírculos uni e bidirecionais no trecho 2 da BR-116/RJ. Fonte: FRITZEN (2005b).	169

Figura 4.34 – Trinca de retração no CCR dois dias após sua execução e em corpo-de-prova, já refletindo no CBUQ antes da simulação de tráfego na BR-116/RJ. Fonte: FRITZEN (2005b).	172
Figura 4.35 – Comparativo da evolução da flecha em trilha de roda com semiciclos uni e bidirecionais no trecho 4 da BR-116/RJ. Fonte: FRITZEN (2005b).	173
Figura 4.36 – Dosagem da reciclagem a frio <i>in situ</i> do revestimento na SP-147 ...	183
Figura 4.37 – Monitoramento deflectométrico na faixa interna na SP-147 durante a cura do material reciclado. Fonte: INTERVIAS (2005a).	185
Figura 4.38 – Monitoramento deflectométrico na faixa externa na SP-147 durante a cura do material reciclado. Fonte: INTERVIAS (2005a).	185
Figura 4.39 – Monitoramento da irregularidade na faixa interna na SP-147 durante a cura do material reciclado. Fonte: INTERVIAS (2005a).	187
Figura 4.40 – Monitoramento da irregularidade na faixa externa na SP-147 durante a cura do material reciclado. Fonte: INTERVIAS (2005a).	187
Figura 4.41 – Monitoramento do VRD na faixa interna na SP-147 durante a cura do material reciclado. Fonte: INTERVIAS (2005a).	189
Figura 4.42 – Monitoramento do VRD na faixa externa na SP-147 durante a cura do material reciclado. Fonte: INTERVIAS (2005a).	189
Figura 4.43 – Monitoramento da macrotextura na faixa interna na SP-147 durante a cura do material reciclado. Fonte: INTERVIAS (2005a).	190
Figura 4.44 – Monitoramento da macrotextura na faixa externa na SP-147 durante a cura do material reciclado. Fonte: INTERVIAS (2005a).	190
Figura 4.45 – Resultados em milímetro do simulador LCPC a 60°C em placas de 100mm de material reciclado extraído da SP-147	191
Figura 4.46 – Resultados em milímetro do simulador LCPC a 60°C em placas de 100mm de material reciclado extraído da SP-147	192
Figura 4.47 – Evolução da flecha em trilha de roda na seção-teste do simulador de tráfego na SP-147. Fonte: INTERVIAS (2005b).	194
Figura 4.48 – Evolução da macrotextura na seção-teste do simulador de tráfego na SP-147. Fonte: INTERVIAS (2005b).	195
Figura 4.49 – Evolução do VRD na seção-teste do simulador de tráfego na SP-147. Fonte: INTERVIAS (2005b).	195

Figura 4.50 – Ilustração do local das seções-teste na BR-116/SP. Fonte: NOVADUTRA (2007).....	200
Figura 4.51 – Granulometria empregada na pesquisa na BR-116/SP em relação às faixas granulométricas de algumas especificações. Fonte: NOVADUTRA (2007).	201
Figura 4.52 – Resumo dos ensaios no simulador LCPC para os materiais coletados de pista não submetidos ao simulador de tráfego em escala real na BR-116/SP. Fonte: NOVADUTRA (2007)	204
Figura 4.53 – Gráfico da resistência à tração de misturas de laboratório, coletadas na usina e na pista após a compactação na BR-116/SP. Fonte: NOVADUTRA (2007).	205
Figura 4.54 – Gráfico do módulo de resiliência de misturas de laboratório, coletadas na usina e na pista após a compactação na BR-116/SP. Fonte: NOVADUTRA (2007).	206
Figura 4.55 – Gráfico da energia de ligação inicial de misturas de laboratório, coletadas na usina e na pista após a compactação na BR-116/SP. Fonte: NOVADUTRA (2007).....	207
Figura 4.56 – Porcentagem de energia retida após a usinagem de misturas de laboratório, coletadas na usina e na pista na BR-116/SP. Fonte: NOVADUTRA (2007).	208
Figura 4.57 – Curvas de fadiga das misturas asfálticas moldadas em laboratório para a pesquisa na BR-116/SP. Fonte: NOVADUTRA (2007).	209
Figura 4.58 – Curvas de fadiga das misturas asfálticas moldadas de amostras coletadas após a usinagem para a pesquisa na BR-116/SP. Fonte: NOVADUTRA (2007).	210
Figura 4.59 – Curvas de fadiga das misturas asfálticas coletadas nas seções-teste da BR-116/SP. Fonte: NOVADUTRA (2007).	211
Figura 4.60 – Perfil deflectométrico da faixa 1 do dispositivo da BR-116/SP com a SP-65. Fonte: NOVADUTRA (2007).	213
Figura 4.61 – Deflexões medidas com viga Benkelman eletrônica antes e após as obras de fresagens e recomposições na BR-116/SP. Fonte: NOVADUTRA (2007).	215

Figura 4.62 – Evolução da Flecha em função do número de operações equivalentes ao eixo padrão rodoviário pelo método USACE (“N”) nas seções-teste da BR-116/SP.....	219
Figura 4.63 – Evolução da macrotextura em função do número de operações equivalentes ao eixo padrão rodoviário pelo método USACE (“N”) nas seções-teste da BR-116/SP.....	220
Figura 4.64 – Evolução da microtextura em função do número de operações equivalentes do eixo padrão rodoviário pelo método USACE (“N”) nas seções-teste da BR-116/SP.....	221
Figura 4.65 – Evolução da deflexão retificada em função do número de operações equivalentes ao eixo padrão rodoviário pelo método USACE (“N”) nas seções-teste da BR-116/SP.....	221
Figura 4.66 – Evolução das deflexões após a simulação de tráfego na BR-116/SP.	223
Figura 4.67 – Volume de Vazios antes e depois da simulação na BR-116/SP	225
Figura 5.1 – Distribuição transversal de carga. Fonte: AZAMBUJA (2004).	259
Figura 5.2 – Transporte e posicionamento do Simulador de Tráfego Linear Móvel	267
Figura 5.3 – Locação da pista teste	267
Figura 5.4 – Calibração / Aferição de cargas.....	269
Figura 5.5 – Monitoramento dos pavimentos com ensaios deflectométricos	271
Figura 5.6 – Controle da evolução de defeitos na superfície realizado por AZAMBUJA (2004).	272
Figura 5.7 – Monitoramento de flecha em trilha de roda com treliça metálica	273
Figura 5.8 – Monitoramento dos pavimentos com ensaios de aderência, com Pêndulo Britânico e ensaios de mancha de areia.	275
Figura 5.9 – Modelo de tabela para apresentação dos resultados.	278

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Características do HVS.	46
Tabela 2.2 – Síntese das Pesquisas realizadas na Pista Circular do IPR/DNER.....	52
Tabela 2.3 – Resumo dos resultados da pesquisa com basaltos alterados no simulador UFRGS-DAER/RS.....	61
Tabela 2.4 – Resumo das principais pesquisas com o simulador UFRGS-DAER/RS	68
Tabela 4.1 – Ficha técnica do experimento com simulador de tráfego na RS-122.	106
Tabela 4.2 – Caracterização dos ligantes asfálticos da pesquisa na RS-122.....	108
Tabela 4.3 – Temperaturas de mistura e aplicação do CBUQ na RS-122	109
Tabela 4.4 – Faixa granulométrica “tipo B” do DAER e faixa de trabalho na RS-122	109
Tabela 4.5 – Resumo dos dados do projeto Marshall das misturas da pesquisa na RS-122.....	110
Tabela 4.6 – Síntese dos ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração nas misturas da RS-122	110
Tabela 4.7 – Resumo do monitoramento das condições ambientais nas simulações na RS-122	113
Tabela 4.8 – Resultados médios de MR a diversas temperaturas em amostras de CBUQ da RS-122.....	121
Tabela 4.9 – Resistência à tração a 25°C em amostras de CBUQ da RS-122	122
Tabela 4.10 – Energia de ligação inicial nas amostras da RS-122.....	124
Tabela 4.11 – Ficha técnica do experimento com simulador de tráfego na SP-330	130
Tabela 4.12 – Identificação das seções-teste na SP-330	131
Tabela 4.13 – Caracterização do material pétreo empregado na pesquisa na SP-330	131
Tabela 4.14 – Enquadramento granulométrico do TSS empregado na SP-330	132
Tabela 4.15 – Dosagem do TSS com polímero da SP-330	132
Tabela 4.16 – Enquadramento granulométrico do TSD empregado na SP-330	133
Tabela 4.17 – Dosagem do TSS com polímero da SP-330	133

Tabela 4.18 – Enquadramento granulométrico do microrrevestimento asfáltico a frio empregado na SP-330	134
Tabela 4.19 – Dosagem do microrrevestimento a frio para a SP-330.....	134
Tabela 4.20 – Ensaio de coesão do microrrevestimento a frio da SP-300	135
Tabela 4.21 – Ficha técnica do experimento com simulador de tráfego na BR-116/RJ	150
Tabela 4.22 – Características do CAP-40 empregado na BR-116/RJ.....	153
Tabela 4.23 – Características do Ligante Asfáltico utilizado no terceiro trecho experimental da BR-116/RJ.....	154
Tabela 4.24 – Características Marshall da Mistura Asfáltica <i>Gap Grade</i> com Borracha fornecida pela BR Distribuidora para a obra na BR-116/RJ.....	154
Tabela 4.25 – Resultado do projeto de mistura do CCR da BR-116/RJ	160
Tabela 4.26 – Resumo dos dados do experimento na BR-116/RJ.....	174
Tabela 4.27 – Ficha técnica do experimento com simulador de tráfego na SP-147.....	177
Tabela 4.28 – Análise mecânica e previsão de vida útil do pavimento da SP-147	181
Tabela 4.29 – Previsão de desempenho com HDM-III para a reciclagem a frio <i>in situ</i> do revestimento na SP-147	182
Tabela 4.30 – Resumo dos dados da dosagem da reciclagem da SP-147	183
Tabela 4.31 – MR e RT no material reciclado da SP-147	186
Tabela 4.32 – MR e RT no material reciclado da SP-147	188
Tabela 4.33 – Monitoramento da condição de superfície durante a cura do material reciclado na SP-147	188
Tabela 4.34 – Ciclos de carga na SP-147.....	193
Tabela 4.35 – Resultados da pesquisa na SP-147	194
Tabela 4.36 – Ficha técnica do experimento com simulador de tráfego na BR-116/SP	198
Tabela 4.37 – Resumo dos resultados no teor ótimo de cada mistura utilizada na pesquisa na BR-116/SP	202
Tabela 4.38 – Viscosidade a 177°C dos ligantes empregados na BR-116/SP	203
Tabela 4.39 – Resultados da retroanálise com dados anteriores à obra de restauração na BR-116/SP.....	214

Tabela 4.40 – Controle tecnológico das obras na BR-116/SP - parte 1	216
Tabela 4.41 – Controle tecnológico das obras na BR-116/SP - parte 2	217
Tabela 4.42 – Ciclos e operações equivalentes por seção-teste da BR-116/SP	218
Tabela 4.43 – Evolução dos valores deflectométricos na pesquisa na BR-116/SP	224
Tabela 4.44 - Resumo dos resultados das seções-teste da BR-116/SP	228
Tabela 4.45 – Resultados das seções-teste ao final de $1,5 \times 10^7$ operações do eixo padrão rodoviário pelo método USACE nas seções-teste da BR-116/SP	229
Tabela 5.1 – Resumo das deflexões nas pistas convencional 1 e borracha na pesquisa na RS-122	231
Tabela 5.2 – Contagens de tráfego no sentido Teresópolis da praça de pedágio no km 133,5 da BR-116/RJ	242
Tabela 5.3 – Quadro resumo dos aspectos positivos e aspectos negativos das pesquisas analisadas	246
Tabela 5.4 – Classificação da Textura - ASTM E-867,1997	274
Tabela 5.5 – Critérios decisórios a serem observados na Concepção da Pesquisa com o Simulador de Tráfego Linear Móvel	280
Tabela 5.6 – Critérios decisórios a serem observados na Definição dos Locais com o Simulador de Tráfego Linear Móvel	281
Tabela 5.7 – Critérios decisórios a serem observados na Definição do Tráfego a ser aplicado pelo Simulador de Tráfego Linear Móvel	284
Tabela 5.8 – Critérios decisórios em relação às Condições Climáticas em pesquisas com Simulador de Tráfego Linear Móvel	287
Tabela 5.9 – Critérios para Execução das Pistas Experimentais destinadas a ensaios acelerados com Simulador de Tráfego Linear Móvel	288
Tabela 5.10 – Critérios de Operação do Simulador de Tráfego Linear Móvel e monitoramento do Pavimento em cada seção-teste	289
Tabela 5.11 – Ensaio complementares e posteriores a simulação de tráfego com o Simulador de Tráfego Linear Móvel	292

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 compreensão 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
m	Coeficiente de Poisson
m/km	Metro por quilômetro
m/m ²	Metro por metro quadrado
m ²	Metro quadrado
ml/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
N	Número equivalente de operações do eixo padrão rodoviário
Nm	Newton metro
O/C	Relação operação-cobertura
oC	Graus Celsius
P	Poise
P	Carga do eixo simples de rodagem dupla
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. Objetivos	5
1.2. Estrutura do Trabalho	6
2. OS SIMULADORES DE TRÁFEGO	8
2.1. Métodos de Dimensionamento e Modelos de Desempenho	11
2.2. Simuladores de tráfego de pequeno porte	19
2.3. Simuladores de tráfego em escala real	25
2.3.1. Introdução	25
2.3.2. Experiências Internacionais	32
2.3.3. Experiências Nacionais	49
2.3.3.1. Pistas Testes	49
2.3.3.2. Simulador de Tráfego Linear Móvel	69
3. ASPECTOS RELEVANTES EM ENSAIOS ACELERADOS DE PAVIMENTOS	77
3.1. Tráfego	77
3.1.1. Carga de Roda	77
3.1.2. Características do Pneu e Pressão de Contato	78
3.1.3. Deslocamento Lateral Transversal	79
3.1.4. Sentido de Carregamento	80
3.1.5. Suspensão e Efeitos Dinâmicos	81
3.1.6. Velocidade de Carregamento	82
3.1.7. Tipo e Configuração de Eixo	84
3.2. Variáveis Climáticas	85
3.2.1. Temperatura	85
3.2.2. Umidade	87
3.2.3. Envelhecimento do Asfalto	89
3.3. Pavimento e Materiais de Pavimentação	90
3.4. Monitoramento durante os Ensaios Acelerados	91
3.5. Instrumentação	92
4. ENSAIOS REALIZADOS: SEÇÕES-TESTE NAS RODOVIAS BRASILEIRAS	102
4.1. Introdução	102
4.2. Rodovia RS-122 (DAER/RS)	105
4.3. SP-330 (Autovias)	128
4.4. BR-116/RJ (CRT)	149
4.5. SP-147 (Intervias)	176
4.6. BR-116/SP (NovaDutra)	197
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DAS EXPERIÊNCIAS BRASILEIRAS E PROPOSIÇÃO DE MÉTODO PARA SIMULAÇÕES	230
5.1. Local	230
5.2. Clima	231
5.3. Deslocamentos do Simulador	232
5.4. Execução	233
5.5. Simulação de Tráfego – Carga e Cobertura	234
5.6. Simulação de Tráfego e Monitoramento	237

5.7. Aspectos Adicionais	238
5.8. Comentários sobre as Pesquisas Analisadas	239
5.8.1. Pesquisa RS-122 (DAER)	239
5.8.2. Pesquisa SP-330 (Autovias)	240
5.8.3. Pesquisa BR-116/RJ (CRT)	241
5.8.4. Pesquisa SP-147 (Intervias)	243
5.8.5. Pesquisa BR-116/SP (NovaDutra)	243
5.8.6. Quadro Resumo	245
5.9. Proposição de Método para Simulações	249
5.9.1. Definição do local	251
5.9.2. Tráfego	255
5.9.2.1. Carga de roda	255
5.9.2.2. Características do Pneu e Pressão de Contato	257
5.9.2.3. Deslocamento Lateral Transversal	258
5.9.2.4. Sentido de Carregamento	259
5.9.2.5. Velocidade do Carregamento e Efeitos Dinâmicos	260
5.9.2.6. Tipo e Configuração de Eixo	261
5.9.3. Variáveis Climáticas	261
5.9.3.1. Temperatura	262
5.9.3.2. Umidade	263
5.9.3.3. Envelhecimento do Asfalto	263
5.9.4. Execução das Seções-teste	264
5.9.5. Instrumentação	264
5.9.6. Simulação de Tráfego e Monitoramento	266
5.9.7. Ensaio Laboratoriais Complementares	279
5.9.8. Resumo do Método Proposto	279
6. Conclusões e Recomendações	293
REFERÊNCIAS	296

1. APRESENTAÇÃO

Avanços significativos vêm sendo atingidos no desenvolvimento de materiais e processos executivos na engenharia rodoviária, em especial na área de infraestrutura. O estudo de desempenho de pavimentos, ou seja, a capacidade do pavimento de atender aos seus objetivos ao longo do tempo, necessita de renovações e aprimoramentos, de modo a acompanhar os avanços tecnológicos.

Os gestores e engenheiros rodoviários brasileiros têm utilizado freqüentemente modelos de desempenho de pavimentos desenvolvidos principalmente na América do Norte e na Europa, para planejar, projetar, construir e reabilitar pavimentos. Esse fato se deve em boa parte ao desenvolvimento dos transportes naqueles continentes, com a construção de malhas rodoviárias pavimentadas e a realização de importantes pesquisas de pavimentos (GEIPOT, 1982b).

Soma-se o fato dos procedimentos de dimensionamento de pavimentos empíricos terem, em sua maioria, origem em pesquisas nas décadas de 1950 e 1960. Além disso, os modelos de desempenho incorporados aos métodos de dimensionamento não cobrem com a amplitude necessária os diversos aspectos atualmente observados nas rodovias de todo o mundo, como o expressivo incremento do tráfego, tanto em volume quanto em cargas, as novas configurações de eixos e rodas, a mudança nas velocidades dos veículos, entre outros (METCALF, 1996).

Portanto, os modelos empíricos apresentam algumas limitações e não são necessariamente transferíveis, a não ser que sejam feitas algumas adaptações. Os modelos de previsão de desempenho devem refletir as condições das rodovias nas quais são aplicados. Por conseguinte, devem ser desenvolvidos com base em dados locais ou devem ser modificados e verificados. O Brasil representa um excelente exemplo dessa necessidade, uma vez que possui condições climáticas diferentes das dos países do Hemisfério Norte, possui solos de diferentes materiais, além de outros fatores que influem no desempenho dos pavimentos e que, portanto, precisam

estar refletidos em qualquer modelo eficiente de precisão de desempenho (GEIPOT, 1982b).

Outra vertente a ser considerada está vinculada aos avanços na indústria da construção rodoviária, com o surgimento de novos materiais e técnicas de pavimentação e recuperação de pavimentos que outrora não eram sequer vislumbradas, tais como os processos de reciclagem de pavimentos e especialmente de revestimentos asfálticos. Neste ponto, destaca-se o emprego de ligantes asfálticos especiais, modificados por polímeros ou por borracha de pneu, uma solução que possibilitou a introdução de camadas delgadas e ultradelgadas¹ na concepção e no dimensionamento das recuperações dos pavimentos, bem como nos programas de manutenção especial da malha rodoviária.

Um dos maiores problemas para os engenheiros rodoviários é o dimensionamento de um pavimento. Além de ter ciência do tráfego significativamente diferenciado em termos de cargas, número e configuração em relação às experiências anteriores, é necessário saber avaliar o potencial de emprego de um novo material com velocidade suficiente para se manter atualizado em relação ao avanço da indústria da construção (METCALF, 1996).

A adoção de modelos de desempenho, entretanto, exige longas etapas de estudos e acompanhamentos de campo que duram vários anos, com o objetivo de consolidar e aferir os modelos propostos. Exemplo disto é o extenso programa LTPP (*Long-Term Pavement Performance Program*) do SHRP (*Strategic Highway Research Program*) americano, iniciado em 1989, com o objetivo de pesquisar centenas de quilômetros de rodovias, durante sua vida de serviço, para compreender os diversos aspectos envolvidos, tais como as propriedades mecânicas dos materiais e as estruturas de pavimentos, estabelecendo novos modelos condizentes com a tecnologia e o tráfego atuais.

¹ Em francês têm-se denominado de *três minces* camada de espessura entre 2 e 3 cm e *ultras minces* a camada inferior a 2 cm.

O principal problema em relação à execução de trechos experimentais refere-se a pouca disponibilidade de tempo para o monitoramento e análise de desempenho. Além disso, também devem ser destacadas as diversas variáveis envolvidas, e muitas vezes não controladas, em uma pista experimental, tais como as frequências e valores de cargas, as propriedades dos materiais e o clima (METCALF, 1996).

A condição ideal para se dimensionar um pavimento de forma satisfatória envolve a construção de uma pista experimental e o monitoramento do comportamento desse pavimento sob serviço, o que, todavia, pode não ser tecnicamente viável ao longo do tempo, considerando-se também os aspectos financeiros envolvidos. Além disso, na vida em serviço o pavimento pode ser solicitado por cargas diferenciadas e superiores às acumuladas na seção experimental (METCALF, 1996).

Neste sentido, é necessário um método que permita, em um curto período de tempo, estudar e pesquisar novas estruturas de pavimentos ou novos materiais de pavimentação, acumulando danos através da repetição de cargas controladas. Os parâmetros não relacionados ao tráfego, tais como as condições ambientais, também devem ser controlados, reduzindo-se o número de variáveis, no experimento num cenário ideal (METCALF, 1996). Muitas agências rodoviárias e pesquisadores acadêmicos têm buscado solucionar esta questão através do emprego de Ensaio Acelerados de Pavimentos (APT), associados ao desenvolvimento de modelos teóricos de comportamento.

Testes realizados em laboratórios, em escala reduzida, geralmente não são adequados para a reprodução do desempenho de pavimentos, devido ao efeito escala que modifica fatores que afastam o experimento das condições existentes em escala real. Este problema tem sido contornado pela utilização de equipamentos conhecidos como simuladores de tráfego que testam seções em escala real, sob condições controladas em curto período de tempo (CERATTI; OLIVEIRA, 1993).

Segundo NÚÑEZ (1997), pesquisadores de diversos países consideram os ensaios em verdadeira grandeza o elo entre os ensaios de laboratório e os ensaios realizados

em rodovias reais. Enquanto os ensaios de laboratório se afastam das condições de carregamento e das características da estrutura, e os ensaios em rodovias demandam um tempo longo para a obtenção de resultados, os ensaios acelerados reduzem o tempo de experimento, permitem a análise de diversos fenômenos relativos ao tráfego, além de possibilitarem a extrapolação dos resultados (AZAMBUJA, 2004).

O emprego de ensaios acelerados em escala real aperfeiçoa as etapas de acompanhamento de campo de uma pista experimental, tornando o trabalho exeqüível em curto espaço de tempo. Isto pode ser comprovado pelo fato de se dispor de simuladores móveis de tráfego, que possibilitam a realização deste tipo de ensaio nos locais em que se pretende executar uma determinada obra de pavimentação ou de reabilitação, preservando-se as condições de contorno, tais como, clima, subleito, confinamento, drenagem, etc.

Os resultados desse tipo de prática, cujo início se deu na pista de Detroit em 1909 com o equipamento denominado *Paving Determinator*, trouxeram diversos avanços para a engenharia, como a *AASHO Road Test*, conduzida pela *Association of State Highway Officials* (AASHTO) no final da década de 1950, um exemplo histórico dos mais importantes na área de infra-estrutura rodoviária.

O interesse crescente nos simuladores de tráfego remete ao incremento acentuado dos volumes e das cargas de tráfego em rodovias em todo o mundo, a partir da década de 1950, levando a uma demanda por mais investimento, tanto na pavimentação de rodovias e na sua reabilitação quanto na atividade de manutenção, sempre exigindo adaptações dos modelos à nova realidade.

De acordo com METCALF (1996), os principais benefícios que podem ser obtidos com o emprego de ensaios acelerados em escala real são:

- Melhoria nos métodos de dimensionamento;
- Avaliações de estruturas de pavimentos;
- Validação do emprego de um determinado material ou técnica;
- Testes práticos de pavimentos para aplicações especiais;

- Avaliação do efeito de diferentes condições de carregamento;
- Modelos de previsão de vida útil;
- Suporte à pesquisa teórica de pavimentos rodoviários.

De acordo com SAEED & HALL (2003), o emprego de uma padronização para o armazenamento e a publicação dos resultados de pesquisas com ensaios acelerados permite o intercâmbio de informações de distintas pesquisas por pesquisadores e demais partes interessadas.

1.1. Objetivos

O objetivo desta pesquisa é contribuir para futuros ensaios acelerados de pavimentos com emprego de simuladores de tráfego lineares móveis, com base na análise das pesquisas já realizadas e dos resultados já obtidos com este tipo de equipamento no Brasil, elaborando uma proposta de método para ensaios dessa natureza. Para tanto, foram analisados os resultados dos primeiros testes acelerados em pavimentos no Brasil e as suas contribuições para o desenvolvimento das técnicas e procedimentos de projeto, bem como o planejamento de manutenção de pavimentos rodoviários.

Apresenta-se também uma síntese sobre os ensaios acelerados de pavimentos em escala real com simuladores de tráfego lineares móveis, com o objetivo de mostrar o estágio atual do conhecimento nessa área, a partir de uma revisão bibliográfica, associando esses conhecimentos aos casos práticos.

São feitas considerações a cerca das possibilidades de utilização deste tipo de ensaio para a análise de desempenho de um pavimento e são propostas diretrizes e método para a realização de pesquisas com simuladores de tráfego lineares móveis, de forma a coordenar esforços futuros e permitir a comparação e disseminação de resultados no meio rodoviário nacional.

1.2. Estrutura do Trabalho

A proposição de um método para o emprego de simuladores de tráfego lineares móveis no Brasil, para determinar o comportamento e prever os desempenhos de pavimentos asfálticos, está consubstanciada nos seis capítulos desta pesquisa.

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

O Capítulo 2 discorre sobre a importância da realização de ensaios acelerados de pavimentos, contextualizando a sua relação aos possíveis métodos de estudo e caracterização de pavimentos, com enfoque no emprego de simuladores de tráfego em escala real, incluindo-se as experiências internacionais e nacionais relacionadas a este tema.

No Capítulo 3 são apresentados os aspectos relevantes para as pesquisas envolvendo os ensaios acelerados com o emprego de simuladores de tráfego, de forma a subsidiar o desenvolvimento de um método de uso para os simuladores de tráfego lineares móveis.

O Capítulo 4 apresenta os ensaios acelerados realizados com o simulador de tráfego linear móvel em rodovias brasileiras até meados de 2006, de forma a permitir a síntese da atual prática de estudos com este tipo de equipamento no meio técnico nacional. O trabalho se restringe às cinco primeiras pesquisas realizadas com este equipamento, visto que o estudo realizado no segundo semestre de 2006 em pavimento novo da duplicação da rodovia BR-101/SC ainda é incipiente, e o realizado em pavimentos da BR-290/RS ainda não tem os seus resultados finais disponíveis.

No Capítulo 5 são discutidos os principais resultados obtidos nos trabalhos realizados no Brasil com o simulador de tráfego linear móvel, com atenção especial aos benefícios e limitações de cada estudo. Ao final propõe-se um método de uso de

simuladores de tráfego lineares móveis em pesquisas sobre o comportamento e o desempenho de pavimentos asfálticos em pista, de forma a coordenar esforços futuros que permitam a comparação e disseminação dos resultados no meio rodoviário nacional. Também são discutidas, de forma mais ampla, diferentes aplicações para este tipo de equipamento, incluindo-se considerações que levam em conta as experiências observadas em trabalhos anteriores.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões e as considerações finais desta pesquisa.

2. OS 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 seções-teste 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 trechos experimentais 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.

A figura 2.1 ilustra a relação entre os diferentes procedimentos de engenharia empregados atualmente em estudos de pavimentos, levando-se em conta o grau de confiabilidade da informação em relação aos custos relativos envolvidos.

Figura 2.1 – Inter-relação entre custos e benefícios em termos de conhecimento adquirido que as ferramentas de engenharia podem trazer a um estudo na área de pavimentação. Fonte: HUGO & MARTIN (2004).

As simulações com modelos computacionais e o julgamento de engenharia podem levar os pesquisadores e técnicos rodoviários, em pouco tempo e com baixo custo, a resultados extremos, que vão desde uma elevada confiabilidade até uma péssima fidedignidade em pista, visto que se baseiam em modelos pré-estabelecidos que, muitas vezes, não contemplam todas as variáveis presentes em um caso específico e estão muito associados às premissas assumidas nos estudos.

Os ensaios de laboratório e também os ensaios de campo permitem uma análise comparativa de comportamento de determinado parâmetro, mas geralmente não são adequados para a reprodução do desempenho de pavimentos. Em geral, todo ensaio de laboratório tem como etapas críticas na reprodução do desempenho a seleção de amostra, especialmente no que se refere à representatividade em relação ao todo, e as condições de moldagem e de contorno, que podem não ter relação direta com a situação observada em pista.

No laboratório há ainda o efeito de escala que modifica fatores intervenientes e as condições de contorno, o que pode ser solucionado pela utilização de seções-teste em pavimentos reais.

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 pelas fatores ambientais e pela variação de tráfego que ocorre em pistas sob tráfego real.

Nos próximos subitens, descrevem-se os simuladores de tráfego existentes, desde os de pequeno porte, utilizados em laboratório na caracterização de materiais e estudos

de misturas em condições controladas, até os simuladores de tráfego em escala real. Neste ponto, deve-se destacar a maior ênfase dada aos simuladores de tráfego em escala real, atualmente já em operação no Brasil, por ser este o objeto do presente estudo. Para tanto são apresentadas algumas considerações em relação aos métodos de dimensionamento e aos modelos de desempenho de pavimentos.

2.1. Métodos de Dimensionamento e Modelos de Desempenho

O desempenho relativo de um pavimento é a sua capacidade em servir ao tráfego ao longo de um período de tempo. Não existem definições amplamente aceitáveis de desempenho que possam ser usadas na avaliação de pavimentos ou que possam ser consideradas no dimensionamento de pavimentos. Uma das formas de se descrever desempenho é como a apreciação macro do histórico de serventia de um pavimento. Assim, tem-se que o desempenho de um pavimento pode ser descrito a partir da observação da serventia na data em que esse foi construído até o período em que a avaliação é desejada. (CARY; IRICK, 1960).

Os modelos de desempenho são utilizados correntemente em programas de manutenção e gerenciamento de pavimentos, constituindo-se em ferramentas que permitem avaliar com maior precisão as necessidades futuras de uma via e, conseqüentemente, aperfeiçoar a determinação do aporte de recursos para a manutenção (VALE, 2003). Modelos de previsão de desempenho são funções que relacionam as características do pavimento e suas condições atuais (estruturais, funcionais e de degradação superficial) à evolução com o tempo dos defeitos de superfície ou do nível de serventia sob determinadas condições climáticas e de tráfego às quais o pavimento está submetido. Tais modelos são instrumentos tecnológicos essenciais para a análise econômica de rodovias (GONÇALVES, 1999).

Definido o que é desempenho de um pavimento, o maior problema para o engenheiro rodoviário é estimar, de forma satisfatória, a vida útil de um pavimento novo ou do reforço de um pavimento antigo. Este problema ocorre devido à complexidade que envolve um pavimento, exemplificado por fatores tais como: tráfego, utilização de

materiais alternativos na estrutura do pavimento, mudança do tipo de carregamento (modernização dos veículos) durante a vida estimada de projeto, geralmente de dez a trinta anos (SILVA, 2001).

Os modelos de previsão de desempenho têm por finalidade determinar como deverão variar as condições do pavimento de uma via ao longo do tempo, ou seja, a partir do conhecimento das condições atuais estimarem 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, 2003).

Há diversos tipos de modelos de previsão de desempenho de pavimentos que se baseiam em premissas e condições de contorno diferenciadas. Geralmente, os modelos são classificados em conformidade com a sua origem, conforme sejam mecanísticos ou empíricos (VALE, 2003). De acordo com GONÇALVES (1999) podem ser estabelecidas as seguintes definições:

- Modelos empíricos: resultam da observação do desempenho de rodovias em serviço, e são funções de alguns poucos parâmetros ou índices que procuram caracterizar a estrutura do pavimento, o tráfego e o clima. Uma abordagem puramente empírica para a previsão do desempenho de pavimentos é baseada em observações de desempenho sem considerar (satisfazer), teoricamente, as contribuições dos vários fatores.
- Modelos mecanísticos: definem matematicamente os fatores individuais específicos, concluindo acerca do momento preciso e o modo principal de deterioração.

As abordagens empíricas estão restritas às condições para as quais foram desenvolvidas e qualquer extrapolação desses limites podem resultar em interpretações grosseiras. Modelos analíticos e numéricos são geralmente utilizados com problemas específicos, como as respostas de cargas ou temperatura, contudo não é possível a combinação desses modelos para explicar completamente o comportamento de um pavimento. Uma forma de se resolver essas diferenças é a realização de experimentos em escala real, onde seções de pavimentos são

devidamente instrumentadas com o propósito de se obter parâmetros e respostas em pontos críticos da estrutura (GONÇALVES, 1999).

Embora os modelos empíricos sejam de utilização bem mais simples do que os mecanístico-empíricos, estes últimos tendem a ser mais confiáveis, especialmente quando se trata de aplicá-los a condições de clima, tráfego e materiais de construção diferentes ou fora das faixas referentes aos trechos experimentais para os quais foram calibrados. Além disso, os modelos empíricos nada informam sobre a evolução dos defeitos no pavimento ao longo do tempo e, na maioria dos casos, não indicam qual será a condição do pavimento ao final do período de projeto. Estas deficiências não existem, de modo geral, nos modelos mecanístico-empíricos. Tais modelos são constituídos por um modelo teórico que procura explicar ou prever a deterioração da estrutura submetida à repetição das cargas do tráfego. Esses modelos são baseados no comportamento mecânico dos materiais das camadas e da própria estrutura sob a ação das cargas repetidas dos veículos em movimento, e por funções de transferência, que calibram o modelo teórico de modo a que este reproduza o desempenho real de pavimentos em serviço (GONÇALVES, 1999).

De acordo com GONÇALVES (1999), os modelos de previsão de desempenho do tipo mecanístico-empírico consistem essencialmente na associação de três componentes fundamentais:

- Um modelo para o cálculo das respostas da estrutura do pavimento à passagem das cargas do tráfego, respostas estas na forma de tensões, deformações e deflexões na estrutura;
- Uma teoria que associe as respostas calculadas à geração e progressão de defeitos, tais como as trincas de fadiga nas camadas asfálticas e cimentadas e as deformações plásticas por acúmulo de deformações permanentes nas camadas do pavimento;
- Uma calibração experimental, para incluir os efeitos de fatores que não puderam ser tratados de forma adequada ou explícita pelo modelo teórico, na qual se incluem principalmente as variáveis ambientais (clima, drenagem) e características específicas do tráfego.

Este autor aponta ainda as seguintes etapas como necessárias para a formulação de um procedimento mecanístico-empírico de projeto:

- A. Determinação da temperatura do concreto asfáltico e estabelecimento de um procedimento para a correção da temperatura (método de correção da temperatura).
- B. Estabelecimento da relação existente entre o módulo de resiliência do concreto asfáltico com a temperatura do revestimento.
- C. Relacionar a deformação (de tração) com a espessura e com os módulos dos materiais das camadas.
- D. Relacionar a deformação com o número de repetições de carga para ruptura.
- E. Uso da lei de Miner para obter o efeito acumulado da deterioração provocada pelas cargas do tráfego ao longo da vida de serviço do pavimento. Em se tratando de pavimentos flexíveis em concreto asfáltico, sua deterioração se dá de forma gradual ao longo do tempo devido a dois mecanismos diretamente associados à passagem repetida das cargas do tráfego, ou seja: o trincamento por fadiga das camadas asfálticas e os afundamentos em trilha de roda decorrente do acúmulo de deformações plásticas em todas as camadas da estrutura.

O guia da AASHTO (1993) descreve os benefícios de se utilizar procedimentos do tipo mecanístico-empírico para o projeto de pavimentos. Dentre eles, destaca-se uma melhor confiabilidade para o projeto, a partir da possibilidade de se prever tipos específicos de defeitos como trincamento por fadiga ou a presença de afundamentos em trilha de roda (GONÇALVES, 1999).

Um dos maiores esforços realizados para a obtenção de modelos de previsão de desempenho de pavimentos foi a AASHO *Road Test*, conduzido durante dois anos nas proximidades de Ottawa, *Illinois*, e concluído em 1961 (VALE, 2003). Esta pesquisa foi realizada para determinar o desempenho da estrutura sob um tráfego específico. Para atingir esse objetivo, uma adequada e não-ambígua definição de desempenho foi necessária. A equipe da AASHO *Road Test* estudou diversas técnicas alternativas para a determinação do índice de desempenho, a partir dos

dados históricos de serventia ao longo do tempo. Escolheu-se a ordenação dos dados históricos de serventia por sua simplicidade e facilidade, bem como pela fácil compreensão por todos os interessados (CARY; IRICK, 1960). Destaque-se que o estabelecimento do conceito de serventia do pavimento desenvolvido por CAREY e IRICK (1960) dá importância às avaliações de parâmetros relacionadas aos usuários de rodovias, ou seja, a avaliação está vinculada fundamentalmente à função global do pavimento – o quanto ele serve ao tráfego ou aos passageiros (GEIPOT, 1982b).

Estes primeiros estudos estavam direcionados, fundamentalmente, para o dimensionamento de estruturas de pavimento, tanto rígidas quanto flexíveis, sendo a maior parte realizada pelo USACE (*United States Corp of Engineers*), com os resultados relatados por Ahlvin entre 1940 e 1980. Grande parte dos estudos do USACE foi conduzida no *Waterways Experiment Station* (USAE-WES) de 1941 a 1956. Dentre as contribuições deste estudo estão o método de dimensionamento de pavimentos baseado no CBR (*California Bearing Ratio*), incluindo a sua utilização em aeroportos bem como a introdução do conceito de repetição de cargas no dimensionamento. De forma similar foram introduzidos os conceitos do método Marshall para a dosagem de misturas asfálticas a partir de pesquisas de 1944, após cinco anos de estudos.

Estudos similares também foram conduzidos em outras partes do mundo como, por exemplo, no Reino Unido, que na década de 1960 contava com aproximadamente 400 seções-teste em operação em sua malha rodoviária principal, resultando em um método de dimensionamento de pavimentos (METCALF, 1996).

De 1958 a 1960 a AASHO *Road Test* estabeleceu a relação entre os parâmetros de dimensionamento de pavimento, as cargas de roda e o número de repetições de cargas que, embora fossem resultados específicos da seção-teste, mostraram-se amplamente aplicáveis. Os resultados foram de grande valia, especialmente ao estabelecer o conceito de serventia como parâmetro prático e efetivo para representar o desempenho de um pavimento e o de número de operações equivalentes (número “N”) para representar o tráfego.

Como resultado tem-se um modelo empírico apresentado no Manual da AASHTO amplamente utilizado, que determina o desempenho de um pavimento através de informações relativas à robustez da estrutura, determina o tráfego equivalente solicitante e determina dados referentes à condição geral de drenagem e ao grau de confiabilidade desejado.

O método da AASHTO, concebido a partir de dados dos experimentos da AASHO *Road Test*, sofreu ajustes e modificações ao longo dos anos num esforço para melhorar e expandir os limites de validade dos modelos (HRB, 1962; AASHTO, 1972, 1986, 1993), sendo a última versão de 1993. Na última década vêm sendo realizados estudos na tentativa de se conseguir uma migração do método de dimensionamento para um procedimento mecanístico-empírico denominado NCHRP 1-37A (CARVALHO, 2006).

Muitos dos conceitos, das conclusões e das análises de pesquisas do período de 1940 e 1960, ainda são utilizados até hoje nos projetos de pavimentos rodoviários. Cita-se, por exemplo, o Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis do DNER desenvolvido e publicado pelo engenheiro Murillo Lopes de Souza em 1979, ainda empregado amplamente em dimensionamentos de pavimentos novos em todo o país, publicado no Manual de Pavimentação do DNER (1996).

Dentre os modelos empíricos amplamente aplicados no Brasil, destacam-se os obtidos na Pesquisa de Inter-relacionamento de Custos Rodoviários (PICR), 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 (VALE, 2003).

Os esforços da PICR se concentraram na obtenção de informações, coleta de dados e experimentos, orientados no sentido de determinar os custos de manutenção das rodovias e os custos de operação de veículos em trechos selecionados da malha rodoviária. As tarefas mais complexas consistiam em identificar e quantificar os

custos de manutenção e utilização de rodovias, objetivando correlacionar os dispêndios de manutenção com a qualidade de rolamento da rodovia, bem como os custos de operação dos veículos com as características da rodovia tais como geometria e qualidade de rolamento (GEIPOT, 1982a).

Quanto às rotas usadas pelos veículos cujos dados de custo se coletavam, procedeu-se ao levantamento das seguintes características: tipo da superfície de rolamento; irregularidade da superfície; geometria vertical; geometria horizontal; largura da pista de rolamento; uso do solo na região e tráfego. Para avaliar o efeito da manutenção sobre a rodovia, os trechos de teste selecionados foram divididos em dois sub-trechos: um deles era mantido sem manutenção, e no outro era aplicada a manutenção de rotina praticada pela autoridade rodoviária. Em locais selecionados, em rodovias bastante deterioradas, foram construídos trechos experimentais onde foram aplicadas técnicas diferentes de manutenção, as quais variavam desde a aplicação de lama asfáltica fina até espessuras variáveis de concreto asfáltico (40 a 120 mm). Nos trechos de teste selecionados foram feitos poços de sondagem para a retirada dos materiais constituintes das diversas camadas do pavimento e para a determinação do CBR *in situ*. O material retirado desses poços foi posteriormente ensaiado em laboratório de solos para a determinação de suas características físicas, tais como granulometria, limites de Atterberg e CBR. Procedeu-se também à retirada de corpos-de-prova do material da superfície de rolamento, bem como de amostras indeformadas do subleito com o uso de tubos *Shelby* (GEIPOT, 1982a).

Além da caracterização das estruturas dos pavimentos desses trechos, foram também colhidas informações sobre clima, tráfego, sua composição e peso. Procedeu-se também o levantamento sistemático da condição dos pavimentos através da medição dos defeitos encontrados, áreas de trincas, panelas e remendos; medição da deflexão, com uso da viga Benkelman; e ainda medição da irregularidade da superfície de rolamento com equipamento tipo-resposta *maysmeter* (GEIPOT, 1982a).

Na pesquisa PICR, observou-se que a condição da superfície do pavimento representada por sua irregularidade é o fator que mais influencia nos custos dos

usuários da rodovia. Assim, é importante prever a evolução da irregularidade do pavimento de forma que os custos dos usuários possam ser avaliados em relação a cada alternativa. A manutenção é executada principalmente como resposta à irregularidade, trincas e trilhas excessivas do pavimento. As trilhas estão relacionadas com a irregularidade, e por acarretarem riscos para os veículos, especialmente em épocas chuvosas, os órgãos rodoviários têm estabelecido níveis críticos de evolução. As trincas dos pavimentos constituem um risco para o capital investido; se não forem controladas adequadamente, poderá se tornar necessária a reconstrução do pavimento, em lugar da operação rotineira de manutenção. Portanto, o volume e conseqüentemente, o custo da manutenção adequada dependerão da evolução potencial da irregularidade, trincas e trilhas do pavimento. Por outro lado, essa evolução potencial das características dos pavimentos depende da estrutura do pavimento, que, por sua vez, está relacionada aos custos de construção. Assim, os modelos de previsão do desempenho de pavimentos constituem instrumentos essenciais para a análise econômica de rodovias (GEIPOT, 1982b).

Os modelos do HDM (*Highway Design and Maintenance Model*) também são amplamente utilizados pelos engenheiros rodoviários brasileiros e estrangeiros, tanto pela sua aplicabilidade na previsão de desempenho de pavimentos quanto pela exigência, por parte de agentes financiadores tais como o Banco Mundial, da realização de análise de viabilidade de investimentos em infra-estrutura empregando este modelo. O HDM iniciou-se em 1969, em países da África, Ásia, Caribe e América Latina, objetivando a qualificação empírica 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 (VALE, 2003).

Têm-se como resultado final modelos de previsão de desempenho de pavimentos que correlacionam o padrão de construção, o padrão e o tipo de manutenção aplicável ao longo do tempo, e os custos dos usuários (VALE, 2003). Neste ponto vale destacar que parte considerável dos modelos do HDM, especificamente em sua versão três, e

no que se refere aos modelos de desempenho de pavimentos flexíveis na versão quatro, deriva dos dados experimentais e de estudos da PICR realizados no Brasil. Tais modelos foram estruturados com base em conceitos mecânicos do comportamento do pavimento e quantificados estatisticamente a partir de dados de monitoramento de um banco de dados, baseados nos estudos realizados em diversos países (PATERSON, 1987).

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).

Como exemplificado, os trechos experimentais podem ser usados para investigar alguns destes aspectos e obter modelos de desempenho. Entretanto, apresentam como desvantagem o longo tempo necessário para se obter os dados, além da pouca possibilidade de controlar a variabilidade dos parâmetros tais como frequência de carregamento, propriedades dos materiais e o clima que também afetam o desempenho do pavimento. Devido a estas circunstâncias, recorre-se às pistas experimentais e aos simuladores de tráfego para se estudar os pavimentos em tempo compatível com a resposta desejada (SILVA, 2001).

2.2. Simuladores de tráfego de pequeno porte

Observa-se no subitem anterior que um dos maiores problemas para os engenheiros rodoviários é estimar de forma satisfatória a vida útil da construção, tanto de pavimentos novos quanto de pavimentos restaurados. Em geral são realizados testes em laboratórios, em escala reduzida (FRITZEN, 2005b).

Os ensaios de laboratório permitem avaliar os materiais que irão compor a estrutura do pavimento, nas condições de campo. Os ensaios de laboratório são importantes no

auxílio ao projeto, na dosagem de materiais de pavimentação e na previsão de comportamento de revestimentos asfálticos, mas implica na adoção de fatores campo-laboratório, bastante elevados para a obtenção dos resultados na previsão de desempenho. Os ensaios de laboratório para misturas asfálticas ainda são os principais mecanismos de dosagem, projeto e controle tecnológico. Certamente estes ensaios de laboratório são aproximações do que ocorre no campo, contudo são a alternativa mais viável e econômica para o suporte aos projetos e obras de pavimentação (FRITZEN, 2005a).

Alguns dos métodos de projeto atualmente em uso, como o do Instituto do Asfalto e o da Shell, estabelecem critérios de falha, como por exemplo, a limitação de afundamentos em trilha de roda a valores admissíveis em torno de 13mm ou estabelecendo um número admissível de repetições de carga para se atingir um determinado nível de deformação de tração, definida com base em ensaios de fadiga realizados em laboratório e/ou calibração efetuada a partir de dados de desempenho obtidos no campo (GONÇALVES, 1999).

Os simuladores de tráfego de pequeno porte, utilizados em laboratório, desempenham papel complementar aos ensaios convencionais de laboratório tanto para a dosagem das misturas asfálticas quanto para o estabelecimento de limites aceitáveis de deformações. Em tais equipamentos podem ser simuladas, em poucas horas, de forma acelerada e sob condição de contorno controlada, o comportamento de uma mistura asfáltica.

Estes ensaios acelerados em laboratório, para estudo do fenômeno da deformação permanente, simulam condições severas para obtenção de resultados de forma acelerada e os resultados obtidos podem prover um critério de seleção de dosagem de misturas sob este aspecto. Geralmente, estes simuladores são instalados em laboratórios e apresentam algumas limitações quanto as suas condições de simulação (FRITZEN, 2005b). Alguns exemplos de simuladores de pequeno porte são:

- Holanda – Shell (*Rolling Wheel Machine*): é uma pista circular de 3m de diâmetro, as seções de pavimentos são entre dois muros de concreto, as vigas

possuem rodas nas extremidades, a carga se dá entre 1kN e 20kN e sua velocidade é de 20km/h;

- Portugal – LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Lisboa): é um equipamento para teste de revestimentos asfálticos em flexão dinâmica, sob ação de cargas rolantes repetidas;
- França – *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* - LCPC (*Wheel-Tracking Rutting Test*): é um equipamento utilizado para estudar afundamento de trilha de roda;
- Departamento Transportes da Geórgia – APA (Analisador de Pavimento Asfáltico): criado em 1985 é um equipamento que pode ser usado para avaliar a deformação permanente, trincamento por fadiga e a suscetibilidade à umidade.

Há ainda simuladores de pista de escala reduzida, embora ainda não empregados em rodovias brasileiras, como o *Model Mobile Loading Simulator* (MMLS3). De acordo com LEE & KIM (2008), este equipamento linear pode ser posicionado em seções-teste e aplicar em média 5.500 ciclos unidirecionais de cargas, equivalentes a aproximadamente um terço das produzidas por um eixo padrão (equivalente a uma frequência de 3,3 Hz). As rodas empregadas são de 300mm de diâmetro e sua carga é de 364 kg, em uma área de contato de aproximadamente 3.400mm².

Existem no Brasil dois modelos de simuladores de laboratório para misturas asfálticas: LCPC (*Wheel-Tracking Rutting Test*), instalado na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e APA (Analisador de Pavimento Asfáltico), instalado atualmente no laboratório da Petrobrás Distribuidora, na cidade de Diadema, em São Paulo. Recentemente, a Universidade Federal do Ceará desenvolveu um equipamento com os mesmos princípios de funcionamento e as mesmas finalidades do simulador de laboratório francês, do tipo LCPC. Há também os simuladores de deformação para as camadas delgadas a frio, como o *Multilayer Wheel Test* e, opcionalmente, o *Loaded Wheel Test*. Estes equipamentos encontram-se descritos a seguir.

Simulador de Laboratório Francês LCPC

O simulador de laboratório de pequeno porte conhecido como LCPC foi desenvolvido entre 1968 e 1970 com a finalidade de estudar o afundamento de trilha de roda na fase de dosagem das misturas asfálticas (FRITZEN, 2005b).

Conforme MERIGHI (1995), o simulador de tráfego LCPC consiste basicamente de um conjunto composto por dois equipamentos mecânicos, acionados por dispositivos hidráulicos e pneumáticos. Um conjunto de equipamentos é destinado a simular o tráfego através da repetição de carga aplicada por uma roda submetida a um esforço vertical, sendo que o seu movimento longitudinal se dá sobre o corpo-de-prova.

O simulador de tráfego do tipo LCPC é apresentado na figura 2.2

Figura 2.2 – Mesa compactadora tipo LCPC (à esquerda) e Simulador de tráfego tipo LCPC (à direita)

A avaliação da medida dos afundamentos de trilha de roda em misturas de concreto asfáltico, submetidas ao simulador de tráfego LCPC, fundamenta-se na experiência francesa que relacionou medidas de laboratório a resultados de pista ao longo dos anos. O critério utilizado é o que especifica a porcentagem máxima de afundamento em trilha de roda de 5% ou 10% em relação à espessura da amostra ensaiada para 30.000 ciclos, dependendo do tráfego da via, para misturas de concreto asfáltico adequadas à camada de rolamento (FRITZEN, 2005b).

Analizador de Pavimento Asfáltico (APA)

O APA surgiu em 1985, no Departamento de Transporte da Geórgia, com o objetivo de desenvolver um método simplificado de ensaios em um simulador de pequeno porte, para a previsão de características de deformação plástica de misturas asfálticas (FRITZEN, 2005b).

O tempo de teste para uma avaliação completa de deformação permanente é de duas horas e quinze minutos para um total de 8.000 ciclos. A suscetibilidade à deformação permanente é estimada colocando-se as amostras retangulares ou cilíndricas sob cargas de roda metálicas que se apóiam em mangueiras de borrachas com seção transversal circular padronizada. São obtidas medidas automáticas da profundidade da trilha de roda sob a passagem da roda (FRITZEN, 2005b; SÁ, 2003).

O APA é mostrado na Figura 2.3, tanto com o emprego de mangueiras de borracha quanto operando com rodas de alumínio retas.

Figura 2.3 – Simulador do tipo APA - Analisador de Pavimento Asfáltico. Fonte: FRITZEN (2005b).

Os testes de deformação permanente são conduzidos à temperatura controlada de 30 a 70°C. Durante o ensaio pode-se simular uma pressão de pneus superior a 827kPa. A medida da profundidade da trilha de roda pode ser efetuada por um sistema de medição automática. Para determinar a resistência à fadiga, a mangueira de borracha usada no teste de deformação permanente é substituída por uma roda de aço (FRITZEN, 2005b).

Contudo, deve-se observar que não há limites estabelecidos para os afundamentos já correlacionados com o desempenho das misturas asfálticas em campo. Assim, até o momento, o emprego deste equipamento tem o enfoque comparativo entre distintos materiais.

Loaded Wheel Test – LWT

Para a verificação do desempenho de uma das misturas de microrrevestimento asfáltico, emprega-se uma simulação do desempenho com o *Multilayer Wheel Test* (ISSA-TB147B). Este ensaio, *Loaded Wheel Test* (LWT), é utilizado para estudos comparativos de amostras asfálticas em múltiplas camadas. Amostras de microrrevestimento com agregados de 0 a 5mm (ou 0 a 8mm) são moldadas em trilhas de 13 ou 19mm de espessura, 50mm de largura e 380 mm de comprimento. Estas amostras são curadas por 24 horas e secas a 60°C por 18 a 20 horas. Segue-se o resfriamento à temperatura ambiente por duas horas. Finalmente as amostras são medidas com paquímetro e então são submetidas a 1000 ciclos de 57 kg de carga à temperatura de 21°C. Ao final do ensaio são determinadas as variações nas dimensões da amostra, a trilha de roda formada, o deslocamento lateral e a densidade compactada.

Esse ensaio é útil na determinação da espessura máxima de microrrevestimento para o preenchimento de trilha de roda e para a determinação do “coroamento” a ser aplicado, de forma a contemplar a compactação inicial feita pelo tráfego. Misturas aceitáveis atingem valores estáveis de peso específico, ou seja, não sofrem alteração em seu peso específico ao final do ciclo de cargas, ao passo que as inaceitáveis não apresentam tal estabilidade. O valor recomendado para o peso específico compactado é de 2,1kg/cm² (VALE, 2003).

Outra opção é a elaboração de gráfico do peso específico pelo número de ciclos no ensaio LWT (ISSA-TB 109), ilustrado na figura 2.4, realizado usualmente para determinar o teor máximo de resíduo asfáltico da mistura, seja de microrrevestimento ou de lama asfáltica, a fim de que não ocorra a exsudação do ligante.

Figura 2.4 – Ensaio LWT. Fonte: VALE (2003).

Nestes ensaios, embora o deslocamento vertical seja limitado entre 10 e 12% e o lateral em 5% por alguns órgãos viários, há dificuldade em alguns casos em se atender às especificações, sendo verificada a compactação vertical dos corpos-de-prova (trilhas de roda) (VALE, 2003).

2.3. Simuladores de tráfego em escala real

2.3.1. 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 de 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 construída 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 Fatigue*.
- 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 seções-teste 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. Conseqüentemente, para utilizar inteiramente os benefícios de APT, há a necessidade de uma metodologia que associe os seus resultados aos de uma rodovia em serviço.

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. A figura 2.5 ilustra esta situação, observando a evolução do tráfego de projeto, os tipos de materiais empregados correntemente em obras de pavimentação e o número de seções experimentais sob tráfego acelerado, entre as décadas de 1960 e 1980.

Figura 2.5 – Evolução das pesquisas com ensaios acelerados associadas ao tipo de material empregado em pavimentos novos e ao tráfego de projeto entre as décadas de 1950 e 1980. Fonte: HUGO & MARTIN (2004).

A seguir relatam-se as principais experiências internacionais no emprego de ensaios acelerados de pavimentos com o emprego de simuladores de tráfego, bem como os equipamentos disponíveis no Brasil e os estudos já realizados no país.

2.3.2. Experiências Internacionais

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).

Minnesota Road Program (Mn/Road)

O *Minnesota Road Program* (Mn/Road) teve início em 1991, quando o Departamento de Transportes e a Universidade de Minnesota começaram a construir uma pista experimental localizada em Otsego, Minnesota. O programa possui duas pistas para testes ilustradas na figura 2.6. Uma rodovia com aproximadamente 5 km

de extensão, um *by-pass* de uma rodovia interestadual, para pesquisa com elevado volume de tráfego e uma outra rodovia com 4 km, em circuito fechado, dedicada ao estudo de pavimentos submetidos a baixo volume de tráfego (TOMPKINS; KHAZANOVICH; JOHNSON, 2008).

Figura 2.6 – Ilustração das pistas-teste do *Minnesota Road Program*.

Este experimento já havia produzido mais de cinquenta entrevistas, trezentos artigos técnicos e um número ainda maior de dados e relatórios não publicados até o ano de 2007, contribuindo para o aprimoramento técnico em diversas áreas e níveis. Enquanto os veículos passam sobre as 40 seções-teste, os dados são enviados imediatamente para o sistema computacional que os transmitem diariamente para o Laboratório de Engenharia e Pesquisa de Materiais do Departamento de Transportes de Minnesota. A instrumentação realizada por mais de 4500 sensores mostra como o pavimento responde a diferentes tipos de cargas impostas pelos caminhões, faz o monitoramento das propriedades dos materiais quando sujeitos às condições ambientais reais e serve para aperfeiçoar o projeto e a previsão do desempenho (TOMPKINS; KHAZANOVICH; JOHNSON, 2008).

Ohio SHRP Test Pavement

O Estado de Ohio, em parceria com o FHWA, também está estudando o desempenho de pavimentos submetidos ao tráfego real, através do programa conhecido por *Ohio*

SHRP Test Pavement, que começou em 1994 e deverá terminar em 2014. O projeto está localizado a 65 km ao norte de Columbus, na rodovia US23. O programa envolve a criação, construção e monitoramento de 5,31km de pavimento instrumentado, composto de trinta e oito seções experimentais, trinta e três das quais com mais de três mil sensores, cujas funções são avaliar os efeitos dos gradientes de temperatura e umidade nos pavimentos e medir as respostas estruturais sob carregamento dinâmico (SILVA, 2001).

National Center for Asphalt Technology (NCAT)

Existe também uma pista experimental, construída próxima ao campus da universidade de Auburn, cujo objetivo é estudar e compreender o comportamento dos pavimentos flexíveis. Controlada pelo *National Center for Asphalt Technology* (NCAT), a pista, com 2,8km de extensão, é financiada por agentes externos, em geral Departamentos Estaduais, e operada pela NCAT. Nesta pista, ilustrada na figura 2.7, existem 46 seções-teste, cada uma com sessenta sensores instalados. A operação de tráfego em cada seção é realizada em ciclos de dois anos no qual são aplicadas 10^7 operações equivalentes ao eixo padrão rodoviário, documentando-se semanalmente os parâmetros de desempenho do pavimento (POWELL, 2008).

Figura 2.7 – Pista-teste do *National Center for Asphalt Technology*

WesTrack

A pista experimental *WesTrack* construída em Nevada, Estados Unidos, através de um convênio do FHWA com mais sete organizações, tinha dois objetivos principais

que eram: continuar o desenvolvimento das especificações relativas ao desempenho de misturas asfálticas a quente e permitir a rápida verificação em campo dos procedimentos de projeto de misturas baseados no método *Superior Performance Asphalt Pavements* (Superpave), que é um produto do programa SHRP. Estes objetivos foram atingidos pela construção, carregamento, monitoramento e evolução do desempenho de 34 seções ao longo de três quilômetros (EPPS *et al.*, 1998).

A pista é formada por duas seções em tangente e duas curvas em espiral. Todas as seções experimentais, num total de 34 seções foram construídas sobre os trechos em tangente. As seções em tangente tinham 10,4m de largura com duas faixas de 3,7m e 1,2m de faixa de segurança com CBUQ ou 1,8 m de acostamento com cascalho. Cada seção experimental possuía 70m de comprimento; 25 m para transição, 40m para monitorar o desempenho e 5m para extrair as amostras. Foram aplicados 5,5 milhões de operações do eixo simples de roda dupla para simular o carregamento equivalente a dez a vinte anos de tráfego no pavimento. Para tanto, durante dois anos, foram foram quatro caminhões não tripulados que trafegavam em média 15 horas por dia a uma velocidade de 65km/h. A bordo de cada caminhão estavam dois computadores: um controlava a velocidade enquanto o outro constantemente procurava por erros de controle. As informações são acumuladas por seis computadores numa sala de controle. Destes computadores, um servia de gerenciador de tráfego. Um segundo checava se este gerenciamento estava sendo corretamente executado. Os outros quatro eram destinados a atender a cada caminhão individualmente, monitorando ininterruptamente o sistema de controle mecânico dos caminhões, evitando falhas que poderiam prejudicar a operação dos caminhões. O sistema foi projetado para resistir à falhas sem perder o controle dos caminhões, isto é, direção, frenagem, transmissão e aceleração (SILVA, 2001).

Na figura 2.8 ilustram-se as seções-teste do WesTrack.

Figura 2.8 – Esquema das seções-teste do WesTrack e foto da pista com veículos em operação.

Os dados de desempenho do pavimento coletados foram: inspeção visual dos defeitos, perfil da superfície transversal, medidas de deflexão longitudinal e atrito da superfície. A construção da pista foi completada em outubro de 1995. O carregamento e monitoramento do desempenho começaram em março de 1996 e foi até o final de 1997. A análise dos dados para a pesquisa e o desenvolvimento de produtos necessitou de aproximadamente um ano após o final do carregamento, tendo sido concluída no final de 1998 (EPPS *et al.*, 1998).

Manège de Fatigue do LCPC

Na França, o *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) possui desde 1984 uma estrutura do tipo carrossel que solicita pistas circulares de grandes dimensões: tem 6m de largura e 120m de comprimento. Geralmente são testadas quatro seções em forma de arco de círculo, cada uma com 30m de extensão. Três pistas estão disponíveis no local e o carrossel de carregamento pode ir de uma pista para outra em curto espaço de tempo. O carrossel é constituído de quatro braços com raio de 20m de comprimento; a velocidade máxima é de 100km/h, sendo que usualmente tem-se adotado a velocidade de 70km/h. Utiliza-se semi-eixo simples ou tandem com rodas simples ou duplas. A carga do semi-eixo simples pode variar de 50 a 70kN e de 80 a 140kN para semi-eixo tandem. Cada braço pode usar um raio diferente e deslocar-se também transversalmente durante a operação do carrossel. As estruturas dos pavimentos das pistas são instrumentadas e programas computacionais fazem à aquisição e o processamento dos dados. O sistema pode operar sob supervisão automática praticamente 24 horas por dia. Mensalmente, um milhão de aplicações de cargas podem ser realizadas no pavimento. O custo estimado do equipamento era de 6 milhões de dólares em 1996. O carrossel LCPC, ilustrado na figura 2.9, já foi usado para três finalidades principais: validar métodos de ensaios e de especificações de materiais, para comparar estruturas de pavimentos inovadoras com uma estrutura convencional e estudar materiais novos para pavimentação. O fato de quatro seções serem testadas simultaneamente sob as mesmas condições de clima, facilita a comparação do desempenho de diversas estruturas do pavimento. Outro aspecto importante é que cada braço do carrossel pode usar um raio diferente permitindo a comparação de diferentes configurações de roda ou eixo sobre o desempenho do pavimento. A possibilidade dos braços girarem com alta velocidade (70km/h) permite reproduzir o equilíbrio entre fadiga e deformação permanente que ocorre em pavimentos reais, o que não acontece com simuladores de tráfego lineares (SILVA, 2001).

Figura 2.9 – Foto ilustrativa do *Manège de Fadigue* do LCPC e detalhe do trem-de-prova.

SILVA (2001) cita ainda alguns experimentos típicos realizados com o simulador do LCPC desde 1984:

- Comparação de duas estratégias de manutenção sobre um pavimento flexível. Neste caso, sobre um pavimento flexível já deteriorado fez-se um reforço de

80mm de concreto asfáltico e outro reforço em duas etapas de 40mm cada, sendo que os 40mm da segunda etapa foram colocados quando os 40mm de reforço inicial já estava bastante trincado. As duas estratégias apresentaram desempenho final equivalente;

- Uma série de experimentos para validar os ensaios de fadiga em misturas betuminosas;
- Experimentos sobre deformação permanente, pavimentos de concreto, pavimentos com base tratada com cimento e o experimento internacional denominado *First OCDE Research Common Experiment* (FORCE), financiado pelos países membros da Organização de Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), sendo que um dos propósitos da pesquisa foi estudar o aumento da carga de eixo padrão para pavimentos flexíveis e semi-rígidos.

Entre 2001 e 2004, os principais desenvolvimentos realizados no LCPC incluem a análise dos efeitos das cargas pesadas (aviões de grande porte) sobre os pavimentos aeroportuários e a melhoria dos métodos de dimensionamento de pavimentos rodoviários para baixo tráfego, considerando-se materiais alternativos sem utilização de materiais cimentantes (LCPC, 2007).

No estudo para desenvolvimento de pavimentos para baixo tráfego foi desenvolvido um modelo de comportamento não linear para camadas granulares. As simulações realizadas a partir deste módulo permitem validar o protocolo de ensaios triaxiais com cargas repetidas. A implantação dos modelos de comportamento num método de cálculo de afundamentos plásticos está em curso com o *Manège de Fadigue* sobre quatro estruturas de pavimentos de bases não tratadas e uma estrutura betuminosa de referência, todos em condições hídricas controladas (LCPC, 2007).

Neste ponto é importante o novo recurso implementado na *Manège de Fadigue* no ano de 2001, em que se implantou um sistema de isolamento total da pista com duas paredes circulares concêntricas de concreto armado de 300mm e raios de 12,1 e 23,0m, respectivamente, além de fundação em concreto cimento Portland a 3,30m de

profundidade. Com esta estrutura isolando a pista circular do entorno e com um sistema que permite impor água (e também drenar) ao pavimento da pista circular, tem-se o controle total da condição hídrica na infra-estrutura durante o ensaio acelerado (BALAY, 2002), como pode ser observado na figura 2.10.

Figura 2.10 – Adaptação realizada nas instalações do LCPC para ensaios com o *Manège de Fatigue* com controle das condições de umidade.

Outra pesquisa que merece destaque é a que faz a avaliação do comportamento do lastro de vias férreas para trens de grande velocidade, realizada em resposta ao grande crescimento deste tipo de transporte na França. O LCPC conduziu investigações em parceria com o gestor da rede ferroviária, empregando ensaios específicos, em escala reduzida e em escala real, para a verificação de resistência ao adensamento. A modelagem global da infra-estrutura da vias, incluindo os aspectos dinâmicos no comportamento dos diferentes materiais de pavimentação de uma via férrea, está em curso.

Simulador FABAC do LCPC

O LCPC desenvolveu entre 1995 e 1999 simuladores lineares de tráfego pesado denominados FABAC (*Fatigue du béton armé continu*), ilustrado na figura 2.11. Hoje se dispõe de dois equipamentos, cada um com 11,2m de comprimento total e 2,5m de largura. Seu peso bruto é de 173kN, sendo que em cada um dos quatro semi-eixos, movimentados por esteira acionada por um motor de 50kVA, se pode aplicar cargas de 30 a 75kN em uma seção-teste de 2,0m a velocidades de 0,5 a 7,0km/h. Isto implica em 50 carregamentos por minuto em um único sentido de tráfego sem dispersão lateral (recurso não disponível neste equipamento que necessariamente aplica o tráfego de forma canalizada). Há ainda a possibilidade de se acoplar um equipamento complementar para o aquecimento (até um máximo de 70°C) e controle da temperatura na seção-teste (LCPC, 2008).

Figura 2.11 – Simulador FABAC do LCPC.

Em contrapartida aos grandes simuladores de tráfego, como *Manège de Fadigue*, os simuladores FABAC oferecem vantagens que permitem reduzir os custos de uma pesquisa como menores dimensões das pistas experimentais, mobilidade e frequência elevada de aplicação de cargas (LCPC, 2008).

Hoje há um campo específico de 2.800m² reservado para as experiências com este equipamento no LCPC de Bouguenais e, como estes simuladores respeitam o gabarito rodoviário, podem ser embarcados e transportados para pistas experimentais externas (LCPC, 2008).

Os temas tratados nas experiências recentes e em andamento com os simuladores FABAC, de acordo com LCPC (2008), são listados a seguir, sendo importante observar que durante os ensaios acelerados para se estudar o comportamento dos pavimentos se empregou instrumentação, definida em função da natureza e objetivo de cada pesquisa:

- Deterioração por fadiga e dimensionamento de estruturas;
- Afundamento plástico das camadas betuminosas;
- Durabilidade de revestimentos asfálticos pré-envolvidos;
- Durabilidade de camadas de superfície em agregado fino sobre camada betuminosa deteriorada;
- Desenvolvimento de instrumentações específicas e testes de viabilidade (prévios à realização de experiência com a *Manège de Fatigue* do LCPC);
- Comportamento das camadas de conservação betuminosa empregadas sobre fissuras de estruturas hidráulicas danificadas (preliminar a uma experiência com a *Manège de Fatigue* do LCPC);
- Desenvolvimento de misturas asfálticas de elevado desempenho.

Como consideração adicional, pode-se salientar que a operação simultânea dos dois simuladores FABAC facilita a análise e interpretação de resultados em estudos comparativos, por permitirem a simulação de seções aos pares, sob condições climáticas e ambientais idênticas.

Simulador de Tráfego do CEDEX

Em 1987, foi construído o simulador de tráfego do CEDEX, localizado em Madrid. O simulador percorre uma pista oval composta de dois segmentos em tangente com 75m de comprimento, unidos por dois segmentos circulares, como apresentado na figura 2.12. Podem-se ensaiar simultaneamente até seis seções de 25m de comprimento, 8m de largura e 2,6m de profundidade cada. A simulação do tráfego é feita com semi-eixo de rodas simples ou duplas com carga variável entre 55 e 75kN (110 a 150kN por eixo), velocidade máxima de 60km/h e variação transversal programada das passadas (largura máxima de circulação de 1,3m). Com relação às aplicações da pista do CEDEX destacam-se a comparação da capacidade de suporte e vida de serviço de diferentes seções experimentais, estudos de tratamentos superficiais, a medida das respostas em tensões e deformações dos diferentes revestimentos da pista e a verificação de modelos teóricos de resposta dos pavimentos (SILVA, 2001).

Figura 2.12 – Pista de ensaios em escala real e veículo simulador de tráfego pesado do CEDEX

Accelerated Loading Facility (ALF)

O equipamento norte-americano conhecido como *Accelerated Loading Facility* (ALF), na verdade tem origem na Austrália, embora tenha se tornado conhecido mundialmente a partir de sua utilização nos EUA. Este simulador, ilustrado na figura 2.13, utiliza uma estrutura metálica de suporte. A carga é proporcionada por um

lastro, e varia de 40 a 80kN em incrementos de 10kN. O rodado duplo é acelerado a uma velocidade de 20km/h através de rolagem sob a ação da gravidade sobre uma rampa e atua sobre uma seção-teste de 12m de comprimento. A desaceleração ocorre quando o conjunto de rodas alcança uma segunda rampa. Os pneus retornam à posição original rolando sobre uma placa metálica colocada na face inferior da viga de suporte superior, o que permite que continue girando na mesma direção durante todo o ciclo. Nesta fase de retorno, ocorre a ação de um motor elétrico até o final da subida na primeira rampa. A variação transversal da aplicação de carga é assegurada pelo deslocamento de todo o equipamento nesta direção. Este equipamento pode ser transformado para teste *in situ*, embora atualmente ele atue em local fixo, nas instalações do *Federal Highway Administration Turner-Fairbanks Research Laboratory*, em McLean, no estado de Virginia-EUA (CERATTI; OLIVEIRA, 1993).

Figura 2.13 – *Accelerated Loading Facility (ALF)*

Na instalação do FHWA denominada *Turner Fairbank Highway Research Center* (TFHRC), em McLean, Virginia - Estados Unidos, utiliza-se o ALF para estudar o comportamento de até vinte e quatro seções experimentais. O simulador de tráfego linear tem 29m de comprimento e solicita o pavimento com um semi-eixo com carga variando de 44,5 a 100kN que se desloca sobre uma seção de teste de 9,8m a uma velocidade de 18,5km/h. Este simulador é controlado por computador, o que permite a operação durante as 24 horas do dia. As pesquisas nestas instalações foram direcionadas para o estudo das pressões elevadas e de pneus extralargos (*super-single*) no desempenho de pavimentos com revestimentos asfálticos. Também foram

fornecidos dados para validar as especificações para as misturas asfálticas desenvolvidas pelo SHRP (SILVA, 2001).

Em maio de 1998, iniciou-se um estudo de pavimento do tipo *whitetopping* ultradelgado (WTUD) através do monitoramento de seções experimentais construídas nas instalações do FHWA no TFHRC. Essa pesquisa tinha como objetivo avaliar o desempenho do WTUD sob condições controladas de carregamento e temperatura, estudar o efeito das características do projeto e verificar o modelo mecanístico de dimensionamento. Para alcançar estes objetivos foram monitoradas oito seções de teste, cada uma com 14,6m de comprimento, constituídas por placas de concreto de 63mm a 89mm de espessura e espaçamento entre juntas de 0,9m, 1,2m e 1,8m. O revestimento de concreto asfáltico possuía 200mm, sendo fresados de 63mm a 89mm antes da colocação do WTUD. Já a base tinha 460mm de brita graduada. Foram instalados de quinze a dezoito extensômetros em cada pista, no topo e no fundo da placa e no topo da camada de concreto asfáltico. (SILVA, 2001).

Louisiana Transportation Research Center (LTRC)

O *Louisiana Transportation Research Center* (LTRC), localizado em Baton Rouge, em cooperação com o FHWA, desenvolveu um simulador linear de tráfego acelerado com 30,48m de comprimento e peso total de 55tf. O simulador solicita as seções de teste com um semi-eixo com carga variando de 45,4 a 95,3kN. Estão sendo estudadas as bases granulares convencionais e alternativas. Também estão sendo avaliadas as características de desempenho, projeto e procedimentos construtivos para pavimentos sujeitos a cargas pesadas e repetidas (SILVA, 2001). Segundo MITCHELL (1996), o FHWA ainda possui um equipamento de ensaio acelerado em Indiana, localizado em West Lafayette, que vem estudando misturas asfálticas.

Heavy Vehicle Simulator (HVS)

Os ensaios acelerados nos pavimentos também podem ser realizados em qualquer trecho de rodovia com o equipamento HVS, desenvolvido na África do Sul, no início

da década de 1970, pelo *Council for Cientific and Industrial Research* (CSIR). A Tabela 2.1 apresenta as principais características do HVS.

Tabela 2.1 – Características do HVS.

Mobilidade	Rebocável para distâncias longas; alto propelido para distâncias curtas
Carga da roda	Tipicamente 20-100kN para rodovias; até 200kN para aeródromos e testes especiais
Roda de teste	Simples ou dupla para caminhão ou simples para avião
Pressão de pneu	Tipicamente 560-690kPa em rodovias; até 1.450kPa em aeródromos
Aplicações média por dia de CESE*	40.000
Comprimento da seção de teste	Até 8m
Largura da seção de teste	Variável, até 1,5m
Seção padrão de teste	Variável
Comprimento total, excluindo o motor principal	22,8m
Largura total	3,7m
Altura total	4,7m
Massa total	Aproximadamente 59.646kg
Velocidade máxima da roda	10km/h
* Carga de eixo simples equivalente	

Fonte: SILVA (2001).

VAN VUUREN (1972) descreveu o chamado HVS da África do Sul como um equipamento montado em uma estrutura sobre rodas, que pode ser transportado por meios próprios até o local de teste de forma a realizar estudos *in situ*. A carga é aplicada por reação hidráulica e pode variar de 20 a 80kN. O acionamento é obtido a partir de um motor hidráulico e a velocidade é de 10km/h. O carregamento é aplicado nos dois sentidos em uma extensão de 6m por 1m de largura (CERATTI; OLIVEIRA, 1993).

Por ser um equipamento de grande versatilidade, o Departamento de Transporte do Estado da Califórnia (CalTrans), adquiriu dois HVS em 1994, cada um por aproximadamente um milhão de dólares, e criou o programa de testes acelerados em pavimentos, com a finalidade de encontrar soluções rápidas e de confiança para os problemas de pavimentos através do melhor conhecimento de seu desempenho. O programa californiano de ensaios acelerados dispõe de três ferramentas: testes no pavimento, em verdadeira grandeza, com dois simuladores de veículos pesados do

tipo HVS; ensaios de laboratório feitos na Universidade da Califórnia em Berkeley e no CalTrans e um banco de dados dos resultados dos testes de HVS obtidos em rodovias em uso na África do Sul. O CalTrans dispõe de quatro milhões por ano em pesquisa de pavimentos flexíveis e rígidos, o que representa aproximadamente 1% do custo total de manutenção e restauração de seus pavimentos (SILVA, 2001).

Os equipamentos HVS descritos até aqui são do modelo HVS Mark III. Há três novos HVS Mark IV, totalmente automatizados, estão em operação: um no *Cold Regions Research & Engineering Laboratory* do USACE; um em parceria entre a Finlândia e a Suécia; e o último no novo centro de pesquisas e ensaios do Departamento de Transportes da Flórida. Há também um novo HVS Mark IV, com possibilidade de imposição de cargas dinâmicas, em operação na África do Sul. Esta versão do equipamento é apresentada na figura 2.14.

Figura 2.14 –Esquema de funcionamento e fotos do HVS Mark-IV.

Uma versão “pesada” do HVS desenvolvida para aeroportos (HVS-A Mark V) está em operação pelo *Waterways Experiment Station* do USACE, com potencial de emprego de carga de rodas aeroportuárias de até 440kN. Em operação desde 1998 este equipamento, ilustrado na figura 2.15 e também conhecido como “Bigfoot” permite a simulação de cargas de rodas duplas de aviões e apresenta dimensões diferenciadas em relação aos demais simuladores HVS (36.3m x 4.23m x 4.99m).

Figura 2.15 – HVS “*Bigfoot*” do *Waterways Experiment Station* empregado para estudos de pavimentos aeroportuários.

Outros Simuladores

Uma outra forma de simulador de tráfego linear foi desenvolvida na Austrália em 1961, dando origem a um modelo de escala reduzida na Universidade de Washington. Um modelo semelhante também foi desenvolvido, paralelamente, na África do Sul. Este modelo formou a base para o equipamento de ensaio acelerado em escala real do Texas (METCALF, 1996).

2.3.3. Experiências Nacionais

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.

2.3.3.1. Pistas Testes

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 2.16 – 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 excentricamente 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 2.2.

Tabela 2.2 – 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.
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 SILVA (2001).

De outubro de 1982 a julho de 1983, avaliou-se o comportamento de dois segmentos experimentais de pavimentos. Estes segmentos foram divididos em dezenove seções que apresentavam tipos de revestimentos diferentes: Tratamento Superficial Duplo (TSD) e Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), sempre sobre base de brita graduada.

No início da década de 1990, a empresa Máxima Consultoria S.A. realizou pesquisas, cujo objetivo básico era estudar o desempenho de pavimentos de CBUQ, com diferentes espessuras e a durabilidade de operações emergenciais de recuperação de pavimentos, além de testes de desgaste de pneus sob diferentes condições de superfície de rolamento. A pista foi dividida em quatro seções com 50mm, 75mm, 100mm e 150mm de revestimento em CBUQ e base de brita graduada e espessura de 300mm em todas as quatro seções (SILVA, 2001).

Estes estudos permitiram concluir que o aumento da espessura do revestimento de 50 para 75mm em nada contribuiu para a durabilidade do pavimento, ao passo que a duplicação da espessura de 50 para 100mm elevou a durabilidade em cerca de 20%. Denominou-se durabilidade a capacidade que cada seção do pavimento teste apresentava sob a ação das cargas do trem de prova, até atingir um estado de deterioração da superfície que impossibilita a operação do trem de prova e exigindo uma operação de recuperação do pavimento (SILVA, 2001).

Todavia a análise mecânica de pavimentos rodoviários flexíveis, como os utilizados nesta pesquisa, indica espessuras críticas entre 40 e 70mm, em função da infra-estrutura existente (base, sub-base e subleito), fato que pode justificar que a alteração da espessura de 50 para 75mm não contribuiu em termos de durabilidade da estrutura como um todo.

Quanto aos resultados obtidos referentes a desgaste de pneus verificou-se que manter o pavimento com a superfície de rolamento íntegra significava diminuir em 20% o desgaste dos pneus (SILVA, 2001).

A pesquisa sobre Concreto Compactado a Rolo (CCR) para pavimentação foi realizada através de um contrato de cooperação técnica entre o DNER e a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), tendo como executora a empresa Inspector Engenharia Ltda. A finalidade da pesquisa foi elaborar um manual sobre projeto, dimensionamento, construção e controle tecnológico de pavimentos de concreto rolado. O resultado deste trabalho constituiu o Manual de pavimentos de concreto rolado, editado pelo DNER em 1992 em dois volumes (SILVA, 2001).

No projeto deste experimento considerou-se que o pavimento seria solicitado por dois níveis de carregamento: o primeiro correspondendo a trinta veículos comerciais por dia (tráfego leve) e o segundo a cem veículos comerciais por dia (tráfego médio). Utilizou-se como veículo tipo, um caminhão de eixo simples com 50kN no eixo dianteiro e 100kN no eixo traseiro e fator de veículo (FV) do USACE igual a 3,42. Para um período de projeto vinte anos o número de solicitações do eixo padrão

(82kN) foi de $7,5 \times 10^5$ para o tráfego leve e $2,5 \times 10^6$ para o tráfego médio. Adotou-se o FV do USACE igual a 9,9 para o trem de prova da Pista Circular (trem de prova com três eixos simples de 100kN). Assim, eram necessários 75.655 giros do trem de prova para atingir o tráfego leve e 252.182 giros para atingir o tráfego médio (SILVA, 2001).

Segundo DNER (1993), o concreto rolado resistiu bem às solicitações para o tráfego leve, entretanto a movimentação vertical das placas em algumas juntas ocasionou o aparecimento de placas com áreas trincadas progrediram, obrigando a paralisação do trem de prova com 107.000 giros, isto é, antes de atingir o tráfego médio.

A pesquisa sobre pavimento de CCR para tráfego pesado (correspondente a quinhentos veículos comerciais por dia) teve como objetivo complementar a pesquisa que estudou o CCR para tráfego leve e médio (DNER, 1992). Segundo o Manual do DNER (1993), o pavimento estava apto a suportar aproximadamente 600.000 giros do trem de prova, mas foi submetido a apenas 150.000 giros. No final destes 150.000 giros tanto o CCR de 320kg/m^3 (com função de revestimento e base) quanto o CCR de 80kg/m^3 (com função de base) apresentaram ótimo comportamento. Quanto ao revestimento de CBUQ foi observado um afundamento excessivo de trilha de roda. Todavia, não foi constatada fadiga da camada, fato confirmado pela ausência de trincas e fissuras na sua superfície (conforme esperado visto que no pavimento em questão o revestimento trabalha a compressão).

Em abril de 1997 o DNER, novamente através de convênio com a ABCP, contratou a Prodec Ltda para desenvolver os estudos de recapeamento de pavimentos flexíveis com concreto do tipo *whitetopping* colocado na pista circular. Acoplado a este projeto, mas sem ter participado da sua concepção inicial, estava o desenvolvimento de uma tese de doutorado sobre o comportamento funcional e estrutural da pista experimental com *whitetopping* convencional e WTUD, bem como o entendimento do próprio funcionamento do carrossel da Pista Circular do IPR/DNER (SILVA, 2001). Os resultados permitiram a elaboração do Manual sobre *Whitetopping* (DNER, 1999).

Em 2002, uma pesquisa teve como objetivo verificar se asfaltos multigrade, produzidos no Chile, possuem propriedades reológicas melhoradas quando comparadas ao CAP-40, produzido no Brasil, proporcionando um melhor desempenho do pavimento. Esta pesquisa foi realizada no simulador de tráfego da Pista Circular Experimental com a seguinte estrutura: subleito de argila amarela, base com 200mm de espessura de brita graduada, concreto asfáltico com 50mm de espessura, *whitetopping* com 150mm de espessura sobreposto pelos materiais a serem testados. As misturas com CAP-40 e com o ligante multigrade foram comparadas nas mesmas condições de temperatura, teor de ligante, granulometria e tipo dos agregados (FRITZEN, 2005b). Os bons resultados do multigrade na pesquisa não foram comprovados em pistas experimentais em corredores de ônibus na cidade do Rio de Janeiro em pesquisa conduzida por SÁ (2003).

A esta pesquisa seguiu-se uma outra sobre utilização de Escória de Aciaria como base e sub-base de pavimentos, com produtos siderúrgicos gerados pela Companhia Siderúrgica de Tubarão, com início em 30/04/2004. Os trabalhos realizados na pista circular do IPR tiveram como meta a construção do trecho experimental com a utilização do produto siderúrgico ACERITA (DNIT, 2007). Na execução do trecho foram colocadas membranas geossintéticas, células de carga e as camadas de base de escória de aciaria, de escória mais argila e de brita graduada. Todavia, a compactação das três seções foi executada sem se obter o grau de compactação ideal com rolo liso, fato atribuído à interferência da membrana.

No período compreendido entre 01/04/2006 a 30/06/2006 foram realizadas três coletas de três amostras de água para teste de lixiviação, para verificação de contaminação pela escória na pista experimental circular, e elaborado o orçamento para manutenção do trem de carga para dar início à operação (DNIT, 2007).

Em 26/05/2006, foi realizado um Seminário Técnico, na cidade de Vitória/ES, para apresentação dos resultados parciais da pesquisa. Em 01/08/2006, foi realizada uma reunião técnica para apresentação dos primeiros resultados da pesquisa ambiental aos

técnicos do Instituto Estadual de Meio Ambiente do Estado do Espírito Santo, aos técnicos da CST-ARCELOR e aos técnicos do IPR, referentes ao local do experimento (DNIT, 2007).

Os estudos, ainda não concluídos, estão sendo conduzidos de forma a normalizar a aplicação da escória de aciaria em obras de infra-estrutura rodoviária, com a finalidade de garantir ao material confiabilidade e aceitação do mercado consumidor, conseguindo-se, assim, destinação para o mesmo em sua totalidade. Visando a normalização, a pesquisa objetiva a determinação de novos parâmetros e procedimentos, os quais serão determinados com base nas caracterizações físicas e químicas do material, bem como a avaliação do seu potencial expansivo em laboratório, aliados à sua aplicação no campo, para, após comprovação técnica de sua viabilidade, a normalização dos métodos a serem utilizados na execução dos serviços (MENDONÇA; NASCIMENTO, J; NASCIMENTO, K, 2005).

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 2.17 – 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).

Conforme CERATTI e OLIVEIRA (1993), o simulador é constituído pelos seguintes sistemas:

- Sistema de Guiamento do Rodado - o rodado, simples ou duplo, é ligado a um carro que se desloca em trilhos, tracionado por cabo de aço. Este carro possui em cada lateral cinco rodas que promovem seu guiamento, sendo que três delas servem para o guiamento sob carga e duas para o guiamento durante o retorno para reposicionamento em um ciclo de aplicação.
- Sistema de Aplicação de Carga - a carga é aplicada através de uma unidade hidráulica eletricamente comandada e de um cilindro hidráulico, montados sobre o carro. Esta carga é aplicada sempre com deslocamento em um único sentido. O retorno se dá com o rodado suspenso.
- Sistema de Amortecimento - o sistema de amortecimento é um dispositivo de segurança composto de molas helicoidais, colocadas nas extremidades dos trilhos de guiamento e tem como função a parada com segurança do carro.
- Sistema de Acionamento - o equipamento é acionado por um motor de indução trifásico de rotor bobinado para regime intermitente. Possui freio eletromagnético, com potência de 15CV e um redutor de 1:9,4. Este conjunto aciona um tambor ligado ao cabo de aço que movimenta o carro. O cabo de aço possui um mecanismo em uma das extremidades, de forma a mantê-lo sempre esticado.
- Sistema do Rodado - a estrutura é composta por papéis Baily tipo BB.1 sobreposto, que o DAER/RS dispunha desativados, anteriormente utilizados para a construção de pontes provisórias de emergência. Esta estrutura serve de reação às cargas, e é apoiada sobre duas vigas-caixão localizadas nas extremidades.
- Sistema de Controle - o equipamento é comandado através de um quadro de comando elétrico com grau de proteção IP 54, desenvolvido especialmente para esta função, e que através de um microprocessador programável acoplado aciona todos os sistemas integrantes do simulador de tráfego. Faz parte também do sistema de controle um quadro de resistores, que tem como função o controle da velocidade de acionamento.
- Sistema de Aceleração e Desaceleração - a aceleração e a desaceleração do deslocamento do carro são comandadas pelo sistema de controle, através do acionamento de freio do motor elétrico, e segundo um sinal elétrico originário

de sensores fotoelétricos, dispostos ao longo dos trilhos de guiamento do carro.

- Sistema de Deslocamento Transversal - o equipamento em operação tem um deslocamento transversal coordenado com o longitudinal, de forma a impedir a formação de trilhas por passagem das rodas em um único local. Frações deste deslocamento ocorrem toda vez que o rodado retorna suspenso para o início de cada ciclo. Este movimento é realizado pelo deslocamento de toda a estrutura sobre um elemento guia existente em cada uma das vigas-caixão de apoio externas ao equipamento. O deslocamento ocorre sobre roletes fixos à viga de apoio da estrutura e é acionado por um motor elétrico de 3CV com redutor, instalado nesta viga em cada extremidade do equipamento. O movimento é obtido através de correias ligadas às vigas externas de apoio

A primeira pesquisa desenvolvida estudou o desempenho de pavimentos delgados com bases e/ou sub-bases com basaltos alterados, sendo que os agregados alternativos foram empregados como macadame seco, conforme especificação DAER ES-P-07/91. Dez pistas com 20m de comprimento e 3,5m de largura foram construídas. Em seis delas, os basaltos alterados foram empregados como únicos materiais granulares, enquanto que, nas outras quatro, uma camada compactada de brita graduada de rocha sã foi incluída como base, acima de uma sub-base construída com basaltos alterados. Os pavimentos, construídos sobre um subleito de argila vermelha de comportamento laterítico, apresentavam em comum o revestimento tipo tratamento superficial com capa selante (NUÑEZ; CERATTI; GEHLING, 2000).

A tese de NUÑEZ (1997) foi a primeira pesquisa realizada com o simulador UFRGS-DAER/RS. Ela demonstrou que muitas aplicações práticas relevantes podem ser obtidas para a engenharia rodoviária a partir de experimentos com este equipamento. De maio de 1996 a abril de 1998, foram aplicados mais de 277.000 ciclos de carga nas seis pistas com bases em basaltos alterados, cujas conclusões são apresentadas na tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Resumo dos resultados da pesquisa com basaltos alterados no simulador UFRGS-DAER/RS.

Item	Resultados
Execução do macadame seco com basaltos alterados	<p>Especificação DAER ES-P-07/91 em geral mostra-se adequada; entretanto recomenda-se:</p> <ol style="list-style-type: none"> Eliminar a molhagem da superfície após a compactação do macadame seco. Controlar a compactação através de levantamentos deflectométricos. Complementar compactação com rolo pneumático em casos de deflexões superiores a 80×10^{-2} mm.
Validação do critério para aceitação de rochas vulcânicas alteradas	Desempenho de pavimentos ensaiados validou critério de aceitação de rochas vulcânicas alteradas, baseado no quociente entre índices de resistência à compressão puntiforme – Índice de Suporte Califórnia (IS), em duas condições: previamente imerso e seco ao ar.
Deformações permanentes em pavimentos delgados	<p>Afundamento nas trilhas de roda foi a principal manifestação de degradação nos pavimentos ensaiados.</p> <p>Maior acúmulo de deformações permanentes se deu nas camadas de basalto alterado.</p> <p>Pós-compactação, cisalhamento e quebra de agregados são mecanismos responsáveis pelas deformações permanentes.</p> <p>Deformações permanentes dependem do grau de saturação do subleito e camadas granulares, e do nível da tensão principal maior (σ_1).</p> <p>Evolução das deformações permanentes com o tráfego é exponencial.</p> <p>Em pavimentos bem dimensionados (pistas 7 e 8), após rápido crescimento inicial, a velocidade de deformação plástica se estabiliza e as deformações permanentes crescem quase linearmente com o número de ciclos de carga.</p>
Comportamento elástico de pavimentos delgados	Pavimentos bem dimensionados (pistas 7 e 8) apresentaram comportamento elástico muito bom. As deflexões baixas ($\leq 0,5$ mm) variaram muito pouco. Os módulos de resiliência de camadas de basalto alterado foram na ordem de 200MPa.
Dimensionamento de pavimentos delgados com basaltos alterados	Equação de dimensionamento, relacionando a espessura do pavimento com tráfego (N) com IS do basalto alterado determinado em amostra previamente imersa. Análise de confiabilidade mostra que pavimentos com 320mm de base de basaltos alterados suportam $N \geq 4 \times 10^5$. Também foram propostos fatores de equivalência de carga para pavimentos delgados (4ª potência).

Fonte: NUÑEZ, CERATTI e GEHLING (2000).

De novembro de 1998 a agosto de 1999 foram ensaiadas as Pistas 5 e 9 que apresentavam sub-bases de basalto alterado e bases de brita graduada de rocha sã.

Foram aplicadas mais de 223.000 cargas de eixo com magnitude de 100 e 120kN. A pesquisa pretendia comparar os desempenhos de pavimentos delgados com bases em basaltos alterados e em brita graduada, considerando também a redução de custos resultante do emprego dos primeiros (NUÑEZ; CERATTI; GEHLING, 2000).

Observou-se que o afundamento de trilha de roda cresceu exponencialmente com o número de ciclos de carga. Além disto, nas seções em que houve dificuldade de compactar adequadamente o macadame seco, o afundamento inicial observado foi mais acentuado (6mm após 700 ciclos de carga). Ainda no que tange às deformações plásticas, se apenas este parâmetro fosse considerado, 120mm de brita graduada de rocha sã equivaleriam a 160mm de macadame seco com basalto alterado (NUÑEZ; CERATTI; GEHLING, 2000).

Com relação à resposta elástica do pavimento, observou-se que as deflexões variaram muito pouco (10% durante o tráfego) nos pavimentos com bases de basaltos alterados, ao passo que na pista com base de brita graduada de rocha sã, as mesmas sofreram um acentuado crescimento ($\cong 50\%$) logo após o início do tráfego, embora as deflexões antes do tráfego fossem iguais em ambas as seções (0,44 mm) no início da pesquisa. O melhor comportamento das bases de macadame seco foi atribuído à sua drenabilidade superior (NUÑEZ; CERATTI; GEHLING, 2000).

Foram instalados tensiômetros ao longo dos pavimentos ensaiados com o objetivo de relacionar os módulos de resiliência do subleito dos pavimentos com a sucção. Toda vez que se levantavam bacias deflectométricas, para posterior retroanálise, media-se os valores de sucção no subleito. Observou-se uma tendência de crescimento do módulo de resiliência com a sucção (NUÑEZ; CERATTI; GEHLING, 2000).

O professor João Fortini Albano (UFRGS) analisou, em agosto de 1997, os efeitos de parâmetros de carregamento em deflexões, medidas no pavimento da Pista 3, e concluiu que a combinação de excesso de carga de eixo (120kN) e a elevada pressão de inflação dos pneus (0,7MPa ou 100psi) pode reduzir a vida útil de um pavimento delgado em até 80% (NUÑEZ; CERATTI; GEHLING, 2000).

GONÇALVES *et al.* (2000) apresentaram o desenrolar de uma pesquisa que empregava o simulador da UFRGS/DAER no estudo do desempenho de pavimentos flexíveis com revestimento de misturas asfálticas convencionais e modificadas com polímeros.

Em agosto de 1999 foi iniciada uma pesquisa que objetiva analisar o efeito da inclusão de mantas de geotêxteis não tecidos, impregnadas com emulsão asfáltica, sobre o retardamento de reflexão de trincas de fadiga. A pesquisa tem como co-partícipe a empresa Ober S/A. Sobre um pavimento previamente ensaiado, foi executada uma fina camada de concreto asfáltico para regularizar a superfície que apresentava afundamentos de trilhas de roda. A seguir, executou-se a camada de concreto asfáltico com 40mm de espessura, na qual foram serradas trincas com 3mm de espessura, reproduzindo trincas de fadiga, seguida de camada de reforço de concreto asfáltico com 50mm de espessura (NUÑEZ; CERATTI; GEHLING, 2000).

A extensão útil do pavimento foi dividida em três segmentos, sendo que nos segmentos das extremidades foram incluídas, entre a camada trincada e o reforço, mantas geotêxteis de características diferentes (denominadas G-150 e GT-150), enquanto que no central o reforço foi construído diretamente sobre a camada trincada. O tráfego sobre o primeiro setor do pavimento, denominado setor 13A, iniciou-se em setembro de 1999, aplicando-se seqüencialmente o seguinte carregamento:

- 2.000 cargas de eixo de 60kN;
- 2.000 cargas de eixo de 80kN;
- 52.700 cargas de eixo de 100kN;
- 30.000 cargas de 120kN.

O tráfego no setor foi interrompido no início de janeiro de 2.000 devido às excessivas deformações permanentes (afundamentos nas trilhas de roda acompanhados de deslocamento da massa asfáltica) associadas às elevadas temperaturas e à canalização do tráfego, inibindo futuras reflexões de trincas.

Embora não tenha permitido conclusões sobre o efeito dos geotêxteis no retardamento da reflexão de trincas de fadiga, o ensaio no setor 13A proporcionou importantes lições que foram posteriormente aproveitadas no ensaio do setor 13B:

- Necessidade de controlar a temperatura dos ensaios em pavimentos com camadas de concreto asfáltico e;
- Evitar a canalização do tráfego através da ampliação da largura da área trafegada para um metro (ao invés dos 700mm da seção 13A).

Observando as lições deixadas pelo ensaio do setor 13A, em abril de 2000 foi iniciado o ensaio do setor 13B. O planejamento do experimento incluía a realização de estudos nos laboratórios de pavimentação da UFRGS e do DAER/RS, com vistas à caracterização e a seleção das misturas asfálticas utilizadas na construção das seções experimentais. Foram executadas seis pistas experimentais, sendo três com revestimento constituído por mistura asfáltica convencional e três com mistura asfáltica modificada com polímeros. As espessuras das camadas de revestimento eram de 40, 60 e 80mm. A camada final de terraplenagem (argila vermelha de comportamento laterítico), existente na Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos UFRGS-DAER, foi mantida. As camadas granulares de base e de sub-base eram constituídas de brita graduada nas espessuras totais de 300mm. A execução das pistas experimentais foi concluída no dia 2 de setembro de 2000 (NUÑEZ; CERATTI; GEHLING, 2000).

Durante a execução das pistas experimentais foram instalados instrumentos configurados com o propósito de investigar as respostas fundamentais dos pavimentos quando submetidos às cargas repetidas do simulador de tráfego. Tais respostas incluíam a medição de tensões e de deformações no interior das camadas dos pavimentos. O grupo principal de sensores utilizados era constituído por células de pressão total e extensômetros de resistência elétrica. (NUÑEZ; CERATTI; GEHLING, 2000).

Utilizando-se da instrumentação de pavimentos em sua Tese de Doutorado na UFRGS, GONÇALVES (2002) desenvolveu uma grande variedade de pesquisas com o simulador de tráfego.

No ano de 2002 foram instalados tubos flexíveis de PVC com os objetivos de analisar o sistema de fundação, composto por tubo e solo, em termos de desempenho mecânico e de determinar os esforços na areia fina que envolve o tubo, como ilustrado na figura 2.18. Para cada vala foram feitas solicitações dinâmicas e estáticas com o simulador de tráfego, sendo que a carga aplicada variou de um valor mínimo de 30kN a um valor máximo de 60kN no semi-eixo. Na pesquisa, foram consideradas como variáveis independentes o grau de compactação da areia e a espessura sob o tubo. As variáveis dependentes foram o recobrimento do tubo e a deformação permanente sob a carga transiente. Os resultados mostraram que o tubo de PVC recoberto por areia fina uniforme só pode ser utilizado na drenagem de rodovia se os níveis de compactação forem próximos de 100% da Energia do Proctor Modificado, com espessura mínima de um metro (NUÑEZ, 2006).

Figura 2.18 – Pesquisas de tubos de PVC com o simulador UFRGS-DAER/RS. Fonte: NUÑEZ (2006).

Relatos de SCHMITZ (2002) indicam que, na vala profunda compactada, foram registradas leituras praticamente nulas de deslocamento dos tubos, sendo as variações pouco significativas nas respostas de deslocamentos registrados pelos sensores (da

ordem de décimo de milímetro), possivelmente causadas por deslocamento relativo do LVDT em relação à parede do tubo, já que estes não foram fixados ao tubo e têm hastes bastante esbeltas. Tal fato pode ter influenciado as leituras nas demais valas de mesma forma.

Com o objetivo de contribuir para o estudo da formação de trilha de roda em corredores e faixas de ônibus, cuja causa está intimamente ligada à temperatura do revestimento asfáltico associada ao tráfego pesado e à concentração de cargas, entre outubro de 2002 e outubro de 2003 foram realizadas medidas de temperatura em diversas profundidades no revestimento asfáltico para modelar sua distribuição ao longo da camada. Também foram coletadas informações referentes à temperatura do ar e a irradiação em estação meteorológica (NUÑEZ, 2006).

Com o objetivo de avaliar o desempenho de recapeamentos asfálticos delgados, do tipo tratamento superficial, utilizando emulsão modificada por polímero sobre pavimentos severamente trincados, entre março e maio de 2003, foram realizados ensaios acelerados com o simulador de tráfego (NUÑEZ, 2006). Foram testados dois tipos de recapeamentos: uma camada de 52mm de espessura, em concreto asfáltico convencional, e um tratamento superficial duplo, modificado por polímero SBS. Os recapeamentos asfálticos foram aplicados sobre uma pista experimental já trafegada e com trincamento padronizado artificialmente produzido, buscando reproduzir efeitos similares àqueles provocados pelo fenômeno de fadiga. A carga de 50kN de semi-eixo adotada proporcionou a degradação do pavimento em três meses de ensaio, para cada recapeamento. O monitoramento do pavimento, em termos estruturais e funcionais, foi feito através do levantamento periódico de deflexões, bacias deflectométricas, afundamentos de trilha de roda e do controle do surgimento de trincas na superfície. Para melhor quantificar e compreender os fenômenos de degradação estrutural, a pista experimental foi instrumentada com sensores (células de tensão total e *strain gauges*) na interface entre o pavimento trincado e os recapeamentos, obtendo-se tensões e deformações em pontos considerados críticos no desempenho de pavimentos recapeados. Durante os períodos de ensaio, foram

monitoradas as condições pluviométricas e as temperaturas do ar e do pavimento (AZAMBUJA, 2004).

Em suma, concluiu-se que o trincamento no recapeamento em tratamento superficial deveu-se, além do tráfego, à condição estrutural inicial do pavimento (severidade do trincamento artificial incompatível com a espessura desse tipo de restauração e baixas temperaturas). Quanto ao recapeamento em concreto asfáltico, percebeu-se que o maior trincamento surgiu em áreas sem trincas artificiais subjacentes, partindo do fundo da camada asfáltica do pavimento, em função da pouca rigidez da camada granular. Quanto à textura superficial nenhum dos recapeamentos apresentou nível considerado inseguro ao tráfego (AZAMBUJA, 2004).

Entre 2003 e 2005 uma nova pesquisa com o simulador de tráfego analisou a eficiência do emprego de asfalto borracha sobre o retardamento do processo de reflexão de trincas. O pavimento estudado possuía 300mm de base granular e camada de concreto asfáltico convencional com 40mm trincada, sobre a qual se executou um recapeamento com 50mm de concreto asfáltico empregando ligante modificado por borracha. O tráfego simulado foi de aproximadamente 513.000 ciclos de carga de um eixo simples de roda dupla com 100kN de carga. O monitoramento do pavimento foi realizado durante a simulação de tráfego com ênfase no trincamento, incluindo medidas de deflexão e instrumentação da pista, bem como da medida de trilha de roda e da textura do pavimento. Observou-se que as trincas na mistura com asfalto borracha surgiram cerca de cinco vezes mais tarde do que no CA com asfalto comum. A mesma severidade de trincamento, definida por um índice de $1,0\text{m/m}^2$, ocorrida com 340.000 aplicações de carga na mistura com asfalto borracha, foi observada com 66.000 no concreto asfáltico convencional. Além disso, a mistura com asfalto borracha proporcionou melhores condições estruturais e funcionais, comparada à espessura idêntica de concreto asfáltico convencional (AZAMBUJA, 2004).

Entre 2004 e 2006 foi conduzida uma outra pesquisa para avaliar os efeitos do teor de umidade e da sucção do solo sobre o comportamento elástico do solo do subleito,

bem como de estimar a mínima profundidade para os tubos. Foram construídas duas seções de pavimento idênticas, com 50mm de concreto asfáltico e 160mm de base de material granular britado. Os sistemas de drenagem superficial e profunda foram implantados nos bordos das seções, que também receberam instrumentação e tiveram a permeabilidade *in situ* determinada. Foi então estabelecido e monitorado o nível de água, bem como o desempenho dos pavimentos. Os resultados finais desta pesquisa ainda estão sendo analisados para a conclusão do estudo.

A tabela 2.4 resume as pesquisas realizadas com o simulador de tráfego UFRGS-DAER/RS.

Tabela 2.4 – 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: Adaptado de NUÑEZ; CERATTI e GEHLING (2000) e NUÑEZ (2006).

2.3.3.2. 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).

A figura 2.19 ilustra etapas distintas da construção destes equipamentos.

Figura 2.19 – Etapas da construção do Simulador de Tráfego Linear Móvel brasileiro. Fonte: 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 semi-eixo 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 conseqüências 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 2.5.

Tabela 2.5 – Características do Simulador de Tráfego Linear Móvel

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

A seguir, são descritos os principais elementos que compõe o Simulador de Tráfego Linear Móvel brasileiro, de acordo com FRITZEN (2005b):

- Sistema de Guiamento do Rodado

O equipamento possui um conjunto de rodado duplo ou simples que exerce pressão sobre o pavimento a ser testado, de acordo com dados pré-determinados. O carro possui rodas laterais que promovem o seu guiamento sobre trilhos, tracionados por um cabo de aço, conforme figura 2.20.

- Sistema de Aplicação de Cargas

A aplicação de carga é feita através de uma unidade hidráulica no semi-eixo, comandada por um cilindro hidráulico que varia de 15 até 90kN, com uma velocidade máxima de 9km/h, o que permite acelerar os esforços associados ao carregamento e simular, efetivamente, as sobrecargas, conforme mostrado na figura 2.21.

O sistema se dá com o deslocamento em um único sentido (unidirecional) ou nos dois sentidos (bidirecional), conforme determinação do projetista:

- Sentido Único: o carro desloca-se no sentido longitudinal do equipamento havendo contato do pneu com o pavimento somente em um único sentido (o retorno se dá com o rodado suspenso);
- Sentido Bidirecional: o carro desloca-se no sentido longitudinal do equipamento havendo contato do pneu com o pavimento tanto na sua ida quanto no seu retorno.

- Sistema de Deslocamento Transversal

O deslocamento pode ser feito de duas maneiras: Deslocamento Lateral Transversal Estático e Deslocamento Lateral Transversal. O primeiro ocorre quando o conjunto chega ao fim do curso em um sentido e movimenta-se lateralmente, fazendo com que o equipamento não passe sobre o percurso anterior no próximo curso; o segundo ocorre quando o conjunto desloca-se transversalmente durante o trajeto do percurso. Estes deslocamentos são

ajustados no painel de controle do simulador, podendo-se regular o tempo de deslocamento conforme necessário. A figura 2.22 ilustra este sistema.

- Sistema de Amortecimento:

O sistema de amortecimento, apresentado na figura 2.23, é um dispositivo de segurança composto por molas helicoidais fixadas nas extremidades dos trilhos de guiamento. Sua principal função é a parada do carro com segurança, prevenindo uma falha no sistema de controle.

- Sistema de Acionamento:

O sistema é acionado por um motor de indução tipo gaiola, de 60HP, 1770RPM e pode operar tanto com 220/380/440V. O sistema de acionamento é comandado pelo sistema de controle que, através de sensores indutivos instalados ao longo do trilho do carro, transmite um sinal à contatora. Esta transmite um sinal ao sistema de acionamento, gerando a desaceleração ou a aceleração do carro. As figuras 2.24 e 2.25 ilustram este sistema.

- Sistema de Rodado:

O sistema de rodado do carro se dá por um garfo articulado que possui um semi-eixo de caminhão na extremidade. São utilizados rodados comerciais de caminhões, conforme mostra a figura 2.26.

- Sistema de Controle:

O sistema de controle é composto por um quadro de comando elétrico e de um microprocessador programável acoplado, que aciona todos os sistemas integrantes do simulador de tráfego, conforme mostrado na figura 2.27.

- Sistema de Aceleração e Desaceleração:

O sistema de aceleração e desaceleração de deslocamento do carro é comandado pelo sistema de controle, através do acionamento do freio do motor elétrico, e segundo um sinal elétrico originário de sensores instalados ao longo dos trilhos de guiamento do carro.

- Sistema de Emergência:

O sistema é composto por duas caixas de segurança instaladas nas laterais do Simulador, conforme mostrado na figura 2.28. Também há um sistema de emergência no quadro de controle, no interior da cabine.

As figuras a seguir foram extraídas de FRITZEN (2005b).

Figura 2.20 – Sistema de Guiamento do Rodado.

Figura 2.21 – Sistema de Aplicação de Cargas Através de um Cilindro Hidráulico.

Figura 2.22 – Sistema de Deslocamento Transversal.

Figura 2.23 – Sistema de Amortecimento.

Figura 2.24 – Motor Indutivo Tipo Gaiola de 60 HP.

Figura 2.25 – Sensores Indutivos.

Figura 2.26 – Sistema de Rodado.

Figura 2.27 – Sistema de Controle do Simulador de Tráfego Linear Móvel.

Figura 2.28 – Sistema de Segurança Instalados nas Laterais do Simulador.

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).

Os estudos de casos detalhados no capítulo 3 consistem nas primeiras aplicações deste tipo de equipamento em ensaios acelerados em rodovias brasileiras em operação. A presente pesquisa inclui a apresentação dos passos adotados para a execução destes estudos com o Simulador de Tráfego Linear Móvel no Brasil e os principais resultados obtidos caso a caso.

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 seções-teste, resultando em definições de soluções de reabilitação e/ou calibrações de modelos nos contextos em que se inserem.

A tabela 2.6 ilustra as pesquisas já realizadas com o emprego do Simulador de Tráfego Linear Móvel no Brasil até julho de 2006 e os locais em que as mesmas foram realizadas, incluindo-se uma breve descrição de seu enfoque.

Tabela 2.6 – Pesquisas realizadas com Simulador de Tráfego Linear Móvel no Brasil

Nº	Interessado	Local	Ano	Descrição	Seções
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
5	NovaDutra	BR-116/SP	2005/ 2006	Influência do tipo de da quantidade de ligante no desempenho do CBUQ faixa C.	5

Os aspectos relevantes destes trabalhos, como os procedimentos metodológicos e os principais resultados obtidos, são apresentados e discutidos no capítulo 4. Os mesmos foram analisados de forma crítica e permitiram a proposição de um método de emprego para este equipamento em pesquisas brasileiras para a determinação de comportamento e previsão de desempenho de pavimentos asfálticos, com vistas a se maximizar os resultados que podem ser alcançados em futuros ensaios acelerados em pista a partir de um adequado planejamento e possibilitar a futura integração entre as distintas pesquisas.

3. ASPECTOS RELEVANTES EM ENSAIOS ACELERADOS DE PAVIMENTOS

Os ensaios acelerados com o Simulador de Tráfego Linear Móvel possibilitam estudos de comportamento de estruturas de pavimento em escala real em reduzido período de tempo com o controle da maior parte das variáveis envolvidas em seu processo de deterioração, sejam elas associadas aos materiais de pavimentação, o tráfego imposto ou aos aspectos ambientais.

Nos itens a seguir, são apresentados alguns aspectos relevantes considerados ou obtidos de pesquisas realizadas empregando ensaios acelerados de forma a subsidiar o desenvolvimento de um método de uso para os simuladores de tráfego lineares móveis.

3.1. Tráfego

3.1.1. Carga de Roda

A carga de roda aplicada é o parâmetro mais importante na deterioração de um pavimento, sendo também a variável de maior dificuldade de controle em seções sob tráfego real. O interesse nesta inter-relação remete à lei da quarta potência, que remonta aos estudos da AASHO *Road Test*, na década de 1960.

De acordo com Albano (2005), a lei da quarta potência estabelecida nos estudos da AASHTO indica que o fator de equivalência de carga (FEC) varia, entre outros fatores, em função da carga por eixo segundo uma relação de expoentes próximos a quatro, como exemplificado a seguir:

$$FEC = \left(\frac{W_i}{W_p} \right)^b$$

Onde:

W_i : carga por eixo genérica

W_p : carga por eixo tomada como padrão

b: expoente definido pela AASHTO como próximo de 4.

A então chamada lei da quarta potência tem se mostrado muito dependente das espessuras e da posição relativa das camadas dos pavimentos. Além disto, esta relação também depende do tipo de eixo, da suspensão e do nível de irregularidade do pavimento (HUGO & MARTIN, 2004).

Neste ponto vale destacar o estudo iniciado no simulador de tráfego do LCPC em Nantes, com o propósito principal de estudar os efeitos da unificação da carga máxima legal praticada em quinze países europeus em 11,5tf no eixo simples de rodagem dupla, que passaria a ser o eixo padrão de referência para toda a União Européia. A alteração de eixo de 10tf para o de 11,5tf implicou em exponenciais para a equivalência de carga em termos de deformação plástica em trilha de roda de 1,47, para pavimentos semi-rígidos (63mm de CBUQ sobre 170mm de BGTC), 2,88 para pavimentos asfálticos robustos (140 mm de CBUQ) e 5,74 para pavimentos asfálticos delgados (67mm de CBUQ) (HUGO & MARTIN, 2004).

Muito embora a lei da quarta potência não seja aplicável a todos os casos, o formato de sua curva (potência) ilustra bem a importância da definição do plano de carregamento a ser realizado durante os ensaios acelerados com o emprego de simuladores de tráfego.

Todavia, valores de carga de roda excessivamente superiores às cargas padrões de dimensionamento devem ser evitados, pois isto pode induzir a mecanismos de falha que nunca iriam se manifestar em condições normais de tráfego, especialmente no caso de camadas cimentadas e asfálticas, como tem sido recomendado nos estudos com HVS na África do Sul (HUGO & MARTIN, 2004).

3.1.2. Características do Pneu e Pressão de Contato

Deve-se observar a importância deste parâmetro em pavimentos asfálticos. Como exemplo, HUGO & MARTIN (2004) citam estudos com o HVS da África do Sul

publicados 1997, cujos resultados indicam pressão não uniforme na área de contato pneu-pavimento, sendo observados picos de pressão na superfície do pavimento superiores ao dobro da pressão de inflação do pneu. Esse fato é considerado como a principal causa do trincamento na superfície do pavimento asfáltico. Também se observaram diferenças na distribuição de pressão em função do tipo de pneu empregado (radial ou não).

3.1.3. Deslocamento Lateral Transversal

A canalização do tráfego pode ser regulada na maioria dos simuladores de tráfego durante os ensaios acelerados através da determinação do deslocamento lateral máximo que ocorrerá no trem-de-prova e, conseqüentemente, da frequência de solicitação de cargas em cada ponto de uma seção transversalmente ao sentido de carregamento. Em síntese, na maioria dos equipamentos de ensaios acelerados, podem ser determinados caso a caso a relação operação-cobertura.

EPPS *et al.* (2001) relataram o efeito da dispersão lateral em seções-teste no WesTrack. Os pesquisadores constataram que o concreto asfáltico tinha se movido lateralmente, durante o ensaio com altas temperaturas, resultando em deformações de materiais asfálticos para cima da cota do revestimento na área não solicitada pelo tráfego. Este fenômeno também foi observado por HAND, EPPS e SEBAALY (1999). Por conseguinte, a profundidade da trilha poderia ser reduzida com o aumento do número de aplicações da carga em uma posição lateral específica.

WHITE, HUA e GALAL (1999) relataram, em estudos com o simulador de tráfego, uma redução significativa na profundidade das trilhas e deformações plásticas ascendentes quando aplicada carga com dispersão lateral. Em um caso específico, a profundidade da trilha e a deformação ascendente eram respectivamente de 10 e 5mm com a dispersão lateral, ao passo que, sem este recurso, os valores foram respectivamente de 15 e 14mm. Em geral, os pesquisadores relataram reduções entre 30% e 40% na flecha em trilha de roda quando introduzida uma dispersão lateral da carga sobre uma largura de 250mm.

CHEN, BILYEU e HUGO (1998) e CHEN e LIN (1999) compararam os perfis típicos de trilha de roda em estradas do Texas com os perfis do trajeto da roda gerados em seções-teste do simulador, no mesmo estado, para relacionar o desempenho dos ensaios acelerados ao tráfego real nas estradas. Como resultado, determinou-se um fator de ajuste baseado nas larguras respectivas da trilha de roda.

3.1.4. Sentido de Carregamento

Embora a escolha por carregamento bidirecional leve a uma significativa redução no tempo de ensaio e, conseqüentemente, nos custos envolvidos, devem-se observar os aspectos técnicos envolvidos, especialmente no que se refere à dissipação de esforços pela estrutura (YANDELL e BEHZADI, 1999).

A distribuição das tensões e deformações, geradas na estrutura pelas cargas de roda do tráfego, se dá de modo que as camadas de revestimento e base aliviem as tensões verticais de compressão no subleito por meio da “absorção” de tensões cisalhantes. Neste processo, ocorrem tensões e deformações de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico, as quais provocarão seu trincamento por fadiga com a repetição das cargas do tráfego. Ao mesmo tempo, a repetição das tensões e deformações verticais de compressão que atuam em todas as camadas do pavimento levará à formação de afundamentos em trilha de roda, quando o tráfego tender a ser canalizado, e à ondulação longitudinal da superfície, quando a heterogeneidade do pavimento for significativa. Deve-se salientar que em uma estrutura de pavimento, o comportamento é transiente, os solos e os materiais granulares da fundação têm comportamento tensão-deformação não-linear (que são influenciados por diversas variáveis), e os materiais asfálticos têm suas propriedades sensíveis à velocidade de aplicação das cargas e à temperatura (GONÇALVES, 1999).

Estudos com ensaios acelerados no Reino Unido indicam que o tráfego bidirecional é mais severo em termos de deformação de trilha de roda do pavimento, se comparado a ensaios unidirecionais. Em um teste comparativo em Puerdue, também se observou

uma maior deformação na seção com tráfego bidirecional. Na Finlândia não se observou tal tendência, sendo os resultados semelhantes nos dois tipos de simulação (HUGO & MARTIN, 2004).

De acordo com FRITZEN (2005b), a partir de informações obtidas com o professor Ceratti, o sistema de deslocamento em um único sentido (unidirecional) é recomendado para os estudos em pavimentos cuja ação crítica de deterioração seja o processo de fadiga. Já os movimentos aplicando cargas nas duas direções (bidirecionais) são recomendados para os estudos com enfoque na deformação permanente.

3.1.5. Suspensão e Efeitos Dinâmicos

A lei da quarta potência foi derivada das experiências da AASHO da década de 1960, em que as cargas de roda eram dinâmicas. Entretanto, os modelos de desempenho para o pavimento asfáltico, geralmente, incluíram os efeitos do carregamento estático de tráfego, expresso por sua carga de roda e pelo número de aplicações, não explicitando o efeito dinâmico de cargas. PIDWERBESKY, STEVEN e DE PONT (1997) indicaram que SWEATMAN (1983) tinha deduzido que havia um grau de repetibilidade espacial nas cargas dinâmicas que ocorrem sob cargas da roda. Em consequência disso, os danos em pontos críticos de pico de carga seria o fator crítico para o desempenho do pavimento. Isto foi validado no estudo sobre a influência de cargas dinâmicas do eixo na resposta do pavimento e a deterioração no simulador de Canterbury (PIDWERBESKY, STEVEN e DE PONT, 1997). Neste estudo, o efeito de três tipos de suspensão (molas convencionais de aço, o conjunto de molas parabólicas e a suspensão a ar) foi investigado em dois testes. As cargas da roda eram idênticas estaticamente, mas completamente diferentes dinamicamente. A análise hierarquizou as suspensões da pior para a melhor, em termos de desempenho do pavimento, com sendo o aço, o feixe de mola e a suspensão a ar. Além disso, o emprego de cargas para as quais as suspensões não foram concebidas também mostrou impacto significativo na deterioração do pavimento.

3.1.6. Velocidade de Carregamento

De acordo com HUGO & MARTIN (2004), o efeito de velocidade de carga não tem recebido tanta atenção na interação pneu-pavimento, talvez pelo fato de, na maioria dos simuladores de tráfego existentes em todo o mundo, não ser possível realizar alterações significativas na velocidade de aplicação de carga. Embora o Simulador de Tráfego Linear Móvel somente realize ensaios a velocidades médias de 10km/h, significativamente inferiores às de operação de uma rodovia, é importante conhecer alguns dos resultados de pesquisas já realizadas nesta área.

SIDDHARTHAN *et al.* (2002) estudaram o efeito da distribuição de pressões de contato nos parâmetros de respostas do pavimento, verificando que a magnitude das deformações no fundo da camada asfáltica e no topo da camada de subleito é afetada com um decréscimo em mais de 25% quando a velocidade veicular aumenta de 5 para 110km/h, tanto para pavimentos delgados (150mm de CBUQ) como para pavimentos espessos (250mm de CBUQ).

CORTÉ *et al.* (1997) relataram que, como uma primeira aproximação, a tendência é que um aumento de 15% na velocidade, em valores originais da ordem de 40 a 50km/h, reduzem as trilhas de roda de 20% a 35%. Mencionam que no estudo realizado pode ter havido um efeito tangencial das rodas na operação em pista circular. Este valor torna-se mais variável com asfalto duro (deformação pequena). Como as trilhas de roda são pequenas (2 a 4mm), também é difícil quantificar a influência da velocidade. STEVEN *et al.* (1999) relataram que o coeficiente dinâmico da carga, como medido com o simulador de Canterbury, dobrou quando uma suspensão de feixe de molas foi utilizada e a velocidade aumentada de 20km/h a 45km/h. O efeito era mínimo com uma suspensão da mola convencional (HUGO & MARTIN, 2004).

HUGO & MARTIN (2004) citam o estudo sul-africano de 1995 que mediu deflexões estáticas e dinâmicas sob cargas da roda, nas estradas em serviço, para relacionar estas às deflexões medidas sob o HVS. A figura 3.1 mostra os resultados em um

pavimento de 60mm de revestimento asfáltico sobre uma base de brita graduada de 210mm e 150mm de sub-base tratada com cimento. A deflexão é alterada significativamente dentro da faixa de velocidades até 20km/h. A redução na deformação do asfalto, com o incremento de velocidade de 0 para 20km/h, é conduzida pela relação entre a tensão elástica e plástica. Resultados similares foram obtidos com um pavimento de 100mm de revestimento asfáltico e com estrutura ligeiramente mais fraca. Observa-se que os estudos foram conduzidos com diferentes cargas nos eixos tandem-triplo (linhas contínuas).

Figura 3.1 – Efeito da velocidade na deflexão do pavimento. Fonte: HUGO & MARTIN (2004).

Durante o projeto FORCE (OECD 1991), foram realizadas experiências com carga de 11,5tf no eixo simples de roda dupla em cinco diferentes estruturas de pavimento, com resultados muito similares aos da figura (HUGO & MARTIN, 2004), como demonstrado nos pontos do gráfico da figura 3.1. WHITE *et al.* (1999) demonstraram o efeito da velocidade na formação de trilha de roda ao analisarem os elementos finitos em seu programa de ensaios acelerados de pavimento. Observaram que as

trilhas se reduziam à metade quando se aumentava a velocidade de valores muito baixos para 100km/h.

Portanto, as baixas velocidades de aplicação de carga em simuladores de tráfego lineares implicam em situações críticas para a deterioração do pavimento, tanto no que se refere ao processo de fadiga, em função das maiores deflexões constatadas, quanto no que tange a deformação permanente.

A frequência da aplicação da carga também é importante ao comparar a deformação sob testes padrões, como relatado por EPPS *et al.* (2001), e nos ensaios acelerados em pistas dedicadas, ou com simuladores de tráfego em seções-teste, onde o incremento da velocidade implica necessariamente em aumento na frequência de carregamento.

3.1.7. Tipo e Configuração de Eixo

Os ensaios acelerados também permitem o emprego de diferentes tipos e configurações de eixos, tanto nas pistas testes dedicadas, através do emprego de diferentes veículos de configurações conhecidas, quanto em simuladores de tráfego, através de alteração no trem de prova empregado.

Como exemplo do potencial dos ensaios acelerados neste sentido, cita-se o estudo de NEWCOMB *et al.* (1999) referente ao efeito de uma série de combinações de veículos de carga, configurações de eixo e velocidades aplicadas às seções de pavimento instrumentadas. Os resultados foram empregados no projeto de desenvolvimento de um método de dimensionamento mecânico-empírico.

3.2. Variáveis Climáticas

3.2.1. Temperatura

A temperatura é o principal fator climático que afeta o desempenho dos materiais asfálticos. Esta mesma afirmação também é válida para os pavimentos de concreto cimento Portland, embora possa ser feita por razões distintas, como a cura e o efeito do empenamento das placas. Além disto, há o efeito da temperatura a curto e a longo prazo (HUGO & MARTIN, 2004).

CORTÉ *et al.* (1997) discutiram minuciosamente o efeito da temperatura em trilhas de roda. Relataram que há uma temperatura a partir da qual os asfaltos mostram-se susceptíveis à formação de trilha de roda. Para a mistura com o asfalto de referência no simulador do LCPC, esta temperatura era de 40°C a 45°C. Para as temperaturas abaixo destas, havia uma redução notória nas trilhas, tanto em profundidade quanto em extensão. Além da deformação muito baixa, as trilhas eram uniformes. Este valor de temperatura é próximo ao da temperatura do ponto de amolecimento do asfalto, determinado pelo método “anel e bola”. Por esta razão, o histórico térmico de um pavimento tem papel importante para o seu desempenho. Lister relatou este problema em 1972 (METCALF, 1996), num dos primeiros estudos com ensaios acelerados no Reino Unido. Os resultados resumidos na figura 3.2 mostram uma tendência similar na temperatura crítica de início de trilha de roda àquela observada por CORTÉ *et al.* (1997), ou seja, uma temperatura crítica de 40°C.

Figura 3.2 – Efeitos da temperatura no desempenho dos pavimentos. Fonte: HUGO & MARTIN (2004).

As trincas produzidas pelas baixas temperaturas são estudadas principalmente para a melhoria das especificações de ligantes. Os estudos com ensaios acelerados nas regiões que apresentam baixas temperaturas durante o inverno, sem nenhum controle ambiental durante a simulação, apresentaram uma oportunidade para a avaliação do sucesso deste enfoque (HUGO & MARTIN, 2004). No exemplo de WesTrack, nenhuma deterioração desta natureza ocorreu, validando assim a estratégia daquele projeto (EPPS *et al.* 1999).

GRAMSAMMER, KERZREHO e ODÉON (1999) indicaram que as experiências para a verificação de trilha de roda podem ser realizadas com poucos ciclos de carga no carrossel do LCPC a altas temperaturas (100.000 a 200.000 aplicações da carga em quatro raios do giro em velocidades de 38 a 48km/h, dependendo do raio). Para tanto, os ensaios são conduzidos no verão (em julho e agosto) quando a temperatura alcança 30°C dentro do curso de simulação, entre as 9:00 e 18:00h, em seções com infra-estrutura resistente à deformação permanente, de modo que a trilha medida na superfície seja realmente o resultado da deformação plástica da camada de rolamento nas condições médias francesas.

Por outro lado, de acordo com KIM *et al.* (2008), em estudos realizados por pesquisadores na Flórida com o HVS (empregados na comparação da modelagem

visco-elástica tridimensional de pavimentos) foram conduzidos no mês de fevereiro (um mês mais frio naquele estado) para se minimizar a deformação em trilha de roda.

Os primeiros estudos com equipamentos de ensaios acelerados no exterior foram realizados em temperatura ambiente, sendo controladas as condições ambientais durante os testes. Recentemente, porém, alguns dos equipamentos disponíveis para a simulação de tráfego permitem o controle da temperatura do pavimento a valores que podem ser inferiores a 0°C e outros superiores a 76°C (HUGO & MARTIN, 2004).

3.2.2. Umidade

HUGO & MARTIN (2004) citam um estudo sul-africano com o HVS que demonstra o significativo impacto do ingresso da água para a deformação permanente da estrutura do pavimento, como demonstrado na figura 3.3. Observa-se que a chuva e a subsequente pulverização artificial de 30mm de água numa superfície de teste implicaram na mudança de comportamento do pavimento. Os pesquisadores relatam que isto não ocorre quando o pavimento é mantido corretamente (com selagens de trincas, por exemplo).

Figura 3.3 – Evolução da flecha em trilha de roda em pavimento asfáltico com base granular em ensaio com HVS. Fonte: HUGO & MARTIN (2004).

HUGO & MARTIN (2004) relatam o estudo de WALKER (1985) sobre o impacto da umidade no desempenho do pavimento e usam os dados, obtidos dos vários testes de HVS em pavimentos sul-africanos, para mostrar os efeitos do tipo de pavimento e do grau de saturação no desempenho. A figura 3.4 mostra a deformação equivalente às passagens de um eixo padrão de 80kN utilizando um fator três na equivalência de carga. Na mesma figura, observa-se também o desempenho da rodovia P 157/1, avaliada em 1996 por JOOSTE *et al.* (1997).

Figura 3.4 – Efeito da saturação no desempenho de pavimentos asfálticos de base granular ensaios com HVS. Fonte: HUGO & MARTIN (2004).

A experiência levada a cabo na Austrália entre fevereiro de 1992 e junho de 1993, em 34 seções submetidas a 3×10^6 ciclos de cargas leves em dez tipos de pavimento, contribuiu para a evolução do conhecimento técnico em termos de projeto e execução de pavimentos granulares estabilizados naquele país. Uma das conclusões do estudo refere-se à importância da consideração do efeito de chuvas pesadas em um reduzido período de tempo no desempenho do pavimento, que pode se sobrepor aos bons resultados ao longo do tempo. Os materiais granulares sensíveis à umidade não secam rapidamente e a prevenção quanto ao ingresso da água e ao aumento do grau de saturação destes materiais é crítica. Nestes casos, quando o subleito tem

capacidade adequada de suporte, a principal função do material granular é a de garantir a selagem da superfície (HUGO & MARTIN, 2004).

Há diversas formas para simular o ingresso da água na estrutura do pavimento, quando se deseja observar seu efeito em ensaios acelerados. No HVS sul africano, os pesquisadores pulverizam água na superfície para simular o tráfego sobre uma pista molhada. Além disso, através de tubulações perfuradas sob uma pressão estática positiva de um a dois metros, os pesquisadores injetam água em uma ou mais camadas do pavimento (HUGO & MARTIN, 2004).

3.2.3. Envelhecimento do Asfalto

Ao considerar os efeitos da ação da temperatura e da umidade nos pavimentos, devem ser diferenciados os efeitos a curto e longo prazo. Ademais, há efeitos não associados ao tráfego, especialmente no caso da temperatura. O envelhecimento de materiais asfálticos, causado por exposição ao calor, oxigênio, radiação, e ao vento, ao longo do tempo, é um dos efeitos não associados ao tráfego que deve ser considerado. Entretanto, para observar todos os aspectos do real efeito do fenômeno de envelhecimento sobre o desempenho do pavimento, são necessários estudos de longo prazo, em trechos experimentais. Até meados da década de 2000, nenhum estudo formal tinha sido empreendido especificamente com a finalidade de estudar o fenômeno de envelhecimento nos programas de ensaios acelerados (HUGO & MARTIN, 2004).

O envelhecimento acelerado artificial já foi empregado por VAN DER MERWE *et al.* (1992) para simular o envelhecimento natural do asfalto em estudos de ensaios acelerados. Através do aquecimento a 100°C por 7 e 28 dias, os pesquisadores “envelheceram”, respectivamente, duas seções-teste de concreto asfáltico. Um aumento drástico na resistência à trilha de roda após o envelhecimento artificial foi observado. Entretanto, a resistência ao trincamento foi simultaneamente reduzida, observando-se trincas no revestimento em períodos mais curtos. A relação entre a resistência e a deformação de trilha de roda com o trincamento, antes e depois do

envelhecimento, era de 1:1,5 (para flecha em trilha de roda) e de 5:1 (para o trincamento).

HUGO, SERVAS e SNYMAN (1987) testaram o efeito de temperaturas baixas (-10°C) sobre o envelhecimento do concreto asfáltico. Novamente este envelhecimento resultou em trincamento mais extenso, o que permitiu concluir que as trincas resultam da inter-relação do aumento no módulo com a tensão atuante.

3.3. Pavimento e Materiais de Pavimentação

ULLIDTZ *et al.* (2008) relatam suas preocupações com a qualidade na execução e na caracterização dos materiais das seções-teste para estudos de desempenho sob ensaios acelerados, com vistas à calibração de modelos mecanístico-empíricos para pavimentos flexíveis com o HVS da Califórnia.

De acordo com HOWARD *et al.* (2008), em estudos comparativos o recomendado é que sejam executadas duas seções-teste, idealmente construídas usando equipamentos e materiais idênticos, distinguindo-se somente nos materiais a serem comparados. Isto permitiria que todas as diferenças no desempenho fossem atribuídas diretamente aos materiais em teste. Porém, a variabilidade inerente às obras de pavimentação impede que isto ocorra.

No estudo de recapeamentos asfálticos com o simulador UFRGS-DAER/RS, onde AZAMBUJA (2004) utilizou o recurso de subdividir a área teste (de 7,0m²) em subseções de 1,0m² em que se alternava a ocorrência ou não de trincamento induzido artificialmente no pavimento. Nas áreas artificialmente deterioradas, as trincas foram executadas com uma serra circular antes da aplicação do recapeamento. A profundidade dessas trincas foi de 50mm ou mais, com o intuito de atingir a camada granular subjacente. Todas as áreas trincadas seguiram o mesmo padrão, possuindo módulos quadrados de 100mm de lado, conforme a figura 3.5. As trincas foram posteriormente preenchidas com argila para evitar que fossem seladas pelo primeiro banho de emulsão asfáltica do tratamento superficial ou pela imprimação realizada

na faixa do recapeamento em concreto asfáltico, favorecendo, assim, o estudo da reflexão de trincamento.

Figura 3.5 – Padrão de trincamento utilizado por AZAMBUJA (2004) e execução das trincas

3.4. Monitoramento durante os Ensaios Acelerados

MITCHELL (1996), relata que alcançar as metas de um ensaio acelerado é função de uma grande quantidade de informações de qualidade, obtidas ao longo de toda a pesquisa. A título ilustrativo, no WesTrack emprega-se o seguinte tipo de informação:

- Dados geotécnicos, incluindo poços de inspeção e da avaliação de ocorrências, coletadas e ensaiadas antes do início da construção;
- Dados defletoométricos nas diversas fases: antes da construção e após a construção de cada camada, e mensalmente durante os ensaios acelerados;
- Ensaio de laboratório de todos os materiais, antes e durante a construção para o controle do projeto e de qualidade (em frequências de amostragem estatisticamente coerentes), além de um número significativo de amostras ensaiadas em cada seção para caracterizar inteiramente a construção *in loco*, como, por exemplo, a determinação de volume de vazios e o teor de asfalto;
- Ensaio de ligantes e de mistura, conforme o SHRP Superpave;
- *Strain gauges* e sensores de temperatura e de umidade nas seções-teste;

- Monitoramento do desempenho (com inspeção visual, perfil transversal e longitudinal, deflexões e com ensaios de aderência) a cada duas ou quatro semanas, durante todo o período de simulação;
- *Strain gauges* e acelerômetros nos eixos de um caminhão, para se obter dados sobre a dinâmica de cargas.

3.5. Instrumentação

A principal finalidade da instrumentação de seções de pavimentos *in situ* é buscar as condições que possibilitem explicar racionalmente o desempenho dos mesmos (GONÇALVES, 1999). Assim, a instrumentação deve buscar subsídios que possibilitem entender o desenvolvimento das tensões e das deformações que atuam nos pavimentos. A realização de medidas de deformação *in situ* auxilia o desenvolvimento de novos materiais e a previsão do desempenho dos pavimentos em função do carregamento, das condições ambientais e também para a melhoria dos métodos de projetos existentes (FRITZEN, 2005b).

Em ensaios acelerados de pavimentos, de acordo com HUGO & MARTIN (2004), os estudos de modelos de desempenho de pavimentos mais freqüentes são baseados na análise elástica da camada, mas os modelos com elementos finitos também têm sido empregados. Nestas pesquisas (APT), os modelos baseados em tensões e em deformações são os mais freqüentes, contudo há também, com grande freqüência, estudos baseados em deflexões e em módulos retroanalizados, além dos modelos de fadiga. Ainda de acordo com HUGO & MARTIN (2004), na instrumentação, empregada para coletar os dados para os modelos de desempenho, geralmente utiliza-se de *strain gauges*, embora alguns centros de pesquisas os tenha preterido por causa da elevada taxa de perda de sensores durante as simulações de tráfego. Os sensores de deslocamentos, como a *Multi-Depth Deflectometer* (MDD), são igualmente difundidos entre os pesquisadores. Além disto, células de pressão são empregadas, embora não com tanta freqüência. Registra-se ainda, freqüentemente, o monitoramento da umidade do subleito.

NUÑEZ (1997) relata o emprego de tensiômetros no monitoramento do grau de saturação da argila utilizada como subleito ou como camada final de terraplenagem em pesquisa. Os registros de baixas pressões de sucção com pequenas oscilações durante a pesquisa indicaram um grau de saturação elevado do material durante a simulação de tráfego.

GONÇALVES (2002) diz que as deformações medidas em estruturas de pavimento podem ser um elemento auxiliar, contribuindo na investigação dos efeitos provocados por diferentes tipos de pressão de inflação de pneus, de níveis de carga, de tipos de suspensão e de geometria dos eixos dos veículos, no desempenho de pavimentos. As medidas de deformações *in situ* são geralmente feitas com o uso de *strain gauges* instalados na estrutura do pavimento, visando proporcionar um melhor entendimento do comportamento dos pavimentos quando submetidos às cargas do tráfego.

Outras ferramentas importantes, utilizadas em medições nas estruturas de pavimentos *in situ*, são as células de tensão total, que medem os esforços exercidos pelo trem-de-prova dos simuladores de tráfego, além dos termopares, com a finalidade de verificar a temperatura nas diferentes camadas dos pavimentos (FRITZEN, 2005b).

Devido ao comportamento visco-elástico das misturas asfálticas, o estudo da temperatura dos pavimentos é muito importante. A sensibilidade aos gradientes térmicos do ligante (o asfalto amolece com o aumento da temperatura e enrijece quando a temperatura decresce). Por isso, quando se pretende analisar as tensões dinâmicas ou deflexões sob o tráfego de veículos, há a necessidade de se conhecer o perfil de temperaturas do pavimento. Desta forma, a utilização dos termopares pode auxiliar a entender o que ocorre nas diferentes camadas de uma estrutura do pavimento (FRITZEN, 2005b).

Experiências Nacionais

O emprego pioneiro de instrumentação em pavimentos no Brasil se deu na pesquisa do trecho experimental da BR-101/SC, entre os km 281+500 e 282+500, no município de Imbituba/SC. Nesta pesquisa foram construídos doze subtrechos de 54m cada, em tangente e em aterro. Cada subtrecho apresentava uma característica de base diferente com uso de areia-cal-cinza volante, variando na espessura e na dosagem. Entre os trechos construídos, havia dois subtrechos de base de brita graduada para termo de comparação com os trechos estabilizados, e também foram adotadas duas espessuras de revestimento de concreto asfáltico de 50 e 100mm (MOTTA, 1981). Dentre os equipamentos utilizados, no trecho experimental de areia-cal-cinza volante, estavam as células de pressão total, os medidores de recalque, os termopares e os sensores eletromagnéticos. Porém, os únicos equipamentos que apresentaram bons resultados durante todo o tempo de acompanhamento foram os termopares, cujo objetivo era o de analisar o efeito da temperatura nas deflexões (influência da temperatura do revestimento nas medições com viga Benkelman) e a estimativa de perfis de temperatura (determinação da temperatura em diferentes camadas).

SILVA (2001) utilizou em 1998 na Pista Circular Experimental do IPR/DNER, em uma pesquisa do *whitetopping*, seis extensômetros e duas células de carga. Esta instrumentação foi proposta e desenvolvida pela MTL Engenharia Ltda, com o objetivo de determinar o desempenho do reforço do tipo WT em termos de vida de fadiga. Os extensômetros de resistência elétrica e as células de carga instaladas em pontos da estrutura do pavimento eram ligados a um sistema de aquisição de dados gerenciado por um computador. Neste experimento, a pista foi dividida em dois trechos, sendo que o primeiro foi constituído por concreto simples (CCP) e o segundo por concreto com fibras metálicas. Os extensômetros ou *strain gauges* de resistência ($120\ \Omega$) e de sensibilidade de $7 \times 10^{-6}\text{m/m}$, fabricados pela KYOWA, foram instalados a cerca de 20mm da cota inferior da camada de CBUQ, com o cuidado de ficarem imersos no concreto, mas o mais próximo possível da fibra inferior (contato entre CCP e CBUQ) e no centro da faixa de rolamento do carrossel.

Os *strain gauges* usados nesta pesquisa eram próprios para a instalação em concreto ainda no estado pastoso, e os cabos de ligação dos *strain gauges* foram protegidos por dutos metálicos com a finalidade de proteger as ligações elétricas da umidade do solo e de minimizar as interferências eletromagnéticas.

SILVA (2001) também instalou duas células de carga, fabricadas pela empresa KRATOS, com a finalidade de medir os esforços exercidos pela placa de concreto sobre a superfície da camada de CBUQ. Estas células foram dimensionadas para suportar carga de até 5,6tf. Também foram instalados 11 termopares na pista experimental com o objetivo de monitorar a temperatura das placas de *whitetopping*, sendo monitoradas geralmente em intervalos de 10 ou 15 minutos, em ciclos de 24 horas. Neste estudo, observou-se que as temperaturas medidas no pavimento foram maiores que a temperatura média do ar durante todo o período de análise, e que as variações diárias de temperaturas foram maiores na superfície, comparadas com as temperaturas em camadas mais profundas.

A pesquisa para o estudo do comportamento do WTUD nas condições tropicais brasileiras é outra experiência nacional que merece relato. Esta pista de teste instrumentada tem possibilitado o estudo do desempenho desta técnica, assim como tem permitido mensurar as temperaturas e os gradientes térmicos aos quais as placas de concreto cimento Portland (CCP) estão submetidas, relacionando estas grandezas às deformações a que o CCP está sendo submetido, devido ao efeito de empenamento causado pelo gradiente térmico nas placas. Provas de carga, com o intuito de determinar as tensões em que o WTUD está submetido pelo efeito conjugado de carregamento e efeito térmico, potencializam-se com esta pista (PEREIRA *et al*, 2000).

Vários dispositivos foram estudados na pesquisa de WTUD da USP, desde armações em aço até dispositivos em argamassa. Por fim, foi adotado para a fixação dos *strain gauges* um dispositivo composto de duas barras de aço CA-60 B de 4,5mm de diâmetro apoiadas sobre duas pastilhas produzidas com argamassa de cimento e areia. As pastilhas de argamassa eram coladas sobre o filme plástico com adesivo de

contato após a identificação precisa da posição do instrumento. Sobre essas barras o *strain gauge* era colocado e fixado com o uso de arame recozido. Já os PT-100 foram fixados em uma haste de PVC com uma altura pré-definida em projeto, de modo a possuir orifícios onde os instrumentos seriam colados com cola de secagem rápida. Essa haste, após o seu posicionamento na placa, era fixada de modo a não sofrer deslocamentos significativos (BALBO *et al*, 2000).

Foram utilizados dezoito termoresistores do tipo PT-100 para medir a temperatura próxima ao topo e ao fundo das placas, em diferentes posições destas, contemplando centro, borda e canto. Para determinar as deformações impostas ao CCP pelos efeitos de gradiente térmico e de carregamento (nas provas de carga), foram instalados quarenta e oito *strain gauges* de imersão, nas mesmas posições dos PT-100, porém em placas diferentes, medindo as deformações na direção de tráfego e transversalmente a este (PEREIRA *et al*, 2000).

A concretagem foi a etapa mais delicada da instrumentação, uma vez que as chances de se ter um instrumento danificado eram elevadas, devido ao processo de execução (manual). Para diminuir a possibilidade de quebras, o sepultamento dos instrumentos foi executado manualmente. Pequenas quantidades de concreto eram cuidadosamente colocadas e adensadas, envolvendo por completo os instrumentos (BALBO *et al*, 2000).

Em uma pesquisa realizada com o Simulador da UFRGS-DAER/RS, foram instrumentadas seis seções experimentais com revestimentos constituídos por misturas de concreto asfáltico convencional e modificados por polímeros. Porém, destas seis seções, apenas duas foram submetidas aos esforços das cargas do tráfego durante este estudo. Estas seções foram monitoradas com medidores de tensões e deformações, instalados em diferentes pontos. Esses instrumentos serviram para analisar o processo do cálculo de tensões e deformações em estruturas de pavimentos flexíveis e está relatado em detalhes na tese de doutorado de GONÇALVES (2002).

No relato de AZAMBUJA (2004), na pesquisa de desempenho de misturas asfálticas, realizadas com o simulador UFRGS-DAER/RS, a instalação dos sensores de instrumentação foi realizada de maneira cuidadosa para que não houvesse danos a estes, principalmente no momento da compactação das camadas dos recapeamentos. Para tanto, foram feitos sulcos no pavimento existente, de maneira que somente a face sensível de medição ficasse exposta. Foram executados “berços” em cada sulco, com ligante asfáltico, com o objetivo de proteger os sensores de possíveis danos e de evitar o deslocamento dos mesmos com a passagem de equipamentos pesados. A instalação dos sensores pode ser observada na figura 3.6.

Figura 3.6 – Disposição dos sensores na pesquisa com o simulador UFRGS-DAER/RS em pesquisa sobre desempenho de recapeamento asfáltico. Fonte: AZAMBUJA (2004).

No recapeamento em tratamento superficial, mesmo tomando-se as precauções necessárias para a sobrevivência dos instrumentos, não foram obtidas respostas da célula de tensão total para as leituras de tensões verticais, nem do sensor de temperatura. Já no recapeamento em concreto asfáltico, a falha foi verificada no *strain gauge* posicionado transversalmente à direção do deslocamento do rodado após 30.000 ciclos de carga (AZAMBUJA, 2004).

MÜLLER (2005) empregou células de carga no Laboratório de Geotecnia da COPPE no setor de Modelos Físicos, em um painel experimental com área superficial de 6m². Estas células foram instaladas na interface da camada de areia de quartzo, utilizada normalmente nos ensaios de solos reforçados, e que neste estudo funcionou como uma camada adjacente ao revestimento de blocos de concreto, com o colchão de assentamento das peças. Foi realizado um estudo com dois formatos de blocos (retangulares e dentados), com quatro espessuras no formato dentado e duas no formato retangular, e espessuras variadas de blocos. A instrumentação dos ensaios de transmissão de tensões, realizados no painel experimental, foi de grande importância para a obtenção da equivalência estrutural e para a quantificação da distribuição de tensões verticais entre as estruturas testadas.

Algumas Experiências Internacionais

Um programa interessante de instrumentação foi realizado no campo de testes de Nardo, no ano de 1984 na Itália. O programa de testes, inicialmente preocupado com a realização de medidas de deformação em camadas asfálticas, envolveu o trabalho de pesquisadores de dez países, sendo que cada equipe apresentou seus próprios objetivos e utilizou projetos individuais de instrumentos. Durante a construção da camada de concreto asfáltico, para permitir uma alta sobrevivência dos sensores, foram adotados cuidados especiais, como a utilização de compactador não vibratório e a baixa temperatura da mistura asfáltica. A taxa de mortalidade pós-construção ficou em torno de 13 % (foram instalados 200 sensores). O sucesso variou de equipe para equipe, de acordo com a atenção destinada à proteção dos instrumentos. A

maioria desses foi sucumbida pela intrusão de agregados. Mesmo com as precauções adotadas, perdas significativas foram registradas durante a construção, principalmente com os sensores cuja proteção era de alumínio. Devido às precauções de proteção adotadas durante a construção, os testes realizados em Nardo não servem para refletir sobre as condições reais de pavimentos em serviço (compactação e temperatura da mistura) (GONÇALVES, 1999).

Figura 3.7 – Alguns instrumentos utilizados no HVS. Fonte: GONÇALVES (1999).

Ainda com respeito à instrumentação de pavimentos *in situ*, sem dúvida, uma das maiores contribuições foi dada pelo HVS sul-africano na concepção, aplicação e na interpretação dos resultados obtidos. Fazem-se as seguintes medições: deflexões com viga Benkelman própria, deformações permanentes e transientes na superfície e em profundidade (por meio de sensores LVDT a várias profundidades, em furo aberto no pavimento) e perfil superficial transversal em 2m de largura com um perfilômetro automático. A figura 3.7 ilustra os sensores de deslocamento instalados no pavimento antes da atuação do HVS para acompanhar a resposta das várias camadas do pavimento ao longo de carregamentos sucessivos, de várias intensidades e com distâncias transversais (GONÇALVES, 1999).

No que se refere à instrumentação de seções de pavimentos, destaca-se o estudo que está sendo desenvolvido pelo Departamento de Transportes do Estado de Minnesota (Mn/DOT), Estados Unidos, que planejou e implementou um programa de pesquisas denominado Mn/ROAD (Minnesota *Road Research Project*). Este programa representa, sem sombra de dúvidas, um importante passo no campo de experimentos em escala real para ensaios de pavimentos. A instrumentação inclui a instalação de aproximadamente 3000 sensores, os quais permitem monitorar a resposta dos pavimentos, tanto em relação às cargas do tráfego quanto em relação às condições ambientais (temperatura e umidade). Os dados coletados no Mn/ROAD são usados para avaliar os métodos de projeto atualmente disponíveis, bem como para auxiliar no desenvolvimento de novas metodologias para a avaliação de projetos e de pesquisas de estruturas de pavimentos. Além disso, são priorizados os estudos no sentido de desenvolver modelos mecânicos de previsão de desempenho. Nessa pesquisa são feitas observações relativas à variação das respostas, tanto em períodos curtos (ex.: variações sazonais) quanto em períodos longos, dentro do período de projeto (GONÇALVES, 1999).

Existem dois tipos de instrumentos instalados no Mn/ROAD, classificados como estáticos e como dinâmicos. Os instrumentos dinâmicos (*strain gauges*) são usados na obtenção de respostas da estrutura, devido às cargas do tráfego, e permitem

monitorar de forma contínua o pavimento, enquanto que os estáticos são utilizados para parâmetros como a temperatura e o teor de umidade da camada. Os sinais transmitidos pelos sensores são, inicialmente, enviados para um sistema temporário de armazenamento, instalado nas proximidades da pista. Em uma segunda etapa, as informações são transferidas para um computador central instalado do Mn/DOT (GONÇALVES, 1999).

As medidas de deformação na fibra inferior do revestimento asfáltico são realizadas a partir da instalação de *strain gauges* espaçados transversalmente (intervalos de 300 mm) sob as trilhas de roda. O intervalo transversal utilizado é necessário para assegurar que as deformações sejam todas capturadas sob o espaço efetivamente ocupado pelas cargas de roda. Já os sensores estáticos (como os termopares) são lidos em intervalos de quinze minutos (GONÇALVES, 1999).

Na pista teste do WesTrack em Nevada, onde os caminhões não-tripulados são operados por instrumentos, há dispositivos nos veículos que permitem o monitoramento contínuo das informações operacionais, como o consumo de combustíveis e a pressão dos pneus, como relatado por EPPS *et al* (1999). Além destes instrumentos, um dos caminhões é dotado de acelerômetro e de célula de carga, com o intuito de monitorar a dinâmica deste veículo. Nesta pesquisa também são empregados *strain gauges* na face inferior da camada asfáltica de cada seção-teste, além de serem sazonalmente monitoradas as variações de temperatura com a profundidade e o grau de umidade nas camadas de infra-estrutura (base, sub-base e subleito). Ainda há uma seção-teste com termopares instalados em cinco profundidades (EPPS *et al*, 1998).

4. ENSAIOS REALIZADOS: SEÇÕES-TESTE NAS RODOVIAS BRASILEIRAS

4.1. Introdução

Os cinco primeiros estudos realizados com o Simulador de Tráfego Linear Móvel no Brasil foram realizados por entidades que, muitas vezes, não têm qualquer inter-relação e, por falta de uma normatização ou de definição de procedimentos metodológicos mínimos, mostram heterogeneidade nos métodos empregados caso a caso.

Todavia, qualquer emprego de ensaios acelerados em pistas de rodovias em operação inicia-se com a definição de um objetivo a ser estudado, ou seja, com o escopo da pesquisa com vistas à necessidade de determinada entidade, seja ela pública ou privada, bem como com o planejamento preliminar das atividades.

Definidas as questões a serem estudadas, as etapas seguintes passam pela escolha das seções-teste, realização de ensaios de caracterização e execução de pistas experimentais (quando for o caso) para posterior realização dos ensaios acelerados. Devem ser considerados os aspectos técnicos de forma a se ter seções representativas para se atingir os objetivos do programa de pesquisa, quanto questões operacionais, os se referem à infra-estrutura e os que tangem a segurança para os usuários da via e para os técnicos envolvidos na operação do equipamento. Passadas todas as etapas, os ensaios acelerados iniciam-se em cada seção-teste com o posicionamento do equipamento Simulador de Tráfego Linear Móvel, incluindo-se a energização e abastecimento de água e a locação da seção propriamente dita. Segue-se o ajuste da pressão hidráulica para se atingir a carga a ser aplicada no pavimento durante o ensaio acelerado, seja com o auxílio do manômetro do equipamento, seja com a aferição dos valores com uma balança móvel. Há ainda a possibilidade de ajuste no deslocamento transversal do trem de carga, em até um metro. Também podem ser definidos ciclos de espargimento de água para se simular o efeito de chuvas na seção-teste.

A primeira campanha de monitoramento do pavimento é realizada previamente à operação do simulador, atividade que é repetida periodicamente durante os ensaios acelerados. Em geral, em cada uma destas campanhas, são registradas as informações gerais, tais como a data, a hora e o 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 de comprimento, em que a carga opera com velocidade praticamente constante. Em síntese, são realizadas as seguintes medidas ou determinações:

- Registros gerais:
 - Data da avaliação;
 - Horário da avaliação;
 - Número de ciclos de carga;
 - Temperatura do ar;
 - Temperatura do pavimento;
 - Cadastro de Pluviometria.

- Condição do Pavimento:
 - Deflexão sob a ação da carga, com o emprego de viga Benkelman ou viga eletrônica;
 - Flecha em trilha de roda;
 - Condição de superfície, cadastrando-se os defeitos existentes em escala;
 - Condições de segurança através da determinação da resistência à derrapagem, empregando o Pêndulo Britânico e os ensaios de Mancha de Areia para a determinação da macrotextura da pista;
 - Outras observações pertinentes.

Opcionalmente, pode-se realizar também a instrumentação das seções-teste, embora esta prática ainda não seja comum nos estudos com Simulador de Tráfego Linear Móvel em rodovias brasileiras.

Ao final de cada campanha de monitoramento do pavimento são retomados os ciclos de aplicação de carga, conforme ilustrado na figura 4.1.

Figura 4.1 – Simulador de Tráfego Linear Móvel em operação.

Ao final da aplicação de cargas em uma determinada seção-teste, o equipamento é retirado e posicionado na seção seguinte, onde todo o ciclo é reiniciado. Já as informações técnicas coletadas ao longo do processo de monitoramento do pavimento são compiladas de forma a possibilitar as análises e a conclusão dos estudos.

Nas pesquisas realizadas no Brasil até meados de 2006, a modelagem de desempenho com os dados de ciclos acumulados no Simulador de Tráfego Linear Móvel, durante cada período de análise em termos de operações equivalentes ao eixo-padrão

rodoviário, têm empregado o conceito de equivalência de carga em função do tipo de eixo e da carga em operações. Assim, tendo em vista que o ensaio é constituído por um semi-eixo de roda dupla em operação, geralmente tem-se a equivalência com o eixo-padrão rodoviário (eixo simples de rodagem dupla), estabelecida diretamente a partir do fator de equivalência de carga pela equação da USACE, apresentada nos manuais do DNER (1998), a saber:

$$FC = 1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$$

Onde:

FC é o fator de carga determinado de acordo com o modelo do USACE e

P é a carga do eixo simples de rodagem dupla, em toneladas.

Resumidos os principais aspectos empregados nas pesquisas com o Simulador de Tráfego Linear Móvel no Brasil, apresentam-se a seguir detalhes de cada uma das pesquisas realizadas no país até julho de 2006.

4.2. Rodovia RS-122 (DAER/RS)

A primeira pesquisa com o Simulador de Tráfego Linear Móvel no Brasil foi desenvolvida pelo DAER, Brasília Guaíba Obras Públicas e Simular Tecnologia de Pavimentos na RS-122, através de um protocolo de colaboração científica datado de 2003 (PASSOS; JOHNSTON; BIANCHINI, 2006b).

A pesquisa tinha como objetivo colaborar com o desenvolvimento e avanço da tecnologia do asfalto borracha no país, levantando questões importantes a serem avaliadas no projeto, estudar as misturas densas com este ligante, ressaltar a importância da boa técnica construtiva no desempenho de um pavimento e a pesquisa realizada dentro dos órgãos rodoviários em parceria com a iniciativa privada. Neste sentido a pesquisa se propôs a comparar o desempenho de duas pistas experimentais de CBUQ com asfalto convencional e com asfalto borracha, respectivamente. A primeira etapa refere-se à simulação de tráfego, realizada com equipamento simulador de tráfego em ambas as pistas. A segunda etapa da pesquisa, que está sendo desenvolvida, pretende avaliar, com o tráfego real e em verdadeira grandeza, a

capacidade de previsão de desempenho deste tipo de equipamento (PASSOS; JOHNSTON; BIANCHINI, 2006b). A tabela 4.1 traz os dados do local do estudo, bem como o objetivo e as características dos trechos ensaiados.

Tabela 4.1 – Ficha técnica do experimento com simulador de tráfego na RS-122

Ficha técnica do experimento	
Local	RS-122
Interessado/Contratante	DAER/RS
Objetivo	Colaborar com o desenvolvimento e avanço da tecnologia do asfalto borracha no país, através da comparação do desempenho de pistas experimentais de CBUQ com asfalto convencional e com asfalto borracha.
Período	2003
Entidades Participantes	Brasília Guaíba Obras Públicas Simular-Tecnologia de Pavimentos
Número de seções-teste	3
Características das seções	Seções subdimensionadas de restauração dos pavimentos de recapeamento em concreto asfáltico com distintos tipos de ligantes (CAP-20 e asfalto borracha). Em função do excelente resultado da primeira pista executada com ligante convencional, realizou-se nova simulação de tráfego em outra seção como contraprova.
Principais aspectos observados	Os resultados obtidos não confirmaram a hipótese inicial da pesquisa que previa que o CBUQ com asfalto borracha teria desempenho superior ao CBUQ com asfalto convencional. A pista recapeada com CBUQ com asfalto convencional, mesmo após a aplicação de dois milhões de ciclos de carregamento equivalente a um número N de 178 milhões de passagens do eixo padrão de 8,2 t, segundo critérios do Corpo de Engenheiros (USACE), não apresentou trincamento na superfície, com desempenho excelente para uma seção subdimensionada.

Para o estudo foram executados trechos experimentais com 300m de extensão cada, com a espessura do revestimento intencionalmente subdimensionada, sendo adotado um recapeamento de 40mm de CBUQ, de modo a acelerar a obtenção de dados comparativos. Segundo a análise mecânica preliminar, com esta espessura, o critério de ruptura por trincamento seria obtido em cerca de vinte dias de APT, com cargas variáveis entre 4,1 e 6,1tf no semi-eixo padrão com movimento bidirecional, desde que válidos os fatores de equivalência de carga do USACE, o que equivaleria a cerca de um milhão e meio de passagens do eixo padrão de 8,2t (PASSOS; JOHNSTON; BIANCHINI, 2006b).

No projeto e produção das duas misturas foram utilizados agregados provenientes da mesma pedra, localizada na rodovia RS-122 próxima aos trechos experimentais da pesquisa, com a mesma composição granulométrica. Na execução do concreto asfáltico, variou-se apenas o teor de ligante para atender às características Marshall desejáveis. A pedra de rocha basáltica é bastante homogênea e possui instalações de britagem que permitem produzir agregados de boa qualidade, tanto em termos de resistência quanto de forma. A lamelaridade dos agregados passantes na peneira $\frac{3}{4}$ " e na $\frac{3}{8}$ ", segundo a especificação DAER/RS EL 108/01, foi de 22% e 26%, respectivamente. A absorção é de 1,4%, segundo a especificação DAER/RS EL 1006/01 (PASSOS; JOHNSTON; BIANCHINI, 2006a).

O projeto original do CBUQ convencional previa a utilização do CAP-20 proveniente da REFAP, em Canoas/RS, porém a execução dos trechos experimentais coincidiu com o período de transição da produção de CAP 50/60, época na qual houve falta de ligante CAP-20 no estado do Rio Grande do Sul. Desta forma, para a execução dos trechos experimentais da RS-122, utilizou-se o CAP-20 proveniente de Araucária no Paraná, que era o asfalto base utilizado pelo Grupo Greca Asfaltos para a produção de asfalto-borracha (Ecoflex-b) (PASSOS; JOHNSTON; BIANCHINI, 2006a). A tabela 4.2 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização para ambos ligantes. Já a figura 4.2 apresenta as curvas obtidas para o CAP-20 e para o asfalto-borracha (Ecoflex-b).

Tabela 4.2 – Caracterização dos ligantes asfálticos da pesquisa na RS-122

Ensaio	Método	CAP-20	Ecoflex-B
Penetração	DAER/RS-EL 203/01	56 mm	
Viscosidade Sayboll-Furol (135°C)	DAER/RS-EL 201/01	206 SSF	-
Viscosidade Sayboll-Furol (175°C)	DAER/RS-EL 201/01	35 SSF	-
Viscosidade Brookfield* (135°C)	ASTM D 4402	453 cP	4285 cP
Viscosidade Brookfield* (155°C)	ASTM D 4402	205 cP	2324 cP
Viscosidade Brookfield* (175°C)	ASTM D 4402	93 cP	1260 cP
Retorno Elástico	DAER/RS-EL 209/01	9%	62%
Espuma	DAER/RS-EL 211/01	Não espuma	Não espuma
Adesividade agregado / ligante	DAER/RS-EL 112/01	Satisfatória	Satisfatória
% Borracha Incorporada	-	-	15%

Fonte: PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006a).

Figura 4.2 – Curva Viscosidade x Temperatura nos ligantes da RS-122. Fonte: PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006a).

A viscosidade do Ecoflex-b é aproximadamente dez vezes maior do que a do CAP-20, para uma mesma temperatura. Considerando que a viscosidade usual do ligante para o envolvimento do agregado durante a usinagem seja de 85sSF ou aproximadamente 184cP, a temperatura do Ecoflex-b deveria ser superior à recomendada pelo fabricante para obter-se a temperatura com o asfalto borracha a viscosidade usual de mistura (PASSOS; JOHNSTON; BIANCHINI, 2006a).

Durante a produção da mistura controlaram-se as temperaturas dos silos quentes, do ligante e da mistura. Na pista foram controladas as temperaturas de chegada dos caminhões, de espalhamento e de compactação. O teor de ligante e a granulometria dos agregados foram monitorados durante a execução das misturas, através de ensaios de laboratório. Posteriormente verificou-se o grau de compactação do recapeamento que foi superior a 97% (PASSOS; JOHNSTON; BIANCHINI, 2006a).

Tabela 4.3 – Temperaturas de mistura e aplicação do CBUQ na RS-122

Ligante	CAP-20			Ecoflex-b		
	Mistura	Pista	Compactação	Mistura	Pista	Compactação
Laboratório	157°C	-	147°C	177°C	-	167°C
Pista	172°C	166°C	148°C	177°C	170°C	153°C

Fonte: PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006a).

Observando-se as temperaturas utilizadas na mistura, tabela 4.3, percebe-se que a viscosidade de aplicação do Ecoflex-b é maior do que a do CAP-20, resultando numa maior espessura de película. Constata-se uma elevada temperatura do CAP-20 no processo de mistura do CBUQ convencional e uma baixa temperatura de compactação do Ecoflex-b.

As misturas de concreto asfáltico com ambos os ligantes (CAP-20 convencional e com asfalto borracha) foram projetadas através do método Marshall, adotando-se a faixa granulométrica “tipo B” do DAER ES-P 16/91-Concreto Asfáltico, sendo utilizados para obtenção da faixa granulométrica quatro materiais: brita 3/4”, brita 3/8”, pó de pedra e areia. A tabela 4.4 ilustra a faixa granulométrica empregada.

Tabela 4.4 – Faixa granulométrica “tipo B” do DAER e faixa de trabalho na RS-122

Peneira	Mistura	Faixa de Trabalho	Faixa B do DAER
3/4"	100,0	100,0	100
1/2"	90,6	84,6 - 96,6	80 - 100
3/8"	82,7	76,7 - 88,7	70 - 90
Nº4	57,4	51,4 - 63,4	50 - 70
Nº8	37,9	35,0 - 41,9	35 - 50
Nº30	21,2	18,0 - 25,2	18 - 29
Nº50	15,8	13,0 - 19,8	13 - 23
Nº100	10,2	8,0 - 13,2	8 - 16
Nº200	6,6	4,6 - 8,6	4 - 8

Fonte: PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006a).

Os teores obtidos foram de 5,0% para o CBUQ convencional com CAP-20 e 5,3% para o CBUQ com asfalto borracha, admitindo-se em ambos os projetos tolerância de 0,3% na execução da mistura. Dados do projeto de mistura estão apresentados na tabela 4.5 (PASSOS; JOHNSTON; BIANCHINI, 2006b).

Tabela 4.5 – Resumo dos dados do projeto Marshall das misturas da pesquisa na RS-122

Características	CBUQ com CAP 20	CBUQ com Ecoflex-b	DAER-ESP-16/91
Passante #200	6,60%	6,60%	4 a 8%
Massa específica aparente	2,541 kg/dm ³	2,530 kg/dm ³	97% (mínimo)
Estabilidade 60°C	1824 kgf	1576 kgf	800 kgf (mínimo)
Índice de vazios	3,90%	3,70%	3 - 5%
Fluência 60°C	2,4 mm	2,8 mm	2 - 4 mm
RBV	75%	77%	75 - 82%
VAM	16%	16%	16% (mínimo)

Fonte: PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006b).

Foram, ainda, realizados ensaios de módulo de resiliência das misturas em amostras moldadas em laboratório, segundo a norma DNER-ME 133/1994 e a resistência à tração por compressão diametral, segundo a DNER-ME-138/1994, sendo os resultados apresentados na tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Síntese dos ensaios de módulo de resiliência e resistência à tração nas misturas da RS-122

Parâmetro	Parâmetro	CBUQ com CAP-20	CBUQ com Asfalto Borracha
Módulo de resiliência a 25°C	DNER-ME 133/1994	5.340 MPa	3.550 MPa
Resistência à tração por compressão diametral a 25°C	DNER-ME-138/1994	1,5 MPa	1,1 MPa

Fonte: PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006b).

Estes resultados indicam que a mistura com asfalto convencional (CAP-20) apresentou maior rigidez que a com asfalto borracha (50% superior). Observa-se também uma maior resistência à tração, no ensaio de compressão diametral na mistura dosada com CAP-20 convencional, em que pese o fato da resistência à tração

por compressão diametral do CBUQ ser inferior ao usualmente obtido neste tipo de material.

De acordo com PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006b), terminada a etapa de laboratório foram executados trechos experimentais de 300m de extensão, nos quais foi selecionada, a princípio, uma pista de 7m de extensão em cada uma das situações com base no critério de deflexão e condição superficial semelhantes, antes do recapeamento. Para a comprovação dos resultados obtidos na pista com CBUQ com CAP-20, escolheu-se posteriormente uma seção-teste nesta área. Tais pistas receberam as seguintes denominações:

- Convencional 1 (km 28+453);
- Borracha (km 28+606);
- Convencional 2 (km 28+486).

A estrutura do pavimento observada em trincheiras abertas após a finalização do ensaio acelerado em cada uma das pistas, é apresentada na figura 4.3.

Figura 4.3 – Estrutura dos pavimentos nas seções-teste da RS-122. Fonte: PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006b).

Antes e imediatamente após a execução do recapeamento de 40mm de espessura, foram realizadas medidas deflectométricas, de trilha de roda e avaliação da superfície do pavimento ao longo da extensão das pistas. Os dados foram levantados a cada metro, exceto na pista Convencional 2, e estão apresentados na figura 4.4.

Figura 4.4 – Condição inicial dos pavimentos da RS-122, ANTES da execução da pista teste e DEPOIS de sua recuperação, sem a aplicação de cargas com o simulador. Fonte: PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006b).

A trilha de roda para a simulação do tráfego foi definida com uma largura de 0,75m, correspondente à largura da trilha externa existente no pavimento antes do recapeamento. Para permitir o monitoramento da evolução dos defeitos de superfície do pavimento, o simulador foi posicionado de forma que a largura do deslocamento transversal sobre o recapeamento coincidissem exatamente com a trilha de roda externa existente no revestimento antigo, que foi topograficamente amarrada utilizando-se triangulação. Os testes acelerados foram realizados utilizando-se a aplicação de carregamentos bidirecionais progressivos de 4,1 a 9,1 t no semi-eixo, que corresponde a cargas de 8,2 a 18,2 t em eixo simples com rodado duplo (PASSOS; BIANCHINI; JOHNSTON; 2004). A evolução dos parâmetros técnicos ao longo do tempo é descrita e apresentada individualmente na sequência.

Foram adotados o semi-eixo padrão com rodado duplo e pneus 9.00/20. A aplicação da carga foi verificada através de calibrações periódicas incluindo pesagens dinâmicas de todas as cargas (PASSOS; BIANCHINI; JOHNSTON; 2004). Nas seções de teste da RS-122 o equipamento manteve velocidade média de 9,7km/h, aplicando-se em média 16.000 ciclos de carga por dia (PASSOS; JOHNSTON; BIANCHINI, 2006b).

As seções de teste de sete metros de extensão foram monitoradas, diariamente, levantando-se o número de ciclos acumulado, a temperatura inicial e final ao ar em cada turno; as condições climáticas, a temperatura do ar e do pavimento por ocasião das medidas, a trilha de roda a cada metro, a deflexão com Viga Benkelman a cada metro, a bacia de deformação e deflexão máxima com viga eletrônica (em estaca central escolhida e com no mínimo três repetições) e a condição visual da superfície (PASSOS; JOHNSTON; BIANCHINI, 2006b).

A precipitação também foi monitorada através de leituras diárias em um pluviômetro instalado no local. A tabela 4.7 apresenta o resumo do monitoramento das condições climáticas. Observa-se que a seção Convencional 1 foi testada durante os meses de inverno, em condições ambientais distintas das demais. (PASSOS; JOHNSTON; BIANCHINI, 2006b). Tal fato motivou a realização dos ensaios na seção Convencional 2.

Tabela 4.7 – Resumo do monitoramento das condições ambientais nas simulações na RS-122

Controle	Convencional 1	Convencional 2	Borracha
Dias chuvosos	29	16	25
Dias nublados / parcialmente nublados	42	31	36
Dias de sol	99	52	52
Temperatura média do ar (°C)	19	24	22
temperatura média da pista (°C)	19	27	22
Total de chuva (mm)	453,7	594,5	415,5

Fonte: PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006b).

A temperatura máxima obtida nas pistas teste sob o simulador foi de 34° C, em virtude da projeção da sombra do equipamento sobre a pista (PASSOS; JOHNSTON; BIANCHINI, 2006b).

A seguir, de acordo com PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006b), descrevem-se os principais eventos observados em cada uma das seções-teste.

Pista Convencional 1 - CA com CAP-20:

A simulação nesta seção foi encerrada após 2.141.337 ciclos ($N_{USACE}=1,8 \times 10^8$), com cargas crescentes entre 4,1 e 9,1tf no semi-eixo e movimento bidirecional. Com cerca de 1.300.000 ciclos, apareceu uma pequena fissura na superfície que não evoluiu apesar do aumento continuado da carga. Após 1.700.000 de ciclos, sem sinais de ruptura do pavimento, a carga foi canalizada (eliminado o deslocamento transversal do equipamento na trilha de roda), o que resultou no aparecimento de uma trinca longitudinal na borda da trilha de roda, caracterizando a ruptura do pavimento por cisalhamento. A deflexão não apresentou evolução significativa durante os testes, o mesmo ocorrendo com a trilha de roda. Após o corte da pista de teste, observou-se trincamento ascendente sem atingir a superfície. Alguns dos dados deflectométricos obtidos durante a simulação são apresentados na figura 4.5.

Figura 4.5 – Bacias de deflexão ao longo da simulação da Pista Convencional 1 - CA com CAP-20. Fonte: PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006b).

Pista CA com Asfalto-Borracha:

A simulação nesta seção foi encerrada após 1.350.805 ciclos ($N_{USACE}=8 \times 10^7$), com cargas crescentes entre 4,1 e 9,1t em movimento bidirecional (mas não com sequência idêntica a empregada na seção convencional 1) e área trincada correspondente a 50% da área da trilha de roda. O início do fissuramento surgiu com cerca de 740.000 ciclos, observado na figura 4.6. Como se observa nas bacias deflectométricas da figura 4.7, a deflexão, sobretudo para as cargas superiores a 5tf no semi-eixo, apresentou uma evolução significativa, sendo mais acentuada, como

era suposto ocorrer, após o início do trincamento. O afundamento de trilha de roda não apresentou evolução significativa durante os testes.

Figura 4.6 – Cargas, temperaturas e parâmetros funcionais ao longo da simulação da Pista CA com Asfalto-Borracha. Fonte: PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006b).

Figura 4.7 – Bacias de deflexão ao longo da simulação da Pista CA com Asfalto-Borracha. Fonte: PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006b).

Pista Convencional 2 - CA asfalto CAP-20:

Tendo em vista o comportamento bastante diferenciado das pistas anteriormente descritas, e não se comprovando a hipótese inicial da pesquisa, optou-se pelo teste em uma terceira pista, novamente no CBUQ com asfalto convencional. Os dados da simulação desta pista são apresentados nas figuras 4.8 e 4.9. A simulação nesta seção foi encerrada após 1.089.310 ciclos ($N_{USACE} = 3,9 \times 10^7$), com cargas crescentes entre 4,1 e 9,1t com movimentos bidirecionais (mas com sequência diferente da empregada na seção convencional 1) e trilha de roda de 16mm (atingindo o critério de ruptura de 15mm com cerca de 1.000.000 de ciclos). A deflexão apresentou alguma evolução durante os testes, porém menos significativa do que na pista de

asfalto borracha. Após o corte da seção-teste observou-se trincamento ascendente, ainda sem atingir a superfície. Apesar das temperaturas mais elevadas durante a simulação, não se observaram sinais de exsudação do ligante na superfície nem desarranjo do esqueleto pétreo na seção transversal. Também não se observou afundamento nas camadas subjacentes.

Figura 4.8 – Cargas, temperaturas e parâmetros funcionais ao longo da simulação da Pista Convencional 2 - CA com CAP-20. Fonte: PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006b).

Figura 4.9 – Cargas, temperaturas e parâmetros funcionais ao longo da simulação da Pista Convencional 2 - CA com CAP-20. Fonte: PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006b).

Análise da Pesquisa

Com base no exposto, a pesquisa em questão levou à não comprovação da hipótese inicial, o que exigiu estudos laboratoriais complementares de ensaios Marshall e módulo de resiliência que, todavia, também não justificavam os resultados experimentais obtidos (PASSOS; JOHNSTON; BIANCHINI, 2006b).

De acordo com PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006a) foram realizados ensaios adicionais para a determinação do módulo de resiliência, tanto do revestimento antigo existente quanto do revestimento novo. Para este estudo utilizaram-se corpos-de-prova moldados em laboratório e retirados da pista. Em laboratório foram moldados dois conjuntos de corpos-de-prova no teor ótimo de projeto, um conjunto com CAP-20 e outro com Ecoflex-b. Esta moldagem foi realizada segundo o método Marshall (DAER-EL 217/01) em corpos-de-prova com diâmetro de 108mm e compactados com 75 golpes por face. Os agregados foram fracionados, conforme previsto no método, de maneira a garantir a reprodução do projeto. Para a retirada dos corpos-de-prova da pista, utilizou-se uma extratora rotativa. Por tratar-se de uma restauração, as amostras extraídas contemplavam as duas camadas do revestimento. O CBUQ antigo foi retirado por corte, resultando em corpos-de-prova regularizados e constituídos apenas por camada de recapeamento. Discute-se a validade da amostragem, cujo processo de corte poderia causar danos às amostras. Todavia julgou-se esta discussão irrelevante, pois se buscava a comparação dos desempenhos e utilizou-se a média de, no mínimo, quatro corpos-de-prova. A extração foi realizada antes da liberação da pista ao tráfego, tanto para o revestimento com CAP-20 como para o revestimento com Ecoflex-b. Em resumo, foram trabalhadas as seguintes amostras:

- Moldadas em laboratório, com mistura em laboratório, reproduzindo o projeto (3 corpos-de-prova de cada projeto);
- Moldadas no laboratório da obra durante a execução, com a massa usinada (5 corpos-de-prova de cada projeto);
- Da pista do revestimento existente (5 corpos-de-prova);
- Da pista do recapeamento (4 corpos-de-prova de cada projeto).

Determinou-se o módulo de resiliência em cinco diferentes temperaturas, 5°, 15°, 25°, 35° e 45°C, utilizando-se o método do DNER-ME 133/1994. Para cada temperatura os corpos-de-prova foram condicionados em ambiente climatizado durante, no mínimo, 24 horas. Primeiramente as amostras foram ensaiadas a 25 °C e a seguir nas temperaturas de 5°, 15°, 35° e 45°C, respectivamente (PASSOS; JOHNSTON; BIANCHINI, 2006a).

A resistência à tração na compressão diametral foi realizada, segundo a DNER-ME 138/1994, na temperatura de 25°C, após os ensaios de módulo. Em uma amostra moldada em laboratório foi realizado somente o ensaio de resistência à tração a 25°C (PASSOS; JOHNSTON; BIANCHINI, 2006a).

As médias dos resultados de módulo de resiliência (MR), nas várias temperaturas de ensaios obtidos a partir de extrações na pista, moldagem em laboratório e com moldagem de massa usinada, encontram-se na tabela 4.8. Na tabela 4.9 são apresentadas as resistências à tração na compressão diametral a 25°C.

Tabela 4.8 – Resultados médios de MR a diversas temperaturas em amostras de CBUQ da RS-122

Temperatura do ensaio	MR médio (MPa)						
	Pista		Laboratório		Usinado		Pista
	CAP-20	Ecoflex-b	CAP-20	Ecoflex-b	CAP-20	Ecoflex-b	Rev. antigo
5°C	17.170	10.680	21.400	13.330	18.470	14.910	18.710
15°C	10.020	7.450	13.010	7.690	10.740	9.970	12.350
25°C	4.200	3.990	5.340	3.550	4.540	5.300	7.460
35°C	1.440	2.040	1.770	1.410	1.130	2.400	4.360
45°C	540	920	1.070	1.060	470	1.041	2.440

Fonte: PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006a).

Tabela 4.9 – Resistência à tração a 25°C em amostras de CBUQ da RS-122

Resistência a tração (MPa)		
Tipo	CAP-20	Ecoflex-b
Pista	1.44	1.32
Usinado	1.49	1.76
Laboratório	1.50	1.14
Revestimento antigo	1.89	-

Fonte: PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006a).

Para as amostras produzidas em laboratório, observou-se que o CBUQ com CAP-20 era significativamente mais rígido que o CBUQ com Ecoflex-b, para as temperaturas mais baixas, apresentando MR praticamente idênticos para temperaturas superiores a 35°C. Comparando as amostras retiradas da pista com as moldadas em laboratório, observa-se que a variação do módulo entre as temperaturas de 5° e 45°C na mistura com CAP-20 foi aproximadamente 75% superior à obtida para a mistura com Ecoflex-b. Nas amostras usinadas esta variação foi um pouco menor, mas ainda assim, evidencia uma menor susceptibilidade térmica do que o asfalto borracha confere à mistura (PASSOS; JOHNSTON; BIANCHINI, 2006a).

Observando-se os valores MR, referentes às amostras usinadas e moldadas em laboratório, nota-se que o CBUQ com Ecoflex-b apresenta um aumento modular significativo, o que não ocorre com o CBUQ com CAP-20. Estes resultados demonstram um enrijecimento da mistura confeccionada com asfalto borracha, fato não observado quando se empregou o ligante convencional.

No estudo dos ligantes, o Ecoflex-b apresentou maior elástico e viscosidade, cerca de dez vezes superior ao CAP-20. Comparando a viscosidade referente às temperaturas de usinagem, o asfalto borracha foi usinado com viscosidade bem superior a de usinagem do CAP-20, resultando em espessamento da película de ligante sobre os agregados (PASSOS; JOHNSTON; BIANCHINI, 2006a). Assim, deve-se destacar que como o asfalto borracha é mais viscoso do que o convencional e exige maiores temperaturas de usinagem e aplicação, exige, também, cuidados adicionais na

confeção do concreto asfáltico, para não se utilizar uma temperatura excessivamente elevada que pode levar ao superaquecimento do ligante, durante o processo de confecção da mistura com asfalto borracha.

Comparando-se as amostras usinadas com as extraídas da pista, observa-se que os valores do MR da mistura com CAP-20 não sofreram alterações significativas, ao passo que o CBUQ com asfalto borracha apresentou módulos de resiliência um pouco inferiores nas amostras de pista. Contudo, pode-se afirmar que na faixa de temperatura da simulação das pistas borracha e Convencional 2 (aproximadamente 30°C), os valores de MR, em ambas as misturas, são semelhantes (PASSOS; JOHNSTON; BIANCHINI, 2006a).

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral foram rompidos em uma prensa eletrônica os corpos-de-prova extraídos da pista, traçando-se a curva de deslocamento versus carga para determinação da energia interna da mistura (PASSOS; JOHNSTON; BIANCHINI, 2006a). Os resultados indicam a mesma tendência de enrijecimento do concreto asfáltico confeccionado com ligante com borracha em relação aos valores obtidos em amostras moldadas em laboratório.

PASSOS, JOHNSTON, e BIANCHINI (2006a) apud MARTINS e PUGLIERO (2004), dizem que a energia de ligação é parâmetro básico para medir a resistência à fadiga de um material, pois a trinca de fadiga aparece somente depois do consumo desta energia pelo processo de aplicação de cargas. Essa energia de ligação é determinada pela relação entre o trabalho total (W) fornecido ao corpo-de-prova, desde o início do ensaio, e o volume de material existente sob a área carregada do corpo-de-prova. Resumindo, chegaríamos à energia de ligação por unidade de volume (WRO):

$$WRO = W / 1,5hD$$

Onde:

WRO: é a energia de ligação por unidade de volume, em kgf/cm²;

W é o trabalho total, em kgf cm;

H é a altura do corpo-de-prova em cm;

D é o diâmetro do corpo-de-prova em cm e

1,5 é a largura em cm, do friso de carga utilizado no ensaio de resistência à tração (Rt).

Para avaliar a resistência à fadiga da mistura, foram realizados ensaios de compressão diametral a 25°C em corpos-de-prova da mistura com asfalto convencional extraído das pistas Convencional 1 e Convencional 2 (CBUQ com CAP-20) e em corpos-de-prova extraídos da pista Borracha (CBUQ com Ecoflex-b). Este ensaio foi utilizado para determinar a relação entre as energias de ligação existente entre as amostras retiradas das três pistas ensaiadas com o simulador de tráfego linear móvel. Os resultados apresentados na tabela 4.10 indicam que nos corpos-de-prova extraídos das pistas experimentais, a energia de ligação da amostra da pista Borracha foi inferior às pistas com CBUQ com CAP-20. A relação entre a energia interna de ligação do CBUQ da pista Convencional 2 com o Ecoflex-b é igual a 1,57, ou seja, existe um acréscimo de 57% da energia de ligação utilizando o asfalto convencional em relação ao asfalto borracha. Esta mesma relação, comparando-se as amostras ao da pista Convencional 1 é de 30% (PASSOS; JOHNSTON; BIANCHINI, 2006a).

Tabela 4.10 – Energia de ligação inicial nas amostras da RS-122

Amostra	Energia de Ligação (kgf/dm²)
Convencional 1	4,0
Convencional 2	4,8
Borracha	3,0

Fonte: PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006a).

Tendo em vista a deformação permanente por trilha de roda excessiva verificada para a segunda pista, a Convencional 2, quando recebeu tráfego do simulador, o que não ocorreu nas pistas com asfalto Borracha e Convencional 1, buscou-se realizar um ensaio específico para a verificação deste parâmetro, uma vez que os parâmetros Marshall da mistura eram adequados e o projeto não utilizava nenhum critério específico com esta finalidade. Em termos de projeto, tanto o CBUQ com CAP-20

quanto o com Ecoflex-b apresentavam fluências semelhantes e valores absolutamente usuais (2,4 e 2,8mm, respectivamente), mesmo com a utilização de 7% de areia (PASSOS; JOHNSTON; BIANCHINI, 2006a).

Diante do exposto, três blocos de CBUQ retirados da pista (camada total, revestimento antigo mais recapeamento) foram enviados ao Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica, da Universidade de São Paulo, para a realização de um ensaio específico para a verificação da propensão das misturas à deformação permanente. O equipamento utilizado é um simulador de laboratório com concepção do LCPC francês e as amostras são ensaiadas à temperatura de 60°C (AFNOR, 1991).

O ensaio, apresentado na figura 4.10, apontou o comportamento inadequado do CBUQ com CAP-20 para a formação de trilha de roda e mostrou resultados semelhantes nas pistas convencionais 1 e 2. Tanto no ensaio de laboratório como na simulação, a pista Convencional 2 apresentou deformação significativa de trilha de roda. A pista Convencional 1 apresentou bom desempenho no ensaio acelerado em pista e não apresentou deformações permanentes de trilha de roda durante a simulação devido às temperaturas baixas que caracterizaram a simulação em pista, uma média de 19°C. Já na pista Convencional 2 a temperatura média da simulação foi de 27°C. O comportamento da mistura com asfalto borracha foi adequado tanto na simulação em pista como no ensaio de laboratório (PASSOS; JOHNSTON; BIANCHINI, 2006a).

Figura 4.10 – Ensaio de deformação permanente em amostras de CBUQ da RS-122. Fonte: PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006a).

No gráfico apresentado na figura 4.10, observa-se que as amostras do CBUQ convencional apresentam realmente deformação permanente excessiva. A linha pontilhada do gráfico é o limite sugerido pela Comunidade Européia, segundo as diretrizes de dimensionamento européias para tráfego pesado (acima de dois mil veículos comerciais diários com eixo traseiro carregado com no mínimo cinco toneladas), que é o caso desta rodovia. Observa-se que a amostra de CBUQ com asfalto borracha retirada da pista não atingiu o valor limite quando ensaiada em laboratório no simulador LCPC com 30.000 ciclos. Na abertura de trincheiras na pista experimental Convencional 2, observou-se que não há evidências de deformação permanente nas camadas inferiores ao revestimento, nem bombeamento de masticue para a superfície, ao contrário, observa-se a fluência lateral da massa mantendo a distribuição granulométrica homogênea em sua espessura (PASSOS; JOHNSTON; BIANCHINI, 2006a).

Apesar das características desejáveis do ligante e da massa usinada com asfalto borracha, o desempenho desta mistura, em termos de reflexão de trincas, com a simulação do tráfego com o simulador, foi inferior ao do CBUQ com CAP-20. As

amostras retiradas das pistas Convencional 1 e Convencional 2 apresentaram propensão ao trincamento, com parâmetros inadequados ao tipo de tráfego da rodovia. Isto não aconteceu com as amostras da pista borracha. Por outro lado, os corpos-de-prova retirados desta pista apresentaram uma energia interna de ligação maior que o CBUQ com asfalto borracha, ou seja, precisam de mais trabalho (energia) para iniciar o processo de fadiga do material (gerar trincas) (PASSOS; JOHNSTON; BIANCHINI, 2006a).

De acordo com PASSOS, JOHNSTON e BIANCHINI (2006b) os estudos na RS-122 permitiram afirmar que:

- Os ensaios de caracterização dos ligantes, bem como os ensaios de módulo de resiliência em amostras moldadas em laboratório, indicaram que o CBUQ com asfalto borracha teria desempenho superior ao CBUQ com CAP-20.
- As diferenças de comportamento em relação à deformação permanente das pistas Convencional 1 e Convencional 2 deveram-se exclusivamente às diferentes temperaturas médias durante a simulação.
- O excepcional comportamento deste pavimento pode ser explicado pela excelente estrutura, com reforço de argila e camada drenante para reduzir a incidência de umidade na base de brita graduada, aliada à excelente técnica construtiva, que proporcionou uma compactação adequada a todas as camadas do pavimento.
- Neste estudo a utilização do simulador de tráfego foi importante para mostrar as diferenças de desempenho das duas misturas, pois, com o tráfego real, o tempo de resposta seria longo, uma vez que ambos os revestimentos atenderiam com sobra à expectativa de vida do projeto, só que com custos diferenciados.
- Em relação à energia interna inferior, a Greca Asfaltos, fornecedora do ligante e projetista da mistura, justifica pela incorreção do projeto fornecido ao DAER, que indica um teor muito baixo de ligante, se comparado a outros projetos da empresa (novo projeto indicou um teor de aproximadamente 1% superior ao previsto no projeto com CAP-20). Esta “falta de ligante”, justifica

a energia interna inferior e também pode ter influenciado o comportamento desta mistura em relação à deformação permanente.

Deve-se observar novamente que a compactação do CBUQ com asfalto borracha se deu em baixa temperatura e que foram observados baixos valores de resistência à tração por compressão diametral neste material em relação às referências.

Ademais, constata-se que os resultados dos ensaios de módulo de resiliência e de resistência à tração indicam um enrijecimento da mistura com asfalto borracha no processo de usinagem, o que também implica em redução na vida de fadiga da mistura.

Os resultados obtidos não confirmaram a hipótese inicial da pesquisa que previa que o CBUQ com asfalto borracha teria desempenho superior ao CBUQ com asfalto convencional. Nas simulações realizadas nas pistas experimentais da RS-122, o asfalto borracha iniciou o processo de trincamento após cerca de 740 mil ciclos, o equivalente a 21 milhões de passagens do eixo padrão de 8,2t, segundo critérios do USACE, atingindo o critério de ruptura (50% da trilha de roda trincada) com 1,38 milhões de ciclos, equivalente a N de 80 milhões de passagens do eixo padrão. A pista recapeada com CBUQ com asfalto convencional, mesmo após a aplicação de dois milhões de ciclos de carregamento, equivalente a um número N de 178 milhões de passagens do eixo padrão de 8,2 t, segundo critérios do USACE, não apresentou trincamento na superfície. Com os resultados obtidos, ficaram em aberto duas questões: - Por que o asfalto borracha rompeu antes do convencional? e - O que justifica a excepcional resistência deste pavimento? (PASSOS; JOHNSTON; BIANCHINI, 2006b).

4.3. SP-330 (Autovias)

A segunda pesquisa com o Simulador de Tráfego Linear Móvel no Brasil consistiu num experimento realizado na rodovia Anhanguera (SP-330) pela concessionária Autovias, no estado de São Paulo, com o apoio da Agência Reguladora de Serviços

Públicos Delegados de Transporte do Estado de São Paulo (ARTESP). O experimento em questão foi motivado pela crescente utilização, na malha concessionada de São Paulo, de soluções alternativas de reabilitação com tratamentos asfálticos a frio, confeccionadas com ligantes modificados por polímero, cujo comportamento no tempo sob ação do tráfego é de conhecimento restrito no Brasil, além de constituírem soluções técnicas que não são consideradas de forma explícita nos métodos de dimensionamento correntes e, portanto, não dispondo de critérios analíticos para a justificativa e o diagnóstico de sua aplicabilidade (AUTOVIAS, 2004).

De acordo com AUTOVIAS (2003), os objetivos desse estudo foram determinar o desempenho e a durabilidade das novas tecnologias e materiais de pavimentação, através de uma simulação de tráfego em escala real, em um curto espaço de tempo, para selecionar soluções que melhor se adequassem à rodovia e melhorassem as condições de conforto e segurança dos usuários das rodovias concessionadas a Autovias.

As seções-teste foram construídas na pista Norte da rodovia SP-330, entre o km 291+650 e 292+650, no município de Cravinhos-SP. Este segmento foi selecionado por ser um ponto de seguidas ações de manutenção corretiva por parte da concessionária, embora os ensaios de caracterização e monitoramento dos pavimentos não indicassem deficiência na estrutura do pavimento. Foram construídas quatro seções-teste de igual comprimento com soluções de reabilitação constituídas isoladamente ou pela associação das seguintes camadas: tratamento superficial simples ou duplo confeccionado com emulsões asfálticas modificadas por polímeros tipo SBS e microrrevestimento asfáltico a frio confeccionado com emulsões modificadas por polímeros SBS (DNER ES-389/99 atualmente substituída pela norma DNIT 035/2005-ES).

A tabela 4.11 apresenta a ficha técnica deste experimento.

Tabela 4.11 – Ficha técnica do experimento com simulador de tráfego na SP-330

Ficha técnica do experimento	
Local	SP-330
Interessado/Contratante	Autovias
Objetivo	Determinar o desempenho e a durabilidade das novas tecnologias e materiais de pavimentação empregando-se misturas asfálticas a frio, confeccionadas com emulsões com polímero, selecionando soluções que melhor se adequassem à rodovia Anhanguera no segmento concedido a Autovias, de forma a melhorar as condições de conforto e segurança dos usuários.
Período	2003/2004
Entidades Participantes	ARTESP Betunel-Koch Garcia, Monteiro & Cia. Ltda. Simular-Tecnologia de Pavimentos Dynatest Engenharia Ltda.
Número de seções-teste	4 construídas e 2 simuladas
Principais aspectos observados	<p>Com relação aos aspectos estruturais, não se observaram modificações durante o período do teste, ou seja, os valores deflectométricos permaneceram inalterados e muito baixos, ou seja, 25×10^{-2} mm e 38×10^{-2} mm para 4 e 8tf no semi-eixo respectivamente. Deve-se observar que tais estruturas de pavimento podem suportar um tráfego equivalente a $N_{USACE} = 10^8$ operações do eixo padrão, isto é, quatro vezes a solicitação do teste com o Simulador, de acordo com os critérios de deflexão admissível preconizados na norma de dimensionamento de reforço DER-PRO 269/94. Dessa forma, como já esperado, não se manifestaram trincas de natureza estrutural ou por fadiga no revestimento asfáltico (percentual de trincas nulo no período).</p> <p>Com relação aos aspectos funcionais, foram analisadas as seguintes características: deformações na trilha de roda e a irregularidade, o valor de resistência à derrapagem (VDR) e a textura superficial definida no ensaio de mancha de areia. Os gráficos e modelos apresentados na sequência mostram a evolução dos valores VDR e a Espessura de Areia (mm) durante o teste, atingindo os níveis limites preconizados pela ARTESP após o número equivalente de solicitações do eixo padrão $N_{USACE} = 3,2 \times 10^7$, na seção de melhor desempenho, o que corresponde ao tráfego de aproximadamente cinco anos.</p>

As delimitações das seções-teste e suas distintas soluções são apresentadas na tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Identificação das seções-teste na SP-330

Segmento			Solução aplicada
Nº.	km inicial	km final	
1	261,650	261,9000	Tratamento Superficial Duplo com emulsão com polímero
2	261,900	262,150	Tratamento Superficial Duplo com emulsão com polímero seguido da aplicação de microrrevestimento asfáltico a frio com polímero (CAPE SEAL)
3	262,150	262,400	Tratamento Superficial Simples com emulsão com polímero seguido da aplicação de microrrevestimento asfáltico a frio com polímero (CAPE SEAL)
4	262,400	262,650	Tratamento Superficial Simples com emulsão com polímero

Fonte: AUTOVIAS (2003).

O tratamento superficial simples e o duplo foram confeccionados com pedrisco de natureza basáltica oriundo da Pedreira Carrascosa e brita 1 da Pedreira Said, cuja caracterização atende às especificações do DNER, como resumido na tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Caracterização do material pétreo empregado na pesquisa na SP-330

Ensaio	Pedreira Carrascosa	Pedreira Said	Especificado
Adesividade da emulsão (DNER-ME 079/94)	Satisfatória	Satisfatória	Satisfatória
Desgaste Los Angeles (DNER-ME 035/98)	14%	17%	< 40%
Durabilidade em sulfato de sódio (DNER 089/94)	5,6%	-	< 12%
Índice de Forma-Paquímetro (NBR 7809/93)	32%	33%	*

Fonte: AUTOVIAS (2004).

A granulometria dos agregados minerais utilizados no traço proposto se enquadra nas faixas A e B da especificação de serviços DNER-ES 391/99 para o tratamento superficial simples, como demonstrado na tabela 4.14 (AUTOVIAS, 2004).

Tabela 4.14 – Enquadramento granulométrico do TSS empregado na SP-330

Peneira (#)	Amostra N°.		Especificação	
	1	2	A	B
1"				
3/4"	100,0			
1/2"	42,2		100	
3/8"	3,2	100,0	85-100	100
5/16"	1,1	99,6	-	-
1/4"	0,7	-	-	-
N° 4	0,4	8,6	10-30	85-100
N° 10	0,3	0,2	0-10	10-40
N° 200	0,2	0,1	0 - 2	0 - 2

Fonte: AUTOVIAS (2004).

A dosagem do tratamento superficial simples indicou as taxas da tabela 4.15 na aplicação de agregado e da emulsão catiônica RR-2C modificada por polímero fornecida pela Betunel, na confecção do tratamento superficial simples para este experimento.

Tabela 4.15 – Dosagem do TSS com polímero da SP-330

Dosagens	Emulsão l/m ²	Agregados kg/m ²
1º Banho sobre o pavimento	0,7 a 0,8	
1ª Camada de agregado Pedrisco	-	7,0 a 8,0
2º Banho diluído sobre o pedrisco	0,7 a 0,8	

Fonte: AUTOVIAS (2004).

A granulometria dos agregados minerais utilizados no traço proposto se encaixa nas faixas A e B da especificação de serviços DNER-ES 392/99 para tratamento superficial duplo, como demonstrado na tabela 4.16.

Tabela 4.16 – Enquadramento granulométrico do TSD empregado na SP-330

Peneira (#)	Amostra N°.		Especificação	
	1	2	A	B
1"			100	
3/4"	100,0		90-100	
1/2"	42,2		20-55	100
3/8"	3,2	100,0	0-15	85 - 100
5/16"	1,1	99,6	-	-
1/4"	0,7	-	-	-
N° 4	0,4	8,6	0-5	10-30
N° 10	0,3	0,2	-	0 - 10
N° 200	0,2	0,1	0 - 2	0 - 2

Fonte: AUTOVIAS (2004).

A dosagem do tratamento superficial simples indicou as seguintes taxas de aplicação apresentadas na tabela 4.17 para o agregado e emulsão catiônica RR-2C, modificada por polímero fornecido pela Betunel, na confecção do TSS para este experimento.

Tabela 4.17 – Dosagem do TSS com polímero da SP-330

Dosagens	Emulsão l/m ²	Agregados kg/m ²
1º Banho sobre o pavimento	0,9 a 1,0	
1ª Camada de agregado brita 1	-	16,0 a 18,0
2º Banho sobre a brita 1	1,2 a 1,3	
2ª Camada de agregados pedrisco	-	7,0 a 8,0
3º Banho diluído sobre pedrisco	0,8 a 0,9	

Fonte: AUTOVIAS (2004).

Por fim o microrrevestimento com emulsão modificada por polímero foi produzido com agregado pétreo de natureza basáltica das pedreiras Said (pedrisco fino e grosso) e Itamogi (pó de pedra), além de cal hidratada CH-1 e emulsão de ruptura controlada, modificada por polímero RL-1CFlex produzida pela Betunel (AUTOVIAS, 2004).

A caracterização dos agregados finos se deu pelo ensaio com azul de metileno e pelo ensaio de equivalente de areia. O ensaio de azul de metileno realizado indicou 4mg/g, sendo preconizado pela ISSA A-145, com resultados inferiores a 10mg/g. O

equivalente de areia (Método DNER-ME 054/97) de 70% obtido, também supera o mínimo de 60% especificado (AUTOVIAS, 2004).

A granulometria dos agregados minerais utilizados no traço proposto se encaixa na faixa 3 da especificação DNER-ES 389/99 Faixa 3, e é apresentada nas faixas de distribuição granulométrica da tabela 4.18.

Tabela 4.18 – Enquadramento granulométrico do microrrevestimento asfáltico a frio empregado na SP-330

Peneira	Pó de pedra (49%)	Pedrisco fino (25%)	Pedrisco grosso (25%)	Cal CH-1 (1%)	Mistura	Faixa de Trabalho	Faixa 3
3/8"		100,0	100,0		100,0	100-100	100-100
1/4"		99,2	97,6		99,2	94-100	90-100
Nº 4	100,0	91	70,4		90,4	85-90	70-90
Nº 8	79,8	37,6	14,0		53,0	48-58	45-70
Nº 16	60,2	16	5,4		35,8	31-41	28-50
Nº 30	44,2	8,4	4,3		25,8	21-31	19-34
Nº 50	32,3	5,7	3,8		19,2	14-24	12-25
Nº 100	22,8	4,2	2,6	100,0	13,9	11-17	7-18
Nº 200	16,2	3,1	1,9	98,5	10,2	8 - 12	5 - 15

Fonte: AUTOVIAS (2004).

Os resultados dos ensaios de desgaste e de exsudação, conforme preconizado pela ISSA para a dosagem de microrrevestimento asfáltico a frio, indicam um teor ótimo de emulsão asfáltica de 11,2% +/- 0,5%, equivalente e um resíduo asfáltico de 6,94% +/- 0,3%. A tabela 4.19 e a figura 4.11 ilustram os resultados dos ensaios de WTAT e LWT utilizados para a dosagem da mistura.

Tabela 4.19 – Dosagem do microrrevestimento a frio para a SP-330

Teores de Emulsão (%)	Ensaio WTAT desgaste g/m ² (máx. 500 g/m ²)	Ensaio LWT absorção g/m ² (máx. 538 g/m ²)
8	1237	-
10	539	343
12	297	448
14	197	486
16	-	571

Fonte: AUTOVIAS (2004).

Figura 4.11 – Dosagem do microrrevestimento a frio para a SP-330. Fonte: AUTOVIAS (2004).

Para o teor ótimo de emulsão, foram realizados ensaios de coesão que resultaram nos valores de torque da tabela 4.20, empregando-se o aditivo AD LARC L 60 a 0,4% de uma solução aquosa a 10% em peso.

Tabela 4.20 – Ensaios de coesão do microrrevestimento a frio da SP-300

Tempo	Valores
60 minutos	14 kg.cm N
120 minutos	16 kg.cm N
180 minutos	21 kg.cm N

Fonte: AUTOVIAS (2004).

Outra etapa do estudo referiu-se à caracterização do comportamento dos pavimentos dos trechos experimentais a partir dos ensaios não destrutivos (NDT), imediatamente antes e após as intervenções. Neste sentido, foram realizados levantamentos

deflectométricos com o emprego de FWD. A primeira campanha de avaliação se deu no dia 12/08/2003, antes da aplicação dos tratamentos a frio para a recuperação do trecho experimental, e o segundo no dia 31/08/2003, após a aplicação das soluções projetadas (AUTOVIAS, 2003).

Os perfis comparativos com os resultados do levantamento obtidos são apresentados nas figuras 4.12 e 4.13, para ambas as faixas de tráfego (faixa interna, de tráfego leve, denominada faixa 1 e a faixa externa, de tráfego pesado, denominada de faixa 2).

Figura 4.12 – Comparativo deflectométrico antes e após a obra na faixa interna da SP-330. Fonte: AUTOVIAS (2003).

Figura 4.13 – Comparativo deflectométrico antes e após a obra na faixa externa da SP-330. Fonte: AUTOVIAS (2003).

A caracterização da estrutura do pavimento existente em cada um dos segmentos experimentais em questão, antes da intervenção, foi analisada pela equipe da Autovias e podem ser observadas na figura 4.14:

Figura 4.14 – Estrutura do pavimento na SP-330. Fonte: AUTOVIAS (2003).

De posse dos dados da avaliação deflectométrica associados às informações relativas à estrutura do pavimento existente, procedeu-se a retroanálise das bacias de deflexão para determinação dos módulos de resiliência das camadas que constituem a estrutura, empregando-se o programa computacional Elsym5, baseado na teoria da elasticidade. Os resultados obtidos no estudo da AUTOVIAS (2003) são apresentados nas figuras 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18.

Figura 4.15 – Retroanálise da seção-teste 1 da SP-330

Figura 4.16 – Retroanálise da seção-teste 2 da SP-330

Figura 4.17 – Retroanálise da seção-teste 3 da SP-330

Figura 4.18 – Retroanálise da seção-teste 4 da SP-330

A medição da irregularidade ou do quociente de irregularidade foi executada em 06 de agosto de 2003, com um medidor tipo resposta instalado em um veículo que, ao deslocar-se sobre a via, fornece uma série de leituras que representam o somatório dos deslocamentos verticais retificados (isto é, em valores absolutos) do eixo traseiro do veículo em relação a sua carroçaria. Nova avaliação foi realizada no dia 15/12/2003, após a execução do trecho experimental. Os perfis com os resultados obtidos nesses levantamentos são apresentados nas figuras 4.19 e 4.20 (AUTOVIAS, 2003).

Figura 4.19 – Irregularidade da faixa interna da SP-330 antes e logo após a obra.
Fonte: AUTOVIAS (2003).

Figura 4.20 – Irregularidade da faixa externa da SP-330 antes e logo após a obra.
Fonte: AUTOVIAS (2003).

O inventário de superfície foi realizado em duas etapas, antes e depois das obras, seguindo-se o método do Levantamento Visual Contínuo, para a determinação dos

índices que caracterizam o estágio de deterioração superficial, sendo os resultados apresentados na figura 4.21.

Figura 4.21 – Condição de superfície antes e logo após a obra na SP-330. Fonte: AUTOVIAS (2003).

Dentre as quatro alternativas de reabilitação executadas no trecho, foram testados os segmentos constituídos por tratamento superficial simples com polímero (TSSpol) com microrrevestimento a frio (MICRO) sobrejacente (seção 3) e a de tratamento superficial simples com polímero (seção 4).

A opção pela simulação destas duas seções se deu por critérios distintos. A seção 3 constitui, teoricamente, uma melhoria da solução usualmente empregada no trecho (aplicação de microrrevestimento asfáltico a frio) na tentativa de se incrementar a vida útil da solução de restauração. A seção 4 consiste em uma solução mais delgada e de menor custo que ainda não havia sido testada na rodovia.

Seção 3 - Tratamento superficial simples com polímero sobreposto por uma camada de microrrevestimento asfáltico a frio

O teste na seção 3, segmento com tratamento superficial simples com polímero sobreposto por uma camada de microrrevestimento asfáltico a frio, foi realizado com 500.000 aplicações do semi-eixo com carga constante de 8tf em movimento

bidirecional. O deslocamento transversal durante os testes correspondeu a uma relação operação por cobertura de 1,25 (AUTOVIAS, 2004). Dessa forma, reproduziu-se o equivalente a $3,2 \times 10^7$ operações do eixo padrão rodoviário calculado com os fatores de carga do USACE. O número N de $3,2 \times 10^7$ representa o tráfego solicitante no período de quase cinco anos no referido segmento da rodovia Anhanguera.

Durante a realização do teste procedeu-se ao monitoramento periódico das condições estruturais e funcionais do pavimento, com medições diárias da deflexão do pavimento, das deformações na trilha de roda, das condições de atrito e da textura superficial (AUTOVIAS, 2004).

De acordo com AUTOVIAS (2004), o monitoramento do pavimento desta seção durante os ensaios acelerados indicou os seguintes resultados:

- Com relação aos aspectos estruturais, não se observaram modificações durante o período do teste, ou seja, os valores deflectométricos permaneceram inalterados e muito baixos, ou seja, 25×10^{-2} mm e 38×10^{-2} mm para 4 e 8tf no semi-eixo, respectivamente. Cumpre ressaltar que tais estruturas de pavimento podem suportar um tráfego equivalente a 10^8 operações do eixo padrão (pelo método USACE), isto é, quatro vezes a solicitação do teste com o Simulador, de acordo com os critérios de deflexões admissíveis preconizados nas normas de dimensionamento vigentes no Brasil. Dessa forma, não se manifestaram trincas de natureza estrutural ou por fadiga no revestimento asfáltico (percentual de trincas visíveis a olho nu igual a zero no período).
- Com relação aos aspectos funcionais, foram analisadas as seguintes características: deformações na trilha de roda e a irregularidade, o valor da resistência à derrapagem (VDR) através do Pêndulo Britânico e a textura superficial definida no ensaio de mancha de areia (espessura de areia). As figuras 4.22 e 4.23 mostram a evolução dos valores VDR e a Espessura de Areia (mm) durante o ensaio acelerado, atingindo os níveis limites preconizados pela ARTESP, de no mínimo 47 para o VDR e de no máximo

1,20mm para a altura de mancha de areia, após o número equivalente de solicitações do eixo padrão de $3,2 \times 10^7$, o que corresponde ao tráfego de aproximadamente cinco anos neste segmento de rodovia.

Figura 4.22 – Evolução da microtextura (VRD) durante o ensaio acelerado na seção de TSS com polímero e microrrevestimento na SP-330. Fonte: AUTOVIAS (2004).

Figura 4.23 – Evolução da macrotextura (espessura de areia) durante o ensaio acelerado na seção de TSS com polímero e microrrevestimento na SP-330. Fonte: AUTOVIAS (2004).

Os resultados referentes às deformações nas trilhas de roda e, por associação, ao *International Roughness Index* (IRI), não se modificaram durante o teste (AUTOVIAS, 2004).

De acordo com AUTOVIAS (2004), concluiu-se a acerca da aplicabilidade técnica da solução de reabilitação dos pavimentos da rodovia Anhanguera, constituída por Tratamento Superficial Simples com polímero e microrrevestimento a frio sobrejacente. A expectativa de desempenho desse tipo de reabilitação corresponde às seguintes referências:

- Trincamento: vida útil > 5 anos ($N_{USACE} > 3,2 \times 10^7$);
- Irregularidade: vida útil > 5 anos ($N_{USACE} > 3,2 \times 10^7$);
- Atrito: vida útil = 5 anos ($N_{USACE} = 3,2 \times 10^7$);
- Textura: vida útil = 5 anos ($N_{USACE} = 3,2 \times 10^7$).

Pode-se, ainda, estabelecer como referencial, a extensão dessa aplicabilidade técnica para as seguintes condições: número N pelo método do USACE limitado em 4×10^7 (USACE) operações, deflexões máximas inferiores a 50×10^{-2} mm e curvatura da bacia deflectométrica, expressa pela diferença entre as leituras sob a carga e a 450mm da mesma, num pavimento com revestimento asfáltico sobre base cimentada totalizando no mínimo 250mm, inferior a 35×10^{-2} mm (AUTOVIAS, 2004).

Seção 4 - Tratamento superficial simples com polímero

O teste na seção 4, segmento com tratamento superficial simples com polímero consistiu em 267.454 aplicações do semi-eixo com carga constante de 8tf com movimento bidirecional. O deslocamento transversal durante os testes correspondeu a uma relação operação por cobertura de 1,25. Dessa forma, reproduziu-se o equivalente a $1,6 \times 10^7$ operações do eixo padrão rodoviário calculado com os fatores de carga do USACE, ou, aproximadamente, dois anos e meio de tráfego no referido segmento da rodovia Anhanguera, período em que as condições de microtextura

passaram da condição adequada para a condição inaceitável, de acordo com os critérios da ARTESP.

Durante a realização do teste procedeu-se ao monitoramento periódico das condições estruturais e funcionais do pavimento, com medições diárias da deflexão do pavimento, das deformações na trilha de roda, das condições de atrito e da textura superficial, sendo obtidos os seguintes resultados:

- Com relação aos aspectos estruturais, não se observaram modificações durante o período do teste, ou seja, os valores deflectométricos permaneceram inalterados e muito baixos, ou seja, 25×10^{-2} mm e $37,4 \times 10^{-2}$ mm para 4 e 8tf no semi-eixo, respectivamente. Cumpre ressaltar que tais estruturas de pavimento podem suportar um tráfego equivalente a 10^8 operações do eixo padrão (pelo método USACE), isto é, quatro vezes a solicitação do teste com o Simulador, de acordo com os critérios de deflexões admissíveis preconizados nas normas de dimensionamento vigentes no País. Dessa forma, como já esperado e obtido no segmento 3, não se manifestaram trincas de natureza estrutural ou por fadiga no revestimento asfáltico (porcentagem de trincas visíveis a olho nu igual a zero no período).
- Com relação aos aspectos funcionais, se observa na figura 4.24 que a evolução da flecha medida sob a trilha de roda apresentou ao final dos ciclos um valor próximo ao limite máximo de 7mm preconizado pela ARTESP. Entretanto, deve-se observar que a condição inicial do trecho, após a execução do TSS com polímero, era de flecha em trilha de roda da ordem de 5mm. Além disto, aos 198.307 ciclos (equivalente a um número N_{USACE} de 1,8 anos para o segmento), foram observados alguns poucos pontos de exsudação na superfície, totalizando 2% da área da seção-teste, que não evoluíram a partir de então. Já aos 220.300 ciclos (equivalente a um número N_{USACE} de dois anos para o segmento) alguns agregados da superfície se quebraram.

Figura 4.24 – Evolução da flecha em trilha de roda no ensaio acelerado na seção de TSS com polímero na SP-330.

- Os aspectos de segurança, expressos pelo VDR e a textura superficial definida no ensaio de mancha de areia são apresentados nas figuras 4.25 e 4.26. Observa-se que, ao final da simulação de tráfego, os valores de VRD atingiram o limite preconizado pela ARTESP de no mínimo 47. Já a macrotextura foi sempre superior ao máximo preconizado pela agência (1,20mm de espessura de areia).

Figura 4.25 – Evolução da microtextura (VRD) no ensaio acelerado na seção de TSS com polímero na SP-330.

Figura 4.26 – Evolução da macrotextura (espessura de areia) no ensaio acelerado na seção de TSS com polímero na SP-330.

Concluiu-se que existe a necessidade de adaptação antes da aplicação de Tratamento Superficial Simples com polímero neste segmento da rodovia SP-330, visto que o

material não se mostrou adequado em termos de macrotextura desde o início da simulação de tráfego, com macrotextura excessivamente grossa e microtextura classificada como lisa, após tráfego equivalente a $1,6 \times 10^7$ operações do eixo padrão rodoviário pelo método da USACE.

4.4. BR-116/RJ (CRT)

A Concessionária Rio Teresópolis (CRT), por contrato, deve manter o pavimento em condições de serventia adequada para manter o conforto e a segurança dos usuários. No entanto, o trecho entre os quilômetros 104 e 122, em ambos os sentidos apresentavam em 2004 diversos defeitos, de severidade variável, na faixa de tráfego pesado (faixa da direita). No ano de 2000, foi realizada a recuperação de alguns subtrechos entre o km 118 e o km 122 na faixa da direita sentido Norte, com fresagem de 70mm e recomposição da mesma espessura em concreto asfáltico, que apresentou problemas de fadiga em menos de dois anos de sua restauração. Em 2000, esta Concessionária apresentou à Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) uma proposta de restauração do pavimento, entre os quilômetros 104 e 122, nas faixas da direita em ambos os sentidos, que consta de uma remoção de 250mm da estrutura existente e a construção de um pavimento semi-rígido com 150mm de CCR, como camada de base e mais 100mm de CBUQ, como camada de rolamento. Já o Plano de Exploração da Rodovia propõe para o trecho a fresagem de 50mm e reposição de 50mm de CBUQ (FRITZEN, 2005b).

Com o objetivo de propor uma solução para recuperar este trecho (km 104 a 122), a CRT fez um convênio com a Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE-UFRJ), assinado em 26 de outubro de 2004, que estabeleceu uma pesquisa com o planejamento do experimento como base para o acompanhamento dos testes e interpretação dos resultados (FRITZEN, 2005b).

O estudo proposto fixou então os tipos de soluções a serem estudadas, partindo das proposições citadas e acrescentando duas alternativas que consistiram em substituir

os 50mm de CBUQ convencional na recomposição da fresagem por mistura empregando asfalto com borracha e a outra mantendo o CBUQ convencional, mas introduzindo-se uma geogrelha interposta entre a nova camada e a antiga trincada. A ficha técnica dessa pesquisa é apresentada na tabela 4.21.

Tabela 4.21 – Ficha técnica do experimento com simulador de tráfego na BR-116/RJ

Ficha técnica do experimento	
Local	BR-116/RJ
Interessado/Contratante	CRT
Objetivo	Estudar alternativas para a restauração dos pavimentos da BR-116/RJ no segmento do km 104 ao km 122
Período	2004
Entidades Participantes	COPPE ANTT ABCP BR ASFALTOS HUESKER
Número de seções-teste	4
Principais aspectos observados	Os resultados foram adequados às solicitações de tráfego somente no segmento em que se realizou a reconstrução da base com concreto rolado. Nas demais seções, recuperadas por fresagem e recomposição com distintos materiais e empregando geossintético, observaram-se resultados semelhantes. Nas seções de fresagem e recomposição, o trincamento refletiu de forma ascendente no asfalto convencional e no asfalto borracha, mas na seção em que se aplicou o geossintético as trincas ocorreram a partir do topo da camada asfáltica.

Seleção do Local

A escolha do local se deu pelo fato do pavimento existente apresentar condições estruturais e de rolamento representativas do trecho total de interesse. Particularmente, optou-se por um segmento homogêneo com extensão adequada em tangente, com altas deflexões máximas, conceito péssimo no Índice de Gravidade Global (IGG) definido pela norma DNIT 006/2003-PRO, e por estar situado próximo à Usina de CBUQ da CRT e da PREMAG (Fabrica de Pré-Moldados) para o apoio de energia e água às instalações do simulador (FRITZEN, 2005b).

No estudo foram analisadas as informações fornecidas pela CRT, tais como: deflexões com viga Benkelman, níveis de serventia do pavimento, volume de tráfego e dados dos poços de sondagem, além de realização de visitas ao trecho em estudo. O ensaio acelerado com simulador na BR-116/RJ foi localizado entre os quilômetros 111 e 112, onde foram construídas quatro seções-teste de 50 m de extensão cada na faixa da direita sentido Norte (FRITZEN, 2005a).

Seções-teste

As quatro soluções testadas neste experimento realizado na BR-116/RJ encontram-se resumidas a seguir:

- 1º trecho experimental: solução de referência (convencional)
 - Fresagem de 50mm do revestimento existente;
 - Pintura de ligação;
 - Recomposição em CBUQ na faixa B utilizando CAP-40 como ligante asfáltico.
- 2º trecho experimental: solução com Geogrelha
 - Fresagem de 70mm do revestimento existente;
 - Pintura de ligação;
 - Execução de camada de reperfilagem de 10mm;
 - Pintura de ligação;
 - Aplicação de geogrelha;

- Execução de CBUQ na faixa B utilizando CAP-40 como ligante asfáltico, totalizando 60mm.
- 3º trecho experimental: Solução com asfalto-borracha
 - Fresagem de 60mm do revestimento existente;
 - Pintura de ligação;
 - Recomposição em CBUQ utilizando asfalto-borracha como ligante em uma mistura de granulometria descontínua do tipo *Gap Graded* (faixa da Caltrans).
- 4º trecho experimental: Reconstrução com concreto rolado e concreto asfáltico
 - Demolição de 255mm do pavimento existente (revestimento e base);
 - Execução de base de CCR com 185mm;
 - Imprimação;
 - Pintura de ligação;
 - Execução de 70mm de CBUQ na faixa B utilizando CAP-40 como ligante asfáltico.

A dosagem das misturas asfálticas convencionais empregadas na pesquisa se deu no laboratório da COPPE/UFRJ, utilizando-se o ligante do tipo CAP-40, caracterizado na tabela 4.22 com 0,5% de aditivo melhorador de adesividade, enquadrando-se granulometricamente a mistura na faixa “B” das especificações do DNER. Para tanto, foram executados os ensaios de desgaste dos agregados (DNER-ME 035/98), adesividade do ligante betuminoso. (DNER-ME 078/94), densidade dos agregados (DNER-ME 081/94), (DNER-ME 084/64), dosagem através do método Marshall (DNER-ME 043/64), módulo de resiliência (DNER-ME 133/94), resistência à tração (DNER-ME 138/94) e fadiga. Os ensaios de caracterização da mistura asfáltica foram repetidos em corpos-de-prova extraídos das seções-teste após a simulação de tráfego.

Tabela 4.22 – Características do CAP-40 empregado na BR-116/RJ.

CARACTERÍSTICA	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADO	UNIDADE
Viscosidade Absoluta a 60°C	4000 a 8000	4290	p
Viscosidade Saybolt Furol a 135°C	170 (mínimo)	266	s
Viscosidade Saybolt Furol a 177°C	40 a 150	49	s
ECA- Variação em Massa	1,0 máxima	0,16	%
ECA- Relação de Viscosidade	4,0 (máxima)	1,8	
ECA- Dutilidade a 25°C	10 (mínimo)	46	cm
Índice de Suscetibilidade Térmica	-1,5 a 1,0	-1,4	
Penetração	30 (mínimo)	36	0,1 mm
Ponto de Fulgor	235 (mínimo)	>320	grau C
Solubilidade no Tricloroetileno	99,5 (mínimo)	100	% massa
Densidade Relativa a 25/25°C	Anotar	1,06	
Aquecimento a 175°C	Não Espuma	Não Espuma	
Certificado de Ensaio - Petróleo Brasileiro S.A Petrobrás N° 3137-04 G			

Fonte: FRITZEN (2005b).

Com base nos resultados dos ensaios realizados em laboratório, foi selecionado o teor de projeto de asfalto pelo método Marshall com energia de 75 golpes nas duas faces do corpo-de-prova, correspondente a porcentagem de 5,5% de ligante e 4,63% de volume de vazios. Foram definidos os percentuais para a composição de agregados utilizados nos subtrechos experimentais 1, 2 e 4 como sendo 26% de Brita 1, 26% de Brita 0 e 48% de Pó de Pedra (FRITZEN, 2005b).

As misturas asfálticas apresentaram em média 1,71 MPa de resistência à tração e os módulos de resiliência de 6.000 MPa em média.

No trecho 3 utilizou-se uma mistura com granulometria descontínua conhecida como *gap graded* obedecendo a uma faixa do Caltrans com asfalto borracha produzido pela BR Distribuidora. O projeto da mistura *gap graded* com asfalto borracha foi elaborado para uma outra obra próxima e fornecido pela distribuidora. A granulometria mais aberta em relação à utilizada nos outros subtrechos experimentais resultou nos seguintes percentuais para a composição de agregados: 10% de Brita 1; 66% de Brita 0, 22% de Pó de Pedra e 2% de Cal Hidratada como filer.

Nas tabelas 4.23 e 4.24 apresentam-se as características do ligante e os resultados da caracterização da mistura asfáltica. Os agregados utilizados são oriundos da pedreira

Sepetiba e os corpos-de-prova, para a determinação do teor de projeto, foram moldados com energia de 75 golpes por face. O ligante utilizado na mistura asfáltica aplicada no terceiro trecho foi do tipo Capflex-B (com 20% de borracha) e o teor foi de 6% de ligante (FRITZEN, 2005b).

Tabela 4.23 – Características do Ligante Asfáltico utilizado no terceiro trecho experimental da BR-116/RJ.

CARACTERIZAÇÃO CAPFLEX-B		
Ensaio	Resultado	Método
Penetração (100g, 25°C, 5s) dmm	50	ASTM D-5
Ponto de amolecimento °C	59	ASTM D-36
Viscosidade Brookfield, CP (6,0 rpm, spindle 31) a 135°C	>5000	ASTM D-4402
Viscosidade Brookfield, CP (6,0 rpm, spindle 31) a 150°C	>5000	ASTM D-4402
Viscosidade Brookfield, CP (6,0 rpm, spindle 31) a 175°C	4000	ASTM D-4402
Recuperação Elástica (25°C) % no dutilômetro	62	DNER 382/99
Densidade	1,03	DNER-ME 193/96

Fonte: FRITZEN (2005b).

Tabela 4.24 – Características Marshall da Mistura Asfáltica *Gap Grade* com Borracha fornecida pela BR Distribuidora para a obra na BR-116/RJ.

Ensaio	Resultados	Unidade	Especificação empregada na obra
CAPFLEX-B	6	%	-
Densidade Teórica	2,482	g/cm ³	-
Vazios Totais	5,7	%	4 a 6
vazios Cheios Betume	13,7	%	-
Vazios Agregados Mineral	19,4	%	> 15
Relação Betume Vazios	70,6	%	62 a 78
estabilidade	788	kgf	> 600
Fluência 1/100	14	polegadas	10 a 18
Densidade Aparente	2,34	g/cm ³	-
Temperatura do Ligante: 155°C a 180°C			
Temperatura da Composição: 155°C a 180°C			
Temperatura de Compactação em Laboratório: 165°C			

Fonte: FRITZEN (2005b).

Execução e Instrumentação

Esta etapa consistiu na construção dos trechos experimentais entre os km 111 e 112 da pista Norte da BR-116/RJ, mais precisamente entre as estacas 1649 e 1659, sentido Rio - Teresópolis. A idéia inicial para a construção dos três primeiros trechos experimentais era fresar e recompor 50mm do revestimento, com o objetivo de se fazer uma comparação entre as soluções diferentes determinadas pela equipe de pesquisadores. Porém, no momento da fresagem da camada de revestimento, observou-se que em alguns locais o revestimento fresado continha geotêxtil do tipo Bidim. Desta forma, foi necessário uma fresagem adicional de 10mm do revestimento para a completa remoção do geotêxtil existente totalizando 60mm de espessura para todos os segmentos, exceto no quarto trecho no qual a solução adotada diferiu, conceitualmente, das demais. Neste último trecho, foi removida toda a camada de revestimento e mais 120mm de macadame betuminoso para a construção de uma nova base de concreto compactado a rolo e um novo revestimento (FRITZEN, 2005b).

Ainda nesta etapa, foi possível realizar, também, ensaios deflectométricos sobre o pavimento fresado, a fim de comparar as deflexões da camada de revestimento antigo com as deflexões do pavimento fresado, o que está ilustrado na figura 4.27.

Figura 4.27 – Deflexões anteriores a fresagem e deflexões sobre o pavimento fresado no segmento experimental da BR-116/RJ. Fonte: FRITZEN (2005b).

Os levantamentos deflectométricos foram realizados pela manhã, tanto no revestimento antigo quanto no revestimento fresado. Assim, o aumento das deflexões medidas sobre o revestimento fresado deve-se ao elevado grau de trincamento existente na camada remanescente de revestimento fresado e a redução da espessura total da camada asfáltica com a conseqüente perda de resistência. Observa-se na figura 4.27 que nas estacas 1658 e 1659 as deflexões máximas medidas no revestimento fresado são maiores que nas demais, o que decorre da maior remoção executada neste local para o assentamento da camada de CCR (FRITZEN, 2005b).

As seções foram instrumentadas com células de pressão total, fabricadas na COPPE com dimensões de 40cm x 40cm. Esse tipo de célula foi instalado no primeiro e no segundo trecho experimental, conforme mostrado na figura 4.28. Estas, porém, não apresentaram desempenho satisfatório, verificando-se na prática que as células tipo “pastel” não foram apropriadas para as cargas dinâmicas repetidas.

Figura 4.28 – Célula de Pressão Total (Tipo Pastel) 40 cm x 40 cm.
Fonte: FRITZEN (2005b).

A seguir, foi construído outro tipo de célula de pressão total, desta vez com 15cm de diâmetro, que apresentou resultados coerentes, mas foram instaladas, apenas, no quarto trecho experimental, posicionadas abaixo da camada do CCR e entre esta e o CBUQ, conforme mostrado na figura 4.29.

Figura 4.29 – Célula de Pressão Total de 15 cm de diâmetro. Fonte: FRITZEN (2005b).

As seções-teste instrumentadas tiveram o seu desempenho monitorado durante a realização dos ensaios acelerados *in situ* com o simulador de tráfego móvel. Apresentam-se alguns detalhes da execução dos quatro trechos experimentais em questão.

– Trecho 1:

Conforme o Plano de Exploração da Rodovia Rio – Teresópolis – Além Paraíba, a solução proposta para este segmento seria fresar 50mm do revestimento e recompô-lo com CBUQ. Portanto para o primeiro trecho experimental localizado entre as estacas 1649 e 1651 + 10m na BR-116/RJ, sentido Norte, esta foi a solução escolhida para o estudo com a utilização do simulador de tráfego móvel. O trecho foi

construído com 60mm de espessura de CBUQ novo, faixa B do DNER e possui 50m de comprimento por 3,6m de largura (FRITZEN, 2005b).

– Trecho 2:

O segundo trecho experimental, localizado entre as estacas 1651 + 10m e a 1654, foi construído com a aplicação de uma geogrelha (Hatelit C 40/17), tendo sido fresados 70mm do revestimento antigo para acomodar uma camada de reperfilagem de espessura média de 10mm, para regularizar a camada fresada melhorando a trabalhabilidade do Hatelit. Em seguida, foi feita a execução de 60mm de CBUQ.

Dentre os cuidados recomendados por MONTESTRUQUE (2002) para a colocação do Hatelit, ressalta-se o emprego de emulsão do tipo RR-1C aplicada a uma taxa de 1,0l/m². A instalação do Hatelit C foi feita com a ajuda de funcionários da CRT, sendo desenrolado diretamente no local. Ele foi aplicado no trecho experimental, cortado na largura de 3,6m. O corte do comprimento também foi feito no local, após a conclusão do trecho. Feita a instalação, foi necessário o espalhamento manual de uma pequena quantidade de massa asfáltica antes da entrada da vibroacabadora e dos caminhões. A camada de CBUQ da restauração ficou com aproximadamente 60mm de espessura. A mistura asfáltica utilizada para este trecho foi igual ao do primeiro trecho (FRITZEN, 2005b).

Após a construção do trecho, foram abertas três janelas para a colocação da instrumentação. Neste trecho experimental foram instaladas duas células de pressão total, dois *strain gauges* (um vertical e outro horizontal), ambos abaixo da camada do Hatelit, e quatro termopares em diferentes profundidades. Após a instalação dos instrumentos foi aplicada massa asfáltica com a mesma característica da existente na seção, compactada com rolos chapa e pneumático (FRITZEN, 2005b).

– Trecho 3:

Aqui, pode-se observar como peculiaridade desta pesquisa, o processo de demarcação de trincas antes da execução da mistura asfáltica de asfalto borracha, realizada em papel em escala real, como pode ser visto na figura 4.30. Já a figura 4.31 mostra a instalação da instrumentação da pista.

Figura 4.30 – Mapeamento da superfície fresada, antes do recapeamento, realizado em papel, em verdadeira grandeza. Fonte: FRITZEN (2005b).

Figura 4.31 – Instrumentação do trecho 3 da BR-116/RJ. Fonte: FRITZEN (2005b).

– Trecho 4:

O quarto trecho experimental está localizado entre as estacas 1656 + 10m e a 1659. É composto por uma camada de CCR e uma camada de CBUQ. O CCR foi fornecido e dosado pela ABCP, empresa participante dos estudos realizados na BR-116/RJ, e fabricado pela usina de concreto LAFARGE (FRITZEN, 2005b).

De acordo com FRITZEN (2005b) o projeto de mistura do CCR, que resultou na composição do material da tabela 4.25, buscou atender as seguintes características:

- Resistência característica à tração na flexão ($f_{ctM,k}$), medida aos 28 dias, maior ou igual a 1,5MPa;
- Resistência característica à compressão simples (f_{ck}), medida aos 7 dias, maior ou igual a 5,0MPa;
- Módulo de elasticidade estático (E) de 12.000 MPa;
- Consumo de cimento entre 90kg/m³ (valor preferível) e 120kg/m³, sendo este o valor máximo recomendado na dosagem;
- Agregado graúdo composto de brita 1 e brita 2;
- Dimensão máxima do agregado graúdo igual a 32mm;
- Grau de compactação (GC) mínimo de 100%, considerando a energia normal de compactação.

Tabela 4.25 – Resultado do projeto de mistura do CCR da BR-116/RJ.

Descrição dos Materiais	Quantidade	Fornecedor/Tipo
Cimento (kg/m ³)	100	CP II-E-32-Maua/Cantagalo
Areia Natural (kg/m ³)	695	Terma
Areia Artificial (kg/m ³)	292	Holcim
Brita 1 (kg/m ³)	528	Holcim
Brita 2 (kg/m ³)	528	Holcim
Água (l/m ³)	142	
Aditivo (ml/m ³)	0,25	Chrysoplast YY 41

Fonte: FRITZEN (2005b).

De posse do dimensionamento do concreto rolado, realizado pela ABCP de comum acordo com a CRT para manter o que havia sido proposto inicialmente a ANTT e para se obter uma estrutura mais próxima das outras soluções, foram realizadas mudanças na espessura de CCR, reduzida de 250mm para 150mm, devido ao pouco tempo disponível do simulador. Porém, no momento da execução, observou-se que a camada de macadame betuminoso existente no local após a fresagem apresentava agregados soltos, o que levou à retirada de 20 a 30mm adicionais, pois havia a necessidade de regularizar a camada de apoio, ficando o CCR com 185mm de espessura, comprovada pela extração de corpos-de-prova dias após a conclusão da obra (FRITZEN, 2005b).

A execução do concreto rolado foi realizada em uma única camada e sua compactação foi com um rolo chapa (vibratório e estático). Também foram moldados corpos-de-prova de 150mm x 300mm para determinar a resistência característica à compressão simples. A pintura de ligação foi aplicada pela equipe da CRT e a emulsão utilizada foi RR-1C, espalhada com a caneta, sem controle de taxa de ligante (FRITZEN, 2005b).

No trecho 4, foram instaladas duas células de pressão total, uma delas abaixo da camada do CCR e a outra sobre o concreto, no dia da aplicação da mistura asfáltica, executada sete dias após a conclusão da base cimentada (FRITZEN, 2005b).

Ensaio Acelerados

Os ensaios acelerados, com a utilização do Simulador de Tráfego Linear Móvel, tiveram início no dia 19 de novembro de 2004. Numa primeira etapa, o simulador apresentou vários defeitos mecânicos e eletrônicos, o que causou um atraso de, aproximadamente, um mês. Neste período, foi possível realizar alguns ajustes quanto às decisões tomadas antes, entre elas a mudança do movimento bidirecional de carregamento para o sentido único, a partir da segunda seção-teste. No primeiro trecho experimental realizaram-se os ensaios acelerados nos dois sentidos (bidirecional), tal qual havia sido planejado inicialmente. Porém, seguindo orientação

do professor Jorge Ceratti, em dezembro de 2004, se optou pela mudança de tipo de carregamento nas seções-teste, pois de acordo com este pesquisador o carregamento bidirecional é mais apropriado para o estudo de afundamento de trilha de roda e o carregamento unidirecional é mais apropriado para o estudo de fadiga, que é o caso da rodovia em estudo. Isso devido às tensões cisalhantes que se desenvolvem nos dois sentidos da pista e tendem a “fechar” as trincas. Daí a opção pela mudança de planos, passando-se a operar o simulador num único sentido (FRITZEN, 2005b).

Durante esses trinta dias não foram considerados os ciclos aplicados no primeiro trecho experimental, porque o trem-de-prova não estava aplicando carga sobre o pavimento, o que só foi constatado após vários dias, com o auxílio da balança móvel. O trem-de-prova estava aplicando uma carga muito pequena sobre o pavimento, pois o curso do cilindro hidráulico estava no seu limite máximo e ele é o responsável pela pressão exercida ao suporte do trem-de-prova. Observou-se que toda a estrutura do simulador estava em cota acima da necessária para seu perfeito funcionamento, tendo sido necessário abaixar toda a estrutura do simulador para 1,25m de distância entre o pavimento e a parte inferior do chassi. Outra mudança foi a inclusão de um deslocamento transversal de 100mm, em substituição à idéia inicial de realizar os ensaios acelerados sem nenhum deslocamento desse tipo. A alteração foi necessária por se observarem sulcos na mistura asfáltica, logo no início dos ensaios acelerados, em função da canalização do tráfego. A velocidade média de operação constatada foi de 7km/h (FRITZEN, 2005b).

Sabe-se que para se determinar o Fator de Equivalência de Carga (FEC) a cobertura da trilha de roda deve ser maior do que a adotada para os ensaios acelerados realizados na CRT, muito concentrada propositalmente. O Fator de Equivalência de operações corresponde a uma faixa de cobertura do revestimento feita pelo tráfego normal onde às cargas não são tão canalizadas e, portanto, não são tão severas quanto o fator adotado para os ensaios acelerados nos trechos experimentais realizados na CRT. Isto configura um fato que provavelmente leva a um índice de correção dos resultados do simulador (fator simulador – campo), em relação ao Número N de projeto normalmente calculado, quer seja com os FEC do USACE ou com os da

AASHTO. Para se obter esse provável “fator de correção”, são necessários estudos adicionais utilizando-se o simulador de tráfego, não realizado neste experimento. Nesta pesquisa, por falta de dados, não foi considerada nenhuma tentativa de “corrigir” esta concentração da aplicação das cargas nos experimentos, teve-se somente o cuidado de se fazer o deslocamento lateral sempre igual nos quatro trechos (FRITZEN, 2005b).

Para se determinar o número “N” de ciclos correspondentes ao eixo padrão rodoviário (eixo simples de roda dupla 8,2tf), é necessário que se multiplique o número de ciclos encontrados com o simulador de tráfego pelo fator de equivalência correspondente à carga utilizada. Existem dois fatores de equivalência bastante utilizados no país: o da AASHTO e o do USACE que permitem converter cargas variadas do tráfego em cargas equivalentes (FRITZEN, 2005b), embora seja importante observar que estes estão associados a conceitos de dano bastante distintos. Uma outra maneira de se calcular o Fator de Equivalência é a partir da modelagem do pavimento em computador, para determinar um resumo de tensões e deformações atuantes no pavimento e com isso determinar o fator de equivalência de cada estrutura de pavimento de cada pavimento dos trechos experimentais, comparando-se o número N obtido na curva de fadiga com as diferenças de tensões calculadas com a carga de 8,2tf e 13,2tf no eixo (carga usada no simulador), conforme sugere MOTTA (1991).

Também é possível determinar um fator campo-laboratório (FCL) através da razão do número obtido com o simulador de tráfego com o da curva de fadiga em laboratório. Nos dimensionamentos mecanístico-empíricos feitos pelo método da COPPE, tem-se utilizado o FCL de 10.000 para as curvas de fadiga obtidas por compressão diametral a tensão controlada, comparada com N calculado com o FEC do USACE (MOTTA, 1991; PINTO, 1991). Porém, deve-se observar que o número “N” do simulador não é igual ao da rodovia, pois há diversas divergências, entre elas a carga concentrada (com pouca variação lateral), a velocidade baixa e a não ocorrência da oxidação real do ligante.

Em todos os segmentos foram registradas as avaliações ao longo de cada trecho experimental, como: deflexões, percentual de trincamento do revestimento asfáltico, afundamentos em trilha de roda, verificação da temperatura em diferentes espessuras e profundidades do revestimento asfáltico, e o monitoramento das tensões na estrutura do pavimento através dos instrumentos instalados no interior do revestimento asfáltico.

O percentual de área trincada foi determinado através de um molde quadriculado de área de 1m² com seção de 100mm x 100mm, que era colocada sobre a área simulada (FRITZEN, 2005b).

Outro recurso utilizado foi medir a permeabilidade em duas etapas, a primeira no revestimento novo, que corresponde ao revestimento sem a interferência do tráfego do simulador, e o segundo realizado sempre após a finalização dos ensaios acelerados com a interferência do tráfego. Além disso, as condições de aderência em pista molhada foram monitoradas no início e ao final dos testes com o emprego de ensaios de Pêndulo Britânico e de Mancha de Areia.

Resultados

A seguir são apresentados os resultados de forma resumida, segundo FRITZEN (2005b).

– Trecho 1:

Apresentou aproximadamente 40% de área trincada conforme norma DNIT 007/2003- PRO, na conclusão dos ensaios acelerados com 192.000 ciclos com carregamento bidirecional de 6,6tf no semi-eixo. As trincas foram classificadas conforme a norma DNIT 008/2003- PRO como FC-1 na sua maioria e algumas como FC-2. O padrão das trincas foi em forma de blocos com dimensões aproximadas de 120 a 150mm.

No ensaio de permeabilidade observou-se que o revestimento era impermeável no concreto asfáltico novo. Já no revestimento simulado o coeficiente de permeabilidade foi de $1,71 \times 10^{-2}$ cm/s sobre a parte trincada. Isso mostra que as trincas atingiram a espessura total da camada, e, embora o grau de severidade ainda fosse “baixo”, já permitiam que a água penetrasse no pavimento.

As deflexões do pavimento medidas com viga Benkelman com carga de semi-eixo de 6,6tf (utilizada na simulação de tráfego) eram da ordem de 66×10^{-2} mm antes da simulação de tráfego e passaram a valores de 106×10^{-2} após os ensaios acelerados.

O afundamento de trilha de roda formado pelo semi-eixo do simulador ao longo do experimento, também foi monitorado. O afundamento foi medido com a treliça padrão da norma DNIT 006/2003-PRO. Percebe-se que o afundamento foi pequeno (3mm), considerando-se o fato do tráfego ser canalizado e da carga ser elevada e também por ter sido no verão. Todavia deve-se observar que o simulador fazia sombra na seção-teste e o emprego de ligante mais duro (CAP-40) podem justificar os resultados obtidos.

Os ensaios de mancha de areia antes e após a simulação de tráfego indicaram uma textura fechada ou fina de acordo com a classificação dos manuais do DNER (1998), ou seja, com altura de areia (HS) no ensaio de mancha de areia de 0,35mm no revestimento novo e de 0,29mm no revestimento após a simulação de tráfego. Os resultados da avaliação com a microtextura com o Pêndulo Britânico também divergiram pouco entre o início e o fim da simulação (VRD de 73 e 69 respectivamente), sendo os resultados adequados nas duas situações.

Neste trecho, as células de carga fadigaram nas primeiras aplicações de carga. As leituras foram perdidas devido ao roubo do computador em que elas estavam armazenadas.

Os termopares foram instalados em diferentes camadas do revestimento com o objetivo de determinar a temperatura em diferentes profundidades, porém, por uma

falha nos procedimentos para a sua instalação não houve sucesso na verificação das temperaturas neste trecho.

Um dos problemas observados no primeiro trecho experimental, além da temperatura elevada devido ao intenso verão, foi também o excesso de chuva desta época do ano. Como o objetivo da pesquisa era a comparação entre as soluções de recuperação de todos os trechos experimentais, foi utilizada nos outros trechos a aplicação de chuva artificial, através do sistema de espargimento de água do simulador, para se criar condições mais próximas das observadas no primeiro trecho.

– Trecho 2:

Embora tenha sido chamado de trecho 2 pela posição relativa, foi o terceiro a ser solicitado pelo simulador. Foi construído no dia 25 de fevereiro de 2004 e começou a ser testado no dia 18 de março de 2004. Este trecho apresentou fissuras no revestimento asfáltico duas semanas após a sua construção. Essas fissuras surgiram de cima para baixo com uma profundidade entre 20 a 30mm da superfície, sem nenhuma interferência do tráfego, conforme mostrado na figura 4.32. No início, surgiram várias hipóteses para justificar este trincamento precoce, entre elas o grau de compactação, temperaturas de usinagem e rolagem, problema de execução da mistura e deficiência no ligante. Para tentar esclarecer o fenômeno, foi realizada a extração dos corpos-de-prova para verificação do grau de compactação, volume de vazios e a determinação do módulo de resiliência e da resistência à tração, e ensaio de fadiga. Foram também extraídos blocos do revestimento para análises realizadas no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Miguez da Petrobras (CENPES), Prefeitura do Rio e no IPR. Estes ensaios não detectaram nenhuma característica que reprovasse o ligante usinado.

Figura 4.32 – Trincas no revestimento do trecho 2 antes da simulação de tráfego. Fonte: FRITZEN (2005b).

Ensaio de tomografia computadorizada realizados em corpos-de-prova fissurados, sem a aplicação de carga, indicam que o trincamento iniciou-se de cima pra baixo, não se observando trincas a profundidades maiores.

O segundo trecho experimental teve sua simulação iniciada com o pavimento já fissurado (mesmo sem tráfego) e apresentou 40% de área trincada na conclusão dos ensaios acelerados com 192.000 ciclos no sentido único, com carga de 6,6tf no semi-eixo sobre o pavimento. As trincas foram classificadas como FC-1 e FC-2 na mesma proporção. O padrão das trincas foi em forma de “blocos” com dimensões aproximadas de 150 a 200mm. Observou-se também que as trincas não chegaram até a camada de Hatelit, sendo o seu sentido de propagação a partir do topo do revestimento.

No ensaio de permeabilidade, observou-se revestimento impermeável no concreto asfáltico novo. Já no revestimento simulado o coeficiente de permeabilidade foi de $2,27 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ sobre a parte trincada.

As deflexões do pavimento medidas com viga Benkelman com carga de 6,6tf no semi-eixo eram da ordem de 57×10^{-2} mm antes da simulação de tráfego, e passaram a valores de 106×10^{-2} mm após os ensaios acelerados.

Foi realizado o acompanhamento da evolução do afundamento da trilha de roda da mistura asfáltica, ao longo dos ensaios acelerados. Observaram-se deformações permanentes mais elevadas do que as constatadas no primeiro e no quarto trechos experimentais que utilizaram o mesmo projeto de mistura asfáltica (embora usadas em dias distintos). A hipótese da deformação permanente, neste caso, ter sido maior, principalmente nos primeiros ciclos, comparados com os demais trechos experimentais que utilizaram o CBUQ convencional com CAP-40, poderia ter sido motivada pela utilização de uma reperfilagem de 10mm para a instalação do Hatelit C 40/17. Observa-se que o grau de compactação e o volume de vazios em média são semelhantes aos do primeiro e aos do quarto trechos experimentais. Contudo, a progressão não foi na mesma taxa com o acúmulo dos ciclos, havendo diminuição da taxa de crescimento ao longo do tempo.

Neste segundo trecho experimental, foram realizados ensaios acelerados com a utilização do simulador de tráfego móvel em sentido único. Também foi possível ajustar o simulador de uma forma que fosse possível analisar um pequeno trecho com carregamento bidirecional. Pode-se observar na figura 4.33 a evolução do afundamento de trilha de roda nos dois tipos de movimento de aplicação de carga. Neste caso é possível dizer que o uso do simulador no sentido único e bidirecional não teve influência na magnitude dos resultados de deformações permanentes, corroborando o previsto pelo professor Ceratti antes do início dos testes.

Figura 4.33 – Comparativo da evolução da flecha em trilha de roda com semiciclos uni e bidirecionais no trecho 2 da BR-116/RJ. Fonte: FRITZEN (2005b).

Os ensaios de mancha de areia antes e após a simulação de tráfego indicaram uma textura fechada ou fina, de acordo com a classificação dos manuais do DNER (1998), ou seja, HS de 0,35mm e de 0,36mm no revestimento novo e após a simulação de tráfego, respectivamente. Os resultados da avaliação com a microtextura com o Pêndulo Britânico também divergiram pouco entre o início e o fim da simulação, sendo os resultados (VRD de 74 e de 57 respectivamente) adequados nas duas situações.

– Trecho 3:

Apesar de ser o terceiro trecho pela posição, foi o segundo ensaiado. Isso porque o asfalto borracha fornecido pela BR Asfaltos e usinado na CRAFT estava sendo confeccionado para um outro local e, com o final dessa outra obra, a usina ficaria aproximadamente trinta dias parada.

O controle de qualidade da mistura empregando a densidade efetiva para determinar o volume de vazios e o grau de compactação nos corpos-de-prova identificou valores

que não atenderam ao determinado no projeto. Por este motivo foram extraídos corpos-de-prova para a investigação por tomografia computadorizada, com o objetivo de verificar se os vazios eram interligados. Foi possível perceber vazios em maior número que o do trecho 2, com boa distribuição e continuidade.

Neste trecho, o trincamento de 40% da área ocorreu com 207.450 ciclos em sentido único com carga de 6,6tf no semi-eixo sobre o pavimento. O afundamento de trilha de roda formado pelo semi-eixo do simulador indicou flecha de 3mm ao final destes semiciclos.

As deflexões do pavimento medidas com viga Benkelman com carga de semi-eixo de 6,6tf eram da ordem de 70×10^{-2} mm antes da simulação de tráfego, e passaram a valores de 118×10^{-2} mm após os ensaios acelerados.

Os ensaios de mancha de areia antes e após a simulação de tráfego (0,62mm e 0,76mm respectivamente) indicaram uma textura média (mais grosseira que as dos demais trechos), de acordo com a classificação dos manuais do DNER (1998). Os resultados da avaliação com a microtextura com o Pêndulo Britânico, expressos pelo VRD, também divergiram bastante no início e ao final da simulação, com VRD de 77 e 48 respectivamente.

As diferenças observadas entre este e os demais trechos devem ter ocorrido por se tratar de uma outra faixa granulométrica (descontínua) e de um material pétreo de outra origem empregado na confecção da mistura (neste trecho utilizou-se a pedreira Sepetiba e nos demais a pedreira Holcim).

No ensaio de permeabilidade os valores obtidos variaram de $1,33 \times 10^{-4}$ cm/s para $1,02 \times 10^{-3}$ cm/s respectivamente do pavimento novo para o simulado, o que pode ser considerado pouco significativo.

Neste período, assim como no primeiro trecho experimental, o verão foi muito chuvoso. Destaca-se que o período chuvoso no local do experimento, pelos dados

climáticos da região, está concentrado entre os meses de outubro e fevereiro, época dos ensaios acelerados do primeiro e do terceiro trechos experimentais. As chuvas geralmente duravam em torno de duas a três horas no final da tarde. Embora o ensaio fosse mantido na maioria das vezes em que chovia, algumas vezes o simulador era parado devido à chuva intensa ou em função da grande quantidade de raios.

– Trecho 4:

O quarto trecho experimental teve a sua construção iniciada no dia 14 de abril de 2004. Este trecho foi realizado em duas etapas: na primeira o CCR foi construído no dia 14/04/2005, e na segunda, no dia 21/04/2005, foi executado o revestimento asfáltico. Esse ensaio acelerado não chegou ao seu objetivo final, se comparado aos demais trechos experimentais, pois ocorreu o término do contrato de locação do simulador não sendo possível atingir a porcentagem de área trincada idêntica a dos outros três trechos. A interrupção ocorreu por motivo financeiro, o que acarretou o encerramento da pesquisa sem que fosse observada nenhuma trinca de fadiga na área simulada com 245.100 ciclos realizados em sentido único e com carga de 6,6tf no semi-eixo.

Neste trecho, foi observada uma trinca de retração dois dias após a construção do CCR, conforme mostrado na figura 4.34. Esta trinca está posicionada transversalmente ao sentido do tráfego com uma abertura de 3 a 4mm. A trinca foi demarcada para acompanhamento futuro, e constatou-se após a construção do revestimento asfáltico a reflexão da trinca do CCR para a superfície do CBUQ. A figura 4.34 mostra também um corpo-de-prova de 150mm de diâmetro extraído no quarto trecho experimental com trincas de retração refletido no CBUQ.

Figura 4.34 – Trinca de retração no CCR dois dias após sua execução e em corpo-de-prova, já refletindo no CBUQ antes da simulação de tráfego na BR-116/RJ. Fonte: FRITZEN (2005b).

O controle de qualidade da obra indicou que na camada de CCR não houve o atendimento aos parâmetros do projeto para a resistência à compressão simples aos sete dias, em alguns pontos, além de elevada compactação e baixo volume de vazios na mistura asfáltica.

As deflexões medidas com viga Benkelman com carga de semi-eixo de 6,6tf apresentaram incremento de 20% após a simulação de tráfego, mas ainda assim se mantiveram em um baixo patamar (da ordem de 55×10^{-2} mm com a carga de 13,2tf no eixo simples de roda dupla).

No ensaio de permeabilidade não se observou alteração do nível de água na pista, mesmo após a simulação de tráfego, fato plenamente justificado pela inexistência de trincas na superfície (a exceção da trinca de retração que não foi ensaiada).

Os ensaios de mancha de areia antes e após a simulação de tráfego indicaram HS de 0,36mm e 0,37mm, ou seja, uma textura fechada ou fina durante todo o ensaio acelerado, de acordo com a classificação dos manuais do DNER (1998). Os resultados da avaliação com a microtextura com o Pêndulo Britânico também divergiram pouco entre o início e o fim da simulação, sendo os resultados (VRD de 74 antes da simulação e de 66 ao final desta) adequados nas duas situações.

Também foi monitorado o afundamento de trilha de roda formado pelo semi-eixo do simulador ao longo do experimento, sendo a trilha pequena (3mm), considerando o fato do tráfego ser canalizado e da carga ser elevada. Neste trecho, o simulador também foi ajustado de uma forma a que fosse possível analisar um pequeno trecho no sentido oposto. Pode-se observar na figura 4.35 a evolução do afundamento de trilha de roda comparada ao afundamento da trilha de roda no sentido único. Neste caso também é possível dizer que o uso do simulador no sentido único e no sentido bidirecional não teve influência nos resultados de deformações permanentes, embora os valores medidos sejam muito baixos.

Figura 4.35 – Comparativo da evolução da flecha em trilha de roda com semiciclos uni e bidirecionais no trecho 4 da BR-116/RJ. Fonte: FRITZEN (2005b).

Os resultados das quatro seções-teste encontram-se resumidos na tabela 4.26, incluindo-se a comparação dos dados de módulos de resiliência (MR) e de resistência à tração (RT) das misturas asfálticas moldadas com material retirado da usina e extraídas após as simulações de tráfego.

Tabela 4.26 – Resumo dos dados do experimento na BR-116/RJ.

Parâmetro	Unidade	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 3	Trecho 4
RT usina	MPa	1,53	s/i	0,65	s/i
MR usina	MPa	7.128	s/i	2.726	s/i
RT após simulação	MPa	1,49	1,41	0,86	1,5
MR após simulação	MPa	6.987	5.244	3.909	5.862
Semi-ciclos do simulador		192.000	220.500	207.450	245.100
Trincas ao final dos ciclos		40%	40%	40%	0%*
Flecha em trilha de roda ao final dos ciclos	mm	3	6	3	3
FE _{USACE}		18,67	18,67	18,67	18,67
FE _{AASHTO}		7,95	7,95	7,95	7,95
Equivalência Campo - Deflexões		4,84	3,77	4,66	n/c
N _{USACE}		3,6 x 10 ⁶	4,1 x 10 ⁶	3,9 x 10 ⁶	4,6 x 10 ⁶
N _{AASHTO}		1,5 x 10 ⁶	1,7 x 10 ⁶	1,6 x 10 ⁶	1,9 x 10 ⁶
FEC - Deflexões		9,3 x 10 ⁵	8,3 x 10 ⁵	9,7 x 10 ⁵	n/c
Deflexão a 13,2 tf no pavimento novo	0,01 mm	66	57	70	46
Deflexão a 13,2 tf no pavimento simulado	0,01 mm	106	106	118	55
Permeabilidade no pavimento novo	cm/s	imperim.	imperim.	1,33 x 10 ⁻⁴	imperim.
Permeabilidade no pavimento simulado	cm/s	1,71 x 10 ⁻²	2,72 x 10 ⁻²	1,02 x 10 ⁻³	imperim.
HS no pavimento novo (manha de areia)	mm	0,35	0,35	0,62	0,36
HS no pavimento simulado (manha de areia)	mm	0,29	0,36	0,76	0,37
VRD no pavimento novo		73	74	77	74
VRD no pavimento simulado		69	57	48	66

* a exceção da trinca transversal de retração constatada

Comentários e Conclusões

As deflexões sob a ação da carga no trecho eram bastante elevadas, o que é a causa e o reflexo do elevado grau de trincamento encontrado no local. Ao final da solicitação pelo simulador nos trechos 1, 2 e 3 as deflexões também já se apresentavam altas, pois a camada asfáltica remanescente após a fresagem apresentava elevado grau de trincamento, o que contribuiu para acelerar a taxa de crescimento das deflexões máximas com o número de ciclos de carga. Também se observou que as bacias medidas apresentavam grandes extensões, provavelmente devido a problemas de subleito em maiores profundidades (FRITZEN, 2005b).

Os resultados obtidos nas três seções-teste em que não houve atividades de recuperação de infra-estrutura (trechos 1, 2 e 3), em termos de operações para a ocorrência de trincas em 40% da área simulada, foram muito semelhantes, o que implica em uma vida útil muito próxima entre as três soluções. Entretanto, observa-

se que as trincas na seção-teste com geogrelha ocorreram a partir do topo da camada asfáltica, indicando que o emprego desta membrana no processo de bloqueio a reflexão do trincamento existente não foi ensaiado neste teste. O CBUQ com asfalto borracha apresentou volume de vazios acima do máximo admissível ao se avaliar a densidade efetiva, o que também pode ter afetado o desempenho da mistura.

Já a solução de intervenção na base com execução de CCR seguida de revestimento asfáltico não teve iniciado o seu trincamento por fadiga sob o mesmo carregamento, em que pese a constatação de baixos valores de resistência à compressão simples, aos sete dias, em algumas amostras da base cimentada executada. O CCR apresentou uma trinca de retração transversal ao sentido do tráfego refletindo para a superfície da camada de revestimento. Uma outra trinca de retração do CCR foi detectada em corpo-de-prova extraído aleatoriamente, sem reflexão, no revestimento até o momento final das observações.

O segundo trecho experimental apresentou flecha em trilha de roda ligeiramente superior aos valores observados nos demais trechos. Isso se deve, provavelmente, a camada de reperfilagem abaixo da geogrelha ter se acomodado durante os ensaios acelerados.

Os resultados de mancha de areia de misturas da mesma faixa granulométrica (trechos 1, 2 e 4) foram muito semelhantes antes e após as simulações de tráfego, não se observado um fechamento significativo na textura pela ação do semi-eixo do simulador de tráfego. Como nestas seções os agregados empregados na confecção do concreto asfáltico tiveram a mesma origem, os resultados dos ensaios de Pêndulo Britânico divergiram pouco entre si. Já o trecho 3, com granulometria e agregados diferenciados em relação aos demais, apresentou incremento da textura e uma redução importante na microtextura com a simulação de tráfego.

Por fim, observa-se que os ensaios realizados com os equipamentos de instrumentação do pavimento nas seções-teste apresentaram muitos problemas durante a pesquisa na BR-116/RJ (FRITZEN, 2005b).

4.5. SP-147 (Intervias)

O programa de concessões de rodovias paulistas previa para os anos de 2005 e 2006 a recuperação dos pavimentos da rodovia SP-147, entre as cidades de Limeira e Piracicaba. Neste tipo de obra, geralmente têm sido empregadas atividades de fresagens e recomposições parciais do revestimento asfáltico, em percentual variável da área definida a partir do inventário de defeitos, seguidas da aplicação de microrrevestimento e/ou recapeamento em concreto asfáltico (PREUSSLER *et al.*, 2005).

Sempre que adequadamente projetadas e executadas, estas técnicas se mostraram efetivas nas obras de reabilitação de pavimentos sujeitos a elevado volume de tráfego. Desde 2004 se dispõe no Brasil de equipamento capaz de realizar a reciclagem a frio do revestimento asfáltico *in situ*, com a adição de emulsão rejuvenescedora (PREUSSLER *et al.*, 2005). Para o desenvolvimento dos serviços de reciclagem merecem reflexão a “incompatibilidade” entre os métodos e procedimentos de análise e projeto que norteiam os critérios e diretrizes da pavimentação no País com as novas tecnologias e novos processos de abrangência internacionais já disponíveis para aplicação imediata.

Desta forma, foi proposta a execução de um trecho experimental de reciclagem a frio do revestimento asfáltico *in situ*, com o emprego de emulsão rejuvenescedora no segmento entre os quilômetros 119,6 e 120,6 da Pista Leste na SP-147, para verificar a adequação desta técnica na restauração de pavimentos e o seu desempenho sob a ação do tráfego (PREUSSLER *et al.*, 2005).

O experimento em questão, resumido na tabela 4.27, teve o patrocínio e a coordenação executiva da concessionária Intervias, com o apoio técnico e promocional da ARTESP (INTERVIAS, 2005b).

Tabela 4.27 – Ficha técnica do experimento com simulador de tráfego na SP-147

Ficha técnica do experimento	
Local	SP-147 entre Limeira e Piracicaba
Interessado/Contratante	Intervias
Objetivo	Estudar o desempenho do pavimento restaurado pela técnica de reciclagem a frio <i>in situ</i> do revestimento asfáltico.
Período	Outubro de 2004 a Julho de 2005
Entidades Participantes	OHL Brasil ARTESP BetunelKoch Asfaltos e Tecnologia Brown & Brown Garcia, Monteiro & Cia. Dynatest Engenharia Simular-Tecnologia do Pavimento
Número de seções-teste	3 executadas e 1 ensaiada
Principais aspectos observados	O processo de reciclagem a frio <i>in situ</i> do revestimento asfáltico com adição de emulsão rejuvenescedora se mostrou tecnicamente viável para o trecho experimental da SP-147, devido à existência de uma camada asfáltica espessa (superior a 80mm) muito trincada e com estrutura adequada aos esforços de tráfego. Com relação aos aspectos estruturais do pavimento, o processo de reciclagem do revestimento asfáltico resguardou as condições de deformabilidade previstas no projeto de restauração, ou seja, os níveis deflectométricos no pavimento mantiveram-se inferiores a 50×10^{-2} mm, com predominância entre 30 e 40×10^{-2} mm. As características funcionais de camada reciclada atenderam aos limites normativos estabelecidos pela ARTESP, no que tange as camadas de rolamento com relação aos padrões de conforto e segurança ao rolamento.

Concepção e Projeto

A elaboração do projeto de recuperação do segmento envolveu a análise dos dados dos levantamentos de irregularidade e da condição superficial da rodovia, bem como as avaliações deflectométricas, o que permitiu o dimensionamento das necessidades de reforço em concreto asfáltico, objetivando-se o atendimento dos requisitos mínimos requeridos pela ARTESP em função do tráfego previsto para a rodovia (PREUSSLER *et al.*, 2005).

Antes da restauração, observavam-se deflexões inferiores a 35×10^{-2} mm, ou seja, valores abaixo dos obtidos quando comparadas com a máxima admissível calculada pela equação da norma DNER-PRO 269/94 (Tecnopav), o que permite concluir que este segmento encontra-se em boas condições estruturais, não necessitando assim de reforço. Com relação à condição funcional dos pavimentos, verifica-se que os valores de irregularidade, expressos em termos de IRI, estão entre 1,5 e 2,7m/km. Em relação à superfície constata-se que o grau de trincamento supera o limite máximo aceito pela ARTESP, que é de 15% de trincas classe 2, exigindo algum tipo de intervenção para a correção deste parâmetro (PREUSSLER *et al.*, 2005).

Este trecho é constituído por um pavimento flexível de revestimento em concreto asfáltico de 150mm sobre uma base de Macadame Betuminoso de 60mm e sub-base de Brita Graduada Simples com 150mm, sendo o subleito local um material argiloso. Na superfície deste pavimento observa-se um trincamento constituído por fissuras abertas não erodidas com formato de couro de jacaré.

Por se tratar de um pavimento em boas condições estruturais no que se refere aos níveis deflectométricos, muito embora se observasse um elevado grau de trincamento, principal defeito de superfície, a solução convencional indicada para a restauração do pavimento era a seguinte:

- Fresagem do revestimento asfáltico (40mm), em até 70% da área;
- Aplicação de pintura de ligação nos segmentos fresados;
- Recomposição da espessura fresada com concreto asfáltico;
- Aplicação de microrrevestimento em duas camadas, como camada final de rolamento.

Tendo em vista que a solução original proposta contempla a intervenção em até 70% da área e as novas tecnologias de reciclagem disponíveis no Brasil, propôs-se a execução de um trecho experimental de reciclagem a frio *in situ* do revestimento com a incorporação de emulsão rejuvenescedora. A reciclagem se justifica nos casos em que as avaliações estrutural e funcional indiquem um grau de trincamento que possa

conduzir ao problema de reflexão de trincas no reforço convencional que venha a ser construído, como o caso em questão. Outro ponto importante refere-se à possibilidade de realizar a recuperação de 80mm do revestimento existente em uma única operação, o que se mostra vantajoso em relação ao processo de fresagem e recomposição que exige que o concreto asfáltico seja executado em duas camadas. A execução de um pano contínuo de reciclagem também implicará na manutenção de um adequado conforto ao rolamento no trecho o que muitas vezes não se consegue ao se realizar atividades descontínuas que objetivam a recuperação apenas dos defeitos de superfície. Outro aspecto importante a favor da reciclagem a frio *in situ* do revestimento é a questão ambiental. Esta técnica contribui na preservação do meio ambiente, visto que há menos exploração de pedreiras, redução em áreas de bota fora para material retirado do pavimento e até mesmo uma menor necessidade de utilização de usinas, de material asfáltico e de combustível (PREUSSLER *et al.*, 2005).

De acordo com INTERVIAS (2004b), o segmento em questão atende aos fatores condicionantes na escolha do tipo de reciclagem proposto:

- Tipo e idade do revestimento: concreto asfáltico com mais de oito anos sob tráfego sem qualquer manutenção de maior porte;
- Espessura da camada de revestimento: superior a 80mm (camadas 1, 2 e 3 somadas);
- Estágio de conservação do revestimento e porcentagem de área remendada: embora o pavimento encontre-se muito trincado praticamente inexistem remendos ao longo deste trecho;
- Condição estrutural do pavimento: adequada, de acordo com os resultados dos ensaios defletoométricos;
- Disponibilidade de materiais e equipamentos: hoje já existe no Brasil recicladoras de pavimentos capazes de realizar a reciclagem do revestimento asfáltico *in situ* com a classificação do material pétreo e o controle total sobre a incorporação de emulsão rejuvenescedora, permitindo a obtenção de uma mistura bastante homogênea ao final do processo, bem como possui rolos compactadores compatíveis para a compressão do material.

Assim, foi proposta a solução convencional com fresagens e recomposições seguidas da aplicação de microrrevestimento entre os quilômetros 119,6 e 119,8, a reciclagem a frio do revestimento seguida da aplicação de microrrevestimento entre os quilômetros 119,8 e 120,2 e a reciclagem do revestimento entre os quilômetros 120,2 e 120,6, sempre na pista Leste da SP-147 (INTERVIAS, 2004b).

Assim, em face da viabilidade da técnica para o trecho em questão, propôs-se a execução experimental das seguintes atividades nas faixas de rolamento da pista:

- Reciclagem a frio do revestimento existente com adição de emulsão rejuvenescedora *in situ* em 100% da área numa espessura total de 80mm;
- Aplicação de microrrevestimento em duas camadas, como camada final de rolamento após a cura do material reciclado em metade da extensão do segmento.

Foram empregados modelos mecanísticos para a análise de tensões, deformações e deslocamentos das camadas asfálticas e para o subleito, com critérios de falha específicos. A análise de desempenho das estruturas foi feita através da verificação da compatibilidade entre os esforços solicitantes (devidos à aplicação de cargas de tráfego) e os esforços resistentes, intrínsecos de cada material, traduzidos neste estudo pelas equações de fadiga apresentadas a seguir.

a) Deformação Vertical Máxima no Revestimento

Como critério comparativo, utilizou-se, para este parâmetro, a equação tradicionalmente aceita e proposta no método TECNAPAV, sendo a vida de fadiga associada à deflexão sob a ação da carga (D): $N = 5,55 \times 10^{16} D^{-5,32}$

b) Deformações de Compressão no Subleito

O critério de deformações verticais de compressão acumuladas do subleito (ϵ_v) é expresso neste trabalho pela equação de Dormon (1971):

$$N = 6,067 \times 10^{-10} . (\epsilon_v)^{-4,762} .$$

Os resultados apresentados na tabela 4.28 foram obtidos a partir da simulação computacional da estrutura existente, considerando-se a reciclagem dos 80mm do revestimento, e permitem a verificação dos esforços na estrutura e o atendimento aos limites estabelecidos com base nos modelos citados, tendo em vista o número “N” previsto ao longo do período de projeto ($2,36 \times 10^7$ operações do eixo padrão rodoviário pelo método da USACE e $8,35 \times 10^6$ pelo método da AASHTO).

Tabela 4.28 – Análise mecânica e previsão de vida útil do pavimento da SP-147

Material	Parâmetro	Unidade	Autores do Modelo	N	Máximo Admissível	Valor Previsto
Concreto Asfáltico	D	$\times 10^{-2}$ mm	Preussler e Pinto	$2,36E+07$ (USACE)	57,7	28,4
Subleito	e_v	mm / mm	Dormon, 1971	$8,35E+06$ (AASHTO)	$4,08E-04$	$3,50E-04$

Fonte: PREUSSLER *et al.* (2005).

Também foi realizada a previsão de desempenho da solução de reciclagem projetada para determinar o período em que o pavimento da rodovia se manterá, após a reciclagem a frio *in situ*, atendendo aos parâmetros de aceitabilidade estabelecidos pela ARTESP, a saber:

- Porcentagem da área com trinca classe 3 (abertas e erodidas): $FC3 \leq 2\%$;
- Porcentagem da área com trinca classe 2 (abertas não erodidas): $FC2 < 15\%$;
- Irregularidade longitudinal: $IRI \leq 2,7\text{m/km}$.

Os resultados da previsão de desempenho realizada com o HDM-III para o segmento, são apresentados na tabela 4.29.

Tabela 4.29 – Previsão de desempenho com HDM-III para a reciclagem a frio *in situ* do revestimento na SP-147

Ano		IRI (m/km)	Trincas %	Desgaste %	Panelas %	Flecha (mm)	N ano (AASHTO)
1	2005	2,2	0,0	0,0	0,0	2,1	$1,00 \times 10^6$
2	2006	2,3	0,0	0,0	0,0	2,2	$1,04 \times 10^6$
3	2007	2,4	0,0	0,0	0,0	2,2	$1,07 \times 10^6$
4	2008	2,6	0,0	0,0	0,0	2,3	$1,11 \times 10^6$
5	2009	2,7	0,0	0,0	0,0	2,3	$1,14 \times 10^6$
6	2010	2,8	0,0	0,0	0,0	2,3	$1,18 \times 10^6$
7	2011	3,0	0,0	0,6	0,0	2,4	$1,22 \times 10^6$
8	2012	3,1	0,0	12,2	0,0	2,4	$1,26 \times 10^6$
9	2013	3,3	2,9	50,5	0,0	2,5	$1,30 \times 10^6$
10	2014	3,5	9,4	88,1	0,0	2,6	$1,35 \times 10^6$
11	2015	3,8	21,7	78,3	0,0	2,9	$1,39 \times 10^6$
12	2016	4,1	41,5	58,5	0,0	3,3	$1,44 \times 10^6$

Fonte: PREUSSLER *et al.* (2005).

Destaca-se que os padrões de desempenho previstos em conformidade com o modelo do HDM indicam uma vida útil de seis anos em função do IRI previsto, mas os resultados devem ser monitorados ao longo do tempo e estão associados a atividades contínuas de manutenção rotineira, preventiva e corretiva por parte da concessionária (PREUSSLER *et al.*, 2005). Todavia, a pesquisa com o Simulador de Tráfego Linear Móvel em seção-teste na rodovia tem como objetivo verificar, em curto espaço de tempo, a coerência deste modelo para o segmento em questão.

A dosagem da mistura reciclada foi realizada em conformidade com o método Marshall, utilizando-se também ensaios especiais de desgaste, sempre empregando na dosagem amostras coletadas da pista e emulsão asfáltica rejuvenescedora (PREUSSLER *et al.*, 2005).

O projeto foi desenvolvido pela Betunelkoch, fornecedora da emulsão, sendo indicados os materiais a serem utilizados e as respectivas espessuras e suas respectivas taxas de aplicação, bem como as características técnicas esperadas para a mistura reciclada (INTERVIAS, 2004a). O resumo da dosagem da mistura reciclada é apresentado na figura 4.36 e tabela 4.30.

RODOVIA				TRECHO		DATA:				
SP-147 - estaca 120+660 sentido Piracicaba - Limeira				RP 04229		06 de novembro de 2004				
				MATERIAL		% AGREGADO	Massa Esp. Efetiva			
DENSIDADE REAL DO CAP-20 (residuo EMA)				1,001		Fresado CBUQ	87,0%			
DENSIDADE REAL DA MISTURA AGREGADO - dag				Fresado PMQ		13,0%				
dag =		100		Cal		1,0%				
		% agr A + dr agr A		% agr B + dr agr B		% agr C +... dr agr C				

Execução do trecho

A reciclagem do revestimento foi realizada no final de novembro de 2004 e as atividades de fresagem e recomposição em concreto asfáltico e aplicação de microrrevestimento deram-se no mês de janeiro de 2005 (PREUSSLER *et al.*, 2005).

Na obra foram utilizados os equipamentos e a equipe técnica disponibilizados pela construtora Brown & Brown, bem como os produtos asfálticos com características específicas para os serviços produzidos pela distribuidora BetunelKoch (INTERVIAS, 2005b).

Monitoramento

Após a execução do trecho experimental, o segmento passou a ser monitorado por campanhas mensais de ensaios por um trimestre para se verificar o comportamento da mistura reciclada, especialmente no que se refere a sua cura e possível consolidação pela ação do tráfego. O monitoramento desses trechos foi realizado com campanhas de avaliação mensal durante os meses de dezembro de 2004, janeiro e fevereiro de 2005, nas quais se realizaram:

- Levantamentos defletoométricos executados com o FWD com espaçamento de 20 em 20m nas duas faixas de rolamento;
- Levantamentos de irregularidade longitudinal com equipamento perfilógrafo laser RSP 3.2 nas duas faixas de rolamento;
- Levantamentos de avaliação de superfície seguindo a norma rodoviária DNIT 006/2003-PRO;
- Levantamento das condições de aderência pneu-pavimento, através de ensaios com o Pêndulo Britânico e de Mancha de Areia.

Os resultados das quatro campanhas de avaliação defletoométrica apresentados nas figuras 4.37 e 4.38 indicam um incremento nos níveis de deflexões no trecho após a restauração da pista, mais significativo nos trechos que foram reciclados (INTERVIAS, 2005a). Este fato é decorrente da substituição de um material rígido e

oxidado por uma mistura executada a frio, que tende a apresentar um incremento de rigidez com o tempo, devido ao processo de cura da emulsão rejuvenescedora ou por uma mistura nova de concreto asfáltico com menor rigidez.

Figura 4.37 – Monitoramento deflectométrico na faixa interna na SP-147 durante a cura do material reciclado. Fonte: INTERVIAS (2005a).

Figura 4.38 – Monitoramento deflectométrico na faixa externa na SP-147 durante a cura do material reciclado. Fonte: INTERVIAS (2005a).

Constata-se também a redução dos valores de deflexões no segmento reciclado na faixa externa de tráfego (faixa 2) entre os quilômetros 119,8 e 120,2 após a execução do microrrevestimento asfáltico executado em janeiro de 2005 (INTERVIAS, 2005a).

No mesmo período foram realizadas as coletas de material da pista reciclada com sonda rotativa e posteriormente foram determinados os valores de resistência à tração e módulo de resiliência em laboratório, como apresentado na tabela 4.31 (INTERVIAS, 2005a). Destaca-se que nos resultados dos ensaios de janeiro e de fevereiro de 2005 há a diferenciação entre as amostras que já estavam cobertas com o microrrevestimento e as que ainda não estavam.

Tabela 4.31 – MR e RT no material reciclado da SP-147

Data	Reciclado com Microrrevestimento		Reciclado sem Microrrevestimento	
	MR (MPa)	Rt (MPa)	MR (MPa)	Rt (MPa)
Novembro de 2004	-	-	1779	0,18
Dezembro de 2004	-	-	1745	0,21
Janeiro de 2005	1985	0,43	1094	0,24
Fevereiro de 2005	2295	0,41	2565	0,43

Observa-se que, tanto nos trechos em que foi aplicado o microrrevestimento asfáltico a frio quanto naqueles em que não foi aplicado este recapeamento, houve um incremento nos valores de módulo de resiliência em fevereiro de 2005, em relação a janeiro do mesmo ano devido ao processo de cura.

Os resultados das campanhas de monitoramento da condição de irregularidade longitudinal, apresentados nas figuras 4.39 e 4.40, indicam uma redução dos valores do IRI com a execução da reciclagem, à exceção do segmento da faixa 1 entre os quilômetros 120,2 e 120,6, local em que se iniciou a execução da pista teste e que teve que ser retrabalhada devido aos problemas na injeção de emulsão asfáltica na mistura durante a obra.

Figura 4.39 – Monitoramento da irregularidade na faixa interna na SP-147 durante a cura do material reciclado. Fonte: INTERVIAS (2005a).

Figura 4.40 – Monitoramento da irregularidade na faixa externa na SP-147 durante a cura do material reciclado. Fonte: INTERVIAS (2005a).

A etapa seguinte da análise consistiu na retroanálise de bacia deflectométrica, representativa da condição média do segmento na faixa crítica de tráfego, a fim de se determinar os módulos resilientes *in situ* de cada um dos materiais que compõem a

estrutura em análise e verificar se atendem às premissas do projeto de pavimentação. O resultado desta retroanálise encontra-se na tabela 4.32.

Tabela 4.32 – MR e RT no material reciclado da SP-147

Descrição	Material	Espessura (mm)	Módulo (MPa)
Revestimento	CBUQ	150	2.000
Base	Macadame Betuminoso	60	1.000
Sub-base	Brita Graduada	150	350
Subleito	Argila	-	200

Fonte: INTERVIAS (2004b).

Com relação à avaliação de superfície, resumidos na tabela 4.33, observa-se que, após as obras, a condição funcional é classificada como excelente a partir dos valores do IGG, em conformidade com a norma PRO-06/2003-DNIT, o que é corroborado pelos valores de flecha em trilha de roda sistematicamente inferiores a 2mm e sem tendência de evolução neste período.

Tabela 4.33 – Monitoramento da condição de superfície durante a cura do material reciclado na SP-147

Data	IGG		Flecha (mm)			
	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 1		Faixa 2	
			TRI	TRE	TRI	TRE
Nov/04	65	52	Não avaliada nesta campanha			
Dez/04	0	9	0,4	0,6	0,6	1,0
Jan/05	2	5	0,4	0,5	1,5	1,8
Fev/05	4	13	0,5	0,5	0,7	0,6

Fonte: INTERVIAS (2005a).

O monitoramento das condições de aderência indicou incremento significativo tanto no VRD quanto na HS, após a execução do microrrevestimento asfáltico a frio, como se constata nas figuras 4.41, 4.42, 4.43 e 4.44.

Figura 4.41 – Monitoramento do VRD na faixa interna na SP-147 durante a cura do material reciclado. Fonte: INTERVIAS (2005a).

Figura 4.42 – Monitoramento do VRD na faixa externa na SP-147 durante a cura do material reciclado. Fonte: INTERVIAS (2005a).

Figura 4.43 – Monitoramento da macrotextura na faixa interna na SP-147 durante a cura do material reciclado. Fonte: INTERVIAS (2005a).

Figura 4.44 – Monitoramento da macrotextura na faixa externa na SP-147 durante a cura do material reciclado. Fonte: INTERVIAS (2005a).

Na mesma ocasião, foram também coletadas amostras indeformadas da pista com o objetivo de se determinar em laboratório os valores de resistência à tração e de módulo de resiliência.

Foram ainda realizados ensaios no simulador LCPC em duas placas coletadas da pista, após três meses de execução da reciclagem, com o intuito de verificar a resistência desta mistura à deformação permanente. Essas amostras, com espessura média de 80mm, foram retiradas da pista e levadas ao laboratório, colocadas dentro dos moldes metálicos e testadas no simulador LCPC. Os resultados são apresentados nas figuras 4.45 e 4.46.

Figura 4.45 – Resultados em milímetro do simulador LCPC a 60°C em placas de 100mm de material reciclado extraído da SP-147

Figura 4.46 – Resultados em milímetro do simulador LCPC a 60°C em placas de 100mm de material reciclado extraído da SP-147

As duas placas de misturas asfálticas apresentaram alta repetibilidade no teste, com valores extremamente próximos de afundamentos com os ciclos sucessivos. O ponto que deve ser realçado é que o LCPC tem sugerido que as camadas asfálticas densas, empregadas como base ou camada de rolamento, com 60 a 80mm de espessura, devem apresentar limite máximo de 10% de afundamento aos 30.000 ciclos a 60°C no teste no Simulador de Tráfego, para serem consideradas misturas asfálticas resistentes à deformação permanente sob tráfego leve a médio (INTERVIAS, 2005a).

Método

A seção-teste de revestimento reciclado a frio *in situ* com emulsão rejuvenescedora sobreposto por microrrevestimento teve sua simulação de tráfego realizada no km 120+540m da Pista Leste da SP-147. Os ensaios acelerados iniciaram-se seis meses após a execução da reciclagem, período considerado suficiente para a cura completa do material executado a frio *in situ*. Este período de cura foi monitorado e o prazo dado foi para permitir o emprego de cargas pesadas, muito superiores aos limites legais brasileiros. O teste acelerado foi realizado em conformidade com o carregamento bidirecional especificado na tabela 4.34.

Tabela 4.34 – Ciclos de carga na SP-147

Carregamento (kg)	Nº de Ciclos	Nº de Ciclos Acumulados
7.380	96.861	96.861
5.300	79.139	176.000
6.050	26.270	202.270
7.000	332.758	535.028

Fonte: INTERVIAS (2005b).

Durante a realização do teste procedeu-se ao monitoramento periódico das condições estruturais e funcionais do pavimento, com medições diárias da deflexão do pavimento, das deformações na trilha de roda, das condições de atrito e da textura superficial, além de inspeção visual.

O teste no segmento teve a duração de trinta dias úteis, sendo completadas 535.000 ciclos de seqüência de cargas estabelecidas. Dessa forma, reproduziu-se o equivalente a $2,36 \times 10^7$ operações do eixo padrão rodoviário calculado com os fatores de carga do USACE, ou $8,36 \times 10^6$ pela AASHTO. O número N em questão representa o tráfego solicitante no período de oitos anos, no referido segmento da rodovia SP-147. O monitoramento do pavimento ao longo do período de teste possibilitou a observação do desempenho do revestimento asfáltico reciclado com as crescentes solicitações das cargas, resultando nos valores referenciais com relação à

expectativa futura de comportamento estrutural e funcional da tabela 4.35 (INTERVIAS, 2005b).

Tabela 4.35 – Resultados da pesquisa na SP-147

Parâmetro	Unidade	Condição Inicial (pavimento restaurado)	Condição Final (após a simulação de tráfego)	Especificações Técnicas
IRI	m/km	< 2,5	< 2,5	$\leq 2,7$
Deflexão	10^{-2} mm	24,1	21,4	$\leq D_{adm} = 60$
VRD	-	65,0	56,7	$47 \leq VRD \leq 75$
Altura de Areia	mm	1,1	1,0	$0,6 \leq HS \leq 1,2$
Flecha	mm	0,5	0,5	≤ 7

Fonte: INTERVIAS (2005b).

As figuras 4.47, 4.48 e 4.49, apresentados na sequência, retratam os modelos de desempenho do pavimento ao longo do período de teste, associando-se as características estruturais e funcionais com o número de repetições equivalente ao eixo padrão rodoviário (Número N pelo método do USACE) (INTERVIAS, 2005b).

Figura 4.47 – Evolução da flecha em trilha de roda na seção-teste do simulador de tráfego na SP-147. Fonte: INTERVIAS (2005b).

Figura 4.48 – Evolução da macrotextura na seção-teste do simulador de tráfego na SP-147. Fonte: INTERVIAS (2005b).

Figura 4.49 – Evolução do VRD na seção-teste do simulador de tráfego na SP-147. Fonte: INTERVIAS (2005b).

Destaca-se que, antes da restauração do trecho, os valores das leituras de flechas em trilha de roda observadas na faixa de tráfego pesado eram praticamente nulos, com valores limitados a 2mm. Durante os APT foram observadas maiores dispersões nas leituras de trilha de roda que o constatado nos experimentos anteriores, além de uma tendência de deformação mais crítica deslocada do eixo central da pista (nos locais sob os pneus do trem de prova do simulador).

Conclusões

O processo de reciclagem a frio *in situ* do revestimento asfáltico com adição de emulsão rejuvenescedora, se mostrou tecnicamente viável para o trecho experimental da SP-147, devido à existência de uma camada asfáltica espessa (superior a 80mm) muito trincada e com estrutura adequada aos esforços de tráfego (PREUSSLER *et al.*, 2005).

Com relação aos aspectos estruturais do pavimento, o processo de reciclagem do revestimento asfáltico resguardou as condições de deformabilidade previstas no projeto de restauração, ou seja, os níveis defletoométricos no pavimento mantiveram-se inferiores a 50×10^{-2} mm, com predominância entre 30 e 40×10^{-2} mm (INTERVIAS, 2005b).

As características funcionais de camada reciclada atenderam aos limites normativos estabelecidos pela ARTESP no que tange as camadas de rolamento ditas “excelentes” com relação aos padrões de conforto e segurança ao rolamento (INTERVIAS, 2005b).

Embora o módulo de resiliência e a resistência à tração não sejam elevados, na estrutura de pavimento do trecho em questão este fato não se mostra relevante, pois a linha neutra da estrutura está abaixo da camada reciclada. Já os resultados de deformação permanente se mostram melhores na simulação em pista do que na de laboratório (mais severa).

Os resultados dos ensaios acelerados indicam que a técnica de restauração utilizada na seção-teste, reciclagem a frio *in situ* de 80mm do revestimento asfáltico com adição de emulsão rejuvenescedora seguida da aplicação de microrrevestimento asfáltico a frio, pode ser aplicada ao longo do trecho Limeira-Piracicaba da SP-147, com bom desempenho ao longo do período de projeto, desde que respeitadas as condições de contorno da pesquisa, especialmente no que se refere à condição estrutural do pavimento. Todavia recomenda-se o monitoramento periódico da pista experimental para se estabelecer uma relação entre o desempenho real e o observado no ensaio acelerado.

4.6. BR-116/SP (NovaDutra)

Entre outubro de 2005 e março de 2006, fez-se um estudo para avaliar o comportamento de diversos tipos de revestimentos betuminosos sob a ação de um simulador de tráfego. Este estudo foi realizado pela concessionária NovaDutra, através do seu Centro de Pesquisas Rodoviárias e dentro do plano de pesquisas junto a ANTT.

Neste estudo, a pesquisa conduzida buscava determinar o comportamento das distintas misturas de CBUQ confeccionadas com base em métodos de dosagem diferenciados e empregando-se quatro tipos de ligantes. Como o que se queria era promover um estudo comparativo entre o comportamento de distintos ligantes asfálticos e métodos de dosagem, optou-se pela utilização de agregados de fonte única e faixa granulométrica idêntica em todas as misturas. Optou-se pela faixa C das atuais especificações do DNIT por ser uma graduação amplamente utilizada no Brasil, sendo a primeira mistura (dosada pelo método Marshall empregando CAP-20) o “padrão” de referência para obras brasileiras. Assim, o confronto dos resultados obtidos em cada mistura permitiria conhecer os reflexos da adoção de diferentes tipos de ligante e/ou métodos de dosagem em termos das propriedades físicas e reológicas do concreto asfáltico e também no seu desempenho (NOVADUTRA, 2007).

A ficha técnica do experimento é apresentada na tabela 4.36.

Tabela 4.36 – Ficha técnica do experimento com simulador de tráfego na BR-116/SP

Ficha técnica do experimento	
Local	BR-116/SP
Interessado/ Contratante	NovaDutra
Objetivo	Avaliação do comportamento de diversos tipos de revestimentos betuminosos projetados pelos métodos Marshall e Superpave sob ação de Simulador de Tráfego Linear Móvel
Período	Outubro de 2005 a Março de 2006
Entidades Participantes	Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) NovaDutra / Centro de Pesquisas Rodoviárias / Engelog COPPE-UFRJ Escola Politécnica da USP Dynatest Engenharia Simular-Tecnologia do Pavimento Usina Jambeiro da Serveng-Civilsan Dan Hebert
Número de seções- teste	5
Principais aspectos observados	<p>Os ensaios permitem comparar o desempenho das misturas asfálticas na estrutura de pavimento, devendo ser consideradas as diferenças no total de ciclos e de operações equivalentes de cargas aplicadas nas distintas seções-teste, bem como a restrição de sua aplicabilidade fora do âmbito da pesquisa. Em síntese observou-se que:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Somente na seção de CAP com polímero houve evolução significativa no valor de flecha em trilha de roda, sendo constatada flecha superior a 6mm ao número “N” de $1,5 \times 10^7$, ao passo que nas demais seções os valores finais foram da ordem de 1 a 2mm. ○ Apesar das dispersões e dos baixos valores de R2 todos os valores de macrotextura e microtextura se mantiveram dentro de parâmetros de excelência exigidos nas rodovias federais concessionadas, ou seja, HS entre 0,6 e 1,2 mm e VRD entre 47 e 75. <p>Em termos estruturais constata-se que somente a seção de CAP polímero SBS apresentou uma evolução inicial significativa nos valores de deflexão com posterior estabilização nas leituras. Contata-se também uma tendência de evolução dos valores deflectométricos no trecho do CAP-20 Superpave após $1,5 \times 10^7$ operação do eixo padrão rodoviário.</p>

Durante a execução dos estudos as especificações nacionais para o cimento asfáltico de petróleo foram alteradas, passando a serem classificadas em função dos resultados dos ensaios de penetração, e não mais por sua viscosidade. Assim, de acordo com a resolução número 19 da Agência Nacional do Petróleo, de 11/07/2005, o CAP-20 passou a ser especificado como CAP-50/70 e o CAP-40 como CAP-30-45. Todavia a nomenclatura aqui adotada refere-se à empregada na época do início da pesquisa (NOVADUTRA, 2007).

A primeira fase da pesquisa foi em laboratório, onde foram realizadas as dosagens de misturas com diferentes ligantes (CAP-20, CAP-40, CAP com polímero SBS e CAP com borracha) pelo método Marshall, com diferentes energias de compactação (75 e 90 golpes) e pelo método Superpave. (NOVADUTRA, 2007).

Na fase seguinte da pesquisa, foram selecionadas cinco misturas cujos comportamentos foram testados em pista com o Simulador de Tráfego Linear Móvel. Estas misturas encontram-se listadas a seguir, onde após a identificação do tipo de ligante empregado tem-se o método de compactação na dosagem e a energia empregada:

- CBUQ faixa C do DNIT com CAP-20 - Marshall 75 golpes;
- CBUQ faixa C do DNIT com CAP-20 - Superpave 125 giros;
- CBUQ faixa C do DNIT com CAP-40 - Marshall 75 golpes;
- CBUQ faixa C do DNIT c/ CAP com polímero SBS - Marshall 75 golpes;
- CBUQ faixa C do DNIT c/ CAP com borracha - Marshall 75 golpes.

Para a realização dos ensaios acelerados, optou-se pela execução de trechos experimentais consecutivos na alça de acesso da via Dutra (BR-116/SP) com a rodovia D. Pedro (SP-65). O local, nas proximidades do km 169 da BR-116 (NOVADUTRA, 2007).

O local e a posição das seções-teste, ilustrado na figura 4.50, foram selecionados por apresentar vantagens operacionais e de segurança, além de possuir uma estrutura de pavimento robusta, íntegra e homogênea.

Figura 4.50 – Ilustração do local das seções-teste na BR-116/SP. Fonte: NOVADUTRA (2007).

Fase 1: Estudos em Laboratório

Inicialmente, agregados da pedreira Jambeiro foram devidamente caracterizados e, em seguida, procedeu-se o enquadramento do material selecionado na faixa C das atuais especificações de serviço do DNIT. Na figura 4.51 é mostrada a curva testada em relação às faixas tradicionalmente empregadas no Brasil.

Figura 4.51 – Granulometria empregada na pesquisa na BR-116/SP em relação às faixas granulométricas de algumas especificações. Fonte: NOVADUTRA (2007).

Observa-se que a faixa atende também a outras especificações granulométricas para o concreto asfáltico, que também são bastante empregadas em dosagens de misturas asfálticas em obras rodoviárias no país, como a faixa III da DERSA, a Faixa B' do DNER, e a EGL 12,5 (especificação particular adotada pela concessionária NovaDutra nas obras de restauração e pavimentação).

De acordo com NOVADUTRA (2007), a etapa seguinte consistiu na realização dos projetos de misturas, alterando-se o ligante asfáltico empregado em conformidade com o método de dosagem Marshall para os doze tipos de misturas estudadas com as combinações possíveis dos distintos parâmetros:

- Ligantes: CAP-20, CAP-40, CAP com polímero e CAP com borracha;
- Método de dosagem e energia de compactação empregada:
 - Marshall com 75 golpes;
 - Marshall com 90 golpes;
 - Superpave com 125 giros no compactador giratório.

Os resultados da dosagem são resumidos na tabela 4.37.

Tabela 4.37 – Resumo dos resultados no teor ótimo de cada mistura utilizada na pesquisa na BR-116/SP

Tipo de Ligante	Método de Dosagem	D_{máx}	D	VV (%)	VAM (%)	CAP (% peso)	Dif CAP-20 (% peso)
CAP-20	Marshall 75 golpes	2.463	2.363	4,1	14,3	4,7	0,0
CAP-20	Marshall 90 golpes	2.468	2.366	4,1	14,0	4,5	0,0
CAP-20	Superpave 125 giros	2.475	2.376	4,0	13,5	4,4	0,0
CAP-40	Marshall 75 golpes	2.459	2.358	4,1	14,7	5,0	+0,3
CAP-40	Marshall 90 golpes	2.470	2.368	4,1	14,1	4,7	+0,2
CAP-40	Superpave 125 giros	2.473	2.376	3,9	13,7	4,6	+0,2
CAP com polímero SBS	Marshall 75 golpes	2.462	2.363	4,0	14,3	4,7	0,0
CAP com polímero SBS	Marshall 90 golpes	2.468	2.372	3,9	13,5	4,2	-0,3
CAP com polímero SBS	Superpave 125 giros	2.483	2.386	3,9	13,0	4,2	-0,2
CAP borracha	Marshall 75 golpes	2.434	2.329	4,3	16,4	5,5	+0,8
CAP borracha	Marshall 90 golpes	2.443	2.344	4,1	15,2	5,0	+0,5
CAP borracha	Superpave 125 giros	2.472	2.370	4,1	13,8	5,5	+1,1

Fonte: NOVADUTRA (2007).

Onde:

D_{máx} - é a massa específica máxima Rice, em g/cm³;

D - é a massa específica, em g/cm³;

VV - é o volume de vazios, em %;

VAM - são os vazios do agregado mineral, em %;

CAP - é o teor de asfalto na mistura, em % em peso;

Dif CAP-20 - é a diferença entre teor de asfalto na mistura da CAP-20 e a do CAP em questão no mesmo método de dosagem, em % em peso.

Constata-se que o CAP borracha foi o que exigiu em todos os métodos de dosagem o maior teor de ligante, seguido, respectivamente, pelo CAP-40, o CAP-20 e o CAP polímero. Observa-se também que o teor ótimo de ligante com asfalto modificado por polímero SBS foi semelhante ao teor da mistura de CAP-20 pelo Marshall com 75 golpes, e inferiores nos demais métodos (o que não condiz com a prática indicada na bibliografia). Este fato também chama a atenção quando se observam os dados de viscosidade dos ligantes a 177°C, apresentados na tabela 4.38.

Tabela 4.38 – Viscosidade a 177°C dos ligantes empregados na BR-116/SP

Ligante	sSF	cP
CAP-20	29	60
CAP-40	41	80
Asfalto modificado por polímero SBS	96	270
Asfalto borracha	-	1320

Fonte: NOVADUTRA (2007).

Neste ponto, deve-se destacar os benefícios trazidos pelos asfaltos modificados à mistura asfáltica, em termos de vida de fadiga, está também relacionado ao aumento no teor ótimo (filme de ligante mais espesso) da mistura, provocado pela alta viscosidade a altas temperaturas e a maior elasticidade dos ligantes modificados, e não somente pela simples incorporação do polímero ou da borracha.

Para a fase seguinte da pesquisa, foram selecionadas cinco misturas cujos comportamentos foram testados em pista com o Simulador. Estas misturas encontram-se listadas a seguir:

- CBUQ faixa C do DNIT com CAP-20-Marshall 75 golpes
- CBUQ faixa C do DNIT com CAP-20-Superpave 125 giros
- CBUQ faixa C do DNIT com CAP-40 - Marshall 75 golpes
- CBUQ faixa C do DNIT com CAP com polímero SBS - Marshall 75 golpes
- CBUQ faixa C do DNIT com CAP com borracha - Marshall 75 golpes

Para estas misturas foram realizados os ensaios de Deformação Permanente com

simulador de tráfego tipo LCPC francês, com duas placas de cada material coletado da pista, já compactadas e frias, conforme especificação francesa (AFNOR, 1991). Estes ensaios de deformação permanente em trilhas de roda foram conduzidos a 60°C até 30.000 ciclos, como especificados nesta norma. As regressões dos resultados de afundamentos em trilha de roda obtidos são apresentadas na figura 4.52.

Figura 4.52 – Resumo dos ensaios no simulador LCPC para os materiais coletados de pista não submetidos ao simulador de tráfego em escala real na BR-116/SP. Fonte: NOVADUTRA (2007)

Também foi realizada, em laboratório, a determinação da Curva de Fadiga para os cinco tipos de concreto asfáltico em questão, considerando-se as amostras moldadas em laboratório, coletadas na usina e retiradas da pista, totalizando quinze ensaios de cada tipo. Na determinação das curvas de fadiga foram utilizados os procedimentos baseados no uso do ensaio de tração por compressão diametral (escolhidos pela facilidade de moldagem do corpo-de-prova e disponibilidade de equipamentos capazes de aplicar as cargas necessárias à mobilização das tensões de interesse prático). Foram rompidos nove corpos-de-prova (três para cada velocidade) para cada mistura testada a fim de fazer a caracterização de suas propriedades mecânicas. Os ensaios foram realizados à temperatura de 25°C e utilizando três velocidades

nominais de carregamento (0,2, 0,5 e 1,3mm/min). Os resultados gerados são os parâmetros K e n referentes à curva de fadiga:

$$N_f = K \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^n$$

onde ε é a deformação específica de tração na mistura asfáltica (NOVADUTRA, 2007).

Os resultados, resumindo os dados de ensaios procedidos para cada uma das misturas nas três situações em tela, ou seja, misturas de laboratório, coletadas na usina e na pista após a compactação, são apresentados na figura 4.53.

Figura 4.53 – Gráfico da resistência à tração de misturas de laboratório, coletadas na usina e na pista após a compactação na BR-116/SP. Fonte: NOVADUTRA (2007).

Os resultados dos ensaios de resistência à tração indicam valores maiores para a mistura confeccionada com CAP-40, tanto para as amostras de laboratório quanto para as coletadas na usina e as retiradas da pista. Para a mistura confeccionada com CAP-20 e dosada pelo método Marshall constatou-se uma menor perda de resistência entre o laboratório e a pista. Já os resultados em laboratório da mistura realizada com este ligante, mas dosada pelo método Superpave, em termos de resistência à tração são semelhantes aos da dosada pelo método Marshall na amostra de laboratório, mas

bem inferiores nas amostras de pista. Por fim a maior perda de resistência entre as misturas confeccionadas em laboratório para as coletadas em pista ocorreu com a mistura com CAP polímero SBS, seguida pela mistura com CAP borracha, demonstrando problemas de usinagem e de execução.

Figura 4.54 – Gráfico do módulo de resiliência de misturas de laboratório, coletadas na usina e na pista após a compactação na BR-116/SP. Fonte: NOVADUTRA (2007).

No que se refere ao módulo de resiliência, observa-se na figura 4.54, a tendência de redução nos valores obtidos em amostras moldadas em laboratório tanto em relação às coletadas em usina quanto em relação às amostras retiradas da pista, indicando variações entre as distintas etapas do processo, desde o estudo em laboratório (condições controladas) até a aplicação em pista. Os resultados finais indicam valores em pista da ordem de 3.500 a 4.500MPa para as amostras de CBUQ com CAP borracha, CAP polímero e CAP-20 dosado pelo Superpave; e valores superiores a 4.000MPa para o CBUQ com CAP-20 e o CBUQ com CAP-40 dosados pelo método Marshall.

Com relação à energia de ligação inicial (WRO), a mistura com CAP Borracha teve a maior perda entre a mistura de laboratório, a usinada e a extraída da pista, seguida

respectivamente, pelo CBUQ com CAP modificado por SBS, com CAP-40 e com CAP-20, todos dosados pelo método Marshall com 75 golpes (figura 4.55).

Figura 4.55 – Gráfico da energia de ligação inicial de misturas de laboratório, coletadas na usina e na pista após a compactação na BR-116/SP. Fonte: NOVADUTRA (2007).

Convertendo-se os resultados da energia de ligação em percentuais em relação ao esperado em laboratório tem-se a porcentagem de energia retida após a usinagem e após a execução em pista para cada tipo de mistura, como pode ser observado na figura 4.56. Para a mistura dosada pelo Superpave com 125 giros não foi realizada esta avaliação, pois não se dispunha de dados da energia inicial em laboratório deste material, contudo a redução da amostra usinada, em relação à amostra coletada em pista, foi de cerca de 50%, como pode ser observado na figura 4.55.

Figura 4.56 – Porcentagem de energia retida após a usinagem de misturas de laboratório, coletadas na usina e na pista na BR-116/SP. Fonte: NOVADUTRA (2007).

Os resultados da curva de fadiga são resumidos nas figuras 4.57, 4.58 e 4.59, de forma comparativa entre os distintos tipos de materiais em cada situação analisada: laboratório, após usinagem e em pista. Constatam-se alterações significativas na vida de fadiga nas três amostras, independentemente do tipo de ligante, indicando a importância do processo de mistura/usinagem e de compactação na qualidade final do concreto asfáltico. Observa-se também que, em geral, a hierarquização dos materiais a partir dos resultados das curvas de fadiga não são compatíveis com a obtida para os valores de energia de ligação numa mesma fase da pesquisa.

Figura 4.57 – Curvas de fadiga das misturas asfálticas moldadas em laboratório para a pesquisa na BR-116/SP. Fonte: NOVADUTRA (2007).

Em termos de vida de fadiga, as amostras moldadas em laboratório que apresentaram melhores resultados foram respectivamente: (1) CAP-20 Marshall; (2) CAP-40 Marshall; (3) CAP Borracha; (4) CAP polímero SBS e (5) CAP-20 Superpave. Destaca-se a grande diferença entre os resultados das diferentes misturas confeccionadas com CAP-20, indicando a perda de vida de fadiga quando se reduz o teor de ligante da mistura.

Figura 4.58 – Curvas de fadiga das misturas asfálticas moldadas de amostras coletadas após a usinagem para a pesquisa na BR-116/SP. Fonte: NOVADUTRA (2007).

Para as amostras coletadas após a usinagem os resultados, em termos de vida de fadiga, indicam alteração na hierarquização apresentada anteriormente, sendo os materiais nesta situação classificados da seguinte forma: (1) CAP Borracha; (2) CAP-20 Superpave; (3) CAP-40 Marshall; (4) CAP-20 Marshall e (5) CAP polímero SBS. Para as amostras retiradas da pista, observou-se um ganho em termos de vida de fadiga para o CBUQ com CAP-40 ao passo que os resultados com CAP-20 se mantiveram praticamente constantes. Observou-se também uma melhora menos significativa nos resultados do CAP polímero e do CAP-20 dosado pelo Superpave, bem como uma piora nos resultados para o CAP borracha.

Figura 4.59 – Curvas de fadiga das misturas asfálticas coletadas nas seções-teste da BR-116/SP. Fonte: NOVADUTRA (2007).

A análise da vida de fadiga, determinada em amostras coletadas da pista, nos permite fazer a seguinte hierarquização para este parâmetro: (1) CAP-40 Marshall; (2) CAP-20 Marshall; (3) CAP Polímero SBS; (4) CAP-20 Superpave e (5) CAP-40 Borracha. Embora esta hierarquização não seja consistente com a bibliografia, ela é muito coerente com os resultados práticos obtidos.

Os resultados nos estudos de fadiga corroboram os resultados dos outros ensaios, indicando alterações significativas na vida de fadiga nas três amostras, independentemente do tipo de ligante, em função do processo de mistura/usinagem e de compactação.

Fase 2: Estudos em Pista

A segunda fase da pesquisa refere-se aos estudos do desempenho *in situ* das camadas asfálticas dosadas e estudadas em laboratório, empregando-se o Simulador de Tráfego Linear Móvel e monitorando-se o desempenho da rodovia.

Caracterização do Local

Tendo sido selecionado o trecho para a pesquisa, com base em aspectos operacionais da rodovia, a etapa seguinte consistiu na caracterização dos pavimentos de forma a identificar as suas condições, tanto em termos funcionais como em termos estruturais. O local é uma alça utilizada somente por veículos que acessam a saída para a SP-65 e fazem a opção de continuar na rodovia BR-116. Têm-se, portanto, um pavimento que sofreu pouca ação do tráfego, desde a sua inauguração há cerca de vinte anos, estando sujeita, entretanto, às ações de intempéries como os ciclos de chuva e calor (NOVADUTRA, 2007).

De acordo com NOVADUTRA (2007), os dados do projeto de pavimentação da rodovia SP-65 indicam que o pavimento em questão é do tipo semi-rígido, com revestimento asfáltico sobre base granular. O furo de sondagem aberto no local confirmou esta informação, indicando a seguinte estrutura:

- Revestimento em Concreto Asfáltico (CBUQ) com 120mm;
- Base de Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) com 200mm;
- Sub-base de Brita Graduada Simples (BGS) com 170mm;
- Reforço do subleito em solo com 210mm;
- Reforço do subleito com Rachão com 140mm;
- Subleito.

Foram realizados levantamentos deflectométricos empregando-se o FWD no pavimento. Os perfis com os resultados obtidos e a identificação dos locais das seções-teste são apresentados na figura 4.60, tendo sido realizados ensaios com cargas de 4 e 8tf no semi-eixo, ao longo de todo o trecho.

Figura 4.60 – Perfil deflectométrico da faixa 1 do dispositivo da BR-116/SP com a SP-65. Fonte: NOVADUTRA (2007).

É importante destacar que os ensaios foram realizados na faixa 1 da pista, ou seja, na faixa de tráfego mais próxima ao eixo da rodovia BR-116, sendo isto o que deveria orientar a definição do local para o posicionamento do simulador de tráfego. Todavia, por questões operacionais e de segurança, o Simulador foi posicionado na faixa 3 (externa), sendo nas seções-teste realizados os ensaios com o FWD antes e depois da simulação com o espaçamento de 0,5m entre as estações de ensaio e carga de 4tf no semi-eixo, como será apresentado na figura 4.66 (NOVADUTRA, 2007).

Foram retroanalisados os resultados das bacias de deflexão medidas com o FWD, de forma a determinar os módulos de resiliência *in situ* das camadas do pavimento de cada um dos trechos. Os resultados desta etapa, realizada empregando-se o programa computacional Elmod5, são apresentados na tabela 4.39.

Tabela 4.39 – Resultados da retroanálise com dados anteriores à obra de restauração na BR-116/SP

Carga no semi-eixo	Local	Módulos de Resiliência Retroanalizadas (MPa)				
		Revestimento	Base	Sub-base	Reforço	Subleito
4 tf	Trecho 1	1.484	9.439	333	182	212
	Trecho 2	1.107	4.784	204	108	325
	Trecho 3	1.124	7.545	283	158	176
	Trecho 4	4.181	9.489	435	195	190
	Trecho 5	2.091	4.353	188	133	291
8 tf	Trecho 1	1.571	12.455	486	262	199
	Trecho 2	1.645	6.286	257	138	278
	Trecho 3	1.585	9.412	366	207	173
	Trecho 4	4.944	11.179	510	213	167
	Trecho 5	2.095	5.683	227	137	254

Fonte: NOVADUTRA (2007).

Observa-se que os valores médios obtidos nas seções-teste indicam a integridade da infra-estrutura, especialmente no que se refere à camada de base cimentada que está íntegra (módulo superior a 4.000MPa) ao longo de todo o trecho (NOVADUTRA, 2007).

Também foi realizado um cadastro visual dos defeitos existentes na superfície do pavimento, onde foram identificadas, basicamente, trincas isoladas classes 2 e 3, e a ocorrência de desgaste (NOVADUTRA, 2007).

Execução da Obra

A execução do trecho consistiu na fresagem de 40mm do revestimento asfáltico existente na faixa externa de tráfego, seguida da limpeza com jato de ar comprimido, pintura de ligação e recomposição com a mistura asfáltica, atendendo-se à dosagem de cada seção-teste. Para tal foram utilizados os mesmos materiais ensaiados e caracterizados nos projetos de mistura e estudos de desempenho de laboratório. De acordo com NOVADUTRA (2007), na execução das atividades a usina utilizada foi do tipo gravimétrica (marca Ciber modelo UAB 18 E com capacidade de 120t/h), da Serveng-Civisan, localizada no km 14 da Rodovia dos Tamoios em Jambeiro. A

aplicação ficou a cargo da construtora Dan Hebert. As obras foram executadas entre 16 de setembro e 7 de outubro de 2005, conforme detalhado a seguir:

- Trecho 1: CAP-20-Marshall 75 golpes 16/09/05
- Trecho 2: CAP-20-Superpave 125 giros 17/09/05
- Trecho 3: CAP-40 - Marshall 75 golpes 22/09/05
- Trecho 4: CAP com polímero SBS - Marshall 75 golpes 29/09/05
- Trecho 5: CAP com borracha - Marshall 75 golpes 07/10/05

Todas as atividades foram acompanhadas e fiscalizadas pelo Centro de Pesquisas Rodoviárias da NovaDutra, de forma a garantir a qualidade e a fidedignidade dos dados de campo. Após a realização de todos os cinco trechos foram realizados os ensaios deflectométricos com a Viga Benkelman eletrônica, sendo os resultados apresentados na figura 4.61 de forma comparativa com os valores obtidos com o mesmo equipamento antes das obras de recuperação.

Figura 4.61 – Deflexões medidas com viga Benkelman eletrônica antes e após as obras de fresagens e recomposições na BR-116/SP. Fonte: NOVADUTRA (2007).

Constata-se o incremento dos níveis deflectométricos praticamente em todo o trecho, havendo maior discrepância entre os valores entre as seções-teste do CAP-20 Superpave e do CAP-40. Todavia os valores encontrados são baixos, especialmente junto às seções-teste.

Os ensaios de controle tecnológico das obras em termos de grau de compactação e espessura são resumidos na tabela 4.40.

Tabela 4.40 – Controle tecnológico das obras na BR-116/SP - parte 1

Mistura	Quantidade de Amostras	% Máxima de Vazios	% Mínima de Vazios	Espessura Mínima Obtida (cm)
CAP 20 - 75 GOLPES	4	7,3%	4,3%	4,4
CAP 20 - 125 GIROS	4	8,0%	2,7%	4,1
CAP 40 - 75 GOLPES	4	6,3%	3,9%	4,0
CAP SBS - 75 GOLPES	4	7,8%	3,3%	3,1
CAP BORRACHA - 75 GOLPES	4	7,9%	3,8%	3,8

Fonte: NOVADUTA (2007).

Destaca-se que os critérios de projeto são os seguintes:

- Porcentagem de Vazios ("X" Máximo) < 7,5%;
- Porcentagem de Vazios ("X" Mínimo) > 3,0%;
- Espessura ("X" Mínimo) > 38mm (95% de 40mm).

Também foram determinados os teores de material asfáltico, para a verificação do atendimento ao projeto em pista, bem como a granulometria da mistura executada e os valores de razão da resistência à tração (RRT) obtidos nos ensaios de dano por umidade induzida. Esses resultados são apresentados resumidamente na tabela 4.41.

Tabela 4.41 – Controle tecnológico das obras na BR-116/SP - parte 2

Seção	Tipo de Ligante	Método	Teor Projeto (%)	Teor Pista (%)	RRT (%)
1	CAP-20	Marshall	4,7	4,8	93,7
2	CAP-20	Superpave	4,4	4,4	84,9
3	CAP-40	Marshall	5,0	4,9	89,1
4	CAP c/ polímero SBS	Marshall	4,7	4,7	91,4
5	CAP c/ borracha	Marshall	5,5	5,3	98,6

Fonte: NOVADUTA (2007).

Método

Os testes acelerados foram realizados em conformidade com o método resumido a seguir:

- Movimentos carregados bidirecionais;
- Deslocamento transversal de 150mm;
- Velocidade do semi-eixo de aproximadamente 10km/h;
- Carga do semi-eixo de roda dupla de aproximadamente 7,9 toneladas, aferidas com balanças móveis no início dos ciclos em cada seção-teste (o que não ocorreu na seção-teste de asfalto borracha);
- Simulação de chuvas através do espargimento de 500 litros de água durante uma hora por dia, em períodos descontínuos de 5 a 15 minutos com vazão de 500 litros por hora, em área de 12 m por 2,5 m;
- Medição de temperaturas do pavimento e do ar;
- Monitoramento periódico das condições estruturais e funcionais do pavimento, com medições diárias da deflexão do pavimento, das deformações na trilha de roda, das condições de atrito e textura superficial;
- Registro das demais informações relevantes.

A extensão longitudinal coberta foi de 10m, sendo 7m de seção útil para monitoramento do pavimento visto que em cada extremidade não foram monitorados

os 1,5m finais, por se tratar da área de aceleração e desaceleração do semi-eixo do simulador. Transversalmente, o estudo abrangeu 700mm, o que representa 150mm de deslocamento transversal (os dois pneus e o vão entre eles totalizam 550mm de largura). Os tempos de percurso registrados para o deslocamento longitudinal e transversal foram de 12s e de 7min e 36s, respectivamente.

Uma vez que o objetivo da pesquisa era um estudo comparativo de desempenho das distintas misturas asfálticas em pista, os ensaios foram finalizados sempre que se atingiu um total de semiciclos de carga próxima a 250.000 numa seção-teste.

Resultados

A fase de estudos do desempenho das misturas asfálticas em pista é descrita a partir da apresentação de regressões dos dados para a proposição de modelos matemáticos, representativos dos parâmetros de controle, em cada uma das seções-teste. A tabela 4.42 apresenta a síntese da aplicação de cargas bidirecionais em cada uma das seções-teste.

Tabela 4.42 – Ciclos e operações equivalentes por seção-teste da BR-116/SP

Ligante	Método de Dosagem	Data de Início	Data de Fim	Carga / Ciclos / FC	Número “N”
CAP-20	Marshall	05/10/2005	10/11/2005	7.900 kgf de 0 a 199.838 ciclos (FC=57,49) 7.940 kgf de 199.838 a 326.536 ciclos (FC=59,33)	$1,90 \times 10^7$
CAP-20	Superpave 125 Giros	11/11/2005	07/12/2005	7.900 kgf de 0 a 206.900 ciclos (FC=57,49) 7.720 kgf de 206.900 a 286.256 ciclos (FC=49,77)	$1,60 \times 10^7$
CAP-40	Marshall	09/12/2005	02/01/2006	7.900 kgf de 0 a 286.388 ciclos (FC=57,49)	$1,65 \times 10^7$
CAP c/ polímero SBS	Marshall	4/01/2006	29/01/2006	7.900 kgf de 0 a 283.178 ciclos (FC=57,49)	$1,63 \times 10^7$
CAP c/ borracha	Marshall	09/02/2006	02/03/2006	6.867 kgf de 0 a 241.300 ciclos (FC=23,93)	$5,77 \times 10^6$

A elaboração dos gráficos com os resultados dos parâmetros técnicos avaliados em cada uma das cinco seções-teste, ao longo do período de simulação em termos de

operação equivalente do eixo padrão rodoviário pelo método USACE, permite a concepção preliminar de modelos de desempenhos para os distintos tipos de mistura nas condições locais. Neste ponto, deve-se observar que os modelos polinomiais de segunda ordem foram, em geral, os que levaram aos melhores resultados estatísticos (ou seja, maximizaram os valores de R^2).

Figura 4.62 – Evolução da Flecha em função do número de operações equivalentes ao eixo padrão rodoviário pelo método USACE (“N”) nas seções-teste da BR-116/SP.

Observa-se na figura 4.62 que somente na seção de CAP com polímero houve evolução significativa no valor de flecha em trilha de roda, sendo constatada flecha superior a 6mm ao número “ N_{USACE} ” de $1,5 \times 10^7$, ao passo que nas demais seções os valores finais foram da ordem de 1 a 2mm, neste nível de solicitação de cargas.

Figura 4.63 – Evolução da macrotextura em função do número de operações equivalentes ao eixo padrão rodoviário pelo método USACE (“N”) nas seções-teste da BR-116/SP.

Apesar das dispersões e dos baixos valores de R^2 todos os valores de macrotextura se mantiveram dentro de parâmetros de excelência exigidos nas rodovias federais concedidas, ou seja, entre 0,6 e 1,2mm, como pode ser visto na figura 4.63. Todavia, é importante observar que as diferenças de tendências se devem ao processo de desagregação de cada material.

Embora haja dispersões e baixos R^2 todos os valores de microtextura (expressos em termos de VRD) se mantiveram dentro dos parâmetros de excelência exigidos nas rodovias federais concedidas, ou seja, entre 47 e 75. Neste ponto, observam-se na figura 4.64 valores finais próximos nas cinco pistas, visto que o agregado empregado na camada de rolamento tem a mesma origem em todas as misturas de concreto asfáltico.

Figura 4.64 – Evolução da microtextura em função do número de operações equivalentes do eixo padrão rodoviário pelo método USACE (“N”) nas seções-teste da BR-116/SP.

Figura 4.65 – Evolução da deflexão retificada em função do número de operações equivalentes ao eixo padrão rodoviário pelo método USACE (“N”) nas seções-teste da BR-116/SP.

Em termos estruturais, constata-se na figura 4.65 que somente a seção de CAP polímero SBS apresentou uma evolução inicial significativa nos valores de deflexão com posterior estabilização nas leituras. É importante destacar aqui que, embora o modelo tenha indicado uma parábola invertida, na prática, o que se observa no trecho é um rápido crescimento nos valores deflectométricos até 5×10^6 operação do eixo padrão rodoviário (método USACE), com a estabilização da condição estrutural a partir deste nível de solicitação em valores intermediários, já não compatíveis com o tipo de estrutura em tela. Observa-se também uma tendência de evolução dos valores deflectométricos no trecho do CAP-20 Superpave após $1,5 \times 10^7$ operação do eixo padrão rodoviário (também pelo método USACE).

Constata-se então uma baixa correlação na regressão dos dados do trecho do CAP-20 Marshall sendo, todavia, importante observar que os valores de deflexão se mantiveram praticamente constantes ao longo do período de simulação de tráfego.

Resultados Complementares

Para que fosse possível fazer comparações, também foram realizados ensaios deflectométricos complementares com o FWD, a cada 0,5m nas seções-teste com os resultados, antes e depois dos ensaios acelerados, apresentados na figura 4.66.

Figura 4.66 – Evolução das deflexões após a simulação de tráfego na BR-116/SP.

As variações observadas ponto a ponto se devem ao processo de deterioração do pavimento, que não ocorre de forma constante em toda a seção-teste, inclusive em função das características dos materiais e processos empregados em obras de pavimentação, fato que também é observado em rodovias em operação, onde o processo de deterioração se inicia em alguns pontos para então se manifestar de forma generalizada.

Destaca-se que a seção com CAP polímero SBS foi a que apresentou maior evolução nos níveis deflectométricos como um todo, como constatado no monitoramento ao longo da simulação de tráfego. Todavia, se observa que os pontos finais da seção com CAP-20 Superpave também apresentaram evolução significativa na deflexão ao passo que, no centro desta seção, se manteve estruturalmente estável como observado no monitoramento durante o ensaio acelerado.

Os resultados obtidos na pista executada com emprego de asfalto polímero podem estar associados à ruptura inicial do pavimento, cujas causas remontam a fatores como a pequena espessura executada (aquém do preconizado inicialmente) solicitada por cargas excessivamente elevadas em relação às geralmente praticadas em rodovias

brasileiras, o baixo teor de ligante empregado em relação a misturas convencionais (tendo em vista os valores usuais da literatura), heterogeneidade da mistura propiciando a infiltração prematura da água aspergida na pista, etc.

Constata-se na tabela 4.43 que em todos os casos houve um incremento da deflexão característica após a realização dos testes acelerados, bem como uma maior heterogeneidade de valores (incremento do coeficiente de variação - CV, ou seja, da razão entre o desvio padrão e a média da deflexão).

Tabela 4.43 – Evolução dos valores deflectométricos na pesquisa na BR-116/SP

Descrição	Antes da Simulação				Depois da Simulação				Dc antes / Dc depois
	D (0,01 mm)	σ (0,01 mm)	Dc (0,01 mm)	C.V.	D (0,01 mm)	σ (0,01 mm)	Dc (0,01 mm)	C.V.	
CAP-20 75 golpes	13,3	1,9	15,2	14%	24,3	9,4	33,7	39%	2,22
CAP-20 125 giros	19,0	2,8	21,8	15%	32,3	20,0	52,3	62%	2,40
CAP-40 75 golpes	10,6	1,3	11,9	13%	20,1	4,2	24,3	21%	2,03
CAP com SBS 75 golpes	10,4	1,6	12,0	16%	36,7	6,8	43,5	19%	3,61
CAP com Borracha 75 golpes	11,9	2,8	14,7	24%	15,2	3,9	19,1	26%	1,30

Também foram coletadas amostras de material da pista após a seção-teste para comparação com os resultados de amostras de locais em que não foram realizados testes acelerados, o que permitiu observar a compactação gerada pelo tráfego, em termos de massa específica e de volume de vazios, como apresentados na figura 4.67. Observa-se em todos os casos a redução dos volumes de vazios devido à ação de tráfego imposta pelo simulador na pesquisa, ou seja, a ação de tráfego implicou em compactação adicional à mistura asfáltica.

Figura 4.67 – Volume de Vazios antes e depois da simulação na BR-116/SP

Comentários Finais e Conclusões

O estudo de laboratório da fase inicial da pesquisa indicou que teores ótimos de ligantes determinados para o concreto asfáltico faixa C, pelo método Superpave, são praticamente iguais aos obtidos pelo método Marshall com aplicação de 90 golpes. Assim, em ambos os casos, o teor ótimo é da ordem de 0,3% inferior ao teor ótimo obtido pelo método Marshall com 75 golpes num dado ligante. Há que se atentar que esta tendência não foi observada na dosagem do CBUQ com asfalto borracha.

Observa-se também que para o CAP-40 o teor ótimo de ligante foi 0,3% superior ao obtido com o CAP-20. Já o ligante com polímero apresenta esta tendência somente nas dosagens do Superpave e do Marshall 90 golpes, ao passo que no Marshall 75 golpes o teor ótimo foi ligeiramente menor do que o do CAP-20.

Além disto, o CAP borracha exigiu teores adicionais de ligante de 0,8%, 0,5% e 1,1% em relação ao CAP-20 nas dosagens Marshall com 75 e 90 golpes e na dosagem Superpave, respectivamente. Observa-se que o CAP borracha foi o que exigiu maior teor de ligante nos três métodos de dosagem estudados, fato associado a sua maior viscosidade.

Nos ensaios de desempenho em laboratório (em amostras coletadas em pista) para a verificação da deformação permanente da mistura com o simulador LCPC, observou-se que a mistura confeccionada com CAP com polímero foi a que apresentou menores deformações ao final de 30.000 ciclos a 60°C, sendo um resultado próximo ao obtido com a mistura empregando CAP borracha. Deve-se destacar que não há influência da estrutura do pavimento e das condições de contorno nos resultados, visto que o ensaio é laboratorial num substrato rígido. Neste simulador de laboratório os resultados finais das misturas confeccionadas com CAP-20 e CAP-40 dosados pelo método Marshall com 75 golpes foram muito similares, embora se observe que a tendência das curvas indica que os resultados se devem em grande parte à maior deformação da mistura com CAP-40 logo no início dos ciclos de carga.

Os resultados do simulador LCPC também indicam melhores resultados (menores deformações permanentes ao final de 30.000 ciclos a 60°C) para a mistura de CBUQ com CAP-20 dosada pelo método Superpave, em relação à mistura dosada pelo método Marshall com 75 golpes, ou seja, menores teores de ligante levam a menor tendência à deformação permanente numa dada mistura.

Os resultados dos ensaios de resistência à tração apresentados indicam maiores valores para a mistura confeccionada com CAP-40, tanto para as amostras de laboratório quanto para as coletadas na usina e para as retiradas da pista. Para a

mistura confeccionada com CAP-20 e dosada pelo método Marshall constatou-se uma menor perda de resistência entre a do laboratório e a da pista. Já os resultados em laboratório da mistura realizada com este mesmo ligante, mas dosada pelo método Superpave teve resultados de resistência à tração semelhantes à dosada pelo método Marshall na amostra de laboratório, mas bem inferior na coletada em pista. Por fim, a maior perda de resistência entre as misturas confeccionadas em laboratório para as coletadas em pista se deu com a mistura com CAP polímero SBS, seguida pela de CAP borracha.

No que se refere ao módulo de resiliência, observa-se a tendência de redução nos valores obtidos em amostras moldadas em laboratório para as coletadas em usina e outra redução para as amostras retiradas da pista, indicando perdas em todas as etapas do processo, desde o estudo em laboratório (condições controladas) até a aplicação em pista. Os resultados finais indicam valores em pista da ordem de 3.500 a 4.500MPa para as amostras de CBUQ com CAP borracha, com CAP polímero e com CAP-20, este último dosado pelo Superpave e valores superiores a 4.000MPa para misturas com CAP-20 e com CAP-40 dosadas pelo método Marshall.

Com relação à vida de fadiga, constatou-se que para as amostras moldadas em laboratório observam-se melhores resultados permitindo a seguinte hierarquização: (1) CAP-20 Marshall; (2) CAP-40 Marshall; (3) CAP Borracha; (4) CAP polímero SBS e (5) CAP-20 Superpave. Destaca-se a grande diferença entre os resultados das diferentes misturas confeccionadas com CAP-20, indicando a perda de vida de fadiga quando se reduz o teor de ligante da mistura. Já nas amostras retiradas da pista observou-se um ganho em termos de vida de fadiga para o CBUQ com CAP-40 ao passo que os resultados com CAP-20 se mantiveram praticamente constantes. Observou-se também uma melhora menos significativa nos resultados do CAP polímero e do CAP-20 dosado pelo Superpave, bem como uma piora nos resultados para o CAP borracha.

Os ensaios da segunda fase da pesquisa permitem comparar o desempenho das misturas asfálticas na estrutura do pavimento em questão. Todavia, nesta comparação

devem ser consideradas as diferenças no total de ciclos e de operações equivalentes de cargas aplicadas nas distintas seções-teste. A tabela 4.44 resume os resultados obtidos ao término da operação do simulador de tráfego nas cinco seções-teste em tela.

Tabela 4.44 - Resumo dos resultados das seções-teste da BR-116/SP

Seção	Tipo de Ligante	Método	Número de Ciclos	Número de Operações Equivalentes	Trincamento (%)	Flecha (mm)	Deflexão (0,01mm)
1	CAP-20	Marshall	326.536	1,91E+07	8%	1,9	17,2
2	CAP-20	Superpave	286.256	1,58E+07	35%	2,2	27,8
3	CAP-40	Marshall	286.388	1,65E+07	0%	1,6	11,6
4	CAP polímero SBS	Marshall	283.178	1,63E+07	7%	6,5	43,4
5	CAP borracha	Marshall	241.300	5,77E+06	0%	0,9	11,3

Como a variação do número “N” (número de operações equivalentes de carga) entre as quatro primeiras seções-teste e a quinta (asfalto borracha) é significativa, a comparação dos resultados deve ser realizada a partir das curvas de desempenho obtidas por tipo de mistura nas seções em questão.

Para efeito comparativo de desempenho das misturas no simulador móvel de tráfego, arbitrou-se no presente estudo a extrapolação dos resultados para $1,5 \times 10^7$ operações do eixo padrão rodoviário, o que reduz a necessidade de extrapolação de valores. Para tal nível de solicitação, podem-se constatar os valores apresentados na tabela 4.45.

Tabela 4.45 – Resultados das seções-teste ao final de $1,5 \times 10^7$ operações do eixo padrão rodoviário pelo método USACE nas seções-teste da BR-116/SP

Parâmetro	Tipo de Ligante e Método de Dosagem Empregado				
	CAP-20 Marshall	CAP-20 Superpave	CAP-40 Marshall	CAP polímero SBS Marshall	CAP borracha Marshall
Flecha (mm)	1,2	1,7	1,4	6,2	2,7
Mancha de Areia (mm)	1,2	0,9	1,0	1,1	0,8
VRD	59,1	59,5	57,3	50,8	71,7
Deflexão (0,01 mm)	17,3	22,2	11,3	38,4	10,2

Esses resultados são válidos no âmbito do escopo da pesquisa em questão, sendo importante observar que apesar do CAP-40 ter apresentado melhores resultados em parte significativa dos ensaios, devem ser atribuídos pesos para os parâmetros em análise, em função do tipo de emprego que se pretende dar à mistura de concreto asfáltico.

Considerações Complementares

Em complemento à pesquisa de laboratório e de campo com o Simulador de Tráfego Linear Móvel, com o objetivo de relacionar os resultados obtidos com os que serão constatados na rodovia em serviço, sujeitos às condições específicas de operação de cargas, tanto em termos de valores individuais, frequência e velocidade, quanto em termos de intempéries provocadas por agentes naturais (sol e chuva) foram executadas seções-teste na pista Sul da rodovia BR-116/SP, entre os quilômetros 169 e 172.

Observa-se que as misturas foram confeccionadas com os ligantes empregados na confecção da seção-teste, não havendo qualquer variação nos componentes destes em relação aos aplicados na realização dos ensaios acelerados com o simulador de tráfego.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DAS EXPERIÊNCIAS BRASILEIRAS E PROPOSIÇÃO DE MÉTODO PARA SIMULAÇÕES

Neste capítulo são discutidos os aspectos relacionados ao planejamento e aos procedimentos de ensaios adotados nos trabalhos realizados no Brasil até meados do ano de 2006, com o simulador de tráfego linear móvel, com atenção especial às dificuldades encontradas na operacionalização dos estudos, aos benefícios e às limitações dos mesmos, tendo em vista os objetivos originais. Estes aspectos divididos por temas, são detalhados a seguir, sendo os mesmos utilizados para a proposição de um método para o emprego do simulador de tráfego em futuras pesquisas.

5.1. Local

Uma das vantagens deste equipamento é que ele pode ser posicionado praticamente, em qualquer rodovia brasileira que possa ser alcançada através de transporte rodoviário, o que permitiu o desenvolvimento de ensaios em rodovias localizadas em três Estados diferentes.

Observou-se inicialmente que, em todas as pesquisas, o emprego do simulador móvel de tráfego foi em seções-teste localizadas ao longo dos trechos aos quais os estudos eram endereçados. O estudo da BR-116/SP (via Dutra), por razões técnico-operacionais, foi realizado em um dispositivo de acesso na faixa de domínio da rodovia, com estrutura de pavimento homogênea e bastante robusta, permitindo o estudo de misturas confeccionadas em usina fornecedora de CBUQ para as obras de restauração da rodovia e nas condições climáticas típicas da região.

Há que se observar o caráter comparativo do estudo de desempenho das pesquisas em questão, nas quais podem ser verificadas certas influências nos resultados devido à escolha do local de posicionamento do simulador de tráfego. Em um estudo comparativo de materiais, a homogeneidade do pavimento nas seções-teste é de

grande importância para que não haja interferência de outras variáveis que possam afetar os resultados.

Neste sentido, foram constatadas algumas divergências significativas dentre as três estruturas de pavimento do estudo na RS-122. As estruturas de pavimento das três seções-teste, observadas na abertura de trincheiras, apresentaram variação significativa na espessura de brita graduada da base e na origem de materiais. A base da seção-teste de asfalto borracha possui 120mm de espessura a mais do que a da pista convencional 1, totalizando 420mm de BGS. Além disto, observaram-se maiores deflexões na pista de asfalto borracha, como resumido na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Resumo das deflexões nas pistas convencional 1 e borracha na pesquisa na RS-122

Pista	Ciclos	Deflexão Máxima		T °C
		Carga de 4,1 t no semi-eixo	Carga de 8,1 t no semi-eixo	
Convencional 1	868.314	42×10^{-2} mm	72×10^{-2} mm	22
	1.194.629	45×10^{-2} mm	80×10^{-2} mm	17
Borracha	79.665	50×10^{-2} mm	61×10^{-2} mm	29
	1.350.805	61×10^{-2} mm	103×10^{-2} mm	23

Também se observou uma diferença significativa na espessura da camada asfáltica, em relação às demais, na seção 4 da concessionária Autovias (150 a 170mm a mais de concreto asfáltico), o que poderia dificultar a comparação com os resultados da seção-teste 3. Entretanto, em ambos os casos foi observado um problema associado a questões de segurança, ou seja, sobre a aderência pneu-pavimento (sendo que os melhores resultados foram obtidos na pista de pavimento com menor espessura de CBUQ). Esta característica é inerente à camada de rolamento executada, e não à estrutura de pavimento existente.

5.2. Clima

O parâmetro clima foi muitas vezes desconsiderado durante o planejamento e a condução das pesquisas até então realizadas. Como consequência disso, na pesquisa

realizada na rodovia RS-122, uma pista adicional foi simulada com o objetivo de verificar os resultados destoantes aos da literatura, em condição climática bastante diferenciada dos da seção original, o que levou a outras contradições (embora claramente justificáveis pelos valores médios das temperaturas ao longo da simulação de tráfego, associados aos resultados de ensaios no simulador LCPC).

Na pesquisa realizada pela CRT houve uma preocupação inicial com os efeitos da temperatura sobre o comportamento resiliente de um pavimento asfáltico flexível, o que não produziu avanços em termos de resultados, em função das dificuldades na obtenção destas informações por instrumentação com termopares.

Nas demais pesquisas, as temperaturas foram registradas e muitas vezes não consolidadas, o que é importante na análise de informações para uma possível comparação de resultados entre os pesquisadores.

Uma mudança de planos importante ao longo da pesquisa na BR-116/RJ, que auxilia na manutenção de condições semelhantes entre as seções-teste, foi a decisão de aspergir água sobre as seções 2, 3 e 4 durante os ensaios acelerados, visto que a seção 1 foi ensaiada em período bastante chuvoso.

O recurso de aspersão de água na superfície, durante o ensaio acelerado, também foi empregado durante os ensaios na SP-147 e na BR-116/SP, o que foi uma decisão acertada, quando se tem a água como um dos fatores importantes para o processo de deterioração dos pavimentos destas rodovias.

5.3. Deslocamentos do Simulador

O simulador de tráfego linear móvel é um equipamento de fácil mobilidade, porém exige cuidados durante o deslocamento de um segmento para outro. O sistema de aplicação de cargas, comandado por um cilindro hidráulico, tem um curso máximo de trabalho de 250mm. Para que este curso funcione adequadamente, toda a estrutura do simulador deverá estar a aproximadamente 1,25m de altura (da estrutura lateral do

simulador até o pavimento). Como o simulador precisa ficar a uma altura aproximada de 1,25m do pavimento, recomenda-se que o cavalo mecânico que o transportará tenha pneus 900R20. No caso do cavalo mecânico dotado de pneus 1100R20 é necessário levantar o simulador através dos pés mecânicos, demandando maior consumo de tempo (FRITZEN, 2005b).

5.4. Execução

Em se tratando de uma seção-teste que será submetida a ensaios acelerados de pavimentos, todos os requisitos de qualidade devem ser atendidos na execução da seção-teste. Assim, o não atendimento destes deve ser identificado pelo controle de qualidade de obra antes do início da operação com o simulador e, quando necessárias, ações corretivas devem ser tomadas, mesmo que impliquem na necessidade de re-serviços.

Este fato é importante para a obtenção de resultados consistentes e comparáveis entre si ao final da pesquisa, o que não ocorreu no caso da pesquisa da BR-116/RJ, onde o concreto asfáltico da camada de rolamento de uma seção trincou antes de ser exposta ao simulador de tráfego e o de uma outra seção apresentou baixo grau de compactação. Em três das cinco pistas experimentais executadas no experimento da via Dutra foi constatado o não atendimento às premissas de projeto, seja em termos de volume de vazios e de grau de compactação ou em termos de espessura mínima da camada de rolamento.

A execução de trechos experimentais de extensões maiores, como as adotadas nas pesquisas do DAER (300m), da Autovias (250m) e da Intervias (400m), embora não impliquem diretamente em melhores obras, certamente permitem melhores ajustes no início do serviço, pois reduzem a possibilidade de problemas de execução durante a aplicação dos materiais, do que seções menores (como as da CRT com 50m e as da NovaDutra com 60m).

Na execução, a opção pela instrumentação ou não do pavimento também se mostrou importante para o desempenho da estrutura, visto que na única pesquisa com o simulador de tráfego linear móvel na qual se optou pela utilização deste recurso, os pontos da instrumentação se mostraram críticos e exigiram operações corretivas, periodicamente. Assim, em uma pesquisa do pavimento com instrumentação, os sensores devem ser instalados com o máximo cuidado para que as condições de contorno não se alterem e para garantir a integridade dos equipamentos e da pista, durante a realização dos ensaios acelerados.

5.5. Simulação de Tráfego – Carga e Cobertura

O tráfego imposto pelo semi-eixo de carga do simulador de tráfego linear móvel ao pavimento, nas pesquisas em questão, também apresentou algumas peculiaridades que merecem comentários.

A primeira, comum a todas as pesquisas analisadas, é a utilização de cargas muito superiores às cargas máximas legais de um eixo simples de roda dupla, especificadas na legislação brasileira. Este recurso, importante para a aceleração dos ensaios e para a redução do tempo necessário para as simulações em pista, deve ser utilizado com ressalvas. Cargas excessivamente altas podem gerar rupturas prematuras, por cisalhamento e não por fadiga, exigindo o cuidado dos pesquisadores nas verificações da adequação destas à estrutura do pavimento antes da simulação de uma seção-teste. Além disso, valores muito discrepantes em relação aos observados na vida útil de serviço da rodovia, podem não representar o comportamento esperado na via em operação, especialmente em pavimentos mais susceptíveis aos efeitos do excesso de cargas.

Incrementar gradualmente as cargas impostas pelo simulador de tráfego é um ponto forte da pesquisa do DAER, pois este processo permite a acomodação gradual do pavimento à imposição de cargas de tráfego e permite verificar a resposta ao incremento destas cargas. Todavia, em estudos comparativos é importante que as

cargas sejam, se não iguais, da mesma magnitude e de frequência iguais em todas as seções, o que não ocorreu na pesquisa gaúcha.

Outro ponto que deve ser observado, também empregado em todas as pesquisas analisadas, é o apoio de equipamento externo ao simulador para a realização da aferição das cargas no início dos estudos de cada seção-teste. É importante que esta seja utilizada no início de cada seção-teste, o que evitará desperdícios de esforços e de recursos, garantindo a qualidade e permitindo atingir os objetivos da pesquisa.

Como exemplos de ocorrências de desvios de cargas em seções-teste, citam-se a simulação de trinta dias com carga praticamente nula no trecho 1 da BR-116/RJ, que resultou no reinício da pesquisa após a constatação deste fato, e a carga muito baixa no trecho de asfalto borracha da pesquisa da BR-116/SP, o que resultou em um número “N” menor do que o das demais pistas.

Em todos os casos foram empregadas as equações da USACE para a determinação dos fatores de equivalência de carga, o que é satisfatório para os objetivos das pesquisas em questão. O estudo da CRT apresentou neste ponto um diferencial, ao calcular os fatores de correção para as curvas de fadiga de laboratório e de campo e estudar teoricamente os efeitos de distribuição de cargas na estrutura. No entanto, o ideal é que a pesquisa seja realizada com o ensaio acelerado para a determinação de curvas de equivalência de carga para um dado pavimento, uma dada rodovia ou malha viária.

Outro fator importante durante o ensaio, relacionado à operação do semi-eixo de carga do simulador, é a dispersão lateral. As duas primeiras pesquisas trabalharam com maiores dispersões laterais, sendo que nas pesquisas mais recentes este valor é limitado a no máximo 150mm, o que equivale a uma relação operação-cobertura (O/C) de 1,0. A relação O/C de 1,0 indica que há pontos na seção onde, no mínimo, uma parte do pneu sempre está realizando a aplicação de carga. Nas pesquisas com dispersão de 150mm, há uma banda de aproximadamente 50mm sob cada pneu em que isso ocorre.

Vale ressaltar que a dispersão lateral de 750mm, correspondente à largura da trilha externa existente no pavimento antes do recapeamento na RS-122, foi alterada durante a simulação da pista convencional 1, em função do bom desempenho do pavimento. Este tipo de alteração pode ser prejudicial para a análise comparativa dos dados de seções distintas, exigindo considerações das diferentes relações O/C na ponderação do número de operações equivalentes de carga.

A escolha do sentido único ou de testes bidirecionais, de acordo com a bibliografia, pode ser importante. Na pequena comparação realizada em seções-teste da CRT os valores de flecha em trilha de roda foram semelhantes para as duas condições.

Os efeitos da variação de cargas e da pressão dos pneus em um pavimento foram estudados na pesquisa com o simulador de tráfego na RS-122 por BIANCHINI, JOHNSTON e PASSOS (2006). Foram realizadas as análises das relações entre a carga aplicada (variando de 4,1 a 8,1tf no semi-eixo simples de roda dupla), a área de contato pneu-pavimento e a pressão de contato do pneu 9.00/20 diagonal, bem como para três níveis de inflação (80, 90 e 100 psi equivalente a 0,56, 0.63 e 0.70MPa). Com o emprego de viga Benkelman eletrônica, para estas combinações também foram medidas a bacia de deflexão do pavimento. O estudo permitiu constatar que:

- O contato do pneu aproxima-se da forma de um retângulo com cantos arredondados, sendo que a largura permaneceu praticamente inalterada com as variações de cargas aplicadas. O aumento da área advém do aumento do comprimento;
- Num mesmo nível de carga, a área de contato diminui com o aumento da pressão de inflação;
- Para cargas no semi-eixo inferiores a 5,4tf para 80psi; 6,3tf para 90psi e 7,2tf para 100psi, as áreas de contato medidas são menores do que as áreas de contato teóricas, ou seja, para cargas menores, os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis resultam em uma estrutura que favorece a segurança;

- A pressão de contato cresce com o aumento da carga num mesmo nível de inflação do pneu e, para um mesmo nível de carga, a pressão de contato cresce com o aumento da pressão de inflação;
- As deflexões medidas não se mostraram sensíveis à variação da pressão de inflação na estrutura estudada.

5.6. Simulação de Tráfego e Monitoramento

As seções-teste foram monitoradas através de parâmetros relacionados à condição do pavimento com ensaios não destrutivos, com frequência pré-estabelecida caso a caso, incluindo-se no mínimo duas das seguintes avaliações: registro do número de ciclos acumulado, temperatura do ar e do pavimento por ocasião das medidas, a trilha de roda, a deflexão com viga Benkelman, a condição visual da superfície e as condições de aderência pneu-pavimento, além de registros das condições climáticas.

Neste ponto, destaca-se a importância do monitoramento da condição estrutural do pavimento, que pode incluir a medição da bacia de deformação com a viga Benkelman ou a viga eletrônica, sempre que se observar alterações nas deflexões máximas, ou em todas as medidas realizadas.

Nas pesquisas realizadas em rodovias no estado de São Paulo, foram monitoradas as condições de segurança durante a simulação de tráfego, o que pode ser especialmente importante em camadas de rolamento, como na pesquisa realizada na SP-330. Neste caso específico, foram as condições de aderência que indicaram o fim da vida útil do pavimento.

Na pesquisa conduzida pelo DAER, a precipitação também foi monitorada por um pluviômetro instalado no local que realizava leituras diárias, sendo que nas outras pesquisas, quando há registros com relação às chuvas, estes são empíricos (são anotados os dias em que ocorrem as chuvas bem como a sua duração). Estas avaliações são importantes, pois este parâmetro pode influenciar o desempenho do pavimento simulado e pode ser considerado no ajuste e mesmo na escolha da

aspersão ou não de água, de forma a se manter em condições similares em todas as seções-teste.

A temperatura foi monitorada em todos os casos a partir de medidas pontuais, realizadas em diversos horários do dia, com critérios individuais e variando caso a caso.

Em todos os monitoramentos citados, em se tratando de ensaios acelerados de pavimentos, a questão mais importante é a necessidade da realização de campanhas de monitoramento em frequência alta, visto que em uma hora o equipamento permite a realização de 800 semiciclos de carga, o que equivale a mais de 19.200 operações por dia com cargas de até 10tf no semi-eixo (2,4 vezes maior do que a da carga padrão e o dobro da carga legal permitida).

Por fim, não houve uma padronização para a apresentação dos resultados nas cinco pesquisas analisadas, sendo que muitas vezes algumas das informações nem mesmo foram apresentadas, embora tenham sido monitoradas durante os ensaios acelerados.

5.7. Aspectos Adicionais

A pesquisa com o simulador realizada na CRT mostrou a importância de se ter um plano de cópias de segurança para as informações coletadas durante o monitoramento das pistas, seja este realizado por vistorias e ensaios não destrutivos, ou a partir da instrumentação do pavimento.

Por fim, as pesquisas mostraram a preocupação com a comprovação dos resultados obtidos nos ensaios acelerados em vias em operação, sendo proposto sempre o acompanhamento das seções durante a vida de serviço de uma via sob tráfego real. Neste ponto, observa-se a importância de se incluir, além do monitoramento periódico do pavimento, as contagens volumétricas e classificatórias de tráfego e as informações sobre as cargas por eixo.

5.8. Comentários sobre as Pesquisas Analisadas

As cinco pesquisas com o simulador de tráfego linear móvel em análise, obtiveram resultados bastante distintos, desde a corroboração do emprego de novas técnicas de recuperação de pavimentos, como no caso da reciclagem a frio *in situ* da SP-147 (embora sem um estudo comparativo em seção-teste de referência sob as mesmas condições de ensaio), até a contra indicação do emprego da alternativa de rejuvenescimento com tratamentos superficiais modificados com polímero, mesmo quando sobreposta por microrrevestimento asfáltico, na restauração da SP-330 na região de Ribeirão Preto, quando se espera uma vida útil superior a cinco anos. Estas pesquisas também geraram dúvidas e resultados que contradiziam as experiências internacionais, como no caso das pesquisas realizadas na região Sul do país e no Rio de Janeiro, além de motivarem novas experiências, como o estudo da BR-116/SP, que levou a NovaDutra a iniciar um amplo estudo laboratorial para a verificação dos efeitos de distintos ligantes e seus teores no comportamento de concretos asfálticos.

Os principais pontos observados em cada uma das cinco pesquisas são apresentados a seguir. Antes, destaca-se a importância da análise integrada dos ensaios acelerados com os ensaios de laboratório, realizados tanto na fase de projeto quanto no controle de qualidade das obras bem como na avaliação de amostras retiradas de pista, antes e após a simulação de tráfego.

5.8.1. Pesquisa RS-122 (DAER)

A pesquisa conduzida pelo DAER na RS-122 não confirmou as duas hipóteses iniciais de que o concreto asfáltico empregando ligante modificado com borracha apresentaria melhor desempenho do que o confeccionado com ligante convencional; e que as seções-teste subdimensionadas romperiam rapidamente com o emprego do simulador de tráfego. Tais fatos motivaram ensaios complementares de laboratório e a inclusão de uma pista teste adicional para verificação do desempenho do concreto asfáltico convencional.

Os ensaios complementares realizados em amostras retiradas de pista indicam que o inadequado desempenho da seção com asfalto borracha, em relação à de asfalto convencional, deve-se, possivelmente, a problemas de execução, o que justificaria a baixa energia de ligação do mesmo, se comparada à obtida nos ensaios com misturas confeccionadas com CAP-20.

Além disso, poderia ter sido realizado ensaios de fadiga em amostras de laboratório e em amostras coletadas em pista, com vistas a aumentar a quantidade de informação sobre as misturas aplicadas e comprovar se, de fato, o ligante foi superaquecido.

Já o desempenho inesperado das seções subdimensionadas com o simulador de tráfego não pôde ser comprovado pela seção-teste adicional, visto que a mesma foi realizada em período mais quente, o que contribuiu decisivamente para a sua ruptura por deformação permanente. A suscetibilidade do concreto asfáltico convencional empregado nesta pesquisa foi comprovada nos ensaios no simulador de laboratório LCPC. Na pista convencional 1 não se observou flecha em trilha de roda significativa, porque a simulação de tráfego ocorreu sob temperaturas mais baixas.

5.8.2. Pesquisa SP-330 (Autovias)

A pesquisa realizada pela Autovias na SP-330 indicou que a solução de recuperação do pavimento com tratamento superficial simples com polímero e microrrevestimento a frio sobrejacente apresenta vida útil superior a cinco anos neste segmento de rodovia, em termos estruturais e de irregularidade longitudinal com vista aos padrões de desempenho exigidos pela ARTESP. Entretanto, os padrões indesejáveis de segurança expressos pela microtextura (VRD inferior a 47) e pela macrotextura (altura de areia superior a 1,2 mm) foram observados no revestimento após um número de operações equivalentes igual ao previsto para um horizonte de cinco anos na rodovia entre os quilômetros 240 e 300.

O tratamento superficial simples com polímero se mostrou excessivamente rugoso desde a sua execução, excedendo o limite máximo de macrotextura preconizado pela

ARTESP em suas rodovias concedidas. Além disso, a microtextura se mostrou inadequada com um nível de solicitação de cargas equivalentes a menos de três anos de tráfego previsto para o segmento rodoviário em questão.

Estes resultados levaram a empresa concessionária a estudar novas alternativas para a restauração dos pavimentos deste trecho da rodovia, com vistas ao atendimento da vida remanescente desejável após a segunda intervenção. Hoje, parte significativa deste trecho da SP-330, concedido a Autovias, já se encontra recuperada com a aplicação de 25mm de *Stone Mastique Asphalt* (SMA).

5.8.3. Pesquisa BR-116/RJ (CRT)

No estudo da CRT na BR-116/RJ, a vida útil relativa, entre as três seções-teste que empregaram soluções em revestimento asfáltico e que atingiram o fim da vida útil na simulação de tráfego, foi semelhante. A partir dos resultados, a seção com geogrelha Hatelit apresentou vida 15% superior à convencional e a com borracha ficou em situação intermediária (8% a mais de vida que a pista com asfalto comum).

Porém, houve problemas de trincamento prematuro da seção com geogrelha, sem a ação do tráfego, e os resultados dos ensaios de laboratório em amostras retiradas da pista indicaram que o trincamento nesta seção ocorreu a partir do topo do revestimento, diferindo do processo de fadiga observados nas seções deste experimento. Outro ponto importante, que pode ter contribuído negativamente para os resultados do experimento na pista de asfalto borracha, foi o baixo grau de compactação e, por consequência, o elevado volume de vazios da mistura executada em pista.

Os dados de contagens de tráfego no km 133,5 da rodovia BR-116/RJ, apresentados por FRITZEN (2005b) e transcritos na tabela 5.2, permitem a determinação do número de operações equivalentes de tráfego pelo método da USACE (número N_{USACE}). O valor obtido é da ordem de 9×10^6 ao ano, considerando que 25% dos veículos trafegam vazios, 70% dos veículos operam com carga máxima legal e 5%

com excesso de cargas. No entanto, há a necessidade de correção deste número em função da canalização de tráfego durante o ensaio acelerado, visto que a mesma não ocorre na prática, o que torna o teste acelerado mais severo.

Tabela 5.2 – Contagens de tráfego no sentido Teresópolis da praça de pedágio no km 133,5 da BR-116/RJ.

Número de Eixos	Tipos de Veículos Comerciais*	VDM_{Comercial} em 2003
2	2C	1297
3	3C – 2S1	1605
4	4C – 2S2 2C2	151
5	2S3 – 3S2 – 2C3	995
6	3S3	206
7	3S2S2	43
8 ou mais	Especiais	0

* conforme o manual do DNIT (1998).

Fonte: FRITZEN (2005b).

A análise dos resultados obtidos em termos de número N_{USACE} nas três seções que atingiram o fim da vida de fadiga indica um total de operações equivalentes correspondente a menos de um ano de tráfego na rodovia, o que significa dizer que a vida constatada nestas seções é muito inferior à desejada para uma solução de restauração dos pavimentos deste segmento, em que pese a necessidade de consideração dos efeitos da canalização de tráfego nos ensaios acelerados (o que resultaria em números maiores).

A importante tentativa de instrumentação do pavimento neste experimento merece menção, mesmo com os problemas durante a pesquisa, por se tratar de mais um passo em direção ao conhecimento do comportamento de pavimentos, face às solicitações de tráfego.

Outro recurso utilizado neste experimento, que auxilia no monitoramento do pavimento, foi o molde quadriculado de 1m^2 com seção de 100mm x 100mm,

colocado sobre a pista para contribuir no mapeamento da área trincada, recurso que já é utilizado nos ensaios acelerados com o simulador UFRGS-DAER/RS.

5.8.4. Pesquisa SP-147 (Intervias)

A pesquisa conduzida na SP-147, pela Intervias, tinha como objetivo estudar o desempenho do pavimento restaurado através da técnica de reciclagem a frio *in situ* do revestimento asfáltico, como alternativa de solução de recuperação do segmento da rodovia entre Limeira e Piracicaba.

Os requisitos de desempenho, esperados em projetos, foram atendidos na pista teste sob ensaio acelerado após 535.028 semiciclos de cargas, executados depois da cura completa do material reciclado e da aplicação de microrrevestimento asfáltico a frio. Em função das cargas empregadas, equivalem a $2,36 \times 10^7$ operações do eixo padrão rodoviário calculado com os fatores de carga do USACE, ou $8,36 \times 10^6$ pela AASHTO, ou seja, equivalem ao tráfego de oito anos de operação neste trecho da rodovia. Por este motivo a reciclagem do revestimento foi executada neste segmento e a obra vem sendo monitorada pela concessionária há quase três anos.

Neste ponto observa-se que o experimento da SP-147 apresenta uma lacuna importante: a não execução de ensaios acelerados na seção-teste de referência executada pela concessionária. Este fato impede uma análise comparativa e aprofundada dos bons resultados obtidos na seção-teste de reciclagem a frio *in situ* do revestimento sob o simulador de tráfego.

5.8.5. Pesquisa BR-116/SP (NovaDutra)

A pesquisa conduzida pela concessionária NovaDutra buscou avaliar o comportamento de diversos tipos de revestimentos betuminosos projetados pelos métodos Marshall e Superpave sob a ação do Simulador de Tráfego Linear Móvel, promovendo um estudo comparativo entre o comportamento de distintos ligantes asfálticos e os métodos de dosagem.

A pesquisa foi dividida em duas fases, uma com os ensaios de laboratório e a outra com a execução de ensaios acelerados de pavimentos com o simulador de tráfego linear móvel, unindo as vantagens dos dois métodos.

Na fase de projeto da mistura pelo método Marshall com 75 golpes por face, chamou a atenção o fato de o teor ótimo de asfalto na mistura com ligante modificado por polímero ter sido ligeiramente inferior ao do CAP-20. Era de se esperar um teor mais elevado em função da viscosidade do ligante modificado por polímero.

Um ponto a ser destacado na pesquisa, por demonstrar as diferenças entre estas etapas, é a análise comparativa entre os resultados de ensaios de amostras do mesmo tipo de material obtidas em três condições distintas, listadas a seguir:

- i. Amostras confeccionadas e moldadas em laboratório;
- ii. Amostras de materiais coletados em usina e moldados e testados em laboratório;
- iii. Amostras coletadas em pista acabada e testadas em laboratório.

Praticamente todos os casos apresentaram diminuição dos valores de resistência à tração, de módulo de resiliência e de energia interna, ao se comparar a amostra de laboratório com a de usina e esta com a de pista. Esta redução foi mais acentuada nas misturas que empregavam ligantes modificados, seja com polímero SBS seja com borracha.

Este fato pode estar associado tanto à dificuldade de se reproduzir em pista as características de um projeto de laboratório, por limitações e por dificuldade de controle de natureza executiva, quanto pela maior dificuldade em se adaptar instalações e preparar equipes para a realização de obras com características distintas das convencionais, especialmente em pistas teste de pequena extensão.

Esta dedução é corroborada pelo controle tecnológico das obras, cujos valores de volume de vazios superiores a 7,5% (máximo admitido em projeto) foram

observados em no mínimo uma das quatro amostras do controle de qualidade realizado nas misturas convencionadas com asfalto borracha, com asfalto polímero e com CAP-20 dosado pelo método Superpave com 125 giros. Já as misturas empregando CAP-20 e CAP-40, dosadas pelo método Marshall com 75 golpes, atenderam as especificações de projeto em 100% das amostras do controle de qualidade. Outro agravante importante refere-se à constatação de uma espessura mínima dos corpos-de-prova do controle de qualidade (de 31mm na pista com asfalto o que também não atende ao mínimo de 38mm especificado em projeto).

Estes fatos, em parte, justificam os piores resultados obtidos nos ensaios acelerados, realizados na pista de asfalto com polímero, em relação às demais seções desta pesquisa, tanto em termos de formação de trilha de roda quanto em relação à evolução das deflexões sob a ação da carga.

Vale ainda a ressalva, em relação ao trecho com asfalto borracha, que não foi exigido pelo mesmo nível de carga que os demais e, portanto, seu resultado tem pouca representatividade na análise comparativa.

Outro ponto de interrogação surgiu após os ensaios no simulador de laboratório LCPC, realizado com amostras coletadas em pista, em que o material confeccionado com polímero SBS apresentou os melhores resultados em relação aos demais, exatamente o oposto do observado nos ensaios acelerados. Dentre as possíveis justificativas para tal fato está o critério de amostragem para os distintos ensaios, amostragem que pode não representar a pista como um todo, em especial tendo em vista a heterogeneidade da mistura constatada no controle tecnológico.

5.8.6. Quadro Resumo

A tabela 5.3 apresenta o resumo das cinco pesquisas com o simulador de tráfego linear móvel em análise, distinguindo-se os aspectos positivos e os aspectos negativos de cada estudo.

Tabela 5.3 – Quadro resumo dos aspectos positivos e aspectos negativos das pesquisas analisadas

Pesquisa	Aspectos Positivos	Aspectos Desfavoráveis
RS-122	<p>A) Estudo pioneiro com o equipamento de simulação de tráfego <i>in loco</i>.</p> <p>B) Monitoramento das pistas testes, durante os APT, realizado com detalhes, incluindo a medição de bacias deflectométricas.</p> <p>C) Estabelecimento, de forma empírica, uma rotina preliminar para emprego de simuladores de tráfego em pista.</p> <p>D) Associação de ensaios de laboratório para entender os resultados da pesquisa.</p> <p>E) Estudos complementares realizados com o simulador permitiram conhecer um pouco mais sobre os efeitos de cargas e pressões dos pneus na área de contato e nas deflexões.</p> <p>F) Verificação da influência da temperatura no desempenho de pavimentos asfálticos, especialmente associados à deformação em trilha de roda.</p>	<p>A) Emprego de cargas variadas em seqüência particularizada em cada uma das seções-teste, o que dificulta as comparações.</p> <p>B) Alteração da dispersão lateral durante o ensaio em uma das seções-teste.</p> <p>C) Problemas na execução da pista de asfalto borracha que não permitiram um estudo consistente do comportamento deste tipo de material.</p> <p>D) Aspectos climáticos, não considerados devidamente no planejamento e execução da pesquisa, levaram a resultados contraditórios nas duas pistas convencionais ensaiadas</p>

Continua

Pesquisa	Aspectos Positivos	Aspectos Desfavoráveis
SP-330	<p>A) Inclusão de ensaios das condições de microtextura e macrotextura no monitoramento das seções-teste</p> <p>B) Resultados das avaliações de segurança permitiram descartar as soluções de tratamento de superfície para horizontes superiores a cinco anos na SP-330</p>	<p>A) Não foi testada uma solução para o atendimento a pretendida vida útil de 8 anos no trecho da SP-330</p>
BR-116/RJ	<p>A) Primeira tentativa de instrumentação de pavimentos em ensaios com o simulador móvel.</p> <p>B) Estabelecimento de FEC com base em resultados de ensaios defletoométricos com o FWD.</p> <p>C) Adoção do molde metálico para auxílio no cadastro de defeitos.</p> <p>D) Associação de ensaios de laboratório para entender os resultados da pesquisa.</p> <p>E) Estudo comparativo do efeito do carregamento em sentido único em relação ao carregamento bidirecional.</p> <p>F) Adaptação do estudo com espargimento de água a partir da segunda simulação de tráfego para garantir condições climáticas semelhantes entre todas as pistas.</p>	<p>A) Não conclusão da simulação da seção 4 por término do contrato de aluguel do equipamento.</p> <p>B) Problemas executivos constatados anteriormente à simulação de tráfego nas seções 2 e 3 (seções com geogrelha e asfalto borracha) não foram corrigidos e prejudicam a análise de resultados.</p> <p>C) Poucos ensaios de monitoramento das seções-teste, realizados com baixa frequência (semanalmente).</p> <p>D) Instrumentação não produziu resultados técnicos e ainda exigiram ações de manutenção durante os APT.</p> <p>E) Não associação do número “N” ao previsto em pista.</p> <p>F) Falta de um plano de segurança para os dados do monitoramento.</p>

Continuação

Pesquisa	Aspectos Positivos	Aspectos Desfavoráveis
SP-147	<p>A) Consideração dos efeitos da cura do material reciclado a frio <i>in situ</i> no planejamento da pesquisa.</p> <p>B) Inclusão da aspersão de água e de cargas elevadas para solicitar de forma crítica o revestimento executado a frio e com elevado volume de vazios.</p> <p>C) Bons resultados permitiram o emprego da técnica de reciclagem com maior segurança em relação aos resultados previstos.</p>	<p>A) Falta estudo comparativo em seção-teste de referência sob as mesmas condições de ensaio.</p>
BR-116/SP	<p>A) Local selecionado para a pesquisa.</p> <p>B) Fase de laboratório realizada de forma ampla.</p> <p>C) Estudo do comportamento dos materiais nas distintas fases de uma obra (projeto, usinagem e aplicação).</p> <p>D) Resultados contraditórios motivaram um amplo estudo laboratorial de concretos asfálticos.</p> <p>E) Constatação, com o simulador de tráfego, da importância do controle tecnológico como forma de se propiciar um bom desempenho do material em pista.</p>	<p>A) Resultados contraditórios entre si e em relação à bibliografia.</p> <p>B) Problemas executivos em três das cinco seções-teste.</p> <p>C) Execução de simulação de tráfego com carga.</p> <p>D) Inconsistência entre os resultados de ensaios de laboratório em amostras coletadas em pista com os resultados do simulador de tráfego – salientando a importância de uma boa amostragem.</p>

Conclusão

5.9. Proposição de Método para Simulações

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. Neste aspecto, em um estudo de um novo material de pavimentação para emprego em rodovias vicinais, não faz sentido realizar a simulação em pavimento asfáltico robusto em operação de tráfego de uma rodovia troncal. Em contrapartida, estudos comparativos de materiais em pavimentos muito resilientes não são representativos para estruturas de pavimentos de vias estaduais paulistas concedidas na década de 1990.

A configuração estrutural de um pavimento é definida em projeto, incluindo-se os materiais que devem ser usados, suas espessuras e características físicas e mecânicas. O sistema estrutural é submetido então ao impacto do carregamento do tráfego sob as circunstâncias ambientais locais que afetam o seu desempenho. O desempenho do pavimento é consequência da inter-relação destes parâmetros. Assim, as análises de pavimentos devem considerar os seguintes aspectos:

- Materiais de pavimentação: especialmente no que se refere às características físicas, mecânicas e reológicas;
- Tráfego:
 - Eixos atuantes, podendo ser simples ou múltiplos;
 - Cargas estáticas e dinâmicas;
 - Dispersão lateral do tráfego;
 - Sistema de suspensão empregado;
 - Pressão dos pneus / Tensão de contato;
 - Tipo de pneu;
 - Velocidade.
- Impactos ambientais:

- Temperatura;
- Água em suas diversas formas;
- Ventos e radiação.

Os ensaios acelerados com o Simulador de Tráfego Linear Móvel permitem o controle da maior parte destes parâmetros, o que possibilita uma extensa gama de aplicações, desde que as pesquisas sejam devidamente planejadas e executadas.

O conhecimento do tipo de estudo que se planeja também é fundamental em todo o processo de simulação de tráfego. Em síntese, estudos realizados com o simulador de tráfego podem ser agrupados nos seguintes tipos:

- Comparativo de materiais;
- Avaliação de desempenho de pavimentos (estruturais e funcionais);
- Efeitos de cargas e/ou dos efeitos de diferentes pneus;
- Estudo de métodos de dimensionamento.

Em todos os casos devem ser definidos pontos-chave para o sucesso do estudo. Quando se planeja o estudo comparativo de dois ou mais materiais, o principal enfoque deve ser para que as demais condições de contorno sejam bastante similares nas distintas seções-teste.

Além deste requisito, na avaliação de desempenho as seções devem representar um determinado trecho ou uma determinada malha, para permitir a extrapolação dos resultados.

Já em seções para estudos de efeitos de cargas, seja pela variação de carga ou da forma do carregamento, devem ser alteradas as condições de solicitação impostas em pavimentos de mesmas características. No estudo de métodos de dimensionamentos, esta variação de cargas deve ser realizada em conjuntos de seções com diferentes espessuras e materiais em suas camadas.

A seguir são apresentados os principais aspectos a serem discutidos e definidos no planejamento de uma pesquisa com o simulador de tráfego, compondo um procedimento que identifica as principais definições a serem realizadas antes, durante e depois dos ensaios acelerados. As etapas seguintes constituem-se em diretrizes para a realização de pesquisas com simuladores de tráfego lineares móveis, de forma a coordenar esforços futuros e a permitir a comparação e a disseminação de resultados no meio rodoviário nacional.

Entende-se que para a realização dessas etapas já está definido o tipo de estudo que irá ser realizado, incluindo-se a definição da quantidade de materiais e de seções a serem ensaiadas.

5.9.1. Definição do local

A definição do local para a realização da pesquisa é uma etapa importante para o sucesso do estudo, independentemente do seu enfoque. Esta questão não deve envolver apenas os aspectos operacionais e logísticos, mas também questões climáticas e técnicas que permitirão uma melhor utilização dos resultados para um segmento ou para uma malha rodoviária. Estes pontos são discutidos a seguir para cada um dos principais aspectos a serem considerados.

– Aspectos operacionais

Os principais aspectos operacionais a serem considerados referem-se à segurança, tanto de técnicos envolvidos na pesquisa quanto de usuários da rodovia e a manutenção do nível de serviço da rodovia o mais próximo possível do original com o fechamento de uma faixa de tráfego para a realização dos ensaios acelerados, posto que as demais limitações podem ser supridas com o emprego de recursos externos ao simulador de tráfego linear móvel.

Assim, buscam-se seções-teste em segmentos em tangente, com baixa incidência de acidentes, que permitam boa visibilidade e identificação do obstáculo na pista.

Preferencialmente, deve-se optar por segmentos em que o tráfego se dá em um único sentido de direção, com no mínimo duas faixas de rolamento, o que implicará em menor interferência com os usuários. Sempre que possível são recomendados trechos com menores volumes de tráfego na malha pesquisada e em que haja elevado nível de serviço. A escolha de um local que disponha de rede elétrica com iluminação também auxilia na questão da segurança, embora não seja pré-requisito para a seleção do trecho, pois há a opção de utilização de geradores e de sistemas de iluminação e de sinalização externos.

Outros aspectos a serem considerados na seleção do trecho referem-se à existência de infra-estrutura de apoio, com a possibilidade de abastecimento e alimentação, bem como a segurança patrimonial.

– **Clima**

Duas questões relacionadas ao clima se mostram importantes no estudo de um pavimento asfáltico e de concreto cimento: a temperatura e a umidade. No que tange a temperatura, devem ser considerados os valores esperados de temperaturas na época do ano em que serão realizados os ensaios acelerados e a sua representatividade para a pretendida extrapolação dos resultados. O mesmo é válido para a questão das precipitações ao longo do ano, muito embora este aspecto possa ser contornado pelo emprego de aspersão de água nas seções-teste, ou mesmo por recursos de saturação da infra-estrutura através de abertura de vala lateral para “alimentação” de água ou para a drenagem do pavimento.

Com relação às variáveis climáticas, também devem ser observados os aspectos sazonais envolvidos, especialmente em estudos que irão demandar maior tempo de simulação de tráfego, já que podem ocorrer variações significativas ao longo do ano, o que poderá resultar em imposição de tráfego a pavimentos originalmente selecionados por serem homogêneos, mas que não apresentavam o mesmo comportamento durante os ensaios acelerados. Em casos extremos, durante uma

mesma estação do ano pode-se optar pela alternância do simulador móvel de tráfego entre as seções-teste.

Durante a simulação, mesmo em períodos do ano adequadamente selecionados, podem correr picos de temperatura e de umidade. Neste caso sugere-se estabelecer gatilhos de paralisação temporária dos ensaios para preservar a representatividade da seção-teste.

– Pavimento existente

Nos estudos em seções-teste de rodovias em serviço, onde são estabelecidas comparações entre materiais ou a avaliação de desempenho de distintas soluções de recuperação, deve-se, primeiramente, identificar o pavimento que representa a condição do segmento em estudo, ou seja, a primeira etapa é definir as estruturas que melhor representarão o segmento rodoviário como um todo para permitir, posteriormente, a generalização dos resultados.

Identificadas as possíveis seções através de consulta a dados históricos e de projetos, deve-se confirmar a sua homogeneidade, ou seja, se as camadas dos pavimentos apresentam materiais constituintes e espessuras constantes, além de comportamento resiliente semelhante. Outros aspectos, como as condições de drenagem e o tipo de seção transversal (corte ou aterro) também devem ser devidamente identificados para verificação de sua compatibilidade com a malha a ser ensaiada.

Para tanto, sugere-se que, além da consulta aos dados históricos referentes à pavimentação e à manutenção da rodovia, sejam realizadas sondagens para a identificação da estrutura do pavimento existente e a coleta de materiais para ensaios de caracterização em laboratório. Complementarmente, pode-se recorrer ao emprego de georradar, ou GPR (*Ground Penetrating Radar*) para realizar a expansão da informação ao longo de um segmento.

Também são necessários os ensaios defletoométricos, preferencialmente com defletoômetros dinâmicos de impacto com FWD empregando múltiplas cargas, cuja informação associada aos dados das sondagens permitirá determinar os módulos resilientes *in situ* dos materiais sob cada nível de solicitação do segmento por retroanálise. Os ensaios defletoométricos com distintas cargas e a determinação dos módulos resilientes por retroanálise devem ser repetidos após a execução das pistas teste, para verificar os resultados das obras e a condição da estrutura a ser simulada.

Deve-se ainda caracterizar o padrão de degradação do pavimento, mapeando-se as ocorrências observadas na superfície e, adicionalmente, recorrendo-se a avaliações do perfil e da irregularidade longitudinal do local.

Especificamente, em estudos de métodos de dimensionamento, devem ser estudadas as estruturas representativas, com variações no subleito, nas espessuras das camadas e, quando pertinente, nas características físicas, mecânicas e resilientes dos materiais.

No caso do estudo do comportamento ou de técnicas e de materiais para a recuperação de rodovias existentes, a escolha do local exato em que se posicionará o simulador móvel de tráfego deverá anteceder a execução da restauração do pavimento, para que se realize uma minuciosa caracterização da condição prévia à obra de recuperação. Esta seleção prévia também permite a utilização do recurso de execução de pré-trincamento artificial, de parte ou mesmo de toda a seção-teste, caso o objetivo seja verificar o processo de reflexão de trincas nas obras de recuperação. A principal vantagem desta técnica é o conhecimento das características das trincas artificialmente criadas, sua forma na superfície e a sua profundidade.

Deve-se observar que, embora esta seja uma opção a ser considerada, o simulador de tráfego linear móvel possibilita a execução de ensaios em pavimentos originalmente trincados. Assim, no processo de seleção dos locais a serem ensaiados, pode-se buscar estruturas que já tenham sido trincadas por ações do tráfego e das intempéries ambientais.

Ainda com relação ao pavimento existente deve-se definir nesta fase o que será feito com a seção-teste após a pesquisa, ou seja, se após a simulação de tráfego a pista será recuperada ou continuará a ser monitorada.

5.9.2. Tráfego

Por definição, nos ensaios acelerados de pavimentos o objetivo é a aplicação de cargas representativas do tráfego real da malha a ser representada no estudo, para se obter a resposta do sistema estruturado em condições controladas e num reduzido período de tempo. Nos subitens a seguir, são discutidos os principais aspectos relacionados ao tráfego que devem ser ponderados e definidos em pesquisas com o Simulador de Tráfego Linear Móvel.

Especial atenção deve ser dada a esta etapa, visto que possivelmente será ela que permitirá estimar melhor, em conjunto com o número de seções-teste a serem ensaiadas e com os objetivos da pesquisa, o tempo necessário para os estudos em pista.

5.9.2.1. Carga de roda

Até meados de 2006, nas pesquisas realizadas com o Simulador Linear Móvel de Pista no Brasil, a modelagem de desempenho tem empregado conceitos de equivalência de carga em função do tipo de eixo e da carga em operação, a partir de modelos pré-estabelecidos. Em todos os casos se operou com um semi-eixo de rodas duplas durante a simulação de tráfego, tendo sido empregada a relação estabelecida para o fator de equivalência de carga da USACE para eixos simples de roda dupla com cargas superiores a 8tf apresentada nos manuais do DNER (1998), a saber:

$$FC = 1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$$

Onde:

FC: é o fator de carga determinado de acordo com o modelo do USACE;

P: é a carga do eixo simples de rodagem dupla, em toneladas.

Este tipo de simplificação pode ser realizado em estudos comparativos de comportamentos de materiais. Contudo, é importante, mesmo nestes casos, fixar a mesma seqüência de carregamento em todas as seções-teste, ou seja, caso se faça a opção por realizar alterações nas cargas aplicadas ao longo da simulação de uma seção, a mesma seqüência de cargas deverá ser realizada em todas as outras seções de forma a permitir a análise comparativa.

Contudo recomenda-se que, tal qual realizado no estudo da BR-116/RJ, seja sempre realizado com os estudo para a determinação do FEC a partir da modelagem do pavimento em computador. Este deve ser realizado a partir dos resultados das sondagens e das retroanálises das bacias de deflexão, determinando-se, com *software* apropriado, as tensões e deformações em toda a estrutura mediante os distintos níveis de carga e também a carga padrão e, conseqüentemente, as expectativas de vida útil com base em modelos de falha determinados em ensaios laboratoriais de fadiga ou obtidos na bibliografia. Neste ponto, faz-se necessário identificar os modelos de falha empregados na determinação do FEC.

Analizando os estudos nacionais com o Simulador de Tráfego Linear Móvel apresentados nesta pesquisa, observa-se a importância de que seja utilizada a seqüência de carregamento em estudos comparativos de materiais, ou mesmo que seja fixada a carga do semi-eixo, com especial atenção ao emprego de valores excessivamente altos, tanto no que se refere à capacidade da estrutura de pavimento em seu suporte e distribuição (sem romper imediatamente), quanto para garantir a representatividade dos resultados obtidos. Este mesmo procedimento não deve ser diretamente utilizado na avaliação do desempenho de um pavimento, de forma a se ter modelos de desempenho, exceto em casos que busquem associar o resultado em pista ao número “N” da AASHTO ou da USACE.

Para um estudo consistente de modelos de desempenho, o ideal é a simulação com distintas cargas, sendo empregada, no mínimo, uma seção dita de referência com a carga padrão e outra seção idêntica com a carga majorada.

Com o resultado deste conjunto de seções podem ser determinados os fatores de equivalência de carga f_i , admitindo-se que um número N_i de solicitações de uma carga de eixo W_i , seja equivalente a um número N_p de solicitações de uma outra carga de eixo W_p tomada como referência, quando as N_i solicitações da carga W_i provocar a mesma deterioração que as N_p solicitações da carga W_p , na estrutura de pavimento considerada. Nestas circunstâncias, a razão a seguir exprime o que se denomina de fator de equivalência da carga de eixo genérica W_i , referido à carga de eixo W_p assumida como padrão:

$$f_i = \frac{N_p}{N_i}$$

A idéia de deterioração subentendida no cálculo dos fatores de equivalência corresponde, quase sempre, à evolução total que o pavimento pode sofrer em se considerando um tipo específico de degradação. Dito de outra forma, os números de solicitações são os que acarretam falhas na estrutura, estando, em cada caso, o conceito de falha implícito na equação de dimensionamento adotada.

Por fim, em estudos mais elaborados, como o de efeitos do excesso de cargas ou de alterações nas configurações de carregamento, e principalmente nos estudos de métodos de dimensionamento, deve-se realizar um plano de amostragem em que o carregamento seja uma das variáveis a ser estudada, em conjunto com as pretendidas alterações nas espessuras e nos materiais de pavimentação.

5.9.2.2. Características do Pneu e Pressão de Contato

Exceto para estudos específicos de efeito das cargas, pressões de contato ou mesmo da influência do tipo de pneu no desempenho de um pavimento, sugere-se a utilização de pneus convencionais empregados em veículos comerciais na pressão indicada pelo fabricante, o que dará maior representatividade ao estudo e eliminará algumas variáveis da matriz do estudo.

Deve-se observar que, embora tais alterações se mostrem significativas em revestimentos asfálticos, a influência do tipo de pneu e da pressão empregada varia

em função do tipo de mistura e de ligante empregados, além das variáveis ambientais.

5.9.2.3. Deslocamento Lateral Transversal

O deslocamento longitudinal do rodado do simulador é acompanhado por um deslocamento gradativo, no sentido transversal, para evitar a atuação da carga num mesmo eixo longitudinal e a formação de uma trilha de roda canalizada, aproximando-se, assim, das condições reais de tráfego de rodovias.

Este deslocamento pode ocorrer tanto no início do semicíclo como ao longo de todo o curso. Em geral, nos estudos realizados com o Simulador de Tráfego Linear Móvel brasileiro, este movimento foi realizado no início do ciclo, não introduzindo um vetor de esforço transversal durante o movimento do semi-eixo na seção-teste. A opção pelo movimento ao longo da seção deve ser utilizada em casos específicos em que este tipo de movimento seja importante.

Deve-se também definir a trilha total que receberá a ação do semi-eixo do simulador durante o ensaio acelerado, visto que a distribuição transversal de cargas tem grande influência no resultado, em termos de número de aplicações da carga que causam os danos que afetam o desempenho, por alterar a relação operação-cobertura e por influir no processo de deterioração do pavimento.

Definido o deslocamento lateral total e a forma como o mesmo se dará em um estudo com o simulador, faz-se necessária a verificação das premissas da pesquisa em pista. Para tanto, sugere-se a utilização do procedimento adotado na pesquisa de AZAMBUJA (2004) com o equipamento da UFRGS-DAER/RS. Nesta pesquisa, para a determinação dos pontos de maior frequência da passagem do rodado, dividiu-se a largura da trilha de roda formada pela largura do rodado em contato com a superfície do pavimento. Esta largura de contato foi obtida através da impressão dos pneus em um papel milimetrado. Já a distribuição transversal de cargas relacionou os

pontos na trilha de roda, segundo um eixo transversal de atuação, com a porcentagem de solicitações nesses pontos. A figura 5.1 a seguir ilustra estas situações.

Figura 5.1 – Distribuição transversal de carga. Fonte: AZAMBUJA (2004).

A maioria dos equipamentos de ensaios acelerados tem potencialidade para aplicar cargas com dispersão lateral. Entretanto, as pesquisas com simuladores de tráfego têm se concentrado em incrementar a aplicação da carga no centro do trajeto da roda ou com o mínimo de deslocamento lateral. O efeito de tal aproximação deve ser considerado tanto por afetar a relação operação-cobertura quanto por influir no processo de ruptura do pavimento.

5.9.2.4. Sentido de Carregamento

A definição da utilização de carregamento unidirecional ou bidirecional pode afetar não somente o tempo necessário para a realização dos ensaios acelerados em pista como também os resultados obtidos.

Com o Simulador de Tráfego Linear Móvel podem-se aplicar com o carregamento bidirecional até 800 semiciclos do semi-eixo padrão na seção-teste, ao passo que este valor é reduzido em aproximadamente 50% no caso de aplicações de cargas somente em um sentido (semiciclos carregados e descarregados alternados).

Nas duas comparações com o Simulador de Tráfego Linear Móvel com cargas idênticas em uma mesma estrutura de pavimento nas mesmas condições climáticas, não houve diferença na formação de trilha de roda, mesmo com a alteração do tipo de carregamento (de unidirecional para bidirecional). Porém, deve-se destacar que os

ensaios se deram sempre em pavimentos que apresentavam baixos valores de flecha em trilha de roda.

Em síntese, a opção por movimentos bidirecionais, em detrimento dos unidirecionais, não influi significativamente em estudos comparativos de materiais, mas pode levar (ou não) a alterações importantes nos resultados de desempenhos de pavimentos ou em estudos de efeitos de cargas nos pavimentos, bem como nos métodos de dimensionamento. Outro ponto importante nesta escolha refere-se à influência direta no prazo para a realização dos ensaios e, conseqüentemente, nos recursos a serem disponibilizados.

Face às discrepâncias entre os resultados das pesquisas e as informações bibliográficas, bem como entre a gama de investigações que podem ser realizadas com o simulador de tráfego, independentemente do tipo de carregamento adotado num estudo com este equipamento, é importante que o mesmo seja devidamente registrado e divulgado em conjunto com os resultados obtidos.

5.9.2.5. Velocidade do Carregamento e Efeitos Dinâmicos

O Simulador de Tráfego Linear Móvel tem sua velocidade média operacional limitada em 10km/h, bem inferior à velocidade de operação em rodovias. Este é um motivo adicional para se ter cuidado na consideração dos resultados de pesquisas com simuladores de tráfego, especialmente em estruturas de pavimento asfáltico. Por outro lado, deve-se observar que esta é uma situação (velocidade baixa) mais crítica que a geralmente encontrada em um pavimento em serviço.

Embora também seja importante, o Simulador de Tráfego Linear Móvel não permite o estudo de distintas suspensões na deterioração e no desempenho dos pavimentos. Em geral, isso é mais simples em pistas experimentais fechadas, havendo, porém, alguns simuladores de tráfego, como o carrossel do LCPC e o HVS sul africano e da Flórida, que possuem tal recurso.

As limitações em se alterar estas variáveis (velocidade de carregamento e suspensão empregada) reforçam a importância de se associar os resultados obtidos em ensaios acelerados de pavimentos com os obtidos em rodovias ou trechos experimentais sob tráfego real.

5.9.2.6. Tipo e Configuração de Eixo

Diferentes configurações de eixos também podem ser estudadas com o Simulador de Tráfego Linear Móvel. No entanto, deve-se observar a atual limitação que o mesmo apresenta em termos de carga máxima no semi-eixo, limitada a 10.000 kg. Este valor de carga, para um semi-eixo simples, mostra-se bastante superior ao valor legal estabelecido, nem tão superior, no caso de eixos tandem duplo, e inferior à carga máxima legal dos eixos tandem triplo, pela Lei da Balança. O Código de Trânsito Brasileiro (Lei nº 9.053, de 23.09.1997 – resolução nº 12 de 06/02/1998) estabelece os seguintes limites máximos de carga: 6,0tf, 10,0tf, 17,0tf e 25,5tf para os eixos dianteiro, simples, tandem duplo e tandem triplo traseiros, respectivamente.

Embora todos os ensaios acelerados realizados no Brasil até 2006 tenham utilizado semi-eixo simples de roda dupla (por ser semelhante ao eixo padrão rodoviário), no planejamento de uma pesquisa com o simulador de tráfego pode-se optar pela alteração de eixos. Também podem ser realizados estudos comparativos com distintas configurações de eixo na distribuição de carga.

5.9.3. Variáveis Climáticas

A temperatura e a água são as principais variáveis climáticas que devem ser consideradas em estudos com o Simulador de Tráfego Linear Móvel em rodovias brasileiras. Os efeitos de gelo e degelo, muito discutido no exterior, não fazem sentido para o estudo das rodovias brasileiras. Já os efeitos de vento e radiação não podem ser estudados diretamente com os equipamentos brasileiros, e nem têm sido objeto de pesquisas com ensaios acelerados no exterior.

5.9.3.1. Temperatura

A temperatura é um fator climático que afeta o desempenho dos pavimentos asfálticos e rígidos. Neste sentido, é necessário controlar ou, no mínimo, conhecer e monitorar a temperatura durante a realização de ensaios acelerados de pavimentos com o Simulador de Tráfego Linear Móvel.

O controle de temperatura do ar e do pavimento deve ocorrer de forma contínua durante os ensaios acelerados ou, no mínimo, de forma periódica, com o registro das mesmas em diversos momentos ao longo das 24 horas do dia. Tendo em vista as grandes variações que ocorrem durante o dia deve-se realizar este monitoramento no mínimo em frequência horária, podendo-se fazer uma opção por intervalos menores, como de 15 em 15min.

Junto ao monitoramento proposto, sugere-se o estabelecimento dos gatilhos de temperaturas máximas e mínimas de forma a se estabelecer uma banda climática na qual a pesquisa é realizada, o que permitirá a comparação entre os resultados de distintas seções-teste ou mesmo a extrapolação dos resultados para determinada rodovia ou malha rodoviária.

O estabelecimento destes valores deve considerar tanto o local e a época do ano em que será realizado o estudo quanto o tipo de materiais do pavimento. Além disto, este aspecto pode exigir a escolha de outros locais ou períodos do ano para a realização dos ensaios acelerados.

Outro ponto importante é a possibilidade do emprego da temperatura em favor da pesquisa, com o intuito de acelerar ainda mais o experimento em casos de estudos comparativos cujo principal enfoque seja o processo de deformação da trilha de roda.

O monitoramento das temperaturas e, principalmente, a sugestão do estabelecimento de gatilhos para as paralisações temporárias dos ensaios acelerados, em parte, estão atrelados ao tipo de equipamento móvel existente hoje no Brasil.

Pavimentos que estão sujeitos a temperaturas abaixo de 0°C sofrem com a influência do processo de congelamento e degelo, no entanto isto não se aplica às rodovias brasileiras.

5.9.3.2. Umidade

A água influencia o comportamento de um pavimento tanto por sua infiltração na superfície quanto pelo ingresso nas camadas subsuperficiais. Entretanto, a exemplo da temperatura, a água também possui um efeito relacionado ao tráfego.

Assim, o planejamento da pesquisa deve definir como lidar com a questão da água na superfície e na infra-estrutura do pavimento, havendo duas questões principais a serem definidas:

- Optar pelo espargimento ou não de água na superfície e, em caso positivo, saber qual a taxa a ser empregada e com que frequência esta será realizada.
- Optar por saturar ou não as camadas da infra-estrutura (base, sub-base, reforço do subleito e subleito), o que é obtido através da alimentação constante por pressão positiva de água em uma ou mais camadas. Outra opção viável é fazer a drenagem do pavimento de forma a evitar que a presença de umidade no mesmo influencie os resultados.

As opções escolhidas devem levar em conta os objetivos da pesquisa em questão por, como já citado, afetarem diretamente os resultados que serão obtidos nas pistas testes.

5.9.3.3. Envelhecimento do Asfalto

O simulador móvel de tráfego não permite o controle da temperatura, nem de outros parâmetros associados ao envelhecimento do pavimento, como a radiação e os ventos. No entanto, pesquisas podem ser realizadas com vistas à verificação do efeito do envelhecimento dos pavimentos dispondo-se de recursos artificiais para a

simulação da ação do “tempo” ou, até mesmo, ensaiando-se seções-teste naturalmente envelhecidas, visto que se trata de um equipamento móvel. Relatam-se

5.9.4. Execução das Seções-teste

Cada pista a ser ensaiada com o simulador de tráfego tem 7,0m x 1,0m úteis de extensão e largura. No entanto, é recomendado que a execução das seções-teste seja realizada em extensões maiores que permitam uma boa qualidade executiva – eliminando-se assim os problemas comuns de “panos” de obra, no início e no fim. Inicialmente propõem-se segmentos com extensões mínimas de 250m cada e largura compatível com a de uma faixa de rolamento.

A importância da qualidade em todas as etapas da execução de um pavimento deve ser aqui ressaltada, desde o seu projeto estrutural, passando pela seleção e pelo projeto da mistura dos materiais, bem como pelo controle de qualidade na produção e na aplicação dos mesmos. Nas seções-teste dos ensaios acelerados, estas atividades, importantes em qualquer obra de pavimentação, devem ser realizadas com atenção especial, pois os resultados das pesquisas poderão nortear uma série de ações futuras na área de infra-estrutura rodoviária.

Também, em caso de opção pela instrumentação do pavimento, deve-se determinar a área a ser simulada (7,0m x 1,0m) antes da execução da pista para que toda a caracterização do local e a implantação dos equipamentos de instrumentação (caso necessários) sejam possíveis.

5.9.5. Instrumentação

Além do monitoramento dos pavimentos, pode-se também optar pela instrumentação das seções-teste, embora esta prática não seja muito freqüente nos estudos já realizados com o Simulador de Tráfego Linear Móvel em rodovias brasileiras. Outro recurso que pode ser empregado é o da instrumentação do trem de prova, para casos específicos de estudo do efeito da dinâmica de cargas nos pavimentos. Entretanto,

isto pode requerer adaptações nos equipamentos móveis de simulação de tráfego utilizados no Brasil.

O emprego de instrumentação nos pavimentos pode enriquecer o processo de análise de dados e de modelagem de desempenhos, em pesquisas com simuladores de tráfego. Porém, há alguns aspectos a serem considerados na escolha deste tipo de procedimento, além da adequação da escolha dos objetivos pretendidos na pesquisa e dos custos envolvidos.

Dentre os problemas que podem ser enfrentados em instrumentação de pista em ensaios acelerados com o simulador de tráfego linear móvel, destacam-se duas categorias: (i) as dificuldades operacionais, como a necessidade de instalações físicas para aquisição de dados, sistema de backup e de segurança patrimonial; e (ii) as dificuldades técnicas, associadas à instalação dos sensores que podem alterar as condições de contorno locais e exigem intervenções minimamente destrutivas e bem executadas, evitando a formação de pontos fracos e a descaracterização da estrutura que podem ocasionar danos nos sensores instalados.

As dificuldades operacionais podem ser superadas com a utilização da própria central de controle do simulador de tráfego e com a central de aquisição de dados para a instrumentação, visto que este local já dispõe de energia e de climatização artificial, além de área livre. A utilização de recursos de informática amplamente difundidos, como *nobreaks* e de sistemas de *backups*, permite garantir a integridade dos dados para as situações de queda ou de interrupção de energia, sendo, contudo, importante definir claramente as ações a serem tomadas durante cada possível reinício do processo de simulação de tráfego, para que o sistema de aquisição de dados também possa ser retomado. Por fim, as questões de segurança patrimonial exigem um procedimento de segurança compatível.

Com relação às condições operacionais, devem ser determinados claramente os pontos em que os sensores serão instalados, bem como a opção pela instalação dos mesmos durante a execução da pista ou após a conclusão da mesma. No caso de

implantação em um pavimento existente, as soluções devem ser minimamente destrutivas para não se descaracterizar o comportamento da estrutura. Além disso, são necessários cuidados adicionais no processo de compactação do pavimento, com vistas a não se criar pontos preferenciais de ruptura na estrutura.

Deve-se implantar os equipamentos que se julguem necessários para a pesquisa durante a execução das obras de pavimentação e/ou restauração. A execução da instrumentação após a execução das seções-teste implica necessariamente em recortes e reparos no pavimento o que muitas vezes pode implicar em pontos fracos e na descaracterização o comportamento real do pavimento nos pontos instrumentados.

5.9.6. Simulação de Tráfego e Monitoramento

A etapa de simulação e monitoramento dos pavimentos pode ser realizada de forma bastante similar em todas as pesquisas com o Simulador de Tráfego Linear Móvel conduzidas até meados de 2006, sendo proposto, aqui, um método que sintetiza a experiência adquirida, com algumas sugestões complementares em função de outros ensaios acelerados já realizados.

A simulação de tráfego deve ser iniciada em cada seção-teste com o transporte do equipamento (preferencialmente 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. Deve-se observar a experiência da pesquisa na BR-116/RJ, que indica a necessidade da estrutura do equipamento ser posicionada numa altura de 1,25m em relação ao pavimento. Portanto, é nesta etapa que se deve verificar o atendimento desta cota em relação à superfície no posicionamento do simulador. Também se recomenda que o cavalo mecânico que realizará o transporte entre as seções-teste tenha pneus 900R20, para se reduzir o tempo demandado na elevação do equipamento.

Também nesta etapa deve ser providenciada a energização e o abastecimento de água para as caixas d'água de contrapeso e, caso necessário, para a de simulação de chuva

e de locação da seção propriamente dita (com demarcação com tinta nos bordos da pista a cada 0,5m), como ilustrado nas figuras 5.2 e 5.3, além da infra-estrutura de apoio operacional.

Figura 5.2 – Transporte e posicionamento do Simulador de Tráfego Linear Móvel

Figura 5.3 – Locação da pista teste

Em seguida, devem ser aferidas as taxas de espargimento de água, verificando-se a vazão de água do equipamento e definindo-se os horários do início e do final dos ciclos de molhagem do pavimento, caso esteja prevista a sua utilização. Também se

deve ajustar o sistema de saturação da estrutura, sempre que aplicável, através de abertura de valas próximas a seção teste e montagem de um sistema de alimentação de água.

Também devem ser 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 (em sentido único ou bidirecional) e calibrando-se os pneus, de forma a atender o planejamento proposto.

A etapa seguinte consiste 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 (ou das cargas) a ser aplicada (definido no planejamento da pesquisa) deve ser verificado no início da simulação de cada seção-teste, seja com o emprego de balança móvel ou através de instrumentação da própria seção (célula de carga). Outra opção seria a instalação de uma célula de carga no pistão de, todavia isto exigiria adaptações nos equipamentos existentes no Brasil.

Caso não se esteja utilizando a instrumentação da pista da seção-teste para o monitoramento das cargas impostas ao pavimento recomenda-se que a aferição da carga com balança móvel seja realizada somente após a estabilização das condições térmicas do sistema hidráulico que realiza sua aplicação. Isto porque antes do início dos ensaios em uma seção-teste o óleo do sistema hidráulico do equipamento está em temperatura inferior a de trabalho (que só é atingida quando o equipamento já está em operação a alguns minutos), o que implica em redução na viscosidade do óleo no sistema após o início da operação do equipamento. Neste sentido recomenda-se que a aferição de cargas com auxílio de balança móvel seja realizada somente após todo o sistema hidráulico atingir a temperatura de equilíbrio.

A figura 5.4 ilustra a etapa de aferição dos valores de carga aplicada com o emprego de uma balança móvel.

Figura 5.4 – Calibração / Aferição de cargas

Nesta etapa, devem-se realizar também as leituras deflectométricas com o emprego da viga Benkelman, convencional ou eletrônica, com distintos valores de cargas, de forma a possibilitar a correlação dos valores com os obtidos nos ensaios com FWD.

Definido o plano de backup para os dados, realiza-se a primeira campanha de monitoramento do pavimento, antes da operação do simulador de tráfego, e esta passa a ser periodicamente repetida, no mínimo a cada dois dias, até o fim do ensaio acelerado. Normalmente, em cada uma destas campanhas são determinadas as informações gerais, como o registro da data, a hora, o 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 7,0m de comprimento por 1,0m de largura. Portanto, pode ser subdivida em sete seções de análise com 1,0m², o que permite a comparação de

resultados entre as sete subseções de referência, verificando-se, inclusive, a homogeneidade dos resultados, o descarte de pontos não representativos e, até mesmo, o estudo de soluções distintas nas subseções, otimizando-se o tempo e os recursos envolvidos (como no caso de comparações entre subseções pré-trincadas e não trincadas).

A sugestão é que, preferencialmente, as medidas e/ou as determinações sejam feitas, nas campanhas realizadas, sempre no mesmo horário do dia, em cada uma das subseções de 1,0m² durante a campanha de monitoramento das subseções, 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.

– **Identificação da seção-teste:**

Neste ponto deve ser 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.

– **Identificação do carregamento:**

Deve ser identificado o número de semiciclos que foi 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.

– **Condicionantes Ambientais:**

As temperaturas do ar e do pavimento devem ser medidas no momento dos ensaios de monitoramento, bem como se deve identificar a frequência e a taxa de espargimento de água na superfície.

Todavia, visto que os estudos acelerados de pavimentos são, geralmente, realizados de forma ininterrupta durante um determinado período de tempo, recomenda-se que as campanhas de monitoramento da temperatura não se restrinjam ao horário de monitoramento de pavimentos, que se dá durante o dia, mas que sejam realizadas medidas intermediárias, incluindo-se o período noturno. Para melhor interpretação dos resultados deve-se realizar o registro das temperaturas do ar e do pavimento com intervalos máximos de uma hora, associando-se os valores ao horário em que foram registrados e o número de semiciclos impostos ao pavimento naquele momento.

– **Condição Estrutural:**

A condição estrutural do pavimento expressa por sua deflexão deve sempre ser monitorada nas campanhas de monitoramento da seção-teste. Como o simulador limita o acesso vertical e longitudinal da pista teste, a utilização do FWD torna-se inviável durante o ensaio acelerado, sendo o seu emprego indicado antes e depois da simulação total de cada seção-teste. Assim, a determinação da deflexão sob a ação da carga deve ser realizada com o emprego de viga Benkelman ou de viga eletrônica, definindo-se sempre a bacia de deformação para possibilitar a caracterização do comportamento resiliente de cada pavimento por retroanálise. A figura 5.5 ilustra este tipo de ensaio.

Figura 5.5 – Monitoramento dos pavimentos com ensaios deflectométricos

Sugere-se que estas medidas sejam realizadas com a mesma carga utilizada para a simulação de tráfego, devendo este fato ser registrado para a posterior análise (deve-

se esclarecer a carga utilizada no ensaio, visto que muitas vezes a mesma difere da carga padrão).

Optar pela realização de medidas com distintas cargas exige um conhecimento adequado da curva de calibração de carga do manômetro do equipamento. No entanto, esta opção pode acabar levando a erros operacionais que resultem em ciclos de simulação de tráfego e de cargas divergentes das planejadas. Esta opção torna-se mais segura, tanto em termos de valores quanto em termos de riscos ao ensaio, quando realizadas em uma pista instrumentada com célula de carga, ou quando auxiliada por uma balança móvel a cada mudança de carga.

– **Condição Funcional:**

A condição funcional deve ser monitorada a partir do cadastro visual dos defeitos observados na superfície da pista teste, sempre empregando-se a terminologia padronizada pelo DNIT ou pelo órgão responsável pela administração da via. A cada inspeção periódica, as trincas e os demais defeitos devem ser desenhados em papel milimetrado, sendo indicado o emprego de grade metálica de 1,0m x 1,0m, subdividida em quadrados de 100mm de lado sobre o revestimento, sempre que se realizar a inspeção visual. Para facilitar a visualização do surgimento e da evolução do trincamento, as trincas podem ser pintadas com tinta *spray*, sendo que cada cor representará um número de ciclos de carga aplicados pelo simulador. Estes procedimentos, utilizados por AZAMBUJA (2004), são ilustrados na figura 5.6.

Figura 5.6 – Controle da evolução de defeitos na superfície realizado por AZAMBUJA (2004).

Além disso, recomenda-se o registro fotográfico da condição da pista teste, o que pode enriquecer visualmente o trabalho, especialmente se este registro for realizado sempre na mesma posição.

Outro parâmetro é a deformação plástica do pavimento, geralmente avaliada através de medições de flecha em trilha de roda com treliça metálica, com base de 1,2m, tal qual especificado na norma DNIT 006/2003 - PRO, como ilustrado na figura 5.7.

Figura 5.7 – Monitoramento de flecha em trilha de roda com treliça metálica

Contudo, nas pesquisas com o Simulador de Tráfego Linear Móvel, recomenda-se o emprego de perfilógrafo, como o empregado por GONÇALVES (2002), que permite a medida do perfil transversal da pista, não se restringindo à determinação da deformação máxima, representando melhor que a treliça metálica a deformação plástica do pavimento na seção-teste. Há também a opção de emprego de perfilógrafo laser como os utilizados nos simuladores HVS sul-africanos.

De acordo com HUGO & MARTIN (2004), os ensaios acelerados para a modelagem de desempenho de pavimentos não incluem os dados referentes à qualidade de rolamento (IRI), em função do comprimento restrito das seções-teste em que são coletados os dados, o que reduz a confiabilidade na medição da irregularidade longitudinal.

No Congresso Mundial da PIARC (*Permanent International Association of Road Congress*, atualmente denominada de *World Road Association*), realizado em Bruxelas em 1987, foram definidas três classes de textura: a microtextura, a macrotextura e megatextura. Foram estabelecidos os limites entre os domínios de escalas de irregularidades de superfícies de pavimentos rodoviários por meio do critério de comprimento de ondas (horizontal) e de amplitude (vertical), conforme pode ser visto na tabela 5.4 (APS, 2006).

Tabela 5.4 – Classificação da Textura - ASTM E-867,1997

Domínio	Intervalo de Dimensões	
	Horizontal	Vertical
Microtextura	0 – 0,5 mm	0 – 0,2 mm
Macrotextura	0,5 mm – 50 mm	0,2 mm – 10 mm
Megatextura	50 mm – 500 mm	1 mm – 50 mm
Irregularidade	0,5 m – 50 m	1 mm – 200 mm

Fonte: APS (2006).

Como o Simulador de Tráfego Linear Móvel brasileiro possui uma extensão útil de teste de 7m, a medição de irregularidade longitudinal dos pavimentos fica limitada, não abrangendo todo o comprimento de onda que caracteriza este parâmetro. Porém, caso sejam realizadas tais medidas, deve-se empregar métodos estáticos de elevada precisão, como o nivelamento topográfico pelo método nível e mira ou pelo emprego de *dipstick* ou de perfilógrafos longitudinais.

– **Condição de Segurança:**

As condições de macrotextura e de microtextura, proporcionadas pelo revestimento, podem resultar em acidentes por derrapagem em situações de frenagem ou de manobras emergenciais, principalmente em pavimentos molhados. A formação de lâmina de água sobre os pavimentos é mais comum em trechos planos, com pouca inclinação transversal, e em curvas de raios longos ou, ainda, em áreas onde há a presença de defeitos, como afundamentos. O veículo em deslocamento sobre esses

trechos pode perder a aderência entre o pneu e o pavimento, ocasionando o fenômeno da hidroplanagem (APS, 2006).

Assim, as condições de segurança devem ser monitoradas, sendo nas seções-teste indicados os ensaios portáteis, como o Pêndulo Britânico, para a determinação da resistência à derrapagem (microtextura), e os ensaios de Mancha de Areia para a determinação da macrotextura da pista, como ilustrado na figura 5.8.

Figura 5.8 – Monitoramento dos pavimentos com ensaios de aderência, com Pêndulo Britânico e ensaios de mancha de areia.

O ensaio com Pêndulo Britânico, norma ASTM E303-93, foi desenvolvido para medir a resistência de superfícies de pista molhada para derrapagem, simulando a derrapagem entre o pneu de um veículo a uma velocidade de aproximadamente 40 a 50km/h. O Pêndulo Britânico é constituído por uma estrutura metálica, na qual uma haste acoplada realiza um movimento pendular. Na ponta desta haste está fixada uma sapata de borracha que, ao ser liberado o movimento a partir de um dos lados do pêndulo, toca o pavimento, seguindo seu curso com menor energia no lado oposto. A diferença de altura entre o início e o final do movimento, é uma medida indireta da microtextura superficial, podendo-se avaliar a resistência à derrapagem. O aparelho tira medidas da resistência a partir da fricção entre uma borracha (fixada na extremidade do braço do pêndulo) e a superfície da pista.

O ensaio de mancha de areia, norma ASTM E 965-96, consiste do espalhamento no pavimento de um volume conhecido de $25000 \text{ mm}^3 \pm 150 \text{ mm}^3$ de areia natural limpa

e seca, uniforme, de grãos arredondados, que passa na peneira com abertura de 0,3mm e ficam retidas na peneira com abertura de 0,15 mm, ou com microesferas de vidro que apresentam as mesmas características granulométricas da areia. Este espalhamento é realizado por sapata circular padronizada, até o preenchimento total das rugosidades do revestimento, em formato circular, donde se mede o diâmetro em quatro direções. Com essa medida média e, conhecendo-se o volume de material, obtém-se a altura média da mancha, proporcionando uma medida de macrotextura da superfície (APS, 2006). Há ainda a possibilidade de emprego de sensores laser capazes de medir a textura do pavimento em substituição aos ensaios de mancha de areia.

Como a caracterização da macrotextura e da microtextura da superfície de pavimentos asfálticos pode ser obtida por meio de diversos tipos de equipamentos que possuem características distintas, os resultados dos ensaios obtidos por esses diferentes equipamentos foram comparados e harmonizados por uma grande pesquisa desenvolvida pela PIARC (*Permanent International Association of Road Congress*, atualmente denominada de *World Road Association*). Esta pesquisa converteu os diferentes valores em um índice internacional combinado, denominado *International Friction Index* (IFI). Posteriormente, a ASTM especificou o emprego do índice através da publicação da norma E 1960-98 *Standard Practice for Calculating International Friction Index of a Pavement Surface* (APS, 2006).

Assim, para melhorar o intercâmbio de informações com outras pesquisas, de posse dos resultados dos ensaios de Pêndulo Britânico e de Mancha de Areia, sugere-se que o pesquisador determine o par de valores de IFI (Sp; F60).

– **Comentários Adicionais**

Todas as informações, julgadas pertinentes pelas pessoas envolvidas na realização dos ensaios acelerados, devem ser 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, devem ser mencionadas. Estas observações devem ser datadas e associadas ao número de semiciclos de carga impostos à seção-teste.

Também devem ser registradas as leituras da instrumentação instalada, caso se opte pelo emprego deste recurso na pesquisa, na frequência estabelecida pelos pesquisadores. Especificamente nos casos em que se utilizar a instrumentação recomenda-se que na equipe de monitoramento da seção-teste esteja incluído um técnico especializado, para verificação das leituras dos sensores e identificação e filtro de eventuais ruídos e defeitos que possam interferir na qualidade da informação que está sendo monitorada e, conseqüentemente, conduzir a resultados inconsistentes.

– **Apresentação dos Resultados**

Inicialmente, devem ser apresentados os dados de projeto estrutural e de mistura, bem como a caracterização da pista teste, antes e depois da execução da recuperação, bem como dos materiais utilizados.

Os dados do monitoramento do pavimento devem ser tabulados ao final da simulação de uma seção-teste, sendo sugerida a padronização mínima destas informações para possibilitar o intercâmbio entre os resultados das distintas pesquisas, ficando sob a responsabilidade dos pesquisadores as análises e as interpretações dos mesmos.

Neste sentido, recomenda-se que sempre sejam publicados, por subseção-teste, os valores de cada um dos parâmetros técnicos e ambientais obtidos nas campanhas de monitoramento, incluindo-se, caso disponíveis, os dados da instrumentação do pavimento. Este fato possibilitará que outros pesquisadores possam realizar suas próprias análises a partir dos dados de monitoramento obtidos durante a simulação de tráfego. Para tanto, sugere-se o preenchimento do quadro modelo da figura 5.9.

Resultados obtidos com Simulador Móvel de Tráfego									
Local:									
Seção:									
Estrutura de Pavimento:									
Parâmetro Monitorado:					Unidade:				
Tipo de eixo e pneu:					Pressão do pneu:				
Dispersão lateral:									
Aspersão de água:									
Saturação da infra-estrutura:									
Data	Nº de semi-ciclos	Sub-seção (número e descrição)							
		No.	1	2	3	4	5	6	7
		Caract. Carga (kg)							

Figura 5.9 – Modelo de tabela para apresentação dos resultados.

De forma complementar, recomenda-se que seja realizado um tratamento gráfico com os valores de temperatura ao longo do tempo de ensaio, incluindo-se as temperaturas médias, máximas e mínimas diárias, bem como um histograma dos valores obtidos para a comparação dos resultados de distintas seções-teste, considerando-se o aspecto ambiental. Maior atenção deve ser dada às concentrações de ensaios a temperaturas elevadas (maior que 40°C) e baixas (inferiores a 10°C). Os totais de pluviometria registrados, quando disponíveis, também devem ser tabulados e graficados, distinguindo-se os valores dos de água aspergida durante a simulação de tráfego.

Todas as informações obtidas nas pesquisas com os simuladores de tráfego lineares móveis de pista também devem ser incluídas num banco de dados, com formato compatível e universal, de forma a se preservar a memória das atividades realizadas e permitir a ampla disseminação do conhecimento adquirido, constituindo num alicerce para o desenvolvimento tecnológico na área de infra-estrutura rodoviária.

5.9.7. Ensaios Laboratoriais Complementares

Caso a caso, em função dos objetivos das pesquisas, devem ser definidos e realizados ensaios de laboratório complementares a pesquisa, de forma a permitir análises mais aprofundadas dos resultados, bem como buscar um embasamento teórico para os resultados práticos das seções submetidas a ensaios acelerados. Preferencialmente, estes estudos devem incluir comparações entre amostras não submetidas ao simulador de tráfego e amostras solicitadas por este.

De acordo com EPPS *et al.* (1999), os ensaios acelerados em WesTrack indicaram a importância de se coordenar os resultados dos ensaios acelerados em verdadeira grandeza com um programa de pesquisa em laboratório para caracterização dos materiais utilizados nas seções-teste e com a análise das respostas dos pavimentos para o desenvolvimento de especificações por desempenho.

5.9.8. Resumo do Método Proposto

Face ao exposto, apresentam-se nas tabelas 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11 o resumo do método de uso dos Simuladores de Tráfego Lineares Móveis de pista para determinação de desempenho de pavimentos asfálticos em ensaios acelerados de pavimentos.

Tabela 5.5 – Critérios decisórios a serem observados na Concepção da Pesquisa com o Simulador de Tráfego Linear Móvel

Item	Atividades	Produtos
Definir os objetivos da pesquisa	<p>Definir o que se planeja estudar e com qual finalidade.</p> <p>Definir quais as variáveis dependentes e independentes da pesquisa.</p> <p>Definir qual a malha a ser representada no estudo, incluindo o tráfego em operação na mesma.</p>	<p>Definição dos objetivos propostos.</p> <p>Definição do tipo de estudo (comparativo de materiais, avaliação de desempenho, efeitos do carregamento ou estudo de métodos de dimensionamento)</p> <p>Definição do número de seções-teste.</p> <p>Características desejadas da seção-teste.</p> <p>Tráfego equivalente para se atingir a vida de projeto.</p> <p>Expectativa preliminar de tempo de estudo.</p>
Definir a malha em que os resultados serão aplicados	<p>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.).</p> <p>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).</p> <p>Coletar dados climáticos, com dados pluviométricos e de temperaturas previstos ao longo do ano.</p>	<p>Caracterização do sistema rodoviário e do tráfego solicitante por segmento.</p> <p>Caracterização climática da região em estudo, incluindo definição dos regimes térmicos e pluviométricos, com indicações das variações sazonais.</p>

Tabela 5.6 – Critérios decisórios a serem observados na Definição dos Locais com o Simulador de Tráfego Linear Móvel

Item	Atividades	Produtos
Aspectos operacionais	<p>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.</p> <p>Preferencialmente, selecionar locais em que o tráfego opera sentido único e há duas faixas de tráfego no local.</p> <p>Verificar se nos locais há rede elétrica com iluminação, infra-estrutura de apoio próxima e condição de segurança patrimonial (não obrigatórios, podendo ser suprido por recursos externos).</p> <p>Definir o que será feito com a seção-teste após a pesquisa (ou a pista será recuperada ou continuará a ser monitorada).</p>	<p>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.</p> <p>Definição das necessidades de infra-estrutura 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.</p> <p>Definição das ações futuras no que tange aos pavimentos que serão submetidos aos ensaios acelerados .</p>

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 infra-estrutura ou mesmo de drenagem adicional do trecho.</p> <p>Optar ou não pela alternância do simulador móvel de tráfego entre as seções-teste, 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	<p>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.</p> <p>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.</p> <p>Realizar ensaios de caracterização com métodos não-destrutivos, utilizando-se inspeções funcionais e ensaios deflectométricos 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.</p> <p>Caracterizar a seção transversal existente e as condições de drenagem.</p>	<p>Identificar os pavimentos que representam a condição da malha em estudo e caracterização de sua condição estrutural e funcional.</p> <p>Identificar eventuais necessidades de adequações na estrutura, tais como implantação de drenos e execução de pré-trincamento artificial.</p>

Conclusão

Tabela 5.7 – Critérios decisórios a serem observados na Definição do Tráfego a ser aplicado pelo Simulador de Tráfego Linear Móvel

Item	Atividades	Produtos
Carga de Roda	<p>Fixar carga (ou eventualmente seqüência 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.</p> <p>Determinar os fatores de equivalência de carga pelos métodos correntes (USACE e AASHTO, ou outros que venham a substituí-los).</p> <p>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.</p>	<p>Definição das cargas a serem empregadas nos APT em cada seção-teste.</p> <p>Fatores de carga pelos métodos correntes (USACE e AASHTO, ou outros que venham a substituí-los).</p> <p>Detalhamento do</p> <p>FEC com base em modelos de falha selecionados.</p> <p>Auxiliar na previsão do número total de ciclos que serão necessários no ensaio acelerado.</p> <p>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 seqüências diferentes de cargas em seções-teste distintas.</p>

Continua

Item	Atividades	Produtos
Deslocamento lateral transversal do trem de carga	<p>Definir o valor total a ser deslocado transversalmente, desde um mínimo de 100mm (em semi-eixos simples de rodas duplas) até a largura total das trilhas de roda que vêm sendo observadas na malha representativa.</p> <p>Definir como o mesmo se dará (no início do semiciclo – preferencial - ou ao longo de todo o seu curso - eventual).</p>	<p>Definição a relação operação-cobertura</p> <p>Definição do perfil transversal do carregamento imposto.</p> <p>Auxiliar na previsão do número total de ciclos que serão necessários no ensaio acelerado.</p>
Sentido de Carregamento	<p>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.</p> <p>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.</p>	<p>Registrar a opção de sentido de carregamento da pesquisa.</p> <p>Auxiliar na previsão do número total de ciclos que serão necessários no ensaio acelerado.</p>

Continuação

Item	Atividades	Produtos
Tipo e configuração do eixo	Definir a necessidade de alternância do semi-eixo do trem de prova (originalmente um semi-eixo 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 semi-eixo, 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 5.8 – Critérios decisórios em relação às Condições Climáticas em pesquisas com Simulador de Tráfego Linear Móvel

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 infra-estrutura: optar pela saturação ou não das camadas da infra-estrutura (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 5.9 – Critérios para Execução das Pistas Experimentais destinadas a ensaios acelerados com Simulador de Tráfego Linear Móvel

Item	Atividades	Produtos
Características da Pista	<p>Definir a extensão do trecho teste, optando-se preferencialmente por segmentos com no mínimo 250m e largura de uma faixa de rolamento.</p> <p>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.</p>	<p>Eliminando-se problemas comuns no início e fim de “panos” de obra.</p> <p>Detalhamento do comportamento do pavimento na seção-teste</p>
Controle de Qualidade	<p>Controle de qualidade intenso em todas as etapas (desde projeto, seleção de materiais, dosagem até o acompanhamento da produção e da aplicação).</p> <p>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.</p>	<p>Seções-teste atendendo aos requisitos de projeto da pesquisa.</p>
Instrumentação	<p>Instalar a instrumentação, caso a mesma seja incluída na pesquisa (item opcional).</p>	<p>Pista instrumentada para a simulação de tráfego (opcional)</p>

Tabela 5.10 – Critérios de Operação do Simulador de Tráfego Linear Móvel e monitoramento do Pavimento em cada seção-teste

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

Continua

Item	Atividades	Produtos
Ajustes iniciais	<p>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.</p> <p>Regular o sistema de alimentação de água de estrutura (caso seja empregado).</p> <p>Ajuste do sistema de dispersão lateral conforme planejado.</p> <p>Ajuste no sistema de carregamento conforme planejado (em sentido único ou bidirecional).</p> <p>Calibrar o pneu na pressão desejada.</p> <p>Verificar a velocidade média de carregamento.</p> <p>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.</p> <p>Realizar a impressão do pneu para a verificação da área de contato.</p> <p>Definir o sistema de <i>backup</i> para as informações coletadas no monitoramento.</p>	<p>Atendimento às premissas propostas no planejamento, tanto no que se refere ao carregamento quanto ao “controle” das condições climáticas.</p> <p>Correlação Viga Benkelman x FWD para a seção-teste.</p>

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 5.11 – Ensaios complementares e posteriores a simulação de tráfego com o Simulador de Tráfego Linear Móvel

Item	Atividades	Produtos
Ensaios 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.

6. Conclusões e Recomendações

As principais conclusões da pesquisa são apresentadas em função dos seus principais objetivos, o que permite a apreciação dos seus resultados. São sugeridos também temas para futuras pesquisas com vistas à melhoria do método proposto para o emprego de simuladores de tráfego lineares móveis de pista para determinação do comportamento e do desempenho de pavimentos asfálticos.

O primeiro ponto importante refere-se ao emprego de ensaios acelerados de pavimentos, com a descrição dos principais equipamentos em operação em todo o mundo e a síntese das pesquisas até o momento realizadas no Brasil, nas duas instalações em campo de prova disponíveis no País e também com os simuladores móveis.

Embora segundo METCALF, 1996, nenhum equipamento seja ideal para todos os objetivos exigindo algumas aproximações, ressalta-se a versatilidade dos simuladores móveis para a realização de ensaios acelerados, que possibilita a verificação do comportamento do pavimento em escala real e em curto espaço de tempo de trechos experimentais de rodovias em serviço, o que é especialmente vantajoso na análise de técnicas de restauração de pavimentos por preservarem as condições locais de contorno.

O segundo ponto refere-se ao resumo dos principais tópicos conhecidos no emprego de simuladores de tráfego, cujas alterações podem ser significativas em função dos objetivos de cada pesquisa. Neste ponto, observa-se a importância do conhecimento adquirido em pesquisas já realizadas, tanto no Brasil quanto no exterior.

A análise crítica das pesquisas realizadas até meados de 2006 com o simulador de tráfego linear móvel brasileiro permite observar, não apenas o potencial de emprego deste tipo de equipamento para o meio técnico nacional, mas também conhecer os pontos negativos e os pontos positivos de cada pesquisa, que podem e devem ser tomados como referência para futuros estudos no país.

Propõe-se que sejam observadas algumas diretrizes para os ensaios utilizando-se um método para a realização de pesquisas com simuladores de tráfego lineares móveis, incluindo-se a montagem de um banco de dados com todas as informações coletadas em cada pesquisa, com formato compatível e universal, de forma a facilitar futuros estudos e permitir a comparação e disseminação de conhecimento no meio rodoviário nacional. Este método está resumido em uma listagem para cada uma das fases que envolvem uma pesquisa com ensaios acelerados deste tipo.

As aplicações desses equipamentos e os programas de estudos associados são vastos, assim sendo, o método proposto facilita a padronização dos mesmos e possibilita uma maior difusão e emprego dos resultados pelo meio técnico nacional. Dentre estes, está a análise do comportamento do pavimento ao longo do tempo para definição de investimentos associados que se farão necessários, face as distintas ações de manutenção e reabilitação no tempo; a implementação de novas tecnologias de forma rápida e consistente em relação às expectativas de desempenho oferecidas; atestar novas obras em fase de conclusão ou recém concluídas (sejam de reabilitação ou de construção); formar uma base experimental para a validação de novos métodos e critérios de natureza mecanística, com fundamentos essencialmente técnicos (como já tem ocorrido no exterior) e redefinir e reavaliar os fatores de carga e os efeitos dos excessos de carga nos pavimentos.

Sugere-se também o estudo da influência de algumas das variáveis envolvidas no emprego de simuladores de tráfego lineares móveis, especialmente no que se refere ao emprego de movimentos de carga em sentido único ou bidirecional e ao efeito da velocidade de carregamento, que pode ser realizado inclusive de forma coordenada com o simulador da Pista Circular do IPR (por permitir que o tráfego do trem de prova com velocidades superiores aos 10km/h em média obtidos com o simulador móvel).

Recomenda-se, por fim, o acompanhamento periódico de trechos experimentais sob tráfego real, para que se possam realizar estudos comparativos de desempenho de vias, sob tráfego real, com os resultados obtidos em seções sob tráfego acelerado.

Outro ponto importante a ser desenvolvido em futuros estudos é o banco de dados para as informações coletadas em ensaios acelerados de pavimentos realizados no Brasil, visto que o mesmo foi proposto mas não detalhado no método apresentado.

REFERÊNCIAS

AFNOR (ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION). Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés – NF P 98-253-1. Julho, 1991.

AFNOR (ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION). Préparation des mélanges hydrocarbonés – NF P 98-250-2. Novembro, 1991.

ALBANO, J. F. Efeito dos excessos de carga sobre a durabilidade dos pavimentos. 2005. 232 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Porto Alegre, 2005.

APS, M. Classificação da aderência pneu-pavimento pelo índice combinado IFI – *international friction index* para revestimentos asfálticos. 2006. 179p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, EPUSP. São Paulo, 2006.

AUTOVIAS. Caracterização dos pavimentos do trecho experimental e plano de pesquisa. Relatório Técnico. 2003. Ribeirão Preto, 2004.

AUTOVIAS. Trecho experimental - simulador de tráfego - SP-330 pista norte - km 291+650 a km 292+650. Relatório Final. 2004. 29 p. Ribeirão Preto, 2004.

AZAMBUJA, D. M. Estudo de recapeamentos asfálticos de pavimentos através de ensaios acelerados. 2004. 124 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Porto Alegre, 2004.

BALAY, J. M. Des possibilites d'expérience supplémentaires avec lê manège de fatigue des structures routières. (Paris) 2002; capítulo 2: 47.

BALBO, J. T.; SEVERI, A. A.; RODOLFO, M. P., PEREIRA, D. S. Pesquisa dos efeitos do clima sobre pavimentos de concreto - instrumentação da pista experimental na USP. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 2000. Rio de Janeiro, 2000. 6p.

BIANCHINI, M. R., JOHNSTON, M. G., PASSOS, M.C.F. Estudo comparativo dos efeitos da variação da carga e da pressão dos pneus nos pavimentos rodoviários. In: 9º ENACOR, 2004. 16 p. Anais, Natal, 2004.

BIANCHINI, M. R., JOHNSTON, M. G., PASSOS, M.C.F. Estudo comparativo dos efeitos da variação da carga e da pressão dos pneus nos pavimentos rodoviários. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA - ENACOR, 9., 2004, Natal.

CARVALHO, R. L. Mechanistic-empirical design of flexible pavements: a sensitivity study. 2006. 166 p. Dissertação (Mestrado) - Faculty of the Graduate School of the University of Maryland. Maryland, Estados Unidos, 2006.

CARY, W. N.; IRICK, P. E. The pavement serviceability - performance concept. 1960. In: HRB Bulletin nº 250, Washington - Estados Unidos, 1960.

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.

CHEN, D. H., H. H. LIN. Development of an equation to predict permanent deformation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACCELERATED PAVEMENT TESTING (CD-Rom). Reno, NV. 1999.

CHEN, D.-H., J. BILYEU, F. HUGO. Monitoring pavement response and performance using in situ instrumentation. In: CONFERENCE ON FIELD INSTRUMENTATION FOR SOIL AND ROCK, Atlanta, Ga., 1998.

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

CORTÉ, J.-F., Y. BROSSEAUD, J.-P. KERZREHO, A. SPERNOL. Study of rutting of wearing courses on the LCPC test track. In: 8th CONFERENCE OF INTERNATIONAL SOCIETY FOR ASPHALT PAVEMENTS. Seattle, 1997. Proceedings (CD-ROM). Seattle, 1997.

DNER, 1992. Manual de pavimentos de concreto rolado. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens, v. 2.

DNER, 1993. Manual de pavimentos de concreto rolado. Departamento Nacional de Estradas de Rodagens, v. 3.

DNER. Manual de reabilitação de pavimentos asfálticos. Rio de Janeiro: 1996. 320p.

DNER. Manual de reabilitação de pavimentos asfálticos. Rio de Janeiro: 1998. 243p.

DNIT 006/2003 – PRO. Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Rio de Janeiro: 2003. 10p.

DNIT, 2007. Via Internet. http://www1.dnit.gov.br/ipr_new/prog_andamento.htm. 2007.

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. 2001.

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.

EPPS, J; SEEDS, S. B.; MONISMITH; C. L., ASHMORE S. C.; ALAV, S. H. Westrack full-scale test track: interim findings. In: 8th CONFERENCE OF INTERNATIONAL SOCIETY FOR ASPHALT PAVEMENTS. Seattle, 1997. Proceedings (CD-ROM). Seattle, 1997.

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

GEIPOT – Empresa Brasileira de Transportes. Pesquisa sobre o Inter-relacionamento dos Custos de Construção, Conservação e Utilização de Rodovias. 1981. 225p. 12v. Brasília, 1982.

GEIPOT – Empresa Brasileira de Transportes. Pesquisa sobre o inter-relacionamento dos custos de construção, conservação e utilização de rodovias. 1981. 225p. 1v. Brasília, 1982.

GONÇALVES, F. P. Estudo do desempenho de pavimentos flexíveis a partir de instrumentação e ensaios acelerados. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2002.

GONÇALVES, F. P. O desempenho dos pavimentos flexíveis. 150p. Porto Alegre, 1999.

GONÇALVES, F. P., CERATTI, J. A. P., OLIVEIRA, J. A. Medidas de deformações horizontais em camadas asfálticas. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 32 Brasília, 2000. Anais. São Paulo: ABPv, 2000. pp. 873-879.

GRAMSAMMER, J.-C., J.-P. KERZREHO, H. ODÉON, The LCPC's APT facility. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACCELERATED PAVEMENT TESTING (CD-Rom). Reno, NV. 1999.

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.

H. TIMM, D. H., PRIEST, A. P. Flexible pavement fatigue cracking and measured strain response at the NCAT test track. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 87th ANNUAL MEETING (CD-Rom). Washington. 2008.

HAND, A.J., J.A. EPPS, P.E. SEBAALY. Development of APT based permanent deformation prediction models translatable to other environments In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACCELERATED PAVEMENT TESTING (CD-Rom). Reno, NV. 1999.

HUGO, F., V.P. SERVAS, D.R.F. SNYMAN. HVS-aided validation of pavement behavior at low temperatures. In: PROCEEDINGS OF THE ASSOCIATION OF ASPHALT PAVING TECHNOLOGISTS. Reno, NV, Vol. 56, 1987, pp. 168–197.

HUGO, F.; MARTIN, A. L. E. NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. - NCHRP Synthesis of Highway Practice 325: Significant findings from full-scale accelerated pavement testing. 2004. TRB, National Research Council, Washington, U.S.A, 2004.

INTERVIAS, Concessionária de Rodovias do Interior Paulista S/A. Reciclagem a Frio *in situ* - Dosagem de Misturas - SP-147 - Pista Leste - km 119+600 ao 120+600. Relatório Técnico 2004. 8p. Araras/SP, 2004.

INTERVIAS, Concessionária de Rodovias do Interior Paulista S/A. Reciclagem a Frio *in situ* – Trecho Experimental – Conceção - SP-147 - Pista Leste - km 119+600 ao 120+600. Relatório Técnico 2004. 35p. Araras/SP, 2004.

INTERVIAS, Concessionária de Rodovias do Interior Paulista S/A. Reciclagem a Frio *in situ* – trecho experimental – monitoramento - SP-147 – pista leste - km 119+600 ao 120+600. Relatório Técnico 2005. 96p. Araras/SP, 2005.

INTERVIAS, Concessionária de Rodovias do Interior Paulista S/A. Reciclagem a frio *in situ* – trecho experimental - SP-147 – pista leste - km 119+600 ao 120+600. Relatório Final 2005. 29p. Araras/SP, 2005

KIM, J., BYRON, T., SHOLAR, G. A., KIM, S. Comparison of a three-dimensional viscoelastic pavement model with full-scale field tests. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 87th ANNUAL MEETING (CD-Rom). Washington. 2008.

LABORATORIE CENTRAL DES PONTS E CHAUSSÉES - LCPC [homepage]. Paris, França, 2007. [citado 30 nov 2007]. Disponível em: http://www.lcpc.fr/fr/recherches/resultats_recents/archieves-2001-2005/index9.dml

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

LEE, J. S., KIM, Y. R. Understanding the effects of aggregate and emulsion application rates on the performance of asphalt surface treatments. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 87th ANNUAL MEETING (CD-Rom). Washington. 2008.

MENDONÇA, R; NASCIMENTO, J; NASCIMENTO, K, 2005. Siderúrgicas e sustentabilidade: alternativa com o uso de co-produto siderúrgico na engenharia rodoviária. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 25 a 28 de julho de 2005, Belo Horizonte – MG, 2005.

MERIGHI, J. V. Utilização de simulador de tráfego para análise de comportamento de misturas asfálticas. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 29 Cuiabá, MT, 1995. Anais. Cuiabá: ABPv, 1995. pp 304-316.

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.

MITCHELL, T. WesTrack: the road to solutions. Public Roads Magazine. Fall 1996· Vol. 60· No. 2 EUA. 1996.

MONTESTRUQUE, G. E. Contribuição para a elaboração de método de projeto de restauração de pavimentos asfálticos utilizando geossintéticos em sistemas anti-reflexão de trincas. 2002. Tese (Doutorado) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, 2002.

MOTTA, L. M. G. Observações sobre a pista experimental de Santa Catarina (areia-calcinza volante). In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 16 Olinda, PE, 1981. Anais. Olinda: ABPv, 1981. pp 187-241.

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

MOTTA, L. M. G. Métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis, critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, 1991.

NEWCOMB, D.E., G. ENGSTROM, D.A. VAN DEUSEN, J.A. SIEKMEIER, and D.H. TIMM, Minnesota Road Research Project: A five-year review of accomplishments. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACCELERATED PAVEMENT TESTING (CD-Rom). Reno, NV. 1999.

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.

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. Ensaio 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

PASSOS, M. C. F.; JOHNSTON, M. G.; BIANCHINI, M. R. RS/122 - Estudo comparativo do asfalto convencional e asfalto borracha através de ensaios de laboratório. In: 18º ENCONTRO DE ASFALTO, 2006. 9 p. Rio de Janeiro, 2006.

PASSOS, M. C. F.; JOHNSTON, M. G.; BIANCHINI, M. R. Simulação de tráfego nas pistas experimentais da RS/122 – asfalto borracha versus asfalto convencional. In: 18º ENCONTRO DE ASFALTO, 2006. 13 p. Rio de Janeiro, 2006.

PASSOS, M.C.F., BIANCHINI, M. R., JOHNSTON, M. G., Simulador de tráfego móvel - experiência de operação. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA - ENACOR, 9., 2004, Natal.

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).

PEREIRA, D. S.; BALBO, J. T.; SEVERI, A. A.; RODOLFO, M. P., SOUZA, A. G. M. Pista experimental instrumentada com whitetopping ultradelgado. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 32 Brasília, 2000. Anais. São Paulo: ABPv, 2000. 12p.

PIDWERBESKY, B.D., B.D. STEVEN, J. DE PONT. Dynamic loading effects on flexible pavement performance. In: 8th CONFERENCE OF INTERNATIONAL SOCIETY FOR ASPHALT PAVEMENTS. Seattle, 1997. Proceedings (CD-ROM). Seattle, 1997.

PINTO, S. Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, 1991.

PINTO, S. Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, 1991.

POWELL, R. B. Modeling rutting performance on the NCAT pavement test track. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD 87th ANNUAL MEETING (CD-Rom). Washington. 2008.

PREUSSLER, E. S.; VALE, A. F.; CANDIRAS, C. M.; NARITA, A. K. Asphalt Cold In Place Recycling: SP-147 Experimental Section. 2005. In: SECOND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PAVEMENT RECYCLING. São Paulo, 2005.

PREUSSLER, E. S.; VALE, A. F.; CARVALHO, R. L. E.; PINTO, I. E. Retroanálise - processos para a avaliação estrutural de pavimentos. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 32 Brasília, 2000. Anais. São Paulo: ABPv, 2000. p.898-916.

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.

SÁ, M. F. P. Influência do tráfego na infra-estrutura viária e misturas asfálticas para corredores de ônibus testadas em simuladores de tráfego. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, 2003.

SAEED, A.; HALL J. W. NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. - NCHRP Synthesis of Highway Practice 512: Accelerated pavement testing: data guidelines. 2003. TRB, National Research Council, Washington, U.S.A, 2003.

SCHMITZ, C. S. Análise do Comportamento Estrutural de Sistemas de Drenagem Viária constituídos por tubos Plásticos Flexíveis envolvidos com areia. 2002. 170p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, EPUSP. São Paulo, 20

SIDDHARTHAN, R.V.; KRISHNAMENON, N.; EL-MOUSLY, M.; SEBAALY, P. E. Investigation of tire contact stress distributions on pavement response. In: JOURNAL OF TRANSPORTATION ENGINEERING, Volume 128, p.136-144. Março/Abril de 2002.

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.

STEVEN, B., J. DE PONT, B. PIDWERBESKY, G. ARNOLD. Accelerated dynamic loading of flexible pavements at CAPTIF. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACCELERATED PAVEMENT TESTING (CD-Rom). Reno, NV. 1999.

SWEATMAN, P.F. A study of dynamic wheel forces in axle group suspensions of heavy vehicles. ARRB SPECIAL REPORT No. 27, Australian Road Research Board, Melbourne, Australia, 1983.

TOMPKINS, D. M., KHAZANOVICH, L., JOHNSON, D. M. Benefits of the Minnesota road research project (MnROAD). In: TRANSPORTATION RESEARCH BORD 87th ANNUAL MEETING (CD-Rom). Washington. 2008

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 BORD 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.

VAN DER MERWE, C.J., H.L. THEYSE, E. HORAK, F. HUGO, H.A. DU PLESSIS, Evaluation of the rehabilitation design of a BTB and the effects of artificial aging using accelerated wheel load testing. In: 7th CONFERENCE OF INTERNATIONAL SOCIETY FOR ASPHALT PAVEME

VAN VUUREN, .J. Pavement performance in the S12 road experiment, an AASHO satellite test road in South Africa. In: THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE STRUCTURAL DESIGN OF ASPHALT PAVEMENTS, Volume I Proceedings. Londres, 1972.

WARREN, K. A., EAMON, C., LORD, C. R., HOWARD, I. L. Variability analysis of low volume instrumented thin flexible pavements. In: TRANSPORTATION RESEARCH BORD 87th ANNUAL MEETING (CD-Rom). Washington. 2008.

WHITE, T.D., J. HUA, K. GALAL. Analysis of accelerated pavement tests. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACCELERATED PAVEMENT TESTING (CD-Rom). Reno, NV. 1999.

YANDELL, W.O., G. BEHZADI. Rutting prediction of twelve accelerated loading facility (ALF) trials. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACCELERATED PAVEMENT TESTING (CD-Rom). Reno, NV. 1999.