DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA PARA PREVISÃO DO DANO POR FADIGA EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Marcos Antonio Fritzen

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientadora: Laura Maria Goretti da Motta

Rio de Janeiro

Julho de 2016

DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA PARA PREVISÃO DO DANO POR FADIGA EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Marcos Antonio Fritzen

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

_____
Prof.ª. Laura Maria Goretti da Motta, D.Sc.

_____
Drª. Leni Figueiredo Mathias Leite, D.Sc.

_____
Prof.ª. Liedi Bariani Bernucci, D.Sc.

_____
Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti, D.Sc.

_____
Dr. Luis Alberto Hermann do Nascimento, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
JULHO DE 2016

Fritzen, Marcos Antonio

Desenvolvimento e Validação de Função de Transferência para Previsão do Dano por Fadiga em Pavimentos Asfálticos / Marcos Antonio Fritzen – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XXIV, 262 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadora: Laura Maria Goretti da Motta

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 250-262.

1. Mecânica dos Pavimentos. 2. Trechos Experimentais. 3. Método de Dimensionamento Mecanístico Empírico Brasileiro. 4. Função de Transferência. I. Motta, Laura Maria Goretti da. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

"*Aos outros, dou o direito de ser como são. A mim, dou o dever de ser cada dia melhor*."

"Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim."

"Para TER algo que você nunca teve, é preciso FAZER algo, que você nunca fez."

Chico Xavier

Dedico este trabalho

A minha família em especial a minha esposa Mariluce, minha eterna gratidão pelo carinho e ensinamento de vida.

As minhas filhas Larissa e Bianca, pela oportunidade de ser pai, espero cumprir meu legado de vida e desejo que vocês nunca percam a esperança de conquistar seus sonhos.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelas oportunidades de vida que me foram dadas e pelas pessoas colocadas no meu caminho.

À minha esposa Mariluce pelo carinho, compreensão, incentivo, amizade e paciência neste período de ausência, meu eterno agradecimento. Tu és o sol da minha vida.

Às minhas filhas Larissa e Bianca pelo amor e carinho sempre demonstrado mesmo nos momentos de ausência. O desafio de fazer esse trabalho é parte do que foi escrito na dedicatória de nunca perder as esperanças.

Aos meus pais Antonio e Nelci e ao meu irmão Luciano que sempre me incentivaram na concretização dos meus sonhos.

À professora Laura Maria Goretti da Motta, cujo incentivo, carinho, compreensão, orientação e paciência me fez entender o verdadeiro sentido das palavras "amizade e esperança". Minha eterna gratidão pela atenção e paciência durante os momentos de desânimo e cansaço neste estudo e pela oportunidade de contribuir para o desenvolvimento do método de dimensionamento mecanístico empírico brasileiro. Um sonho que se torna realidade.

À família Motta, pelo carinho e a oportunidade de fazer parte dessa família, Laura, Vermelho, Beatriz e Gabriel. Obrigado pelo carinho e afeto com a minha família.

À amiga e colega Leni Leite pelo carinho, respeito, amizade e ensinamento durante todos esses anos e sua nobre participação na banca.

Ao professor Jorge Ceratti pelo respeito e apoio durante esses anos de convivência e a nobre participação na banca.

À professora Liedi Bernucci pelo carinho e apoio durante esses anos de convivência e a nobre participação na banca.

Ao amigo, colega e “co-orientador” Luis Nascimento por sua atenção, amizade e ensinamento desde 2006, obrigado pela oportunidade de contribuir para o desenvolvimento do método de dimensionamento mecanístico empírico brasileiro, e sua nobre participação na banca.

Ao amigo e colega Filipe Franco pelo apoio, ajuda e desenvolvimento de programas específicos para o andamento deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

Ao amigo e professor Thiago Aragão, cearense gente boa, pelo carinho e amizade desde sua chegada à COPPE.

Aos grandes amigos e colegas de trabalho, que admiro muito, em especial ao engº Álvaro Vianna, engº Carlos Filipe “Cayto”, engª Mariluce Ubaldo, engº Ricardo Gil, engº Sérgio Iório, Allan Fernandes, Washington Rafael, Leandro Pereira, Roberto Vianna, Vera Lúcia, Luis Carlos, Marcos Antunes, Max, Rodrigo, Mauro e todos os outros que fazem do Laboratório de Geotecnia nosso segundo lar.

À família COPPE, professores, funcionários e amigos pelo carinho, dedicação e o privilégio de trabalhar e conviver com pessoas que dedicam suas vidas em prol de um país melhor. Em especial ao professor Jacques de Medina mestre dos mestres que contribuiu muito para o país, principalmente no Departamento de Estradas da Guanabara e na COPPE, professor que deixou para muitos um legado que hoje está sendo concretizado no método de dimensionamento mecanístico brasileiro.

Aos amigos e colegas do CENPES pelo privilégio de trabalhar com esta equipe dedicada, em especial ao Sérgio Murilo, Ulisses Figueiredo, Margareth Cravo, Adriana Tinoco, Vânia Periquito e Maria Helena.

Ao brilhante grupo de pesquisadores do SisPavBR, pelos ensinamentos, em especial a professora Laura Motta, professor Jacques de Medina, Mariluce Ubaldo, Álvaro Vianna, Leni Leite, Filipe Franco, Thiago Aragão, Luis Nascimento, Ilonir Tonial, Prepredigna da Silva, Carlos Filipe, Antonio Guimarães, Luciana Dellabianca, Luciana Nogueira, ao IPR / DNIT / Ministério dos Transportes e a todos os demais coordenadores que fazem parte do grupo da Rede Temática de Asfalto.

Aos amigos da BR Distribuidora pelo apoio e parceria ao longo desses anos.

Ao professor Luciano Specht e ao professor Deividi pelo pronto atendimento e atenção nos dados enviados para a validação da Função de Transferência.

À Kamilla Vasconcelos pelo carinho e pronto atendimento no envio dos dados para a validação da Função de Transferência.

A Craft Engenharia em especial ao amigo José Carlos pelo apoio na execução dos segmentos experimentais do Projeto Fundão.

Aos alunos de mestrado e doutorado pelas conversas informais nos corredores do laboratório.

Ao casal Ulisses e Cintia, pelo carinho e torcida para a realização do meu objetivo.

Obrigado a todos que de uma maneira ou outra me ajudaram nesta caminhada, perdoe-me no caso de alguma omissão. Finalmente, externo meus sinceros agradecimentos àqueles que contribuíram para realização deste trabalho, independentemente da magnitude de sua ajuda.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA PARA PREVISÃO DO DANO POR FADIGA EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Marcos Antonio Fritzen

Julho/2016

Orientadora: Laura Maria Goretti da Motta

Programa: Engenharia Civil

Um dos maiores problemas na engenharia rodoviária é estimar de forma satisfatória a vida útil de pavimentos novos e restaurados, especialmente em relação a trincas por fadiga ou à deformação permanente. Essa incerteza na previsão da vida útil dos pavimentos asfálticos está relacionada atualmente ao alto grau de empirismo existente no método de dimensionamento de pavimentos flexíveis – método DNER, vigente no país desde 1966. O Brasil, especialmente os órgãos rodoviários necessitam urgentemente de um modelo mais adequado à realidade técnico – científica do país e baseada em critérios mecânicos que minimizem o erro da previsão. Esta tese teve como objetivo contribuir com o estabelecimento de um novo método mecanístico – empírico na sua parte mais fundamental: definir uma calibração para a previsão do dano por fadiga (Função de Transferência) baseada nos ensaios mecânicos de módulo de resiliência e fadiga por compressão diametral de cargas repetidas de misturas asfálticas, a partir da análise de segmentos experimentais construídos e monitorados anualmente, desde sua implantação, nas principais vias da Cidade Universitária, e na porcentagem de área trincada observada em campo. A Função de Transferência foi definida a partir de 6 misturas asfálticas distribuídas em 45 segmentos construídos em diferentes condições estruturais e níveis de tráfego. É baseada no dano médio acumulado distribuído em 110 pontos, calculado com o programa de análise elástica. A Função de Transferência também foi validada com segmentos experimentais de diferentes regiões do país, da Rede Temática de Asfaltos, com previsão de área trincada muito próxima da área trincada observada.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

DEVELOPMENT AND VALIDATION OF TRASNFER FUNCTION FOR FATIGUE FOR DAMAGE PREDICTION ON ASPHALT PAVEMENTS

Marcos Antonio Fritzen

July/2016

Advisor: Laura Maria Goretti da Motta

Department: Civil Engineering

The prediction of the service life of new and rehabilitated pavements is a major challenge for pavement engineers, especially if distresses such as cracking and rutting are involved. This uncertainty in the prediction of the service life of Brazilian asphalt pavements is also associated to the use of a purely empirical flexible pavement design guide, which dates from 1966. In that sense, the development of a new guide that is more technically sound and based on concepts of mechanics of materials rather than on purely empirical relations becomes an urgent task. This dissertation aims to contribute with the development of the new mechanistic – empirical Brazilian pavement design guide. More specifically, the research focuses on the definition of a so-called transfer function that is used to relate the material behavior characterized in the laboratory to the amount of damage observed in 45 real field segments. These segments were built in the main campus of the Federal University of Rio de Janeiro and have been monitored over the years. They were composed by 6 different asphalt mixtures, built in locations with various structural conditions, and subjected to different traffic levels. The Transfer Function was calibrated based on the responses provided by the structural analysis software of the guide, which used information, obtained from the laboratory experiments as input parameters. Finally, the Transfer Function was validated using data from several field segments that have been monitored in different states of the country. The results indicate that the function has been successfully calibrated and validated and can provide fatigue cracked predictions that are very close to the damage levels observed in real field segments.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 6
2.1Breve Histórico de Alguns Trechos Experimentais no Brasil 6
2.2 Trechos Experimentais Integrantes da Rede Temática de Asfaltos 16
2.2.1 Trechos Experimentais da COPPE/UFRJ 17
2.2.2 Trechos Experimentais da UFSM 23
2.2.3 Trechos Experimentais da UFRGS 26
2.2.4 Trechos Experimentais da UFC 27
2.2.5 Trechos Experimentais da UFSC 29
2.2.6 Trechos Experimentais da EPUSP 30
2.3 Breve Histórico de Trechos Experimentais no Exterior 32
2.4 O Uso de Simuladores de Tráfego no Mundo 44
2.4.1 Simulador de Tráfego Circular do IPR/DNER 47
2.4.2 Simulador de Tráfego da UFRGS - DAER/RS 48
2.4.3 Simulador de Tráfego Móvel - HVS 54
2.5 Ensaios Mecânicos de Misturas Asfálticas Necessários para o Dimensionamento 78
2.6 Métodos de Análise de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos Brasileiros 89
2.7 Métodos de Dimensionamento Internacionais 95
2.8 Cenário Atual do Modal Rodoviário Brasileiro 110
2.9 Função de Transferência do Dano Simulado para Área Trincada 112
3 PROJETO FUNDÃO 119
3.1 Histórico da Cidade Universitária 120
4 MATERIAIS E MÉTODOS 125
4.1 Introdução 125
4.2 Materiais e Métodos Empregados na Etapa de Pré Execução do Projeto Fundão 125
4.3 Materiais e Métodos Empregados na Etapa de Execução 144
4.3.1 Misturas Asfálticas 144
4.4 Avaliação e Monitoramento dos Segmentos Experimentais Construídos no Projeto Fundão 152
4.5 Critério Utilizado na Retroanálise das Bacias Deflectométricas de 2015 para Determinação da Função de Transferência 163
4.6 Análise Elástica de Múltiplas Camadas - AEMC 166
5 RESULTADOS E ANÁLISES 169

5.1 Resultados dos Ensaios Mecânicos 169

5.2 Resultados dos Segmentos Experimentais à Quente Contemplados Nesta Tese 171

5.3 Resultados da Retroanálise dos Segmentos Experimentais Obtidos das Bacias Deflectométricas com o Uso do FWD no Ano de 2015 175

5.4 Desenvolvimento da Função de Transferência 179

5.4.1 Roteiro da Metodologia de Obtenção da Função de Transferência (Passo 1 a 19) 183

5.5 Parâmetros Estatísticos 212

5.6 Validação da Função de Transferência com Trechos Experimentais Nacionais 218

5.7 Validação da Função de Transferência de Trechos Experimentais Nacionais Utilizando Curvas de Fadiga do Projeto Fundão 232

6.1 Conclusões 243

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros 248

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 250

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de eixos de caminhões utilizados na pista NCAT (Fonte: http://eng.auburn.edu). 2016 40
Figura 2 - Pista experimental da NCAT (Fonte: http://eng.auburn.edu) março2016 41
Figura 3 - Pista experimental Mn / Road (Fonte: http://www.dot.state.mn.us/mnroad) março2016 42
Figura 4 - Pista experimental da Westrack (Fonte: https://www.researchgate.net) março2016 43
Figura 5- Vista superior da pista circular experimental do IPR / DNER (SILVA, 2001). 48
Figura 6- Simulador de tráfego da UFRGS DAER/RS (Foto: Jorge Ceratti) 49
Figura 7- Simulador de tráfego móvel – Heavy Vehicle Simulator – HVS 55
Figura 8- Aferição do trem de carga com o uso da balança móvel da CRT 67
Figura 9- Levantamento deflectométrico com o uso da viga Benkelman eletrônica da COPPE 68
Figura 10- Levantamento de irregularidade com o uso do dipstick 68
Figura 11- Levantamento de mancha de areia 69
Figura 12- Gabarito para determinação da porcentagem de área trincada 69
Figura 13- Área de atuação do trem de carga com o uso do simulador de tráfego 70
Figura 14- Curva granulométrica utilizada nas misturas asfálticas de referência (Fonte: Luis Nascimento / Petrobras) 74
Figura 15 - Esquema do equipamento de ensaio de compressão diametral de cargas repetidas 80
Figura 16 Esquema do ensaio de compressão diametral para misturas asfálticas 82
Figura 17 – Resultados da calibração da Função de Transferência sigmoidal do MEPDG dada no NCHRP (2004) – (Fonte: NASCIMENTO, 2015) 96
Figura 18 - Geometria das estruturas de pavimento consideradas no catálogo do MACOPAV (Fonte JAE, 1995) 105
Figura 19 – Fotografia extraída do acervo do EUTB – mosaico aero fotográfico das ilhas designadas pelo Dec. Lei 7565 de 02/05/1945. 122
Figura 20 - Imagem fotográfica antes e depois do aterro (Fonte www.pu.ufrj.br) 123
Figura 21- Corridas de carros nas vias da Cidade Universitária (Fonte www.pu.ufrj.br) 123
Figura 22- Ilha do Fundão Cidade Universitária (site prefeitura UFRJ) Fonte www.pu.ufrj.br ano 2009. 124
Figura 23- Localização da Ilha do Fundão (imagem produzida através Google Earth – janeiro de 2009) 124
Figura 24 - Levantamento deflectométrico com o uso da viga Benkelman automatizada nas vias da Cidade Universitária – fevereiro de 2006 128
Figura 25 - Deflexões máximas medidas na faixa central dos trechos do Projeto Fundão, antes de qualquer intervenção, com o uso da viga Benkelman eletrônica. 128
Figura 26- Curva obtida pelo método das diferenças acumuladas da AASHTO para determinação dos segmentos homogêneos – modificada de Nascimento, (2015). 129
Figura 27 – Exemplos de condições superficiais existentes na época (2006) nas vias da Cidade Universitária 130
Figura 28 - Valores médios do IGG em 2006 de alguns dos segmentos homogêneos das vias do Projeto Fundão 131
Figura 29 - Curva granulométrica da camada de sub-base da estaca 134 do Projeto Fundão 135

Figura 30 - Curva granulométrica da camada de reforço do subleito da estaca 134 do Projeto Fundão 135
Figura 31 - Curva granulométrica da camada do subleito da estaca 134 do Projeto Fundão 136
Figura 32 - Curva granulométrica da camada de sub-base da estaca 287 do Projeto Fundão 136
Figura 33 - Curva granulométrica da camada do subleito da estaca 287 do Projeto Fundão 137
Figura 34 - Curva granulométrica da camada de sub-base da estaca 454 do Projeto Fundão 137
Figura 35 - Curva granulométrica da camada do subleito da estaca 454 do Projeto Fundão 138
Figura 36 - Perfis estruturais dos poços de sondagem realizados no Projeto Fundão em 2006 138
Figura 37 - Aspectos da abertura dos poços de sondagem Projeto Fundão em 2006... 139
Figura 38 - Resultado do IRI médio das trilhas de roda da faixa central dos segmentos homogêneos 1º ao 8º do Projeto Fundão em 2006 (Nascimento et al., 2009)..... 141
Figura 39 - Resultado do IRI médio das trilhas de roda da faixa central dos segmentos homogêneos 9º ao 12º do Projeto Fundão em 2006 (Nascimento et al., 2009)..... 141
Figura 40 - Distribuição de veículos comerciais por hora dos locais levantados na Cidade Universitária em 2009 143
Figura 41 – Volume médio diário referente aos seis locais de contagem do tráfego comercial em 2009..... 143
Figura 42 - Distribuição granulométrica dos agregados das misturas asfálticas a quente aplicadas no Projeto Fundão..... 146
Figura 43 - Formulário padrão dos principais dados de cada segmento experimental. 159
Figura 44 - Legenda com os tipos de defeitos representados no croqui de defeitos dos segmentos experimentais..... 160
Figura 45 - Inventário de defeitos do segmento à quente (SQ) 5 referente ao ano de 2015 160
Figura 46 - Evolução da irregularidade do SQ 5 desde a sua implantação em 2006 até 2015 161
Figura 47 - Evolução da macrotextura do SQ 5 desde a sua implantação em 2006 até 2015 162
Figura 48 - Evolução da porcentagem de área Trincada do SQ 5 desde a sua implantação em 2006 até 2015 162
Figura 49 - Evolução do afundamento de trilha de roda do SQ 5 desde sua implantação em 2006 até 2015..... 163
Figura 50 - Laboratório móvel e FWD da COPPE..... 164
Figura 51 – Interface do programa de retroanálise – BackSisPavBR- Versão 1.1.0.0 por Franco em 201, utilizada nesta tese 166
Figura 52 - Perspectiva da distribuição dos 110 pontos gerados no AEMC (Nascimento, 2015). 167
Figura 53 - Interface do programa AEMC modificado em 2015 utilizado nesta pesquisa 168
Figura 54 – Exemplo de evolução do dano médio acumulado gerado pelo AEMC – segmento com duas camadas de revestimento asfáltico novos – Projeto Fundão..... 168
Figura 55 – Resultado das curvas de fadiga de misturas asfálticas aplicadas em segmentos experimentais do Projeto Fundão utilizadas neste estudo 171

Figura 56 – Critério de mapeamento dos defeitos nos segmentos experimentais do Projeto Fundão 173
Figura 57 - Resultados da calibração da Função de Transferência definida por Nascimento em 2015, baseada na Função "$S_{T\,0,35}$" Fonte: (NASCIMENTO, 2015) ... 180
Figura 58 - Fluxograma para determinação da Função de Transferência 182
Figura 59 - Dano médio acumulado – livre dos 45 segmentos experimentais avaliado neste estudo – escala aritmética. 184
Figura 60 - Dano médio acumulado – livre dos 45 segmentos experimentais avaliado neste estudo – escala semi log. 184
Figura 61 - Dano médio acumulado - limitado dos 45 segmentos experimentais avaliados neste estudo – escala aritmética. 185
Figura 62 - Dano médio acumulado - limitado dos 45 segmentos experimentais avaliados neste estudo – escala semi log. 185
Figura 63 - Determinação do período em meses em função do Dano@10%AT – exemplo SQ43 D 186
Figura 64 - Dano médio para Dano@10% de AT versus Dano@0,800 – dano limitado dos 45 segmentos experimentais 188
Figura 65 – Resultados da Função "S" Dano@0,800 dividido Dano@10% de AT – dano limitado dos 45 segmentos experimentais 189
Figura 66 - Comparação da área trincada observada versus área prevista com base na função "S" – Dano@0,800 191
Figura 67 - Dano médio reduzido – limitado dos 45 segmentos experimentais avaliados nesta pesquisa – escala aritmética. 192
Figura 68 - Dano médio reduzido – limitado dos 45 segmentos experimentais avaliados nesta pesquisa – escala semi log. 192
Figura 69 – Resultados da Função DELTA Dano@10% de AT menos Dano@0,800 – dano limitado dos 45 segmentos experimentais 193
Figura 70 - Dano médio reduzido – livre gerado com os 45 segmentos experimentais avaliados neste estudo – escala aritmética. 194
Figura 71 - Comparação SQ 01 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 195
Figura 72 - Comparação SQ 02 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 195
Figura 73 - Comparação SQ 02 D - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 196
Figura 74 - Comparação SQ 03 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 196
Figura 75 - Comparação SQ 05 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 196
Figura 76 - Comparação SQ 05 C - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 197
Figura 77 - Comparação SQ 10 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 197
Figura 78 - Comparação SQ 11 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 197
Figura 79 - Comparação SQ 11 D - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 198
Figura 80 - Comparação SQ 12 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 198

Figura 81 - Comparação SQ 12 D - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 198
Figura 82 - Comparação SQ 13 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 199
Figura 83 - Comparação SQ 15 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 199
Figura 84 - Comparação SQ 17 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 199
Figura 85 - Comparação SQ 18 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 200
Figura 86 - Comparação SQ 19 C - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 200
Figura 87 - Comparação SQ 33 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 200
Figura 88 - Comparação SQ 33 D - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 201
Figura 89 - Comparação SQ 34 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 201
Figura 90 - Comparação SQ 34 D - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 201
Figura 91 - Comparação SQ 35 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 202
Figura 92 - Comparação SQ 35 C - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 202
Figura 93 - Comparação SQ 35 D - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 202
Figura 94 - Comparação SQ 40 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 203
Figura 95 - Comparação SQ 40 C - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 203
Figura 96 - Comparação SQ 41 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 203
Figura 97 - Comparação SQ 42 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 204
Figura 98 - Comparação SQ 42 D - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 204
Figura 99 - Comparação SQ 80 C - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 204
Figura 100 - Comparação SQ 23 C - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 205
Figura 101 - Comparação SQ 26 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 205
Figura 102 - Comparação SQ 26 C - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 205
Figura 103 - Comparação SQ 26 D - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 206
Figura 104 - Comparação SQ 29 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 206
Figura 105 - Comparação SQ 29 D - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 206

Figura 106 - Comparação SQ 06 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 207
Figura 107 - Comparação SQ 06 C - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 207
Figura 108 - Comparação SQ 08 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 207
Figura 109 - Comparação SQ 08 C - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 208
Figura 110 - Comparação SQ 14 D - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 208
Figura 111 - Comparação SQ 38 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 208
Figura 112 - Comparação SQ 43 C - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 209
Figura 113 - Comparação SQ 43 D - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 209
Figura 114 - Comparação SQ 65 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 209
Figura 115 - Comparação SQ 65 C - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa 210
Figura 116 – Comparação do dano médio acumulado utilizando o AEMC em segmentos experimentais construídos com CAP 30/45 com fadiga por compressão diametral alterando a segunda camada asfáltica. 211
Figura 117 – Comparação do dano médio acumulado utilizando o AEMC em segmentos experimentais construídos com CAP 30/45 com fadiga por compressão diametral e tração direta. 212
Figura 118 – Média do erro padrão versus dano médio reduzido ($S_{T0,35}$) todos os segmentos. Fonte (NASCIMENTO, 2015) 213
Figura 119 - Erro previsto versus dano médio reduzido baseado no Dano@0,800 – segmentos experimentais Projeto Fundão 214
Figura 120 - Erro padrão medido versus dano médio reduzido baseado no Dano@0,800 – segmentos experimentais Projeto Fundão 215
Figura 121 - Diferença entre a AT prevista menos a AT Observada – segmentos Fundão 217
Figura 122 - Comparação da AT $_{observada}$ versus AT $_{prevista}$, com a Função de Transferência – CRT - I..... 221
Figura 123 - Comparação da AT $_{observada}$ versus AT $_{prevista}$, com a Função de Transferência – CRT – II..... 221
Figura 124 - Comparação da AT $_{observada}$ versus AT $_{prevista}$, com a Função de Transferência – CRT – III 222
Figura 125 - Comparação da AT $_{observada}$ versus AT $_{prevista}$, com a Função de Transferência – CONCER CAP 50/70 – esquerda..... 223
Figura 126 - Comparação da AT $_{observada}$ versus AT $_{prevista}$, com a Função de Transferência – CONCER CAP 50/70 – direita..... 224
Figura 127 - Comparação da AT $_{observada}$ versus AT $_{prevista}$, com a Função de Transferência – CONCER CAP 30/45 – esquerda..... 224
Figura 128 - Comparação da AT $_{observada}$ versus AT $_{prevista}$, com a Função de Transferência – CONCER CAP 30/45 – direita..... 225
Figura 129 - Comparação da AT $_{observada}$ versus AT $_{prevista}$, com a Função de Transferência – UFRGS - II. 226

Figura 130 - Comparação da AT $_{observada}$ versus AT $_{prevista}$, com a Função de Transferência – UFSM Av. Hélvio Basso. 226
Figura 131 - Comparação da AT $_{observada}$ versus AT $_{prevista}$, com a Função de Transferência – EPUSP CAP 30/45 227
Figura 132 - Comparação da AT $_{observada}$ versus AT $_{prevista}$, com a Função de Transferência – EPUSP CAP 50/70 227
Figura 133 - Comparação da AT $_{observada}$ versus AT $_{prevista}$, com a Função de Transferência – UFC – trecho 1 DNIT BR/222 228
Figura 134 - AT $_{observado}$ em relação ao dano reduzido dos segmentos experimentais nacionais que validam a FT desta tese. 229
Figura 135 - Comparação da área trincada $_{observada}$ versus área trincada $_{prevista}$ segmentos Projeto Fundão mais segmentos nacionais 230
Figura 136 – Erro padrão medido versus dano médio reduzido baseado no Dano@0,800 – segmentos experimentais Projeto Fundão e Nacionais..... 231
Figura 137 – Comparação da AT $_{observada}$, AT $_{prevista}$ Projeto, AT $_{prevista}$ Fadiga Fundão e AT $_{prevista}$ Genérica, com a Função de Transferência – CRT I 234
Figura 138 – Comparação da AT $_{observada}$, AT $_{prevista}$ Projeto, AT $_{prevista}$ Fadiga Fundão e AT $_{prevista}$ Genérica, com a Função de Transferência – CRT II..... 235
Figura 139 – Comparação da AT $_{observada}$, AT $_{prevista}$ Projeto, AT $_{prevista}$ Fadiga Fundão e AT $_{prevista}$ Genérica, com a Função de Transferência – CRT III 235
Figura 140 - Comparação da AT $_{observada}$, AT $_{prevista}$ Projeto, AT $_{prevista}$ Fadiga Fundão com a Função de Transferência CONCER CAP 30/45 – WMA – Faixa Esquerda. 236
Figura 141 - Comparação da AT $_{observada}$, AT $_{prevista}$ Projeto, AT $_{prevista}$ Fadiga Fundão com a Função de Transferência CONCER CAP 30/45 – WMA – Faixa Direita..... 237
Figura 142 - Comparação da AT $_{observada}$, AT $_{prevista}$ Projeto, AT $_{prevista}$ Fadiga Fundão e AT $_{prevista}$ Genérica, com a Função de Transferência – UFSM 238
Figura 143 - Comparação da AT $_{observada}$, AT $_{prevista}$ Projeto, AT $_{prevista}$ Fadiga Fundão e AT $_{prevista}$ Genérica, com a Função de Transferência – UFRGS 238
Figura 144 - Comparação da AT $_{observada}$, AT $_{prevista}$ Projeto, AT $_{prevista}$ Fadiga Fundão e AT $_{prevista}$ Genérica, com a Função de Transferência – EPUSP CAP 30/45 239
Figura 145 - Comparação da AT $_{observada}$, AT $_{prevista}$ Projeto, AT $_{prevista}$ Fadiga Fundão e AT $_{prevista}$ Genérica, com a Função de Transferência – EPUSP CAP 50/70 239
Figura 146 - Comparação da AT $_{observada}$, AT $_{prevista}$ Projeto, AT $_{prevista}$ Fadiga Fundão e AT $_{prevista}$ Genérica, com a Função de Transferência – UFC CAP 50/70 240
Figura 147 – Função de Transferência Comparada a Título Ilustrativo com a Função de Transferência de NASCIMENTO (2015) e o Fator Campo Laboratório de PINTO (1981) 242

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Resumo dos segmentos experimentais nacionais utilizados na validação da Função de Transferência 32
Tabela 2- Espessura das seções experimentais – pistas da AASHO Road Test. (Fonte: http://training.ce.washington.edu/wsdot) fevereiro 2016 35
Tabela 3- Características do simulador de tráfego móvel - HVS 56
Tabela 4- Resultados dos trechos experimentais submetidos aos ensaios acelerados BR/116 – NOVA DUTRA (2007) 64
Tabela 5- Características da composição granulométrica e taxa de ligante utilizado no primeiro trecho experimental de TST submetido aos ensaios acelerados com o HVS .. 71
Tabela 6- Características da composição granulométrica e taxa de ligante utilizado no segundo trecho experimental de TST submetido aos ensaios acelerados com o HVS... 72
Tabela 7- Resultados obtidos durante a realização dos ensaios acelerados nos TST´s .. 72
Tabela 8- Características das misturas asfálticas mornas construídas na Cidade Universitária (Fonte: Luis Nascimento / Petrobras) 74
Tabela 9- Resultados obtidos durante a realização dos ensaios acelerados nos trechos de Warm Mix Asphalt (WMA). 76
Tabela 10 - Frota total de veículos – DENATRAN 2016 112
Tabela 11 - Resumo dos trechos homogêneos das vias do Fundão com suas respectivas nomenclaturas 129
Tabela 12 - Conceitos de degradação do pavimento em Função do IGG 130
Tabela 13 - Resultados dos ensaios de compactação e módulo de resiliência dos materiais coletados no poço de sondagem localizado na estaca 134. 132
Tabela 14 - Resultados dos ensaios de compactação e módulo de resiliência dos materiais coletados no poço de sondagem localizado na estaca 287. 133
Tabela 15 - Resultados dos ensaios de compactação e módulo de resiliência dos materiais coletados no poço de sondagem localizado na estaca 454. 134
Tabela 16 - Segmentos homogêneos identificados com o uso do GPR por LOPES (2009). 140
Tabela 17 - Resultado da caracterização física dos agregados (Nascimento et al., 2009) 145
Tabela 18 - Distribuição granulométrica das misturas asfálticas a quente utilizadas no Projeto Fundão (convencionais, modificadas e especiais) 146
Tabela 19 - Resumo das propriedades dos ligantes e emulsões asfálticas utilizados nas dosagens do Projeto Fundão (NASCIMENTO et al., 2009) 147
Tabela 20 - Resumo das dosagens das misturas a quente do Projeto Fundão (NASCIMENTO et al., 2009) 149
Tabela 21 - Resumo das dosagens de tratamentos superficiais à frio (NASCIMENTO et al., 2009) 150
Tabela 22 - Resumo das dosagens do microrrevestimento e do pré misturado à frio (NASCIMENTO et al., 2009) 151
Tabela 23 - Revestimentos asfálticos de CBUQ implantados no Projeto Fundão (Nascimento et al., 2009) 155
Tabela 24 - Soluções asfálticas à frio, implantados no Projeto Fundão (Fonte: Nascimento, et al., 2009) 156
Tabela 25 - Resultados da fadiga e MR e RT de misturas asfálticas usadas no Projeto Fundão 170

Tabela 26 - Porcentagens de área trincada observadas em campo dos segmentos experimentais utilizados neste estudo. 174
Tabela 27 - Resultados da retroanálise dos segmentos experimentais contemplados neste estudo..... 177
Tabela 28 - Exemplo dos dados de um segmento experimental – Projeto Fundão..... 183
Tabela 29- Coeficientes gerados para o cálculo da Função de Transferência..... 194
Tabela 30 - Parâmetros estatísticos para previsão de erro – segmentos experimentais Projeto Fundão..... 216
Tabela 31 - Resultados da AT observado versus AT previsto em relação ao último levantamento de campo disponível, definidos com a FT desta tese. 220
Tabela 32 - Parâmetros estatísticos para a previsão de erro – segmentos experimentais Projeto Fundão e Nacionais..... 232
Tabela 33 – Resumo dos Coeficientes da Função de Transferência desta tese, NASCIMENTO (2015) e o Fator Campo Laboratório PINTO (1981) 241

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

AASHO = *American Association of State Highway Officials*

AASHTO = *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ABNT NBR = Associação Brasileira de Normas Técnicas – Normas Brasileiras

AEMC = Análise Elástica de Múltiplas Camadas

AI = *Asphalt Institute*

ALF = *Accelerated Loading Facility*

AMB = Asfalto Modificado com Borracha

AMP = Asfalto Modificado com Polímeros

ANTT = Agência Nacional de Transporte Terrestre

APA = *Asphalt Pavement Analysis*

APDG = *Austroads Pavement Design Guide*

APT = *Accelerated Pavement Testing*

ASTM = *American Society for Testing and Materials*

ATR = Afundamento de Trilha de Roda

BGS = Brita Graduada Simples

BGTC = Brita Graduada Tratada com Cimento

CAP = Cimento Asfalto de Petróleo

CBR = *California Bearing Ratio*

CBUQ = Concreto Betuminoso Usinado à Quente

CDI = *Compaction Densification Index*

CE = Ceará

CENPES = Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Miguez

CETEM = Centro de Tecnologia Mineral

CISL = *Civil Infraestructure Systems Laboratory*

CNT = Confederação Nacional de Transportes

CONCER = Concessionária Rio – Juiz de Fora

COPPE = Coordenação dos Programas de Pós-graduação em Engenharia da UFRJ

CRT = Concessionária Rio – Teresópolis

DAER / RS = Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul

DEINFRA = Departamento de Infraestrutura de Santa Catarina

DENATRAN = Departamento Nacional de Trânsito

DER / MG = Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais

DNER = Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT = Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DOT = *Department of Transportation*

EME = *Enrobé à Module Élevé*

ESALs = Índice de Equivalência de Eixos da AASHO

ETUB = Escritório Técnico da Universidade do Brasil

EUA = Estados Unidos da América

EVA = Etileno – Acetato de Vinila

FABAC = *Fatigue du Béton Armé Continu*

FCL = Fator Campo Laboratório

FEC = Fator de Equivalência de Carga

FEPAVE = *Finite Element Analysis of Pavement Structures*

FHWA = *Federal Highway Administration*

FN = *Flow Number*

FWD = *Falling Weight Deflectometer*

GEIPOT = Empresa de Pesquisas e Planejamento de Transportes

GPR = *Ground Penetrating Radar*

GSEP = Gerencia de Sedimentologia e Petrologia do CENPES

HA = *Highways Agency*

HU = Hospital Universitário

HVS = *Heavy Vehicle Simulator*

ICR = Pesquisa de Interrelacionamento de Custos Rodoviários

IDH = Índice de Desenvolvimento Humano

IG = Índice de Grupo

IGG = Índice de Gravidade Global

IP = Índice de Plasticidade

IPR / DNER = Instituto e Pesquisas Rodoviárias / Departamento Nacional de Estradas e Rodagem

IRI = *International Roughness Index*

IS = Índice de Suporte

ISC = Índice de Suporte Califórnia

JULEA = *Jacob Uzan Layered Elastic Analysis*

LA = Lama Asfáltica

LAPAV = Laboratório de Pavimentação

LCPC = *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*

LL = Limite de Liquidez

LMP / COPPE = Laboratório de Mecânica dos Pavimentos / COPPE

LMP / UFC = Laboratório de Mecânica dos Pavimentos / UFC

LTP = Laboratório de Tecnologia de Pavimentos

LTPP = *Long – Term Pavement Performance Program*

LTRC = *Lousiana Transportation Research Center*

LVC = Levantamento Visual Contínuo

LVECD = *Layered Viscoelastic Continuum Damage*

MEPDG = *Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide*

MG = Minas Gerais

Mn = *Minnesota*

MR = Módulo de Resiliência

MT = Ministério dos Transportes

NAPA = *National Asphalt Pavement Association*

NCAT = *National Center for Asphalt Technology*

NCHRP = *National Cooperative Highway Research Program*

PG = Grau de Desempenho do Ligante Asfáltico

PMF = Pré Misturado à Frio

PR = Paraná

PRS = *Performance – Related Specification*

PSI = Índice de Serventia Atual

PU = Prefeitura Universitária

RBV = Relação Betume – Vazios

RDT = Recursos do Desenvolvimento Tecnológico

REDUC = Refinaria Duque de Caxias

RET = *Reactive Elastomeric Terpolymer*

REVAP = Refinaria Henrique Lage

RJ = Rio de Janeiro

RS = Rio Grande do Sul

RT = Resistência à Tração

SBS = *Styrene – Butadiene – Styrene*

SC = Santa Catarina

SDIMPA = Sistema de desenvolvimento de Pavimentos Asfálticos

SHRP = *Strategic Highway Research Program*

SMA = *Stone Mastic Asphalt*

SMS = Saúde, Meio Ambiente e Segurança

SN = Número Estrutural

SP = São Paulo

SRTA = Sistema da Rede Temática de Asfaltos

SUPERPAVE = *Superior Performance Asphalt Pavements*

TDI = *Traffic Force Index*

TFHRC = *Turner Fairbank Highway Research Center*

TMAA = Temperatura Média Anual do Ar

TMAPav = Temperatura Média Anual do Pavimento

TR = Trilha de Roda

TSD = Tratamento Superficial Duplo

TSS = Tratamento Superficial Simples

TST = Tratamento Superficial Triplo

UFC = Universidade Federal do Ceará

UFRGS = Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFRJ = Universidade Federal do Rio de Janeiro

UFSC = Universidade Federal de Santa Catarina

UFSM = Universidade Federal de Santa Maria

USA = *United States of America*

USACE = *United States Army Corps of Engineers*

VAM = Vazios dos Agregados Minerais

VDM = Volume Diário Médio

VRD = Valor de Resistencia a Derrapagem

Vv = Volume de Vazios

WASHO = *Western Association of State Highway Officials*

WMA = *Warm Mix Asphalt*

WSU = *Washington State University*

WTUD = Whitetopping Ultradelgado

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, um dos principais problemas observados nas rodovias brasileiras é o trincamento por fadiga do revestimento de concreto asfáltico. Esse fenômeno tem uma natureza complexa e pode estar relacionado a vários fatores, tais como: escolha dos materiais, efeitos climáticos, características do tráfego e da estrutura do pavimento. Daí vem a necessidade de um bom projeto que combine os materiais e as espessuras das camadas, conforme a sua rigidez e resistência aos danos, de modo a propiciar uma resposta estrutural condizente com as solicitações do tráfego.

O dimensionamento adequado de um pavimento asfáltico tem como objetivo assegurar, de maneira mais econômica ou sustentável possível, que a repetição da passagem dos eixos dos veículos não cause o trincamento excessivo da camada do revestimento dentro do período de projeto previsto e também garanta que as camadas constituintes do pavimento sejam capazes de suportar os efeitos da deformação permanente causados pela passagem dos veículos, principalmente pelo excesso de carga.

A Mecânica dos Pavimentos é uma disciplina da Engenharia Civil que permite estudar o pavimento como uma estrutura. As ferramentas básicas estão na teoria da elasticidade, análise numérica, mecânica, resistência dos materiais, entre outros. Os métodos de dimensionamento de pavimentos ressentem-se da falta de aprofundamento da análise teórica e da não utilização de parâmetros experimentais de deformabilidade de solos e materiais de pavimentação no país. Repetem-se os métodos de dimensionamento empíricos de origem estrangeira, como o método de dimensionamento do DNER, vigente no país, (MEDINA e MOTTA, 2015).

É do conhecimento que os órgãos rodoviários no Brasil necessitam urgentemente de um método de dimensionamento mais adequado à realidade técnica – científica do país, que seja de natureza mecanística – empírica. Engenheiros rodoviários vêm buscando um entendimento mais analítico do problema e tentando, com isso, reduzir a parcela de empirismo que é inevitável no atual estado da arte. Isto é diferente dos métodos puramente empíricos que são baseados em regras ou estudos desenvolvidos a partir de

acompanhamentos observados em campo, muitas vezes replicados para regiões diferentes das definidas nos estudos originais.

No atual cenário brasileiro e mundial, os métodos de dimensionamento empíricos vêm perdendo espaço no projeto de pavimentos novos ou restaurados, o que é uma ótima notícia para o meio rodoviário. Vários países no mundo tem utilizado método de dimensionamento mecanístico com certa parcela de empirismo. No Brasil, essa realidade está ganhando força no meio rodoviário, técnico e científico, com o apoio de universidades, órgãos rodoviários e centros de pesquisa. O sonhado método de dimensionamento mecanístico – empírico está sendo desenvolvido por consenso.

Um dos maiores problemas da engenharia rodoviária é estimar de forma satisfatória a vida útil de pavimentos novos ou de restauração rodoviária. Em geral são realizados ensaios em laboratório, em escala reduzida, que não são totalmente adequados à reprodução do desempenho de pavimentos, devido ao efeito da escala que modifica fatores os quais afastam o experimento das condições existentes no campo e condições ambientais.

Os ensaios de laboratório permitem avaliar os materiais que irão compor a estrutura do pavimento nas condições de campo. Para estes ensaios são adotados valores limites de qualidade dentro de diversos enfoques, tais como: fadiga, módulo de resiliência - MR, resistência à tração - RT, deformação permanente, etc. Os ensaios de laboratório são muito importantes, pois auxiliam tanto no projeto e na dosagem de misturas asfálticas, como na previsão do desempenho de revestimentos asfálticos, mas implicam na adoção de ajustes entre as observações na escala de laboratório para a escala real: são os Fatores Campo Laboratório – FCL.

Cada vez mais são realizados estudos com o objetivo de propiciar aos técnicos responsáveis pelo processo de tomada de decisão, informações e ferramentas capazes de auxiliá-los nas atividades de projeto e manutenção de pavimentos. São três os procedimentos que podem ser utilizados para prever o comportamento dos pavimentos, sob o efeito das cargas e do clima: ensaios de laboratório, simuladores de tráfego e ou acompanhamentos sistemáticos de trechos experimentais de verdadeira grandeza.

A Função de Transferência ou “Fator Campo Laboratório” é a correlação ou fator de ajuste entre os resultados obtidos em laboratório e as condições de campo, por meio de simulações computacionais considerando as propriedades dos materiais e o desempenho observado em campo. A Função de Transferência definida nesta tese avaliou o desempenho de 45 segmentos experimentais asfálticos construídos e monitorados desde a sua implantação nas principais vias da Cidade Universitária “Projeto Fundão” e contou com 6 misturas asfálticas. A maioria dos segmentos experimentais avaliados nesta pesquisa apresentam mais de 8 anos de implantação e monitoramento.

O objetivo principal desta tese é desenvolver, implantar e calibrar uma Função de Transferência para as condições brasileiras considerando os ensaios correntes de carga repetida de módulo de resiliência e de fadiga das misturas asfálticas, definindo um procedimento experimental e computacional baseado em elasticidade, para a previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos.

A Função de Transferência a ser desenvolvida vai se basear no dano médio acumulado, distribuído em 110 pontos distribuídos no revestimento, sob a carga, por análise elástica de múltiplas camadas, considerando ensaios mecânicos de módulo de resiliência e fadiga por compressão diametral de misturas asfálticas, e permitirá a previsão de área trincada, como critério para definir a vida útil de uma estrutura de pavimento asfáltico.

A proposta atual do método de dimensionamento mecanístico – empírico brasileiro, denominado SisPavBR, é fundamentada no método proposto por FRANCO (2007) e modificado neste estudo. O método vem sendo implantado em dois níveis: nível A e nível B. O que difere entre os dois níveis é a forma de caracterizar as misturas asfálticas. O nível A considera o revestimento asfáltico elástico, caracterizado pelos ensaios mecânicos de módulo de resiliência e fadiga por compressão diametral de carga repetida. O nível B considerará o revestimento asfáltico viscoelástico, a velocidade dos veículos e as variações de temperatura da camada e é caracterizado pelos ensaios mecânicos de módulo dinâmico e fadiga por tração direta com tensão controlada.

A proposta principal é apresentar uma Função de Transferência para o nível A do método, definido por análise elástica de múltiplas camadas, calibrada por resultados obtidos de segmentos experimentais construídos e monitorados no Projeto Fundão e que

serviram para a implantação e calibração desta Função. Após a implantação e calibração da Função de Transferência baseada nestes trechos, foi estendida a sua validação considerando segmentos experimentais nacionais que foram construídos e monitorados em diferentes regiões do país por universidades participantes da Rede Temática de Asfalto, apoiadas por projetos de pesquisa financiados e coordenados pelo CENPES/Petrobras, dentro das determinações da ANP.

A presente tese está estruturada em seis capítulos descritos a seguir:

Capítulo 1: Apresenta um panorama da pesquisa no contexto geral, os parâmetros adotados e a definição dos objetivos.

Capítulo 2: Este capítulo apresenta um apanhado dos principais estudos realizados no país e no mundo, relacionados a trechos experimentais construídos e monitorados sistematicamente no Brasil e no mundo; principais características de trechos experimentais implantados em diferentes regiões do Brasil e que fazem parte da Rede Temática de Asfaltos; o uso de simuladores de tráfego no Brasil e no mundo, com ênfase em segmentos acelerados realizados no Brasil e suas contribuições para a engenharia rodoviária brasileira; ensaios mecânicos com destaque nos ensaios de compressão diametral; métodos de dimensionamento brasileiros e suas proposições; métodos de dimensionamento internacionais; dados de 2015 relacionados ao cenário atual do modal rodoviário brasileiro e finaliza com proposições de Funções de Transferência para diferentes estudos no Brasil e no mundo.

Capítulo 3: Apresenta um breve histórico da formação da Cidade Universitária – Ilha do Fundão, realizada na década de 1950, por interligação de oito ilhas, os objetivos da construção da ilha e os benefícios para a educação e pesquisa. As vias da Cidade Universitária serviram de base para a construção de trechos com novos produtos asfálticos e convencionais e acompanhamento sistemático dos segmentos experimentais avaliados nesta pesquisa.

Capítulo 4: Neste capítulo estão apresentados os materiais e métodos empregados nas diferentes etapas do Projeto Fundão, tais como: pré execução e execução; as metodologias adotadas para a dosagem das misturas asfálticas; procedimentos adotados

nas avaliações e monitoramentos dos segmentos experimentais; critérios adotados na retroanálise dos segmentos experimentais analisados para a determinação da Função de Transferência e finaliza com uma breve descrição do programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas – AEMC, utilizado nesta pesquisa para obter as respostas do pavimento.

Capítulo 5: Descreve os resultados dos ensaios mecânicos das misturas asfálticas analisadas nesta pesquisa, bem como a escolha dos segmentos experimentais usados na calibração; descreve o procedimento de cálculo para a determinação da Função de Transferência baseada no módulo de resiliência e na fadiga por compressão diametral; procedimento realizado para a determinação de parâmetros estatísticos definidos neste estudo; a validação da Função de Transferência definida nesta pesquisa com dados de trechos experimentais construídos e monitorados no Projeto Fundão com trechos experimentais nacionais construídos e monitorados em diferentes regiões do país; comparação da Função de Transferência definida neste estudo versus o fator campo laboratório proposto por PINTO, (1981) em alguns segmentos típicos avaliados e finaliza com uma análise da sensibilidade da Função de Transferência para diferentes níveis de confiabilidade nos segmentos experimentais nacionais.

Capítulo 6: Neste capítulo estão apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1Breve Histórico de Alguns Trechos Experimentais no Brasil

Estudos sistemáticos em trechos reais necessitam de acompanhamentos e de avaliação durante um longo tempo. São estudos demorados e sua grande vantagem é a determinação de curvas de desempenho que levam em conta as variáveis do tráfego e do clima. Os trechos experimentais de uma forma geral são muito importantes para obter curvas de desempenho a partir de observações em longo prazo com a solicitação dos veículos comerciais ou com a utilização de simuladores de tráfego através de ensaios acelerados. Ambos permitem verificar o desempenho comparativo de materiais novos e convencionais, a concepção dos pavimentos e a análise dos métodos de projeto adotados.

Como exemplo de acompanhamentos sistemáticos de trechos experimentais no Brasil, pode-se citar o experimento realizado em Santa Catarina sob a coordenação do Instituto de Pesquisa Rodoviária / Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (IPR/DNER) e a participação da Coordenação dos Programas de Pós-graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ). Segundo PINTO *et al*. (1977), no final de 1976 foi construído um trecho experimental em um acesso da BR 101/Santa Catarina (SC), entre os kms 281+500 e 282+500, no município de Imbituba/SC. MOTTA (1981) cita que este trecho experimental está localizado em uma região de areia de duna abundante localizada próximo à usina da SOTELCA, no município de Capivari/SC, responsável pela geração de grande volume de cinza volante resultante da queima de carvão gerado pela usina termoelétrica.

Com objetivo de utilizar os materiais abundantes na região, o trecho experimental foi dividido em doze segmentos com 54 metros de extensão cada, em tangente e aterro e cada segmento apresentava uma característica de base diferente com o uso de areia – cal – cinza volante, variando a espessura e a dosagem. Entre os segmentos analisados, dois segmentos foram construídos com brita graduada na camada de base para comparação com os segmentos estabilizados. Também foram adotadas duas espessuras de revestimento asfáltico: 5 e 10 cm.

A plataforma do trecho experimental foi construída em aterro, sendo utilizado um solo arenoso local, com *Califórnia Bearing Ratio* (CBR) de 15% e na camada de sub-base foi utilizado um solo residual de gnaisse com CBR de 33%, com uma espessura de 10 cm em todos os segmentos. O dimensionamento foi realizado pelo método do DNER, considerando um Volume Diário Médio (VDM) de 4500 veículos / dia e o número N fixado em $4{,}0 \times 10^7$. MOTTA (1981) descreve que foram realizados levantamentos de cargas de veículos comerciais em duas etapas e verificou-se que havia um grande número de veículos com excesso de carga na BR-101/SC à época.

O emprego de instrumentação em pavimentos feito neste experimento foi o pioneiro no Brasil, o que justificou as falhas encontradas neste estudo. Dentre os equipamentos utilizados no trecho experimental de (areia – cal – cinza volante), estão células de pressão total, medidores de recalque, termopares e sensores eletromagnéticos. Porém o único equipamento que apresentou resultados confiáveis ao longo de muitos anos foram os termopares. As falhas observadas nas instrumentações por falta de experiência serviram de aprendizagem para os projetos posteriores do IPR/DNER e COPPE. Além da instrumentação, foram realizadas várias etapas ao longo desse estudo, tais como:

- Ensaios mecânicos em laboratórios;
- Contagem classificatória de veículos;
- Pesagem dos veículos comerciais;
- Levantamentos deflectométricos com o uso da viga Benkelman;
- Avaliações superficiais para determinação do Índice de Gravidade Global;
- Estudos computacionais com o uso do programa *Finite Element Analysis of Pavement Structures* (FEPAVE);
- Retroanálises.

Como conclusões apresentadas por MOTTA (1981), tem-se que o comportamento das misturas básicas e também das outras misturas sob o revestimento asfáltico de 5 cm de espessura, foi semelhante ao dos segmentos com revestimento asfáltico de 10 cm, o que demonstrou à época que o revestimento com 5 cm satisfaz plenamente quando se utiliza na camada de base material cimentado quimicamente. Também foi verificado que o excesso de peso que circulava normalmente no trecho experimental à época dos

levantamentos fez com que o número N de projeto, calculado para 10 anos fosse atingido em apenas 4 anos.

Este estudo também se vinculou a três dissertações de mestrado – Pinto (1971), Nardi (1975) e Marcon (1977), que abordaram diferentes aspectos das misturas de areia – cal – cinza volante, tais como o efeito da dosagem, energia de compactação, idade de cura, umidade de compactação, temperatura de cura, efeito da substituição de parte da areia por brita, em relação à resistência à compressão simples e compressão diametral ou tração indireta, além de módulos de elasticidade estático e dinâmicos.

Na década de 1990 foi programada uma avaliação do comportamento de pavimentos com o uso de *Heavy Vehicle Simulator* (HVS) de um trecho experimental na rodovia Carvalho Pinto. Para este estudo foram realizados levantamentos deflectométricos com o uso da viga Benkelman e do *Falling Weight Deflectometer* (FWD), como instrumentos para o controle na execução das diversas camadas do pavimento. As características estruturais podem ser verificadas em MOTTA *et al.* (1995).

Além do controle tecnológico convencional de campo, como umidade e densidade, foram propostos para cada uma das camadas do pavimento valores de deflexões admissíveis, para o Lote 7 da obra. Os valores de deflexões admissíveis foram estabelecidos a partir de módulos médios admitidos pelo projetista para cada um dos materiais constituintes das camadas. Os materiais utilizados nos trechos experimentais foram ensaiados em laboratório e o controle construtivo foi o convencional e por medidas de deflexões.

Os valores admissíveis para controle com o FWD foram maiores que os valores admissíveis da viga Benkelman. As deflexões medidas com a viga Benkelman e com o FWD apresentaram semelhança nos coeficientes de variação. Porém, depois de todo esforço de implantação de vários trechos experimentais, lamentavelmente, por motivos burocráticos e políticos, não foi possível realizar o objetivo principal desta pesquisa que era a importação de um simulador de tráfego móvel – HVS. Segundo MOTTA *et al.* (1995) a vinda do simulador de tráfego móvel sem dúvida teria sido um grande marco para a pesquisa brasileira, por ser um estudo pioneiro no país na época.

Comentam-se a seguir alguns estudos experimentais realizados em pistas de rodovias brasileiras, vinculadas a estudos de materiais alternativos, o que é de fundamental importância, pois nem sempre são encontrados bons materiais a curtas distâncias de transporte e nem sempre se dispõe de materiais adequados sob o ponto de vista das especificações ou de novos critérios, para determinados serviços.

NARDI (1998) mostra um estudo de solo estabilizado quimicamente em um trecho experimental localizado no município de Rio Rufino na BR – 282/SC com a rodovia SC – 427 no estado de Santa Catarina. Devido à dificuldade de se obter, no local, materiais que satisfizessem as especificações, pela má qualidade das jazidas de solos e pela inexistência de rochas com características adequadas à pavimentação, foram realizados testes com produtos químicos para melhorar as condições dos materiais locais. Na determinação das características dos materiais utilizados foram realizados ensaios de caracterização dos solos, das substâncias estabilizantes como: composto metalo – orgânico e substâncias reagentes do tipo carbureto de cálcio (CaC_2).

O trecho experimental foi construído a partir da estaca 0 até a estaca 15, totalizando 300 metros de extensão, com uma plataforma de terraplenagem de 11 metros, toda construída em aterro com material não selecionado, oriundo do corte lateral da própria rodovia e construída a partir de uma miscelânea de rochas sedimentares fragmentadas em diversos estados de intemperização, misturadas ao solo originário de sua decomposição química e degradação física.

A execução foi feita inicialmente com movimentação do solo in situ com a motoniveladora, com a finalidade de retirar os matacões e parte dos pedregulhos com dimensões excessivas. Em seguida foi utilizado o rolo compactador pneumático visando acomodar o solo. Segundo NARDI (1998), a substância reagente foi distribuída no trecho em pequenas leiras basculadas sucessivamente do caminhão, que em seguida foram espalhadas com o uso da motoniveladora. Ao final desta etapa iniciou-se a escarificação do solo visando à homogeneidade da mistura entre a borra de carbureto e o solo, completando o processo com o uso da grade de disco.

Segundo NARDI (1998) o controle do trecho experimental foi executado por ensaios visando reproduzir os dados anteriormente obtidos em laboratório. Porém o solo,

visualmente no trecho experimental, apresentou uma granulometria completamente heterogênea, devido a não seleção dos materiais oriundos do corte lateral da rodovia. Em laboratório e campo, a adição de substâncias estabilizantes e reagentes atuou positivamente na melhoria do solo, apresentando características de material cimentado após um período. Apesar dos problemas de campo, o autor comenta que as experiências de laboratório e de campo permitiram verificar a possibilidade de melhorar as condições dos materiais para a utilização em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários com a adição de rejeitos tipo cal de carbureto.

Em uma das rodovias mais importantes do país, a rodovia Presidente Dutra, que liga as capitais de São Paulo e Rio de Janeiro foi feito um estudo em um trecho experimental entre os kms 136 a 128, no município de Caçapava, com a aplicação de microrrevestimento asfáltico com 2,5 cm de espessura, executado em duas camadas. Segundo MALUF *et al*. (1998), foram realizadas avaliações das condições estruturais e funcionais do pavimento com o uso do FWD, Pêndulo Britânico, *Ground Penetrating Radar* (GPR), medidas de irregularidade e o inventário de defeitos, para a análise do desempenho da camada do microrrevestimento.

MALUF *et al*. (1998) comentam que o microrrevestimento mostrou-se adequado como camada de rolamento especialmente para a reabilitação de segmentos de rodovias que não apresentam deficiências estruturais nas camadas de base, sub-base ou subleito. Neste estudo foi testada a aplicabilidade do microrrevestimento como camada intermediária entre o pavimento existente e o reforço em Concreto Betuminoso Usinado à Quente (CBUQ) com o objetivo de evitar a reflexão de trincas.

PEREIRA *et al*. (2000) relatam a construção de um trecho experimental construído no Campus da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) no ano de 1999, com o objetivo de estudar o comportamento do Whitetopping Ultradelgado (WTUD). O consumo de cimento utilizado na construção do trecho experimental foi de 6% em peso além da utilização de microssílica na mistura. O concreto alcançou uma resistência à tração de 5,0 MPa após 48 horas e de 7,0 MPa após 7 dias.

A estrutura do WTUD era composta por duas seções com placas quadradas, uma com 0,6 metros e a outra com 1,0 metros, ambas com 9,5 cm de espessura. Este estudo

contou com a instalação de medidores de deformação (strain gages) e de temperaturas (termoresistores tipo PT-100). A liberação do tráfego se deu 6 dias após a concretagem das placas e o volume de tráfego diário era em torno de 130 ônibus e 15 caminhões.

Segundo PEREIRA *et al*. (2000), o WTUD foi submetido aos esforços de flexão devido à ação do tráfego e de cisalhamento devido ao efeito de frenagem e aceleração dos veículos comerciais e ônibus. Também foi verificado no WTUD, nas posições de canto, bordas e centro, que os gradientes térmicos foram aproximadamente iguais entre si e o desempenho observado após um ano de abertura ao tráfego comercial foi classificado como excelente.

Outro estudo de acompanhamento em trecho experimental, relatado por PEREIRA e MOTTA (2001) apresenta avaliação funcional e estrutural de dois trechos experimentais com geotêxtil, um localizado na rodovia Rio Teresópolis e o outro na estrada do Encanamento. Nas análises desses trechos, além dos ensaios funcionais e estruturais, foram realizadas extrações de corpos de prova para avaliar a aderência do geotêxtil com as camadas do revestimento.

Na rodovia Airton Senna foi construído um trecho experimental entre os kms 51 + 400 a 52 + 000, com 600 metros de extensão, divididos em dois segmentos de 300 metros, onde no primeiro segmento foi aplicado geotêxtil impregnado com asfalto e no outro segmento o método convencional sem o uso do geotêxtil, em ambos os segmentos foram aplicados CBUQ convencional. Segundo MONTESTRUQUE (2002), no segmento onde foi realizada a aplicação do geotêxtil, foram fresados 4 cm do revestimento antigo e sobre a camada remanescente instalou-se o geotêxtil com o objetivo de retardar a reflexão de trincas e sobre o geotêxtil foi aplicado 4 cm de revestimento novo.

A estrutura do pavimento era do tipo semirrígido composto por uma camada de sub-base de 14 cm de espessura de Brita Graduada Simples (BGS), uma camada de base de 16 cm de espessura de Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) e o revestimento asfáltico era composto por três camadas, a primeira com 7 cm de espessura composta de Pré Misturado à Frio (PMF), a segunda com 5 cm de espessura de camada de ligação e a terceira camada com 5 cm de espessura (camada de rolamento) composta de CBUQ.

Segundo MONTESTRUQUE (2002) a avaliação estrutural foi realizada antes e depois da construção do trecho experimental. Foi realizado um mapeamento do trincamento existente antes da restauração, onde a camada do revestimento de CBUQ apresentava elevado grau de trincamento em algumas partes do trecho experimental além da presença de afundamentos de trilha de roda presentes em pequenas extensões.

Após a análise preliminar o referido autor optou em fresar 4 cm de espessura do revestimento seguido de recapeamento em CBUQ – Faixa C do DNIT de mesma espessura. O autor descreve que a instalação do geotêxtil como camada anti-reflexão de trincas é muito simples e apresenta a sequência dos serviços realizados nesse estudo:

- Fresagem da superfície asfáltica;
- Limpeza da superfície do revestimento fresado, com o uso da vassoura mecânica;
- Limpeza da superfície com ar comprimido para retirada de poeira;
- Pintura de ligação;
- Aplicação do geotêxtil imediatamente após a primeira pintura de ligação;
- Rolagem com o rolo pneumático com pressão de 50 psi;
- Aplicação da segunda camada da pintura de ligação sobre o geotêxtil;
- Após a ruptura da emulsão é necessário a execução do salgamento para a entrada da vibro-acabadora e dos caminhões;
- Aplicação da camada de CBUQ correspondente ao reforço projetado;
- Compactação da camada asfáltica.

MONTESTRUQUE (2002) concluiu que no segmento experimental onde foi aplicado o geotêxtil houve uma melhora do comportamento visual na camada asfáltica visto que o segmento convencional sem o uso do geotêxtil apresentou trincas de reflexão na superfície 4 meses após a restauração do pavimento e o segmento com geotêxtil apresentou comportamento semelhante, aproximadamente 11 meses após a restauração do pavimento.

PEREIRA (2002) construiu um trecho experimental localizado na zona oeste do município do Rio de Janeiro, com extensão de 220 metros e 12 metros de largura.

Estudos preliminares determinaram o volume de tráfego e as condições de serventia do local. O trecho experimental foi dividido em seções de 10 metros e foram realizados os levantamentos de avaliação visual de defeitos, levantamento estrutural com o uso da viga Benkelman e com FWD, abertura de poços de sondagem e coleta dos materiais constituintes das camadas para determinação das espessuras e caracterização dos materiais.

Segundo PEREIRA (2002) foram construídos três segmentos experimentais com o uso do geotêxtil tipo BIDIM OP 20 e três segmentos experimentais sem o uso do geotêxtil. A espessura da camada de revestimento asfáltico utilizado foi de 4 cm de CBUQ sobre o revestimento antigo para todos os segmentos. O autor verificou que o pavimento original possuía boa capacidade estrutural apesar do elevado grau de trincamento e que durante o primeiro ano após a construção do trecho experimental os segmentos com e sem o uso do geotêxtil apresentaram um bom desempenho.

MOTTA e LEITE (2002) relatam uma parceria entre a COPPE/UFRJ e o CENPES com o objetivo de acumular dados de desempenho de trechos experimentais de pavimentos asfálticos e verificar o comportamento em relação ao envelhecimento de misturas asfálticas em serviço. Este estudo foi realizado em seis trechos experimentais, com idades diferentes de implantação e com variadas condições climáticas e de tráfego. O acompanhamento se deu por visitas periódicas aos trechos experimentais, coletas de corpos de prova extraídos in situ, medidas de avaliação superficial e medidas de avaliação estrutural com o uso da viga Benkelman.

Segundo MOTTA e LEITE (2002) o primeiro trecho experimental analisado foi o trecho conhecido como Rio – Orla, construído em novembro de 1991 com extensão de 400 metros e localizado na Avenida Sernambetiba, no Recreio dos Bandeirantes, município do Rio de Janeiro. O ligante utilizado neste estudo foi o Concreto Asfáltico de Petróleo (CAP) 40. Também foram realizadas medidas de temperatura do ar e da superfície do pavimento, e a Temperatura Média Anual do Ar (TMAA) era em torno de 25ºC e a Temperatura Média Anual do Pavimento (TMAPav) em torno de 34ºC. O trecho tinha na época da construção um trânsito médio, composto principalmente de ônibus urbanos e de turismo em torno de 500 veículos comerciais / dia.

Este trecho Rio-Orla está em boas condições até a data desta tese, tendo sido acompanhado ainda por vários anos com retiradas de amostras e levantamento de defeitos segundo informações pessoais das autoras citadas antes.

O segundo trecho experimental foi construído na rodovia Bandeirantes / São Paulo (SP) em novembro de 1993 com uma extensão de 300 metros. Este trecho apresentou uma TMAA em torno de 21ºC e a TMAPav em torno de 29ºC. O Ligante asfáltico utilizado neste estudo foi o CAP 20 produzido na Refinaria Henrique Lage (REVAP) em São José dos Campos / SP, a partir de uma mistura de petróleos nacionais com 84% de Marlim e 16% de Cabiúnas e o tráfego médio apresentado na época era de 9000 veículos / dia.

O terceiro trecho experimental foi construído na Avenida Washington Soares em Fortaleza / Ceará (CE). Neste local foram construídos dois segmentos experimentais. O primeiro com extensão de 400 metros e ligante asfáltico utilizado do tipo CAP 30/45 e o segundo segmento experimental com extensão de 200 metros e ligante do tipo CAP 50/60. Os segmentos apresentaram um TMAA em torno de 27ºC e a TMAPav em torno de 36ºC, sendo que o tráfego estimado na época era de aproximadamente 4350 veículos / dia.

O quarto trecho experimental foi construído na rodovia União e Indústria em abril de 1995, antigo traçado da BR – 040 / Minas Gerais (MG), entre Matias Barbosa e Juiz de Fora. Neste estudo foi utilizada uma mistura reciclada à quente com agente rejuvenescedor de óleo de xisto, com extensão de 180 metros. O trecho apresentou uma TMAA em torno de 19ºC e a TMAPav em torno de 26ºC. O ligante asfáltico utilizado neste estudo foi do tipo CAP 20 produzido na Refinaria Duque de Caxias (REDUC), o agente rejuvenescedor foi do tipo RA-75 e o esqueleto pétreo era composto de 40% de material fresado e 60% de material virgem e o tráfego médio na época era de aproximadamente 2500 veículos comerciais por faixa de tráfego.

O quinto trecho experimental foi construído na rodovia BR – 476 / Paraná (PR), em São Mateus do Sul, implantado em outubro de 1993, com uma extensão de 800 metros e o ligante utilizado foi obtido a partir do óleo de xisto. O trecho apresentou uma TMAA em torno de 17ºC e a TMAPav em torno de 24ºC com volume de tráfego muito elevado,

visto que é uma das principais rotas de ligação entre as regiões sul e sudeste. Segundo MOTTA e LEITE (2002) parte deste trecho foi substituído em 1999 devido à presença de deformações permanentes muito acentuadas que ocorreram próximo de quebra molas instalados na rodovia, além de problemas de má dosagem e construtivos que resultaram em baixas densidades da mistura asfáltica.

O sexto trecho experimental foi construído entre o acesso da ASBAC e o trevo do Presidente, próximo a Esplanada dos Ministérios em Brasília. Esse trecho tem dois segmentos experimentais um com uma área de 22.300 m² e ligante do tipo CAP 20 convencional, e o outro com uma área de 28.000 m² ligante asfáltico do tipo CAP 20 modificado com 2% de asfaltita. As obras iniciaram em setembro de 1999 e foram concluídas em dezembro de 1999. O trecho apresentou uma TMAA em torno de 22ºC e uma TMAPav em torno de 30ºC.

MOTTA e LEITE (2002) apresentaram as principais características das misturas asfálticas construídas nas diferentes regiões do país, também ressaltam que os trechos são chamados experimentais somente devido ao fato de terem sido demarcados e acompanhados sistematicamente ao longo de alguns anos, mas que na pratica construtiva, na dosagem e no dimensionamento estrutural dos trechos foram utilizados os métodos tradicionais, sendo os mesmos usados na extensão total de cada obra vinculada ao local. Também concluíram que o acompanhamento sistemático destes trechos experimentais em serviço permitiu comprovar que os ligantes asfálticos produzidos no Brasil se comportam adequadamente quanto ao envelhecimento em relação ao clima comparável ao que acontece nos Estados Unidos da América (EUA). Uma análise detalhada destes segmentos também pode ser vista em TONIAL (2001).

SEVERO *et al*. (2004) iniciaram em 2001 um estudo de um trecho experimental na BR-116/RS entre os municípios de Guaíba e Camaquã no estado do Rio Grande do Sul. Essa rodovia foi implantada em 1954 e pavimentada nos anos de 1958 a 1961.

O primeiro segmento experimental foi construído com uma camada de 3,2 cm de CBUQ com 12% de borracha sobre uma camada de revestimento existente de 14 cm de espessura de CBUQ e base + sub-base de 40 cm de saibro arenoso.

O segundo segmento experimental tinha 16 cm de camada de revestimento antigo existente de CBUQ convencional e a camada de base + sub-base iguais ao primeiro segmento. Segundo SEVERO *et al*. (2004) o VDM de veículos comerciais era de 1400 por faixa de tráfego.

O monitoramento foi realizado em três etapas: 10, 24 e 38 meses após a execução da atual estrutura com o asfalto borracha. Nestas avaliações observou-se que onde havia mistura com asfalto borracha não houve trincamento até o 38º mês, já o local onde havia mistura com asfalto convencional apresentava 1,3% de área trincada no 24º mês e 1,8% no 38º mês.

Como se vê nesses relatos, o acompanhamento sistemático de qualquer trecho experimental até a obtenção da curva de desempenho completa, ou seja, até o fim da vida útil é pouco relatada, devido à demora na obtenção dos dados. A maioria dos relatos restringe-se aos primeiros meses de observação. A grande dificuldade para obter resultados de trechos experimentais é o tempo necessário de observações que poderá ser muito grande caso se queira estimar o desempenho dos trechos de alto volume de tráfego e períodos grandes de projeto. Além disso, não foram coletadas todas as informações necessárias para a análise desses pavimentos com os critérios considerados adequados nesta pesquisa atual (o que é natural tendo em vista os objetivos à época de cada uma das experiências) o que não permite, lamentavelmente, o uso da maioria deles nesta definição da função de transferência.

2.2 Trechos Experimentais Integrantes da Rede Temática de Asfaltos

O projeto denominado de Rede Temática de Asfalto foi uma iniciativa da Petrobras com o apoio do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Miguez (CENPES) e tem como objetivo projetar, construir e monitorar sistematicamente trechos experimentais implantados em várias regiões do Brasil, visando a criação de um banco de dados.

Em um cenário nacional a médio e longo prazo, pretendem-se correlacionar todas as informações coletadas em campo com os ensaios de laboratório e desenvolver um Sistema de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos (SDIMPA), de modo a criar um método de dimensionamento mecanístico empírico brasileiro.

A origem do projeto se deu em 2006, através de uma parceria entre a COPPE/UFRJ e o CENPES/PETROBRAS no denominado *Projeto Fundão* que será detalhado mais a frente. Atualmente o projeto Rede Temática de Asfaltos tem abrangência em nível nacional, envolvendo as principais universidades do país e instituições de pesquisa e desenvolvimento.

No âmbito da Rede, foi desenvolvido em 2010, pelo CENPES, setor de Gerência de Lubrificantes e Produtos Especiais – COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Ceará (UFC), EPUSP e Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), um Manual de Execução de Trechos Monitorados com diretrizes para o planejamento, construção e monitoramento de trechos experimentais. O manual descreve e padroniza todas as etapas que envolvem a construção dos trechos experimentais, passando pelas fases de: pré-execução, execução e pós-execução.

Em paralelo ao Manual de Execução de Trechos Monitorados foi criado um banco de dados denominado de Sistema da Rede Temática de Asfalto (SRTA) com o objetivo de armazenar informações oriundas dos trechos experimentais construídos nas várias regiões do país. Atualmente somente o CENPES tem acesso a todos os dados dos trechos experimentais que vem sendo monitorados no Projeto da Rede Temática de Asfalto. O objetivo final desse sistema é viabilizar todas as informações organizadamente para serem utilizadas no desenvolvimento do método de dimensionamento mecanístico empírico.

A seguir estão descritos os principais trechos experimentais construídos e monitorados segundo o Manual de Execução de Trechos Monitorados e que vão permitir a validação da Função de Transferência definida de segmentos experimentais do Projeto Fundão.

2.2.1 Trechos Experimentais da COPPE/UFRJ

O Laboratório de Geotecnia e Pavimentos da COPPE/UFRJ e a Concessionaria Rio Juiz de Fora – CONCER realizaram um estudo com o objetivo de avaliar o desempenho de trechos experimentais monitorados e verificados pelo método mecanístico empírico SisPav proposto por FRANCO (2007). Também visou testar o comportamento de misturas asfálticas dosadas através do método Superpave que atendessem os critérios de

dosagem de misturas asfálticas para rodovias de alto volume de tráfego, ensaios de laboratório utilizando o compactador giratório para a determinação dos parâmetros *Compaction Densification Índex* (CDI), *Traffic Force Índex* (TDI) e *Flow Number* (FN) propostos por NASCIMENTO (2008), avaliação das características mecânicas de fadiga por compressão diametral de carga repetida, MR, RT, dano por umidade induzida e deformação permanente com o uso de simulador de laboratório *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC), (MOTTA *et al*., 2012).

Para atingir o objetivo principal foram construídos três segmentos experimentais, com diferentes misturas asfálticas aplicadas nas duas faixas de rolamento, localizado próximo ao trevo de acesso a Itaipava – Petrópolis / RJ, entre os kms 57 a 58. O projeto foi desenvolvido com recursos do programa "Recursos de Desenvolvimento Tecnológico nas Concessões Rodoviárias" (RDT) da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). As diferentes etapas deste estudo foram definidas e executadas de acordo com o Manual de Execução de Trechos Monitorados e fazem parte dos trechos experimentais monitorados da Rede Temática de Asfaltos (Relatório Técnico - http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/12571/Relatorios_de_Pesquisa_RDT).

A primeira etapa deste estudo foi o reconhecimento dos trechos concedidos geridos pela Concer por análise visual, in situ, e uma análise a posteriori das deflexões medidas em 2009 pela concessionária em toda extensão da rodovia com o uso do FWD da Dynatest, totalizando 183 km de extensão entre os municípios do Rio de Janeiro e Juiz de Fora – MG. Estas análises embasaram a escolha dos prováveis locais do trecho experimental, que seria composto por três segmentos. Portanto, necessitaria dispor de condições semelhantes para os três segmentos. Na ocasião foram definidos critérios para a seleção do provável local do trecho experimental, tais como:

- Extensão mínima de 200 metros para cada segmento;
- Deflexões máximas entre 50 e 100 (0,01 mm) em ambas as faixas de rolamento;
- Características de tráfego semelhantes para cada faixa de rolamento.

Após a definição do local onde seria construído o trecho experimental foi realizada a sondagem e coleta dos materiais constituintes do pavimento através da abertura de um poço de sondagem. Os materiais foram levados ao Laboratório de Geotecnia LABGEO /

COPPE e submetidos aos ensaios mecânicos e de caracterização. Também foram coletados os agregados da Pedreira Pedra Sul de Juiz de Fora – MG para a realização do projeto da mistura asfáltica de Alto Módulo e da mistura morna, além de avaliar o comportamento mecânico da mistura asfáltica de referência usada normalmente nos serviços de restauração da rodovia, usada como controle.

O trecho experimental avaliado apresenta uma estrutura composta por uma camada de subleito de material silte argiloso, 21 cm de sub-base de solo silto arenoso, 22 cm de base granular - BGS e 8 a 11 cm de revestimento asfáltico, com elevado grau de trincamento em toda a extensão.

O primeiro segmento experimental construído foi de concreto asfáltico convencional – segmento de referência, com 190 m de extensão, construídos nos dias 10 e 11 de dezembro de 2010 na faixa da direita e esquerda, respectivamente. A camada do revestimento foi aplicada após a fresagem total do revestimento antigo e aplicada a mesma espessura em duas etapas de 6 e 5 cm de espessura, totalizando 11 cm de revestimento asfáltico com ligante asfáltico convencional – CAP 50/70, faixa B do DNIT dosado através do método Marshall. Essa mistura asfáltica foi projetada e executada pela construtora Compasa do Brasil e usinada na usina de asfaltos da Soma Engenharia.

O segundo segmento experimental construído foi de concreto asfáltico de Alto Módulo, com 200 m de extensão, construídos nos dias 12 e 13 de dezembro de 2010 na faixa da direita e esquerda, respectivamente. A camada do revestimento foi aplicada após a fresagem total da camada de revestimento existente e aplicada em duas camadas de 5,5 cm cada, porém na camada de binder o teor de ligante foi 0,3% maior do que o teor de projeto, com o objetivo de retardar o processo de trincas. A mistura asfáltica de Alto Módulo foi dosada segundo a metodologia Superpave com Tamanho Máximo Nominal (TMN) de 19,1 mm, para alto volume de tráfego. A mistura asfáltica foi usinada na usina de asfalto da Soma Engenharia e aplicada pela construtora Compasa do Brasil nas mesmas condições e equipamentos utilizados no primeiro segmento.

O terceiro segmento experimental de concreto asfáltico morno, com 270 m de extensão, foi construído nos dias 10 e 12 de abril de 2013, cerca de, 16 meses após a construção

dos demais segmentos, na faixa da direita e esquerda, respectivamente. A camada do revestimento asfáltico foi aplicada após a fresagem total da camada do revestimento existente e aplicada em duas camadas de 4 cm cada. Na camada de ligação foi adotado o mesmo critério do segundo segmento com 0,3% a mais de ligante em relação ao teor ótimo de projeto. O processo para a usinagem da mistura asfáltica morna foi realizado conforme a tecnologia patenteada pela Petrobras denominada A – SAT. É um processo de usinagem sem o uso de aditivos químicos, porém para esse processo foi necessário o uso de uma usina de asfalto gravimétrica para a usinagem da mistura, diferente da usada na usinagem dos dois segmentos anteriores. Esta usinagem foi então realizada na Usina de Asfaltos da Craft Engenharia.

Após a construção dos segmentos experimentais a equipe de técnicos da COPPE/UFRJ, Concer e CENPES realizou avaliações periódicas desde a construção e, monitorou o comportamento dos segmentos quanto ao seu desempenho funcional e estrutural. As avaliações realizadas consistiram nos seguintes levantamentos:

- Levantamentos deflectométricos com o uso do FWD;
- Levantamento visual de defeitos;
- Medidas de Irregularidade com o uso do Perfilômetro a laser;
- Medidas de atrito com o uso do Grip Tester;
- Afundamento de trilha de roda com o uso do Perfilômetro a laser e a treliça metálica;
- Macrotextura com o uso do Perfilômetro a laser e a mancha de areia;
- Extração de corpos de prova para análise dos resultados mecânicos.

Em 2016 o primeiro e o segundo segmento experimentais sofreram intervenções no revestimento, bem como a faixa da direita do terceiro segmento experimental. Assim foi finalizado o acompanhamento sistemático dessas seções, devido ao elevado grau de trincamento e a existência de panelas na época o que levou a concessionária a fazer intervenção de parte da camada do revestimento dos segmentos citados. Porém as observações realizadas permitiram calibrar e validar a Função de Transferência proposta neste estudo conforme será apresentado no capítulo 5. A faixa da esquerda do segmento de mistura morna ainda está sendo monitorada.

Em 2010 o Laboratório de Geotecnia e Pavimentos – LABGEO / COPPE / UFRJ iniciou um estudo de acompanhamento sistemático de trechos experimentais na região norte do estado de Minas Gerais entre os municípios de Campo Azul e Brasília de Minas – MG em parceria com o Departamento de Estradas e Rodagem de Minas Gerais (DER/MG). Estes segmentos fazem parte de um Programa de Melhoria de Acessibilidade a Municípios de Pequeno Porte – chamado PROACESSO, na área de resultados estratégicos, denominado Rede de Cidades e Serviços. O objetivo geral do programa PROACESSO é contribuir para o desenvolvimento socioeconômico de municípios com baixo Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e precária conexão com a rede viária principal, (MEDRADO, 2009). São trechos experimentais de baixo volume de tráfego.

Segundo MOTTA *et al*. (2012) em 2003, 26% dos municípios mineiros, ou seja, 225 cidades, não dispunham de uma ligação pavimentada à rede rodoviária principal do estado, num total de 5,6 mil km de extensão. O local dos trechos experimentais encontra-se distante 600 km aproximadamente da capital do estado, Belo Horizonte. O clima local, do tipo AW, tropical chuvoso, é quente e úmido com inverno seco apresentando temperaturas médias do mês mais frio de 18ºC e média anual de 23,8ºC. O balanço hídrico anual indica um déficit hídrico, de 316 mm de abril a outubro. A formação vegetal é o cerrado, solo de savana tropical.

MEDRADO (2009) e MOTTA *et al.* (2012) mostram o planejamento do experimento que resultou na construção de 5 segmentos experimentais, constituídos de uma camada de subleito de solo local, 20 cm de base, diferentes em cada segmento e uma camada de revestimento asfáltico de Tratamento Superficial Duplo (TSD) convencional.

O primeiro segmento experimental situa-se entre as estacas 1865 a 1875, sua base é composta de um solo arenoso fino, abundante no local, misturado com 2% de cimento ultra-forte da Holcim e sobre a base foi executada a imprimação com CM – 30. Porém esse segmento criou uma crosta frágil de aproximadamente 2 cm de espessura que foi removida com a motoniveladora e executada uma capa selante sobre a camada remanescente da base com RR – 2C diluída a 50% de água em substituição da camada de imprimação com CM – 30. Esse segmento, portanto, ficou com 2 cm a menos que os demais na base.

O segundo segmento experimental situa-se entre as estacas 1875 a 1885, sua base é composta por um solo arenoso fino laterítico (LA'), oriundo de uma caixa de empréstimo da rodovia MG – 202, próximo ao km 141, e sobre a base foi executado uma camada de imprimação com CM – 30.

O terceiro segmento experimental situa-se entre as estacas 1885 a 1895, sua base é composta por um solo arenoso fino (NA'), abundante no local e misturado com 50% de cascalho de seixo rolado, solução adotada em toda a extensão (1 km) da rodovia aproximadamente 42 km, com uma camada de imprimação com CM – 30.

O quarto segmento experimental situa-se entre as estacas 1895 a 1905, sua base é composta por um solo arenoso fino (NA'), abundante no local, com uma camada de imprimação com CM – 30.

O quinto segmento experimental situa-se entre as estacas 1905 a 1915 e foi adotado a título de comparação: seção de igual comprimento dos segmentos monitorados utilizada em todo o trecho da rodovia para servir como referência para o desempenho dos outros segmentos.

O DER/ MG realizou um estudo do VDM local no ano de 2011 e observou um VDM de aproximadamente 120 veículos dia, sendo que desse total, 33 eram veículos comerciais. De acordo com o projeto a previsão para o período de projeto de 10 anos é de $1{,}97 \times 10^5$ (MEDRADO, 2009).

Após a abertura ao tráfego o LABGEO / COPPE com o apoio do DER/MG regional e da capital, vem monitorando o trecho periodicamente, com avaliação funcional e estrutural dos segmentos experimentais. Esses trechos fazem parte dos trechos monitorados da Rede Temática de Asfalto e podem ser vistos no SRTA. Dados da penúltima avaliação estão apresentados em ALBERNAZ *et al.* (2014). Em maio de 2016 foi feita mais uma avaliação estando os segmentos em boas condições.

Em 2014 o LABGEO da COPPE iniciou um estudo de acompanhamento sistemático de trecho experimental em uma via do terminal Aroldo Melodia, da linha Transbrasil da

Bus Rapid Transit (BRT), localizada próximo ao Hospital Universitário Clementino Fraga Filho na Cidade Universitária do Rio de Janeiro.

SILVA (2014) acompanhou as etapas da construção do trecho experimental e reproduziu no tanque teste de modelos físicos da COPPE a estrutura construída em campo. Relata o autor que a seção experimental semirrígida é composta por: duas camadas de revestimento asfáltico de 5 cm de espessura, binder e capa, respectivamente, 15 cm de base de brita graduada tratada com cimento, 10 cm de sub-base de brita graduada simples e subleito composto por solo argiloso de empréstimo, oriundo de obras de terraplenagem da linha Transbrasil, classificado segundo a metodologia MCT como solo NA'.

Os materiais empregados no trecho experimental em campo foram entregues no LABGEO da COPPE, para ensaios de caracterização, ensaios mecânicos e para reprodução do trecho experimental no tanque teste de modelos físicos onde foi instrumentado com células de pressão, TDR's, células de carga e submetidos ao carregamento de carga repetida.

O trecho experimental faz parte de segmentos experimentais da Rede Temática de asfaltos e vem sendo monitorado desde sua implantação, (julho de 2014). Uma análise detalhada desse estudo pode ser visto em SILVA (2014).

2.2.2 Trechos Experimentais da UFSM

A Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) implantou e vem monitorando desde o final de 2012 e início de 2013, três trechos experimentais construídos em vias da cidade de Santa Maria, região central do estado do Rio Grande do Sul, localizada aproximadamente a 113 metros acima do nível do mar. O objetivo é o mesmo: avaliar o desempenho funcional e estrutural de modo a subsidiar e calibrar modelos de previsão de desempenho que vão auxiliar na elaboração do método de dimensionamento mecanístico empírico brasileiro, adaptado às diferentes condições climáticas, geológicas e de tráfego no Brasil.

A construção dos segmentos experimentais de responsabilidade dos técnicos da UFSM seguiu o Manual de Execução de Trechos Monitorados desenvolvido pela Rede Temática de Asfalto, nas diferentes etapas: Pré Execução, Execução e Pós Execução.

Segundo SANTOS (2015) buscou-se estudar algumas variáveis relevantes tais como: diferentes estruturas de pavimento, diferentes materiais e implantação de dois segmentos de estrutura nova e um segmento de restauração da camada do revestimento. Os três segmentos experimentais da UFSM são: um localizado na Av. Roraima – segmento de restauração; um segmento na Av. Hélvio Basso – segmento de implantação de estrutura nova, duplicação da via e um segmento localizado na BR – 158 conhecido como Trevo dos Quartéis – segmento de implantação de estrutura nova, também duplicação da rodovia existente.

O segmento da Av. Roraima é constituído de uma via de pista dupla preexistente, com 240 de extensão e que apresentava à época inúmeros defeitos antes da restauração, tais como: panelas, trincas interligadas, exsudação, ondulações, tendo seu conceito baseado no Índice de Gravidade Global (IGG) como péssimo. O segmento experimental é composto por uma camada de subleito de solo argiloso, 17 cm de base granular – BGS, 5 cm de revestimento asfáltico antigo e 5 cm de revestimento asfáltico novo – CBUQ segundo SANTOS (2015).

O segmento experimental tem uma largura de 7,5 m, dividido em duas faixas de rolamento no mesmo sentido. Foi realizada a contagem do tráfego nos períodos de 6, 11 e 15 meses após a restauração da via com um VDM de 6000 veículos, aproximadamente, com fator de frota de 6,0% e 7,2%, respectivamente em cada período avaliado. Também foram coletados materiais constituintes do pavimento para ensaios em laboratório.

A mistura asfáltica aplicada no segmento experimental foi enquadrada na Faixa C do DNIT e apresenta um teor de projeto de 6,15%, CAP 50/70 com Grau de Desempenho do Ligante Asfáltico (PG) 64-16 e dosado pelo método Marshall.

O segmento experimental da Av. Hélvio Basso tem 300 metros de extensão oriundos da duplicação da rodovia e é composto por uma camada de subleito de solo argiloso, 40 cm

de sub-base de macadame seco, 20 cm de base granular – BGS e 6 cm de revestimento asfáltico. SANTOS (2015) realizou a contagem do tráfego em três períodos: 5º, 13º mês e no final do semestre de 2014 e o VDM observado foi 10700, 11500 e 12600 veículos, respectivamente com fator de frota de 6,3%, 6,1% e 5,9%, respectivamente nos três períodos avaliados.

Os materiais constituintes do pavimento foram coletados e submetidos aos ensaios de laboratório, conforme previstos no Manual de Execução de Trechos Monitorados. A mistura asfáltica aplicada no segmento experimental foi enquadrada na Faixa C do DNIT e apresenta um teor de projeto de 5,9%, CAP 50/70 com PG 58-16 e dosado pelo método Marshall.

O segmento experimental da BR – 158 – Trevo dos Quartéis tem 300 m de extensão, oriundos da duplicação da rodovia BR – 158. O segmento é composto por uma camada de subleito de solo argiloso, 40 cm de reforço de rachão, 15 cm de sub-base de macadame seco, 15 cm de base granular – BGS e 7,5 cm de revestimento asfáltico. O VDM obtido neste segmento após 4 meses da abertura ao tráfego foi de 9800 veículos aproximadamente com fator de frota de 6,3% aproximadamente no período.

Os materiais constituintes do pavimento foram coletados e submetidos aos ensaios de laboratório. A mistura asfáltica foi enquadrada na Faixa B do DNIT e apresenta um teor de projeto de 5,85%, CAP 50/70 e dosado pelo método Marshall.

Segundo SANTOS (2015) os segmentos experimentais foram monitorados em diferentes períodos após a liberação do tráfego. O monitoramento contemplou os seguintes ensaios:

- Macrotextura – mancha de areia;
- Microtextura – Pêndulo Britânico;
- IFI – baseado na Mancha de areia e no Pêndulo Britânico;
- Medidas de Irregularidade – Perfilômetro a laser;
- Afundamento de trilha de roda – Perfilômetro a laser;
- Levantamentos visuais de defeitos;

- Levantamentos deflectométricos com o uso da viga Benkelman;
- Levantamentos deflectométricos com o uso do FWD.

SANTOS (2015) definiu modelos de previsão de desempenho para cada segmento experimental em função dos fatores de equivalência da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e *United States Army Corps of Engineers* (USACE).

O autor conclui que as condições funcionais dos segmentos experimentais monitorados estão satisfatórias, até o momento, o que é esperado visto que os segmentos experimentais foram liberados ao tráfego no início de 2013, praticamente.

SANTOS (2015) obteve 34 modelos de previsão de desempenho em função do número de solicitações equivalentes ao eixo padrão, sendo que 17 modelos foram obtidos pelo Fator de Equivalência de Carga (FEC) da AASHTO e os outros 17 modelos obtidos pelo FEC da USACE. O autor comenta que estes modelos de previsão de desempenho podem servir para outros locais, porém com materiais semelhantes aos apresentados neste estudo.

O segmento experimental da Av. Hélvio Basso serviu para calibração e validação da Função de Transferência proposta pelo autor desta tese e está descrita com mais detalhes no capítulo 5. Os demais segmentos experimentais da UFSM descrito acima não foram utilizados na validação da Função de Transferência porque não foram realizados os ensaios mecânicos de MR e fadiga por compressão diametral até o momento.

2.2.3 Trechos Experimentais da UFRGS

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS planejou, construiu e vem monitorando periodicamente três segmentos experimentais da BR – 290/RS, pista sul sentido Porto Alegre – Osório.

O primeiro segmento experimental está localizado entre os kms 14+700 ao 14+400, com 300 metros de extensão e tem a mesma estrutura do terceiro segmento

experimental localizado entre os kms 4+960 ao 4+860, com 100 metros de extensão posicionado no acostamento externo da rodovia pista sul. O segundo segmento experimental está localizado entre os kms 5+500 ao 5+000, com 500 metros de extensão na terceira faixa de rolamento da via.

Segundo MATTOS (2014) o segundo segmento experimental difere dos demais na camada de reforço do subleito que é composto de rachão, enquanto os outros dois segmentos são de areia. Isto é devido à sua proximidade com a lagoa, nas demais camadas os materiais apresentam a mesma origem e composição. Em geral a estrutura do pavimento do trecho experimental é composta de subleito, 60 cm de reforço de subleito de areia (segmentos I e III) e rachão (segmento II), 30 cm de sub-base de material originado do britador primário, 15 cm de base granular – BGS e 8 cm de revestimento asfáltico com ligante modificado de polímero – FLEXPAVE 60/85, faixa C do DNIT aplicada em duas camadas de 4 cm.

MATTOS (2014) apresenta um estudo de tráfego na BR – 290/RS com características sazonais em termos de volume de tráfego, por se tratar de uma via de acesso ao litoral do Estado. Esta rodovia apresenta intenso fluxo de veículos de passeio nos meses do verão, chegando a um VDM de 35 mil veículos e um VDM de 20 mil veículos nos meses de inverno. Porém o autor verificou que o tráfego comercial não apresentava sazonalidade correspondendo a um VDM de 5 mil veículos comerciais / dia.

O segundo segmento experimental deste estudo serviu de calibração e validação da Função de Transferência proposta pelo autor desta tese e está descrito com mais detalhes no capítulo 5.

2.2.4 Trechos Experimentais da UFC

SOARES *et al.* (2015) descreve que o Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará (LMP/UFC), não teve a oportunidade de participar da elaboração dos projetos de nenhum dos trechos monitorados, uma vez que todos os projetos foram realizados antes do estabelecimento do Manual de Execução de Trechos Monitorados da Rede Temática de Asfaltos. Contudo o LMP/UFC acompanhou a fase

de execução dos trechos e vem monitorando trechos experimentais construídos em rodovias estaduais e federais no Estado do Ceará, segundo SOARES *et al.* (2009).

O primeiro trecho experimental está localizado na rodovia CE – 085, entre a região metropolitana de Fortaleza e Camocim, próximo ao município de Caucaia, com extensão de 300 metros em um trecho de duplicação da rodovia. A estrutura do pavimento consiste em uma camada de subleito, 55 cm de reforço do subleito, 21 cm de sub-base de solo, 20 cm de base de solo cimento e 5 cm de revestimento asfáltico com CAP 50/70, faixa C do DNIT. Os materiais constituintes do pavimento foram coletados in situ e submetidos aos ensaios previstos no Manual de Execução de Trechos Monitorados no LMP/UFC.

O segundo trecho experimental situa-se na rodovia BR – 222, próximo ao município de Umirim – CE, distante 86 km aproximadamente da capital cearense. O trecho vem sendo monitorados pelo LMP/UFC. Trata-se de um trecho de restauração. A estrutura do pavimento consiste em uma camada de regularização com material do próprio local após a remoção do revestimento existente, 15 cm de sub-base com o reuso do material de empréstimo – solo, 15 cm de base granular – BGS, 7 cm de camada de binder e 5 m de CBUQ como camada de revestimento. As camadas do binder e do revestimento foram definidas através do método Marshall com o uso do CAP 50/70 no LMP/UFC, bem como os demais materiais constituintes das camadas do pavimento foram submetidos aos ensaios característicos no LMP/UFC.

O terceiro trecho experimental está localizado na rodovia BR – 222, entre os municípios de Croatá e Itapajé – CE com 300 m de extensão. A estrutura do pavimento consiste em 30 cm de aterro, 15 cm de sub-base de solo local, 15 cm de base granular com cimento – BGTC, 6 cm de binder e 5 cm de revestimento com o uso do CAP 50/70, PG 64 -22 da Lubnor.

Os resultados de todos os ensaios podem ser observados no Relatório Técnico Parcial 3, com o título: Desenvolvimento de um Método de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos – SDIMPA, de autoria de SOARES *et al*. (2015). O primeiro e o terceiro segmentos experimentais não foram utilizados na validação da Função de Transferência

por falta de dados de algumas camadas do pavimento. Somente o segundo segmento experimental foi utilizada para a validação da Função de Transferência.

2.2.5 Trechos Experimentais da UFSC

A Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) construiu e vem monitorando trechos experimentais em diferentes regiões do estado de Santa Catarina, como membro da Rede Temática de Asfaltos, sob coordenação do professor Glicério Trichês, sendo 4 trechos experimentais.

O primeiro trecho experimental construído pela UFSC está localizado no município de Itapoá / SC, na rodovia SC – 415, região nordeste do estado – conhecido como Polo Eletro – Metal – Mecânico, tem 400 m de extensão situada entre as estacas 1170 a 1190, em ambos os sentidos. O trecho experimental apresenta um volume de tráfego predominantemente comercial devido ao acesso ao terminal de carga e descarga do Porto de Itapoá.

O segundo trecho experimental está localizado entre os municípios de Urubici e Morro da Igreja / SC, na rodovia SC – 439, região do Planalto Serrano do estado – conhecido como Polo de Celulose e Papel, e está dividido em 3 segmentos de 300 m cada e o mesmo volume de tráfego, onde:

- O primeiro segmento está localizado entre as estacas 65 a 80, e é constituído por uma camada final de terraplenagem de 60 cm de espessura de solo, 20 cm de sub-base de macadame seco, 15 cm de base granular – BGS, 2 cm de uma camada asfáltica de proteção faixa F do Departamento de Infraestrutura de Santa Catarina (DEINFRA/SC) e 4 cm de revestimento asfáltico CAP 50/70, faixa D do DEINFRA/SC;

- O segundo segmento está localizado entre as estacas 125 a 140, e é constituído por uma camada de 20 cm de regularização, 20 cm de sub-base de macadame seco, 15 cm de base granular – BGS e 6 cm de revestimento asfáltico faixa D do DEINFRA/SC com asfalto modificado com borracha;

- O terceiro segmento está localizado entre as estacas 450 a 465, e é constituído de 20 cm de regularização, 20 cm de sub-base de macadame seco, 15 cm de base granular – BGS e 6 cm de revestimento asfáltico, sendo 2 cm de CAP 50/70 para proteção da base e 4 cm de AMB, ambos na faixa D do DEINFRA/SC.

A altitude do segundo trecho experimental é de 900 m em relação ao nível do mar e é uma das regiões mais frias do país. A rodovia foi liberada ao tráfego em janeiro de 2012 com um VDM de aproximadamente 1500 veículos. Segundo TRICHÊS (2013) o tráfego previsto no período de projeto é de 3,71 x 10^6.

O terceiro trecho experimental está localizado entre os municípios de Joaçaba e Capinzal / SC, na rodovia SC – 135, região Meio Oeste do estado – conhecida como Polo Agroindustrial. O trecho experimental está dividido em 3 segmentos: o primeiro segmento é chamado de referência, com 1600 m de extensão, o segundo e o terceiro segmentos estão localizados entre os kms 204 e 205, nas duas faixas de rolamento, além da 3ª faixa e entre os kms 193 e 194 nas duas faixas de rolamento, respectivamente.

O quarto trecho experimental está localizado no município de Araranguá / SC na rodovia BR – 101, região sul do estado – conhecido como Polo Cerâmico e Carvão. O trecho experimental está dividido em dois segmentos: O primeiro segmento está situado entre os kms 0 + 360 e 0 + 960, sentido Araranguá – Sombrio / SC e o segundo entre os kms 0 + 960 e 0 + 660, sentido Sombrio – Araranguá / SC, com duas faixas de rolamento por sentido. Os resultados e detalhes da construção e monitoramento dos segmentos poderão ser observados no SRTA.

2.2.6 Trechos Experimentais da EPUSP

O Laboratório de Tecnologia de Pavimentos (LTP) da EPUSP construiu trechos experimentais sob a coordenação da Professora Liedi Bernucci, na rodovia SP – 345, também conhecida como Estrada do Leite, rodovia que interliga os municípios de Altinópolis, Batatais, Itirapuã e Patrocínio Paulista, no trecho denominado Furnas localizado no Km 15 + 300.

O LTP construiu o primeiro trecho experimental que foi dividido em 3 segmentos de 250 m de extensão cada, sendo diferenciada somente a camada de base. O primeiro segmento experimental consiste de uma camada de subleito de solo local tipo LA, 2 camadas de 15 cm de reforço do subleito com solo selecionado tipo LA, 15 cm de base (solo brita, solo brita cimento e solo cimento) e sobre a camada de base uma camada de TSD com emulsão RR-1C modificada com polímero Estireno – Butadieno – Estireno (SBS).

O segundo trecho experimental foi construído entre as estacas 707 + 10 e a estaca 745 e foi dividido em 2 segmentos, sendo diferenciado somente o ligante asfáltico da camada do revestimento (CAP 30/45 e CAP 50/70). A estrutura do pavimento é composta por uma camada de subleito de solo local, 2 camadas de 15 cm de reforço do subleito de solo selecionado, 15 cm de base de solo – brita, 40 e 60%, respectivamente e 4 cm de revestimento asfáltico, sendo o primeiro segmento situado entre as estacas 707 + 10 a 726 + 05 dosado com CAP 50/70 e o segundo segmento situado entre as estacas 726 + 05 a 745 dosado com CAP 30/45, totalizando 375 m de extensão cada segmento, segundo BERNUCCI *et al*. (2013).

Os dados do segundo trecho experimental foram utilizados para a calibração e validação da Função de Transferência proposta nesta tese e está descrito com mais detalhes no capítulo 5.

A Tabela 1 apresenta um resumo dos dados dos segmentos experimentais que foram utilizados na validação da Função de Transferência desta tese.

Tabela 1- Resumo dos segmentos experimentais nacionais utilizados na validação da Função de Transferência

SEGMENTOS	FAIXA	LIGANTE	ESPESSURA (CM) / MÓDULO DE RESILIÊNCIA RETROANALISADOS (MPa)						FADIGA		TRAFEGO ANUAL
			CAMADA 1	CAMADA 2	CAMADA 3	CAMADA 4	CAMADA 5	CAMADA 6	K1	K2	
CRT 1	DIREITA	30/45	6,5 / 7976	3,5 / 1800	15 / 5500	15 / 260	20 / 80	SL / 40	6,00E-09	-2,789	1,57E+06
CRT 2	DIREITA	30/45	7,0 / 6779	3,0 / 1500	15 / 5500	15 / 60	20 / 50	SL / 35	3,00E-08	-2,638	1,57E+06
CRT 3	DIREITA	AMB	6,0 / 3001	4,0 / 1300	15 / 5500	15 / 230	20 / 130	SL / 60	1,00E-10	-3,201	1,57E+06
CONCER	DIREITA	30/45	8,0 / 10062	-----	22 / 236	21 / 144	-----	SL / 128	2,00E-11	-3,288	4,59E+06
CONCER	ESQUERDA	30/45	8,0 / 10062	-----	23 / 236	22 / 144	-----	SL / 128	2,00E-11	-3,288	1,15E+06
CONCER	DIREITA	50/70	11,0 / 9470	-----	22 / 236	21 / 144	-----	SL / 128	2,00E-14	-4,079	4,88E+06
CONCER	ESQUERDA	50/70	11,0 / 9470	-----	22 / 236	21 / 144	-----	SL / 128	2,00E-14	-4,079	8,61E+05
UFSM	DIREITA	50/70	6,0 / 4901	-----	20 / 569	40 / 189	-----	SL / 160	4,00E-05	-1,999	8,72E+05
UFRGS	DIREITA	PAVEFLEX	8,0 / 5517	-----	15 / 263	30 / 350	60 / 300	SL /80	5,00E-17	-4,366	7,60E+06
EPUSP	DIREITA	30/45	4,0 / 5358	-----	15 / 1150	15 / 450	15 / 416	SL / 300	1,00E-09	-3,304	1,40E+05
EPUSP	DIREITA	50/70	4,0 / 4606	-----	15 / 800	15 / 420	15 / 370	SL / 300	3,00E-05	-2,098	1,40E+05
UFC	DIREITA	50/70	5,0 / 4027	6,0 / 4651	15/ 137	15 / 120	-----	SL / 80	5,00E-15	-4,091	1,05E+05

2.3 Breve Histórico de Trechos Experimentais no Exterior

Um dos primeiros estudos de desempenho dos pavimentos em seções experimentais que se tem informação foi o da "Bates Road". Este estudo foi motivado por uma despesa prevista de U$ 100.000.000,00, para a pavimentação de um sistema viário principal, o que inspirou e deu origem às atividades de investigação intensiva no início de 1920 pela Divisão de Estradas e Rodagem do Departamento de Obras Públicas e Edifícios, de Illinois, localizado próximo à cidade de Bates conforme visto na página eletrônica http://www.idaillinois.org/cdm/ref/collection.

Os principais problemas investigados neste estudo foram: o efeito de pressão da carga no solo, o efeito da temperatura na superfície do pavimento, o impacto resultante da movimentação das cargas de roda, o efeito de fadiga por ações repetidas que causam as tensões de flexão no concreto simples e a drenagem dos solos do subleito.

A Bates Road foi construída com o objetivo de avaliar, na medida do possível, o fator de impacto variável das cargas no subleito. Seis grupos de seções foram construídos, cada um representando um determinado pavimento, totalizando 68 seções avaliadas. Essas seções foram submetidas a um tráfego de caminhões controlados, porém com cargas variáveis de 2.500 até 13.000 lb (1,1 a 6,0 tf). As seções eram compostas por revestimentos de concreto asfáltico, revestimentos de concreto cimento Portland simples e superfícies de tijolos vitrificados com juntas betuminosas sobre uma base de macadame.

Esse estudo avaliou o desempenho das diferentes seções experimentais com diferentes níveis de carga, o que permitiu ao corpo técnico o embasamento para escolha da melhor solução observada em campo e que foi implantada na via como um todo após o término dos estudos.

Outro estudo pioneiro de acompanhamento sistemático nos Estados Unidos, realizado no ano de 1952, de avaliação do desempenho de pavimentos flexíveis foi da *Western Association of State Highway Officials* (WASHO Road Test), que serviu de base para o desenvolvimento da metodologia da *American Association of State Highway Officials* (AASHO), que também foi derivada de pistas experimentais da AASHO Road Test, de 1958 a 1960.

Os primeiros trechos experimentais da WASHO foram construídos em 1952 e finalizados em maio de 1954 em Ottawa, Illinois. Foram construídas quatro pistas divididas em 46 seções diferentes entre si em aspectos como: espessura de concreto asfáltico variando de 5 a 10 cm e espessura total do pavimento variando de 15 a 55 cm, todos submetidos ao tráfego de caminhão com eixo de roda simples e carga variável de 18.000 a 22.000 lb (8,2 a 10 tf) e caminhões com eixo de roda dupla e carga variável de 32.000 a 40.000 lb (14,5 a 18,2 tf). Esse estudo contou com o uso da viga Benkelman, recém criada, para as medidas de deflexão dos pavimentos.

Segundo COUTINHO (2011) as primeiras conclusões da WASHO Road Test foram:

- O desempenho do pavimento foi influenciado pela ação do gelo e degelo da água contida no pavimento;
- Há influência no desempenho do pavimento pela variação da espessura do pavimento;
- As seções com revestimento asfáltico de maior espessura apresentaram desempenho superior ao das demais seções.

No final da década de 1950, início da década de 1960, devido à necessidade de aumentar a malha rodoviária americana especialmente na ligação de cidades de médio e grande porte, a AASHO desenvolveu o maior experimento rodoviário do mundo, à

época, para definir uma metodologia de dimensionamento de pavimentos rodoviários, denominada AASHO Road Test.

A AASHO Road Test realizou estudos, em Ottawa, Illinois entre 1956 a 1961, com o objetivo de avaliar o desempenho estrutural de alguns pavimentos, sob a ação do tráfego acelerado, bem como a determinação da degradação do pavimento em relação à solicitação do tipo de eixo dos veículos que trafegava na via. Esses dados foram usados para estabelecer um novo método de dimensionamento de pavimentos flexíveis e limites máximos de carga por eixo.

A construção da pista teve início em agosto de 1956 e sua conclusão foi em setembro de 1958. Foram construídas 6 pistas experimentais, totalizando 332 seções com 320 metros cada, com espessuras variáveis para cada camada do pavimento, conforme mostrado na Tabela 2. Os testes foram realizados de outubro de 1958 até o verão de 1961.

A pista 1 não foi submetida ao tráfego, foi utilizada para estudos sobre os efeitos climáticos. As demais pistas foram submetidas ao tráfego e avaliadas em relação ao comportamento estrutural do pavimento, com exceção da pista 2 que foi submetida ao tráfego leve de caminhonetes. Nas pistas da AASHO Road Test além da variação da espessura houve segmentos executado em concreto de cimento Portland e concreto asfáltico como revestimento.

O concreto asfáltico foi executado com CAP 85-100 dosado pelo método Marshall com 50 golpes por face, variação do teor de asfalto de 4,4 a 5,4% e o volume de vazios médio foi de 7,7% em pista.

A base foi construída com pedra britada com CBR de 75 a 108% e nas camadas de sub-base o CBR foi de 28 a 51%. O material utilizado para o reforço do subleito foi um solo A-6 e o CBR médio de 2,9%, com grau de compactação médio de 98,5%, segundo COUTINHO (2011).

Tabela 2- Espessura das seções experimentais – pistas da AASHO Road Test. (Fonte: http://training.ce.washington.edu/wsdot) fevereiro 2016

Pista Nº	Espessura do Pavimento, pol.		
	Concreto Asfáltico	Base	Sub-base
1	1,0	-----	-----
	3,0	6,0	8,0
	5,0	-----	16,0
2	1,0	-----	-----
	2,0	3,0	4,0
	3,0	6,0	8,0
3	2,0	-----	-----
	3,0	3,0	4,0
	4,0	6,0	-----
4	3,0	-----	4,0
	4,0	3,0	8,0
	5,0	6,0	12,0
5	3,0	3,0	8,0
	4,0	6,0	8,0
	5,0	9,0	12,0
6	4,0	3,0	8,0
	5,0	6,0	12,0
	6,0	9,0	16,0

As pistas da AASHO Road Test permitiram definir vários conceitos novos durante sua construção e acompanhamento sistemático, entre eles pode-se citar:

- Índice de Serventia Presente (PSI);
- Análise da Capacidade estrutural – Número Estrutural (SN);
- Índice de Equivalência dos Eixos – ESALs - AASHTO.

O Índice de Serventia Presente foi criado com o objetivo de avaliar as condições do pavimento quanto ao conforto e segurança. O PSI foi desenvolvido a partir de um estudo em três estados americanos com a participação dos motoristas de automóveis e

caminhões em 138 regiões específicas das rodovias americanas. As notas variavam de: 0 – 1 muito ruim; 1 – 2 ruim; 2 – 3 aceitável; 3 – 4 boa e 4 – 5 muito boa.

Ao mesmo tempo foram realizadas análises das condições dos pavimentos referentes às 138 regiões avaliadas quanto à rugosidade longitudinal, fissuras, remendos, afundamento de trilha de roda e desagregação, e o valor do PSI foram definidos em função da correlação das notas dos usuários, (motoristas) e a análise das condições do pavimento. Este índice passou a ser a referência para o dimensionamento que foi criado.

YODER e WICKZACK (1975) avaliam que esse conceito gerou uma visão diferenciada do que vinha sendo executado até o momento: surgia um método de dimensionamento de pavimento que não se baseava somente na capacidade de resistência estrutural das camadas, mas sim na sua capacidade funcional também.

O Número Estrutural (SN) é a quantificação da capacidade de suporte da camada ponderada pela capacidade estrutural das demais camadas constituintes do pavimento. A AASHO Road Test definiu conceitos estruturais para cada material, à época, com valores fixos para cada um dos materiais constituintes do pavimento.

Os índices de fatores de equivalência de eixos (Índice de Equivalência de Eixos – ESALs), por sua vez, foram desenvolvidos pela análise comparativa entre os diversos eixos da época e o eixo padrão, escolhido como um eixo simples de roda dupla carregado com 18.000 lb (8,2 tf). Foi obtida uma correlação entre os tipos de eixos e o eixo padrão, considerando a influência dos eixos em relação à vida útil do pavimento, obtendo assim os fatores de equivalência de eixos – AASHTO.

Como resultado deste experimento obteve-se um modelo empírico de dimensionamento amplamente utilizado, que determina o desempenho de um pavimento usando informações relativas à capacidade da estrutura e determina o tráfego equivalente solicitante além dos dados referentes às condições gerais de drenagem e o grau de confiabilidade desejado. O método estabelecido a partir de dados experimentais da AASHO Road Test sofreram ajustes e modificações ao longo dos anos num esforço de melhorar e expandir os limites de validade dos modelos.

Em 1961, houve divulgação dos primeiros resultados e ao longo dos anos seguintes foram feitas versões do método: 1972, 1986, 1993, 2002. Com o acompanhamento sistemático dessas pistas o método passou por várias reformulações, porém a reformulação maior ocorreu a partir de 2002: passou de um método empírico para um método mecanístico empírico.

Por exemplo, em 1972 foi lançada uma nova versão do *Interim Guide for Design of Flexible Pavement Structures*, agora pela AASHTO. Definiram-se novos coeficientes estruturais para novos materiais que não foram usados nas pistas da AASHO, baseados nas experiências adquiridas pelos órgãos estaduais rodoviários, na década de 1960. Esses coeficientes estruturais passaram a ter uma faixa de variação para cada material constituinte da camada. Também foram criados novos fatores que compatibilizavam a equação de dimensionamento do pavimento com as diversidades climáticas dos EUA e para diferentes tipos de subleito.

No Manual de 1986 a característica do subleito, passou a ser dada pelo módulo de resiliência e não mais pelo CBR. Na versão do Guia da AASHTO de 1993, não houve mudanças na equação do dimensionamento dos pavimentos asfálticos. As mudanças se limitaram aos coeficientes estruturais das camadas de pavimento que passaram a ser dependentes dos módulos de resiliência dos materiais que foram retroanalisados.

MONISMITH (2004) relata que a conferência realizada em 1962 na Universidade de Michigan foi um marco no meio técnico. A *The International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements* teve como objetivo discutir os resultados encontrados na AASHO Road Test e trocar experiências sobre a evolução de dimensionamento dos pavimentos asfálticos pelo mundo.

COUTINHO (2011) descreve que a conferência foi considerada o ponto de partida do desenvolvimento dos métodos mecanísticos de dimensionamento de pavimentos asfálticos como se conhece atualmente. Foram apresentados importantes contribuições, tais como sistemas de múltiplas camadas elásticas que pode ser usado para análise de tensões do pavimento. Neste período surgiram vários conceitos que seriam utilizados nas metodologias analíticas que viriam a ser desenvolvidas durante esta década de 1960 até os dias atuais.

O Guia da AASHTO de 2002 apresentou um método de dimensionamento totalmente novo denominado mecanístico empírico que considera:

- A capacidade de analisar diferentes materiais, tanto na construção como na restauração dos pavimentos;
- A influência dos veículos em relação a vida útil do pavimento com análise de novos veículos e características de pressão dos pneus e de carga por eixo;
- A influência do clima de forma abrangente em relação às características dos materiais e na dinâmica da vida útil do pavimento;
- A capacidade de carga dos materiais;
- Permite adotar modelos de desempenho dos pavimentos, através de tensões e deformações admissíveis, progressão da serventia do pavimento ao longo do tempo dado pela irregularidade, entre outros critérios.

O programa *Strategic Highway Research Program* (SHRP) teve inicio na década de 1980, conduzido pela *Federal Highway Administration* (FHWA) desenvolveu um subprograma chamado *Long – Term Pavement Performance Program* (LTPP) para avaliar o desempenho dos pavimentos ao longo do tempo, de aproximadamente 2200 seções experimentais construídas praticamente em todo território dos Estados Unidos e alguns estados do Canadá, durante um período de 20 anos. O objetivo principal deste programa é ter informações que permitam aumentar a vida de serviço dos pavimentos novos e restaurados usando diferentes materiais, condições climáticas, programas de manutenção e o efeito de cargas variáveis.

A primeira parte deste estudo levou em consideração uma análise geral dos pavimentos construídos em diferentes locais dos dois países citados, condições climáticas diversas e o método de projeto adotado. A segunda parte é o estudo específico do pavimento destinado ao acompanhamento intensivo, com poucas variáveis.

Como a primeira parte deste estudo contempla um grande número de seções experimentais, serve também como referência para os resultados da segunda parte. As seções do estudo geral foram escolhidas de rodovias existentes, enquanto que as seções dos estudos específicos foram especialmente construídas. Os principais responsáveis

pelo programa são os *Department of Transportation* (DOT), Universidades, AASHTO, FHWA e associação de indústria, segundo SILVA (2001).

A seguir estão apresentados alguns dos principais experimentos com trechos experimentais desenvolvidos pelo FHWA, como meta para os estudos específicos de pavimento.

O *National Center for Asphalt Technology* (**NCAT)**, foi criado em 1986 com a participação de 10 estados americanos, *National Asphalt Pavement Association* (NAPA) e a *Education Foundation and Auburn University*. A pista experimental de Auburn – NCAT teve como objetivo: avaliar o desempenho de pavimentos em função do número de eixos simples de roda dupla, comparar o desempenho de misturas asfálticas com e sem ligantes modificados, comparar projetos de misturas asfálticas executadas de acordo com o método Superpave e do tipo SMA além de testes de novos materiais e procedimentos de execução em escala reduzida bem como o monitoramento da irregularidade dos pavimentos.

A pista NCAT apresenta uma geometria em formato oval de aproximadamente 2,7 km de extensão, conforme mostrada na Figura 1 e na Figura 2, localizada em uma área de 309 acres (1,25 km²) nas proximidades de Auburn. A pista contemplou 45 seções testes com 60 m de extensão cada. A construção da pista teve início em setembro de 1998 e os serviços de terraplenagem foram executados em 10 meses aproximadamente, escavados em plena área de floresta.

A velocidade do veículo teste foi de 70 km / h aproximadamente e a aplicação de carga foi realizada durante 6 dias ininterruptos e um dia parado para manutenção dos veículos, durante dois anos, com monitoramento da irregularidade, do afundamento de trilha de roda, da aderência, da densidade e da deflexão.

Acompanhamentos sistemáticos da pista experimental NCAT continuam em operação desde sua implantação e a cada período são realizados novos testes. LACROIX (2013) relata que o *Performance – Related Specification* – PRS proposto tem como objetivo

analisar o desempenho de misturas asfálticas em relação a trincas por fadiga e deformação permanente. As misturas asfálticas são caracterizadas pela rigidez, comportamento a fadiga e deformação permanente utilizando o ensaio de módulo dinâmico.

LACROIX (2013) avaliou o desempenho de misturas asfálticas implantadas na pista experimental NCAT desde 2009, de misturas mornas, misturas com 50% de RAP e combinação de ambos. O referido autor descreve que o desempenho observado em campo em relação à fadiga permitiu estimar que todas as seções experimentais avaliadas tendem a ter uma vida superior a 18 anos, na mesma taxa de tráfego prevista. O desempenho em relação à deformação permanente também foi avaliado pelo autor neste estudo.



Figura 1 - Tipos de eixos de caminhões utilizados na pista NCAT (Fonte: http://eng.auburn.edu). 2016



Figura 2 - Pista experimental da NCAT (Fonte: http://eng.auburn.edu) março2016

A pista experimental de **Minnesota – (Mn) / Road** teve início em 1991, parceria entre o Mn DOT e a Universidade de Minnesota, localizada a 25 km de Minneapolis / St Paul, em Otsego. A Mn / Road é composta de 2 pistas: uma na rodovia interestadual com 5,6 km de extensão submetida a elevado volume de tráfego e uma pista com 4 km de extensão em circuito fechado, dedicada ao estudo de pavimentos submetidos a baixo volume de tráfego, conforme apresentado na Figura 3.

A pista da Mn / Road tem um sistema de aquisição de dados eficiente, em tempo integral. Enquanto os veículos passam sobre as 45 seções testes, os dados são enviados imediatamente para o sistema computacional que os transmite 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 e às condições ambientais reais e serve também para aperfeiçoar o projeto e a previsão do desempenho.



Figura 3 - Pista experimental Mn / Road (Fonte: http://www.dot.state.mn.us/mnroad) março2016

O estado de **Ohio**, em parceria com a FHWA vem estudando o desempenho de pavimentos submetidos ao tráfego real, pelo programa conhecido como *Ohio SHRP Test Pavement*, que teve início em 1994, com perspectivas de durar 20 anos. A pista está localizada a 65 km ao norte de Columbus, na rodovia US – 23. O programa envolveu a criação, construção e monitoramento de aproximadamente 5,3 km de pavimentos instrumentados.

Vários sensores ambientais foram instalados em 18 seções com o objetivo de monitorar as variáveis sazonais que afetam severamente o pavimento rodoviário, incluindo:

- Temperatura média e gradientes de temperatura no interior da camada do pavimento;
- Umidade do subleito;
- Profundidade do gelo e degelo dentro da estrutura do pavimento.

Além disso, 33 seções de pavimentos foram instrumentadas com sensores dinâmicos com o objetivo de monitorar as tensões no pavimento e a deflexão vertical do pavimento e subleito.

Os dados coletados durante esses anos de estudos permitiram aos pesquisadores da *Ohio SHRP Test Pavement* avaliar os efeitos dos gradientes de temperatura e de umidade nos pavimentos e verificar as tensões na estrutura sob carregamento dinâmico.

A pista experimental de Nevada construída em 1995, denominada **Westrack**, convênio entre o DOT e a FHWA, teve como objetivo verificar o desempenho de misturas asfálticas à quente e a influência de suas características, tais como: teor de ligante, faixa granulométrica e volume de vazios em uma escala real, porém com a possibilidade de acelerar as ações com controle sobre as cargas aplicadas.

A pista experimental Westrack tem 2,9 km de extensão em um formato oval que consiste de duas tangentes e duas curvas com superelevação, com 2 faixas de rolamento, ambas com 3,7 m de largura, perfazendo uma seção transversal de 10,4 m aproximadamente, conforme apresentado na Figura 4.

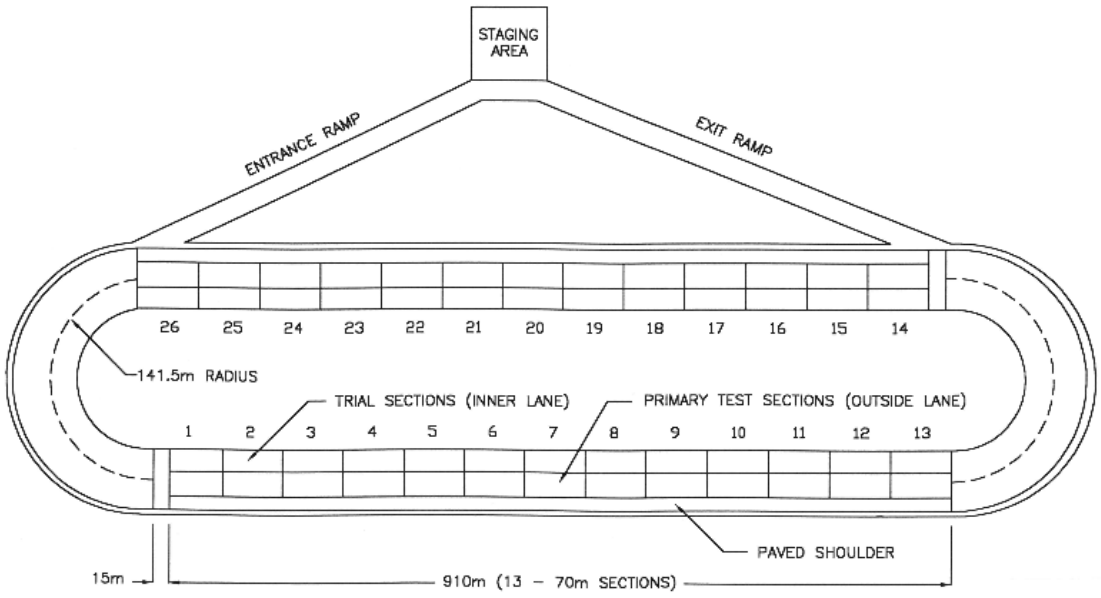


Figura 4 - Pista experimental da Westrack (Fonte: https://www.researchgate.net) março2016

Cada tangente contém 13 seções de testes com 70 metros de extensão e cada seção é dividida em três zonas:

- A primeira zona, chamada de transição contempla os primeiros 25 m, na direção do tráfego. Essa zona de transição não foi avaliada no estudo devido a possíveis variabilidades durante a construção das seções;
- A segunda zona contempla os próximos 40 m que foi a área de testes na qual todas as medições de desempenho do pavimento foram realizadas;
- A terceira zona contempla os últimos 5 m que foi a área em que as medições de amostragens e de testes destrutivos foram realizadas periodicamente.

A estrutura do pavimento foi uniforme ao longo das 26 seções testes na pista da Westrack e contempla as seguintes espessuras: 15 cm de revestimento asfáltico à quente, 30 cm de base granular e 45 cm de subleito compactado. As curvas desta pista não foram avaliadas.

A região de Nevada apresenta clima desértico, com precipitação abaixo dos 100 mm por ano e invernos amenos. O veículo teste usado neste estudo tinha três reboques com carga de 80 kN por eixo com pneus de roda dupla e foi realizado durante 2 anos, 7 dias por semana e 20 horas por dia. Segundo EPPS *et al.* (1998) os resultados obtidos neste estudo permitiram determinar curvas de desempenho das misturas asfálticas que contribuíram para o programa SHRP.

Visto o cenário das principais grandes pistas experimentais realizadas nos Estados Unidos na década de 1990, pode-se concluir que houve um marco no desenvolvimento de novas tecnologias e pesquisas de pavimentação no país à época, tais como: LTPP anos 1990, MnRoad anos 1991, Ohio anos 1994, Westrack anos 1995 e NCAT anos 1998.

2.4 O Uso de Simuladores de Tráfego no Mundo

Simuladores de tráfego são equipamentos que tem a finalidade de realizar em curto espaço de tempo a determinação da vida útil do pavimento pelo uso de ensaios acelerados, ou seja, permitem testar seções típicas de estruturas de pavimentos, em

escala real, porém de maneira acelerada. No entanto podem não representar todos os fatores climáticos, como: chuva, temperatura, umidade e insolação. Mesmo assim podem auxiliar muito na tomada de decisão e balizar os estudos de laboratório em relação ao FCL.

A utilização de simuladores de tráfego foi uma alternativa criada pela necessidade de obter dados mais precisos sobre o desempenho em escala real de estruturas de pavimentos construídos com equipamentos convencionais, em curto espaço de tempo. Esses ensaios acelerados têm sido cada vez mais difundidos como uma importante ferramenta de apoio ao processo de tomada de decisão e no entendimento do real comportamento dos pavimentos e dos novos materiais.

FRITZEN *et al* (2005) descrevem o uso do simulador de tráfego comparado com o tráfego real de um trecho experimental construído na BR – 116 / RJ sob a concessão da Concessionária Rio Teresópolis (CRT). Este segmento também foi usado na validação da FT nesta pesquisa como se verá no capítulo 5.

A realização desses ensaios acelerados permite minimizar as incertezas dos modelos de desempenho utilizados para o dimensionamento de pavimentos novos e/ou restauração de pavimentos. Permite também a obtenção de dados mais precisos na modelagem das condições futuras do pavimento e os investimentos associados que se farão necessários, permitindo ainda programar estratégias de manutenções preventiva e corretiva, bem como a reabilitação dos pavimentos ao longo de um determinado período de análise. (FRITZEN *et al.,* 2005).

De acordo com METCALF (1996) a aceleração do dano no pavimento, quando submetido a ensaios acelerados, ocorre em geral, quando há um incremento nas repetições de carga, na modificação do carregamento, na imposição de condições climáticas e no tipo de estrutura do pavimento com reduzida capacidade estrutural e menor vida útil de projeto ou pela combinação de dois ou mais destes fatores.

Os simuladores de tráfego permitem a realização de ensaios acelerados de pavimentos em condições de contorno mais próximas das que realmente são submetidos os

pavimentos em serviço e que os simuladores podem ser empregados para diversos fins, tais como:

- Avaliar o pavimento já existente para níveis de tráfego elevado;
- Avaliar o processo de estabilização e ou uso de geossintéticos em camadas de subleito;
- Permitir o emprego de novos materiais e diferentes estruturas;
- Determinar o processo de deterioração dos pavimentos;
- Avaliar o efeito de diferentes tipos de eixos, carga e pressão dos pneus;
- Investigar os efeitos ambientais;
- Determinar a vida remanescente do pavimento.

Além disto, o uso do simulador de tráfego permite ao projetista definir curvas de desempenho, funcional e estrutural, auxiliando no sistema de gerenciamento.

METCALF (1996) descreve que o primeiro simulador de tráfego foi instalado em Detroit, em 1909, chamado de *Paving Determinator*, seguido pela pista circular do *British National Physical Laboratory*, em 1912, que originalmente empregava rodas metálicas, tendo sido substituído por rodas de borracha.

VALE (2008) relata que em 1919, na Virginia, foi construída uma pista circular submetida ao tráfego de um caminhão, até meados da década de 1930 e que no final dos testes permitiu grandes avanços no dimensionamento de pavimentos de concreto.

Como já comentado em 1920, em Illinois, teve início a *Bates Road Test*, a primeira pista submetida ao tráfego controlado com cargas que variavam de 1 a 6 tf por eixo, com 68 segmentos de um total de 4 km. Este estudo permitiu avaliar diversos materiais, tais como blocos intertravados, misturas asfálticas e concreto de cimento Portland.

No início da década de 1920 outros estudos foram realizados com pavimentos de concreto, por exemplo, o de Pittsburg, Califórnia realizado entre 1920 a 1923. Segundo METCALF (1996) o primeiro experimento de âmbito nacional dos EUA foi realizado entre 1944 e 1954, denominado *Hybla Valley Non Rigid Pavement*, que constatou as

deflexões no pavimento quando carregadas em uma pista oval. Outro estudo envolvendo pavimentos de concreto ocorreu na *Road Test One Maryland*, em 1949, com 1,8 km de extensão, permitiu aos pesquisadores avançar na relação entre o incremento nas cargas e o bombeamento observado no pavimento.

Várias pesquisas envolvendo simuladores de tráfego vêm sendo desenvolvidas no mundo todo e submetidos a ensaios acelerados de verdadeira grandeza. Estudos acelerados com o uso de simuladores de tráfego de verdadeira grandeza podem ser uma ferramenta muito importante na tomada de decisão de projetos novos e de restauração, permitindo definir curvas de desempenho. Simuladores de tráfego têm sido desenvolvidos em vários países do mundo, adaptados as suas necessidades e interesses. A seguir estão descritos alguns dos países que usam simuladores de tráfego, como: África do Sul, Alemanha, Austrália, Brasil, China, Coréia do Sul, Costa Rica, Dinamarca, Espanha, EUA, Finlândia, França, Holanda, Japão, Nova Zelândia, Reino Unido, Roménia, Suécia, Suíça, Tchecoslováquia.

2.4.1 Simulador de Tráfego Circular do IPR/DNER

Muitos estudos já foram realizados com a utilização de simuladores de tráfego para ensaios acelerados em todo o mundo, principalmente na África do Sul, Europa, América do Norte e no Brasil. Atualmente no Brasil existem quatro tipos de simuladores de médio e grande porte, sendo que o simulador da UFC até o momento não realizou nenhum estudo técnico publicado.

A construção da pista experimental do IPR / DNER com base em um simulador circular foi a primeira realizada no Brasil. Na década de 1970 pesquisadores do IPR analisaram diferentes tipos de pistas experimentais e simuladores de tráfego existentes à época no mundo. Na ocasião foram verificadas vantagens e desvantagens através de detalhes de projeto, fotografias, publicações e visitas nos Estados Unidos, Inglaterra, Portugal e França. Segundo SILVA (2001) pistas experimentais circulares dos Estados Unidos, Inglaterra, Checoslováquia, Argentina, México e Hungria ajudaram o IPR / DNER a optar pela construção de uma pista experimental circular, do tipo carrossel, semelhante à existente na *Washington State University* (WSU), na cidade de Pulmann, Estado de Washington.

O simulador de tráfego circular do IPR, como é conhecido, teve início a sua construção em 1975 e foi instalado no Centro Rodoviário em Parada de Lucas – km 163 da Rodovia Presidente Dutra, no Rio de Janeiro, conforme observado na Figura 5. Após o término da construção da pista circular experimental em 1979, iniciou-se um programa de pesquisa onde foram realizados vários estudos no simulador de tráfego circular, tais como: comportamento de revestimentos com TSD e CBUQ entre 1982 a 1983, comportamento de CBUQ com diferentes espessuras no ano de 1991, estudo sobre concreto rolado em 1992, estudo sobre concreto rolado para tráfego pesado em 1993, estudo do reforço de concreto de cimento Portland (Whitetopping) realizados entre 1997 a 1998 e um estudo comparativo entre dois tipos de ligantes asfálticos, um convencional do Brasil CAP 40 e um ligante asfáltico Chileno tipo Multigrade realizado entre os anos de 2002 e 2003. Outros estudos foram realizados com o uso do simulador circular do IPR, como: escória, que pode ser visto no relatório técnico do IPR.



Figura 5- Vista superior da pista circular experimental do IPR / DNER (SILVA, 2001).

2.4.2 Simulador de Tráfego da UFRGS - DAER/RS

O segundo simulador de tráfego da UFRGS Departamento Autônomo de Estradas e Rodagem do Rio Grande do Sul (DAER/RS) foi construído entre 1992 e 1994. A motivação inicial para sua construção era conhecer o comportamento estrutural de camadas de basalto alterado quando empregado em rodovias de baixo volume de

tráfego. Essa pesquisa foi desenvolvida em conjunto com a Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS e o Departamento Autônomo de Estradas e Rodagem do Rio Grande do Sul – DAER/RS. Para o desenvolvimento desse simulador de tráfego os responsáveis estudaram as principais características de simuladores em operação à época a nível mundial. A equipe da UFRGS e do DAER/RS optaram por um simulador de tamanho médio, porém com o objetivo de reproduzir o mais real possível o efeito do tráfego sobre uma estrutura de pavimento.

O simulador da UFRGS DAER/RS é semelhante ao *Accelerated Loading Facility* (ALF), norte americano. Segundo CERATTI *et al*. (2000) o projeto foi desenvolvido pelo grupo de projeto mecânico e avaliação industrial do departamento de engenharia mecânica da UFRGS, conforme observado na Figura 6.



Figura 6- Simulador de tráfego da UFRGS DAER/RS (Foto: Jorge Ceratti)

A primeira pesquisa realizada com a utilização do Simulador de Tráfego da UFRGS DAER/RS, realizada por NUÑEZ (1997) teve como objetivo analisar a capacidade do basalto alterado como material para rodovias de baixo volume de tráfego no Estado do Rio Grande do Sul. Segundo o autor o desempenho de pavimentos com camadas de basalto alterado e avaliados nas pistas experimentais foi satisfatório, possibilitando a indicação do emprego do material para pavimentação extensiva de rodovias coletoras, com garantia de boa qualidade técnica e notável economia.

Em 1999 a UFRGS, o DAER/RS e a empresa Ober S.A., desenvolveram um estudo para comparar o processo de reflexão de trincas em camadas asfálticas executadas sobre pavimentos antigos trincados, com o uso do simulador de tráfego da UFRGS DAER/RS. Segundo VIEIRA (2000) foi construído um trecho experimental com revestimento asfáltico onde foi realizado trincas com o uso de uma serra circular com o objetivo de simular trincas de fadiga. O trecho foi dividido em três segmentos sendo que em dois segmentos foram aplicadas geotêxteis com características diferentes como camada intermediária e no terceiro segmento o reforço foi executado sobre a camada trincada.

VIEIRA (2000) constatou que a inclusão do geotêxtil não tecido agiu como elemento retardador na propagação das trincas por fadiga e como membrana impermeável. E que a utilização dessa tecnologia pode se refletir em uma economia inicial com a redução da camada asfáltica de reforço ou até ao longo do tempo com o aumento da vida útil de projeto.

GONÇALVES (2002) realizou um estudo com o uso do simulador de tráfego da UFRGS DAER/RS, onde o autor instrumentou seis segmentos experimentais com revestimentos constituídos por misturas de concreto asfáltico convencional e modificados por polímeros. Porém destes seis segmentos apenas dois foram submetidos aos ensaios acelerados. Estes segmentos simulados foram monitorados com medidores de tensões e deformações, instalados em diferentes pontos e serviram para analisar o processo do cálculo das tensões e deformações em estruturas de pavimentos flexíveis.

Outro estudo realizado nos segmentos experimentais construídos por GONÇALVES (2002) foi o de CARDOSO (2004) que comparou o comportamento mecânico de uma mistura asfáltica convencional e uma modificada com polímero (3% SBS). Foram moldados corpos de prova em laboratório e extraídos corpos de prova de segmentos estudados por GONÇALVES (2002). Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios mecânicos para determinação do MR, RT, Fadiga e deformação permanente. Os resultados obtidos indicaram que a relação MR / RT de campo foram superiores aos resultados obtidos de corpos de prova moldados em laboratório, verificou-se que a RT das misturas extraídas de campo apresentaram resultados bem inferiores aos obtidos em

laboratório devido ao baixo grau de compactação de campo, conduzindo a valores de vazios diferentes de projeto.

CARDOSO (2004) descreve que o desempenho das misturas estudadas em função dos baixos valores de RT, alto índice de vazios e da provável oxidação dos ligantes, sob condições, climáticas e do tráfego, geraram a evolução prematura dos mecanismos de degradação das misturas como o trincamento e o afundamento de trilha de roda.

AZAMBUJA (2004) realizou um estudo sobre o desempenho de uma estrutura de pavimentos recapeado com TSD através de ensaios acelerados com a utilização do simulador de tráfego da UFRGS / DAER/RS, em escala real. Para este estudo foi utilizado um trecho experimental construído por GONÇALVES (2002) onde foram executadas quatro áreas de trincamento artificial, com o uso de uma serra circular, semelhante ao padrão de trincas causadas por fadiga. O estudo também foi monitorado com células de carga, strain-gages e sensores de temperatura.

Foi utilizada para este estudo uma carga total de 100 kN com a finalidade de acelerar ainda mais o processo de degradação do pavimento. Os testes com o simulador de tráfego foram realizados entre abril e junho de 2003, totalizando $1,2 \times 10^5$ ciclos de carga.

AZAMBUJA (2004) descreve que as deflexões máximas apresentaram uma evolução após $7,0 \times 10^4$ números de ciclos de carga e o fenômeno da reflexão de trincas foram observados até os primeiros $3,0 \times 10^4$ números de ciclos de carga aproximadamente. Após os $4,0 \times 10^4$ números de ciclos de carga as velocidades de trincamento em áreas trincadas e não trincadas previamente começaram a apresentar o mesmo grau de trincamento, o que foi deduzido que o trincamento foi causado pela fadiga de todo o revestimento asfáltico.

CRUZ (2005) apresenta os resultados de um estudo comparativo em relação ao desempenho de dois revestimentos asfálticos submetidos aos ensaios acelerados com o uso do simulador de tráfego da UFRGS, a autora comparou o desempenho de uma mistura asfáltica convencional com uma mistura asfáltica modificada com o uso de borracha. Segundo CRUZ (2005) os resultados obtidos através dos ensaios acelerados

para as duas soluções, apresentaram para o segmento de mistura asfáltica convencional um número N de aproximadamente 1,0 x 10^5 e para o segmento de mistura asfáltica modificada com o uso de borracha um número N aproximadamente 1,2 x 10^5, com uma carga no eixo de 100 kN em ambos os segmentos. A autora concluiu o estudo comentando que o segmento com mistura asfáltica convencional apresentou elevado grau de trincamento e no segmento da mistura asfáltica modificada com borracha após a solicitação do número N observou-se apenas uma trinca.

Na sequência dos estudos iniciados por CRUZ (2005) deu – se o início aos estudos de WICKBOLDT (2005) que avaliou a eficiência do recapeamento asfáltico construído com uma mistura asfáltica modificada com o uso de borracha pelo do processo via úmida, no retardamento de reflexões de trinca através de ensaios acelerados com o uso do simulador de tráfego da UFRGS. A estrutura do pavimento avaliado neste estudo era constituída por 50 cm de solo argiloso arenoso de comportamento laterítico, 30 cm de base de Brita Graduada, 4 cm de revestimento asfáltico trincado e 5 cm de revestimento asfáltico modificado com borracha.

Segundo WICKBOLDT (2005) o número N obtido no final dos ensaios acelerados foi de 5,1 x 10^5 aproximadamente e a carga no eixo de 100 kN. Foram monitoradas as condições estruturais do pavimento com medidas de deflexão, dados de instrumentação para análise das tensões e deformações, avaliação do afundamento de trilha de roda além dos levantamentos de macro e microtextura.

A autora constatou que o uso da mistura asfáltica modificada com borracha retardou em até cinco vezes o surgimento de trincas que ocorreu no revestimento asfáltico com borracha após 3,4 x 10^5 solicitações, enquanto que no revestimento asfáltico convencional estudado por CRUZ (2005) tal nível de trincamento ocorreu com 6,6 x 10^4 solicitações, com o mesmo carregamento no eixo.

WICKBOLDT (2005) conclui que os afundamentos de trilha de roda observados no revestimento asfáltico com o uso de borracha avaliado no seu estudo e comparado com o revestimento asfáltico convencional realizado por CRUZ (2005) apresentaram evoluções iniciais semelhantes, porém após 3,7 x 10^4 solicitações de carga a taxa de deformabilidade plástica no revestimento convencional tornou-se maior. O afundamento

de trilha de roda no revestimento convencional de 7 mm foi observado com 1,0 x 10^5 solicitações de carga aproximadamente e no revestimento asfáltico modificado com borracha os 7 mm de afundamento foram obtidos com aproximadamente 2,6 x 10^5 solicitações de carga.

ROHDE (2007) realizou um estudo que foi dividido em duas etapas, laboratorial e campo. Na primeira etapa a autora comparou o desempenho mecânico de diferentes misturas asfálticas com o emprego de ligantes modificados, tais como: RASF, CAP 20 modificado por 7,8% de polímero Etileno Acetato de Vinila (EVA), CAP 30/45 modificado por 1,2% de acido polifosfórico denominado PPA 30/45 e um ligante convencional do tipo CAP 50/70 como referência. Na segunda etapa a autora avaliou o desempenho de uma mistura asfáltica de elevado módulo empregado em camadas estruturais de pavimentos, conhecida na Franca como *Enrobé à Module Élevé* (EME).

ROHDE (2007) acompanhou a construção dos trechos experimentais construídos na área de testes acelerados do laboratório de pavimentos da UFRGS. O primeiro trecho experimental foi construído com 12 cm de EME e o segundo trecho experimental com 8 cm de espessura e sobre a camada de elevado módulo foi aplicado uma camada de rolamento em microrrevestimento à frio. As demais camadas dos trechos experimentais são compostas por 60 cm de subleito de solo argiloso de comportamento laterítico, 16 cm de sub-base composta de rachão e 12 cm de base de brita graduada. Porém somente o trecho experimental com de 8 cm de elevado módulo foi submetido aos ensaios acelerados com o uso do simulador de tráfego da UFRGS.

Segundo as conclusões de ROHDE (2007) os ligantes experimentais estudados, não se enquadravam nas especificações francesas para misturas de elevado módulo. Os critérios de avaliação do trecho experimental submetido aos ensaios acelerados foram: levantamentos deflectométricos e avaliações de deformação permanente o que se concluiu que o emprego de mistura asfáltica de módulo elevado em camada estrutural de pavimento, permitirá a construção de estruturas de melhor qualidade técnica, podendo contribuir para o aumento da vida útil das rodovias.

JOHNSTON, et al (2015) descreve que a UFRGS e o DAER / RS vem realizando estudos desde 1992 com o objetivo de avaliar a possibilidade de utilizar basalto alterado como uma das alternativas econômicas para rodovias de baixo volume de tráfego.

Um estudo comparando o desempenho de um pavimento de baio volume de tráfego com o resultado obtido de testes acelerados com o uso do HVS foi realizado com o objetivo de compreender o comportamento mecânico e obter um critério de projeto para pavimentos com base e ou sub-base composta por basalto alterado.

Dois segmentos experimentais construídos na ERS – 132 foram avaliados durante 10 anos desde sua implantação e comparados com o desempenho do segmento submetido aos ensaios acelerados.

Os autores observaram que o desempenho dos segmentos experimentais submetidos ao tráfego comercial apresentou um melhor desempenho em relação ao segmento submetido aos ensaios acelerados com o uso do HVS da UFRGS.

2.4.3 Simulador de Tráfego Móvel - HVS

O simulador linear de tráfego do tipo *Heavy Vehicle Simulator* - HVS, deslocável sobre rodas, foi desenvolvido e fabricado pela empresa Cifali, com a colaboração da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, a partir da experiência desta com aproximadamente dez anos na operação do Simulador de Tráfego UFRGS/DAER.

O simulador de tráfego HVS fabricado no Brasil tem como principal característica sua mobilidade, podendo se deslocar por rodovias se necessário, para realização de testes e estudos em pistas reais de rodovias, vias urbanas ou pistas de aeroportos, através de reboque conforme mostrado na Figura 7, o HVS é operado por um sistema hidráulico e o carregamento pode ser aplicado com roda simples ou dupla. Esta característica é única, em simuladores de tráfego semelhantes existentes no Brasil e de grande importância, considerando-se as dimensões de nosso país e as distâncias a serem percorridas para se alcançar locais de características distintas.



Figura 7- Simulador de tráfego móvel – Heavy Vehicle Simulator – HVS

O primeiro simulador de tráfego móvel da América Latina foi desenvolvido e patenteado pela Cifali no ano de 2002, e hoje pertence à empresa Simular que possui 2 unidades deste. A primeira unidade foi utilizada no início de uma pesquisa do DAER/RS e no estudo realizado na concessionária de rodovias AUTOVIAS em São Paulo no ano de 2004. A segunda unidade foi utilizada na etapa final dos estudos realizados pelo DAER/RS.

O estudo realizado em parceria entre o DAER/RS, Simular, Brasília Guaíba Obras Públicas e Greca Asfaltos na RS/122 teve início em agosto de 2003, com três segmentos experimentais contíguos de 300 metros de extensão, sendo dois com revestimento de concreto asfáltico convencional CAP 20 e o outro asfalto modificado com borracha. O objetivo dos testes foi comparar, através da simulação acelerada em escala real, o comportamento destes dois diferentes tipos de ligantes, apontando a melhor e mais econômica solução para esta aplicação específica. Na Tabela 3 estão apresentadas as principais características da sua configuração.

Tabela 3- Características do simulador de tráfego móvel - HVS

Comprimento total do equipamento, m	20,7
Largura total, m	3,1
Altura máxima, m	4,4
Peso de Transporte (sem lastro), t	32
Peso total (com lastro), t	58,5
Capacidade do reservatório água x 3, l	26.550
Velocidade máxima do trem de carga, km / h	7,0
Comprimento máximo de simulação, m	11,0
Comprimento útil de simulação, m	5,0
Largura máxima de simulação, m	1,0
Número de ciclos unidirecional, p / h	350
Número de ciclos bidirecional, p / h	700
Carga máxima de aplicação no semi-eixo, tf	8,6
Configurações de pneus	900; 1000; super single
Tensão de comando, V	220 ou 380
Frequência, Hz	50/60

A RS/122 é a principal rodovia estadual de ligação entre a região metropolitana de Porto Alegre e o Vale do Sapateiro com o Polo Metal - mecânico de Caxias do Sul. O volume de tráfego é intenso, com uma média de 15 mil veículos por dia, sendo 35% deste total de veículos comerciais. No ano de 2004 a RS/122 teve inicio a sua duplicação e restauração, conforme descrito pelo (DAER/RS, 2004).

Foram realizados os testes com o simulador de tráfego móvel do tipo HVS, que permitiu à equipe de técnicos responsáveis pela pesquisa obter conclusões importantes sobre o desempenho funcional do pavimento testado.

Dentre as conclusões feitas por BIANCHINI *et al.* (2004), está que o primeiro trecho experimental de CBUQ convencional apresentou um excelente desempenho, e a estrutura do pavimento existente está muito bem consolidada o que permitiu realizar testes acelerados avaliando especificamente o revestimento. Após aplicação de 2,15 x 10^6 ciclos de carga, aproximadamente, com variação de cargas entre 4,1 a 9,1tf no semi-eixo em movimento bidirecional o autor relata que com 1,3 x 10^6 ciclos de carga, surgiu a primeira trinca que apesar do aumento da carga não evoluiu. Foi utilizado o fator de equivalência da USACE para determinar o número de eixo padrão que foi de 1,8 x 10^8.

O segundo trecho experimental de AMB foi encerrado com 1,35 x 10^6. Com variação de cargas entre 4,1 a 9,1tf no semi-eixo, porém não houve uma sequencia idêntica a empregada no primeiro segmento convencional. Segundo o autor, o início das trincas surgiu com 7,4 x 10^5, e área trincada correspondente a 50% da área da trilha de roda e apresentou um número de eixo padrão de 8,0 x 10^7, definido em função do fator de equivalência da USACE.

O terceiro trecho experimental de CBUQ convencional apresentou um comportamento bastante diferente em relação aos outros dois segmentos, o trecho foi encerrado com 1,1 x 10^6, número de ciclos aproximadamente, o trecho apresentou deformação permanente na camada asfáltica de 16 mm ao final dos ensaios acelerados.

Outro trabalho realizado com o uso do HVS foi à rodovia Anhanguera, no Estado de São Paulo, localizado na Rodovia SP – 330, sentido São Paulo – Ribeirão Preto, de responsabilidade da Concessionária Autovias, teve quatro seções teste construídas. De acordo com o relatório da Autovias, o pavimento original é constituído por revestimento asfáltico com 15cm de espessura, base de solo cimento com 20 cm de espessura, sub – base com solo estabilizado granulométricamente com 20 cm de espessura e o subleito composto por material silto – argiloso (AUTOVIAS, 2004).

O objetivo deste estudo foi determinar o desempenho e a durabilidade das novas tecnologias e materiais de pavimentação, através do uso do simulador em um curto espaço de tempo. As seções de reabilitação foram construídas no ano de 2003 isoladamente ou pela associação das seguintes camadas:

- Tratamento Superficial Duplo com Polímero;
- Tratamento Superficial Duplo e Micro Revestimento a Frio com Polímero;
- Tratamento Superficial Simples e Micro Revestimento a Frio com Polímero;
- Tratamento Superficial Simples.

A pesquisa com Simulador de Tráfego permitiu à AUTOVIAS (2004) concluir que a solução de reabilitação dos pavimentos da Via Anhanguera com o Tratamento Superficial Simples seguida de Micro Revestimento a Frio com Polímero é adequada para o tráfego futuro do local. Entretanto, os padrões indesejáveis de segurança expressos pela Microtextura (Valor de Resistência a Derrapagem –VRD, inferior a 47) preconizados pela Agencia Reguladora de Transportes do Estado de São Paulo (ARTESP) se mostrou inadequada com níveis de solicitação inferiores a prevista no projeto, porém a Macrotextura apresentou resultados superiores a 1,2 mm mostrando se excessivamente rugoso desde a sua execução.

Segundo VALE (2008) esses resultados levaram a concessionaria a buscar novas alternativas para a restauração dos pavimentos. Na época uma das soluções adotadas pela concessionária é a aplicação de 25 mm de *Stone Mastic Asphalt* (SMA).

FRITZEN (2005) realizou um estudo com o uso do simulador de tráfego móvel na rodovia BR-116/RJ em quatro trechos experimentais construídos com diferentes processos. A concessionária Rio Teresópolis – CRT que administra a via apresentava na época, um trecho com 34 km de extensão em péssimo estado de conservação com elevado grau de trincamento na faixa da direita em ambos os sentidos, de um total de 183 km de extensão, aproximadamente de gestão. O revestimento asfáltico existente apresentava 10 cm de espessura, 15 cm de macadame betuminoso, 15 cm de macadame hidráulico, 20 cm de reforço do subleito e subleito. Os trechos experimentais foram contemplados com 50 m de comprimento e 3,6 m de largura, cada, totalizando 200 m de extensão.

Foram realizados estudos técnicos no local, em nível funcional e estrutural, e a construção dos trechos se deu em um local onde apresentava as mesmas condições estruturais para os quatro trechos. Foram abertos poços de sondagens e o material

constituinte de cada camada foi submetido aos ensaios mecânicos em laboratório. Também foram coletados materiais da Pedreira Holcim para as dosagens das misturas asfálticas. FRITZEN (2005) descreve as soluções de cada trecho experimental construído no referido estudo:

- Primeiro trecho experimental: A primeira solução foi baseada no Plano de Exploração da Rodovia (PER), que apresentava como alternativa de fresagem de 5 cm do revestimento antigo e uma reposição na mesma proporção de revestimento asfáltico novo. O trecho experimental foi construído com 6 cm de espessura de CBUQ faixa B do DNIT, CAP 30/45 e possui 50 m de extensão por 3,6 m de largura, desses 50 m de extensão apenas 11 m centrais do trecho experimental foram submetidos aos ensaios acelerados com o uso do simulador de tráfego com carga de 6,6 kN no semi-eixo aplicados no sentido do tráfego – mono direcional;

- Segundo Trecho Experimental: A segunda solução foi sugerida pela equipe de técnicos consultores convidados que propuseram o uso de uma geogrelha como anti reflexão de trincas. O trecho experimental foi construído com 7 cm de CBUQ sendo 1 cm de reperfilagem sobre a camada fresada remanescente, a aplicação da geogrelha tipo Hatelit C e sobre a geogrelha 6 cm de CBUQ faixa B do DNIT, CAP 30/45;

- Terceiro Trecho Experimental: A terceira solução também foi sugerida pela equipe de técnicos consultores convidados da Petrobras que propuseram o uso de uma mistura asfáltica descontinua faixa Caltrans com o uso de Asfalto Modificado de Borracha (AMB). O trecho experimental foi construído com 6 cm de CBUQ sobre a camada fresada com o uso de AMB, projetada pela BR Distribuidora S.A.;

- Quarto Trecho Experimental: a quarta solução foi adotada pela equipe técnica da Concessionária, uma vez que a mesma estava utilizando essa solução na reconstrução de locais de acesso para a rodovia. Esse trecho experimental se difere dos demais, pois a solução adotada nos três primeiros segmentos apresenta uma característica de pavimento flexível e este uma característica de

pavimento semirrígido, devido a substituição da camada de macadame betuminoso por uma camada de concreto compactado com rolo e sobre esta camada mais 7 cm de CBUQ faixa B do DNIT, CAP 30/45.

Todos os trechos experimentais foram submetidos aos ensaios acelerados com carga de 6,6 kN no semi-eixo, ambos com variação lateral do trem de carga e o carregamento realizado no sentido da via – mono direcional. Foi criado um cronograma de ensaios que eram realizados periodicamente em todos os trechos, tais como: Aferição do trem de carga com uma balança móvel no início de cada trecho experimental, levantamentos deflectométricos com a viga Benkelman Eletrônica da COPPE, afundamento de trilha de roda, porcentagem de área trincada, medidas da temperatura do ar, ensaio de permeabilidade e micro e macro textura com o uso do Pendulo Britânico e o ensaio de mancha de areia, respectivamente. Todos esses ensaios eram associados ao número de ciclos no momento (FRITZEN, 2005).

O estudo permitiu concluir que as três primeiras soluções testadas, submetida ao uso do simulador de tráfego móvel não apresentaram um bom desempenho funcional e que segundo o autor as soluções testadas naquelas condições apresentariam uma área trincada de 40% (critério adotado pela equipe para finalizar os ensaios acelerados nas seções experimentais) em apenas 36 meses após a abertura do tráfego comercial, o que foi constatado por FRITZEN *et al*. (2007). Já a quarta solução do trecho semirrígido não foi concluída devido a questões financeiras o que levou seu encerramento antes na presença de trincas. Também no tempo do tráfego comercial de 36 meses não houve a presença de trincas neste segmento.

A empresa CONSTRUCAP realizou um estudo com o simulador de tráfego móvel na BR - 101/SC, no ano de 2006, onde foram testados dois segmentos com a mesma característica estrutural, tendo como diferencial somente o traço do concreto asfáltico utilizado na camada de revestimento.

Os trechos experimentais são constituídos, segundo relatório técnico da Dynatest (2006) responsável pela realização dos ensaios e monitoramento do desempenho dos trechos experimentais por:

- Revestimento em concreto asfáltico com 15 cm de espessura;
- Base brita graduada simples com 18 cm de espessura;
- Sub-base de macadame seco com 18 cm de espessura;
- Subleito areno – siltoso.

No relatório apresentado pela Dynatest não estão detalhadas as características das misturas asfálticas e as propriedades estruturais dos trechos experimentais estudados.

De acordo com as conclusões da empresa responsável pela realização dos ensaios e monitoramento do desempenho do pavimento, os trechos 1 e 2 não atenderam ao número N previsto no projeto de 10 anos, apresentando trincas e deformações permanentes já nos primeiros dois anos de solicitação ao tráfego.

A concessionária OHL Brasil em 2004 realizou um estudo com o uso do simulador de tráfego móvel sobre um trecho experimental de reciclagem a frio in situ, com o emprego de emulsão rejuvenescedora, de 8 cm de espessura, e sobreposta a essa camada duas camadas de microrrevestimento entre os kms 119,6 a 120,6, localizada entre os municípios de Limeira e Piracicaba, SP-147. O objetivo foi verificar a adequação desta técnica na restauração de pavimentos e o seu desempenho sob a ação do tráfego (PREUSSLER *et al.*, 2005).

Os ensaios acelerados tiveram início seis meses após a execução da reciclagem, período que foi considerado adequado para a cura do material executado a frio in situ. Foram utilizadas variações de carga de 5,3 a 7,38 kN, durante trinta dias uteis de ensaios acelerados, totalizando $5{,}35 \times 10^5$ ciclos o que reproduziu o equivalente a $2{,}36 \times 10^7$ ciclos do eixo padrão com base no fator de equivalência da USACE.

O número N obtido corresponde ao tráfego correspondente a 8 anos do tráfego comercial do local, de acordo com PREUSSLER *et al*. (2005). Como conclusão os autores verificaram que ao processo de reciclagem a frio in situ do revestimento asfáltico a adição da emulsão rejuvenescedora mostrou-se tecnicamente viável.

A concessionária Nova Dutra juntamente com a COPPE/UFRJ e a Dynatest, realizaram um estudo de laboratório e campo com o objetivo de avaliar o comportamento de diversos tipos de revestimentos asfálticos projetados através do método Marshall e *Superior Performance Asphalt Pavements* (SUPERPAVE) submetidos aos ensaios acelerados com o uso do simulador de tráfego móvel.

Na primeira fase deste estudo foram realizadas dosagens de misturas asfálticas com o uso de diferentes ligantes asfálticos e metodologias de dosagem Marshall e Superpave, conforme descritos a seguir:

- CBUQ – Faixa C do DNIT – CAP 50/70 – Método Marshall 75 golpes;
- CBUQ – Faixa C do DNIT – CAP 50/70 – Método Superpave 125 giros;
- CBUQ – Faixa C do DNIT – CAP 30/45 – Método Marshall 75 golpes;
- CBUQ – Faixa C do DNIT – CAP modificado com polímero – SBS – Método Marshall 75 golpes;
- CBUQ – Faixa C do DNIT – CAP modificado com borracha – Método Marshall 75 golpes.

Os agregados utilizados neste estudo foram oriundos da pedreira Jambeiro que foram devidamente caracterizados de acordo com as normas vigentes no Brasil. Após as dosagens definidas, foram moldados corpos de prova para os ensaios mecânicos conforme descritos a seguir:

- Deformação permanente com o simulador de tráfego tipo LCPC, com placas extraídas de campo;
- Determinação da curva de fadiga;
- Resistência à Tração e;
- Módulo de Resiliência.

A segunda fase da pesquisa referiu-se aos estudos do desempenho das misturas asfálticas *in situ* submetidas aos ensaios acelerados com o uso do simulador de tráfego móvel. O local escolhido para a construção dos trechos experimentais é uma alça de

acesso para a SP/065 e ou fazem opção em continuar pela BR/116 sentido Rio de Janeiro / São Paulo. A estrutura do pavimento consiste nos seguintes materiais:

- 12 cm de revestimento de concreto asfáltico – CBUQ;
- 20 cm de Brita Graduada Tratada com Cimento – BGTC;
- 17 cm de Brita Graduada Simples – BGS;
- 21 cm de reforço do subleito;
- 14 cm de reforço do subleito com Rachão;
- Subleito.

A execução dos trechos experimentais consistiu na fresagem de 4 cm do revestimento asfáltico existente e a recomposição de 4 cm de CBUQ novo. A construção e a fiscalização dos trechos experimentais foram acompanhadas pelo Centro de Pesquisas Rodoviárias da Nova Dutra. Foi criado um procedimento para a realização dos ensaios acelerados para os cinco trechos experimentais submetidos ao simulador de tráfego móvel conforme descrito a seguir:

- Carregamento bidirecional do trem de carga;
- Deslocamento transversal de 15 cm;
- Velocidade do semi-eixo de 10 km/h, aproximadamente;
- Carga utilizada no semi-eixo de roda dupla de 7,9 kN, aferidas com a balança eletrônica da Concessionária Nova Dutra;
- Simulação de chuva através do espargimento de 500 litros de água durante uma hora por dia;
- Medidas de temperatura do Ar e Pavimento;
- Monitoramento periódico das condições estruturais e funcionais do pavimento, tais como: levantamentos deflectométricos, afundamentos de trilha de roda, macro e microtextura, através da Mancha de Areia e do Pêndulo Britânico, respectivamente.

O fim dos ensaios acelerados se deu entre $2,4 \times 10^5$ a $3,2 \times 10^5$ aproximadamente, sentido bidirecional com carga aplicada de 7,9 kN no semi-eixo para todos os trechos

experimentais, uma vez que o objetivo deste estudo era comparar o desempenho das diferentes misturas asfálticas implantadas em campo.

Este estudo permitiu a conclusão das cinco misturas asfálticas analisadas em laboratório bem como a comparação do desempenho em campo, conforme apresentado na Tabela 4.

Concluiu-se que houve uma variação no teor de ligante, mesmo utilizando a mesma composição granulométrica. O desempenho das misturas asfálticas submetidas aos ensaios de deformação permanente apresentaram comportamentos distintos principalmente se comparados a diferentes tipos de ligante, o que mostrou que a mistura asfáltica confeccionada com asfalto modificado com polímero – SBS apresentou a menor deformação permanente após 30.000 ciclos a 60ºC conforme especificação (NF P 98-253-1 AFNOR, 1991a), seguida da mistura asfáltica modificada com borracha.

Entre as misturas asfálticas convencionais observou-se que a mistura asfáltica dosada pelo método Superpave apresentou uma menor deformação permanente em relação a outras duas misturas asfálticas dosadas pelo método Marshall.

O trecho com asfalto borracha apresentou em campo um Afundamento de Trilha de Roda (ATR) menor em relação aos demais, porém está relacionado ao número de aplicações a que foi submetido menor em relação aos demais.

Tabela 4- Resultados dos trechos experimentais submetidos aos ensaios acelerados BR/116 – NOVA DUTRA (2007)

Seção	Tipo de Ligante	Método	Número de Ciclos	N equivalente USACE	Área Trincada, %	Afundamento Trilha de Roda, mm.
S 1	CAP 50/70	Marshall	$3{,}26 \times 10^5$	$1{,}91 \times 10^7$	8	1,9
S 2	CAP 50/70	Superpave	$2{,}86 \times 10^5$	$1{,}58 \times 10^7$	35	2,2
S 3	CAP 30/45	Marshall	$2{,}86 \times 10^5$	$1{,}65 \times 10^7$	0	1,6
S 4	CAP POLÍMERO	Marshall	$2{,}83 \times 10^5$	$1{,}65 \times 10^7$	7	6,5
S 5	CAP BORRACHA	Marshall	$2{,}41 \times 10^5$	$5{,}77 \times 10^6$	0	0,9

CERATTI (2007) coordenou um estudo na BR – 290/RS: projeto de pesquisa da CONCEPA e o Laboratório de Pavimentos da UFRGS – Laboratório de Pavimentação (LAPAV). O objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho de uma estrutura de pavimentos real da rodovia BR – 290/RS submetida à aplicação de cargas do tráfego impostas em verdadeira grandeza com o uso de um simulador de tráfego móvel linear.

O trecho experimental estava localiza na BR – 290/RS entre os municípios de Osório e Porto Alegre, rodovia conhecida como *Free Way*, inaugurada em 1973 com o projeto grandioso de ser a primeira autoestrada brasileira, construída para ligar o litoral gaúcho à Capital do estado.

Segundo CERATTI (2007) o trecho experimental estava localizado no km 5 da rodovia, pista sentido Osório – Porto Alegre na faixa em que há a estrutura de ampliação (3ª faixa). Construída no ano de 2004 a rodovia já sofreu a ação do tráfego comercial o que não impossibilita definir correlações entre a ação ocasionada pelo tráfego real e a simulada com o uso do simulador de tráfego.

A estrutura do pavimento contemplou uma camada de revestimento de 8 cm de CBUQ, 15 cm de base de brita graduada, 30 cm de sub-base de material primário e 60 cm reforço subleito de areia e subleito. Após termino dos ensaios acelerados no primeiro segmento realizado na 3ª faixa de rolamento o simulador de tráfego foi posicionado no acostamento da rodovia, que apresenta a mesma condição estrutural da 3ª faixa de rolamento, porém sem a ação do tráfego praticamente, somente sob a ação do clima.

Essa decisão permitiu aos técnicos acompanhar a evolução completa da deterioração do pavimento, garantindo, no primeiro segmento a degradação final do pavimento e com o segundo segmento avaliar o processo inicial da degradação. A carga aplicada neste estudo foi de 8 tf no semi-eixo com inflação dos pneus de 100 psi. Durante a realização dos ensaios acelerados foram realizados levantamentos estruturais e funcionais semanalmente, tais como: levantamentos deflectométricos com o uso da viga Benkelman convencional e eletrônica, porcentagem da área trincada, medidas de afundamento de trilha de roda, medidas de Macrotextura e parâmetros ambientais e pluviométricos, além da extração de corpos de prova para análise mecânica em laboratório.

Segundo CERATTI (2007) concluiu-se que os níveis de degradação, obtidos em 2 meses de ensaios acelerados para cada segmento, foram suficientes para avaliar a condição estrutural do pavimento.

Em 2008, um estudo realizado pela COPPE e o CENPES, envolvendo o simulador de tráfego móvel foi realizado na Cidade Universitária da UFRJ no município do Rio de Janeiro no âmbito do chamado Projeto Fundão. Foram avaliados cinco trechos experimentais com o objetivo de verificar o desempenho de diferentes misturas asfálticas através de ensaios acelerados.

Os trechos experimentais apresentaram características diferentes entre si, sejam através da granulometria, ligantes modificados, metodologias utilizadas, temperatura de usinagem e compactação no caso de misturas asfálticas mornas e ou emulsão modificada no caso de misturas asfáltica a frio Tratamento Superficial Triplo (TST). Foram avaliados cinco trechos experimentais na seguinte sequencia, conforme descritos a seguir:

- Tratamento Superficial Triplo – TST com o uso de emulsão modificada RRE - FLEX, ensaiado no período de janeiro a março de 2008;
- Tratamento Superficial Triplo – TST com o uso de emulsão convencional, ensaiado no período de abril a maio de 2008;
- Mistura asfáltica morna – Trecho 5 com o uso de ligante asfáltico CAP 50/70 com 0,5% de A-SAT, ensaiado no período de julho a agosto de 2008;
- Mistura asfáltica morna – Trecho 4 com o uso de ligante asfáltico CAP 50/70, ensaiado no período de agosto a outubro de 2008;
- Mistura asfáltica morna – Trecho 1 com o uso de ligante asfáltico CAP 50/70, ensaiado no período de outubro a dezembro de 2008.

Foi criado um procedimento para a realização dos ensaios para cada trecho experimental monitorado neste estudo, esse monitoramento periódico avaliava as condições estruturais e funcionais do pavimento com intervalo de um dia dos levantamentos deflectométricos com o uso da viga Benkelman eletrônica da COPPE, nas deformações de trilha de roda, nas medidas de atrito e textura superficial, acompanhamento da

densidade no revestimento submetido ao trem de carga do simulador com o uso do densímetro não nuclear a evolução da porcentagem de área trincada com o uso de um gabarito desenvolvido no LABGEO da COPPE e aleatoriamente o levantamento da irregularidade com o uso do Dipstick. A Figura 8, Figura 9, Figura 10, Figura 11, Figura 12 e Figura 13, mostram alguns procedimentos realizados periodicamente durante os ensaios acelerados.



Figura 8- Aferição do trem de carga com o uso da balança móvel da CRT



Figura 9- Levantamento deflectométrico com o uso da viga Benkelman eletrônica da COPPE



Figura 10- Levantamento de irregularidade com o uso do dipstick



Figura 11- Levantamento de mancha de areia



Figura 12- Gabarito para determinação da porcentagem de área trincada



Figura 13- Área de atuação do trem de carga com o uso do simulador de tráfego

Os trechos experimentais com solução a frio – TST com emulsão convencional e modificada, foram submetidos carregamentos com o trem de carga de 4,1 kN, aplicados no semi-eixo sentido mono direcional. Já os três trechos experimentais de misturas asfálticas mornas o carregamento do trem de carga foi de 5,1 kN no semi-eixo sentido mono direcional, carga superior ao eixo padrão de 8,2 kN no eixo, porém condizentes com a carga legal vigente no país atualmente.

O primeiro trecho experimental submetido aos ensaios acelerados foi o TST - 1 com emulsão modificada, construído na Av. Pedro Calmon em frente ao LABGEO / COPPE. O TST - 1 foi construído sobre o revestimento existente de CBUQ que apresentava elevado grau de trincamento, o trecho possui uma extensão de 53 metros lineares.

Na Tabela 5 estão apresentados os dados da análise granulometria e taxa de emulsão utilizada. Neste trecho TST – 1 o carregamento do trem de prova se deu em um único sentido (mono direcional) no sentido do tráfego, até a obtenção de 50 % de área trincada (critério de finalização dos ensaios). Porém por se tratar do primeiro trecho experimental submetido aos ensaios acelerados foi determinado a continuidade dos

ensaios acelerados porém com carregamento em ambos os sentidos (bi direcional) com a finalidade de avaliar o comportamento do TST em relação a área trincada.

O Projeto e o acompanhamento sistemático da execução dos serviços foram acompanhados pela equipe de técnicos da BR Distribuidora, em especial do Engenheiro Fabrício Mourão.

O segundo trecho experimental TST - 2 com emulsão asfáltica convencional, submetido aos ensaios acelerados, construído na Av. Pedro Calmon na sequencia do TST - 1 também localizado em frente ao LABGEO. O trecho experimental TST – 2, construído nas mesmas condições do primeiro trecho experimental variado somente o tipo de emulsão, com extensão de 51,4 metros lineares. A Tabela 6 apresenta os dados da análise granulométrica e a taxa de emulsão.

Tabela 5- Características da composição granulométrica e taxa de ligante utilizado no primeiro trecho experimental de TST submetido aos ensaios acelerados com o HVS

PROJETO FUNDÃO - SEGMENTOS SIMULADOR

Segmento	Serviço	Estaca	Ext. (m)	Larg. (m)	Área (m2)	Emulsão
(18-BR)	TST	Inicial: E 450+10m Final: E 453	53,0	10,6	561,8	RRE-FLEX (Modificada 1)

Dados da Execução

Data Exec.: 31/07/07

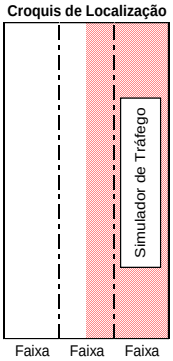
Faixas Executadas:

Faixa Central e Faixa da Direita

Etapas Executivas	Taxas Aplic. (kg/m2)			
	EMA		Agregado	
	Proj.	Exec.	Proj.	Exec.
1ª Cam. - Brita 1	0,70	0,95	20,9	18,78
2ª Cam. - Brita 0	0,90	0,81	8,8	11,75
3ª Cam. - Gran.	0,90	0,86	3,8	4,50
Banho Final	0,80	0,73	-	-
Total	**3,30**	**3,35**	**33,5**	**35,03**

OBS.:
Não foi possível definir a taxa de granilha aplicada. Adotou-se então 4,5kg/m2.

Croquis de Localização



Análise Granulométrica

Peneiras		1ª Camada - Brita 1				2ª Camada - Brita 0				3ª Camada - Granilha			
		Lim. Faixa		%pass.		Lim. Faixa		%pass.		Lim. Faixa		%pass.	
#	mm	mín.	máx.	**Proj.**	**Ensa.**	mín.	máx.	**Proj.**	**Ensa.**	mín.	máx.	**Proj.**	**Ensa.**
1"	25,4	100	100	**100,0**	**100,0**	100	100	**100,0**	**100,0**	100	100	**100,0**	**100,0**
3/4"	19,1	90	100	**92,6**	**95,8**	100	100	**100,0**	**100,0**	100	100	**100,0**	**100,0**
1/2"	12,7	20	45	**28,1**	**36,3**	100	100	**100,0**	**100,0**	100	100	**100,0**	**100,0**
3/8"	9,5	0	10	**7,5**	**12,0**	90	100	**95,0**	**97,2**	100	100	**100,0**	**100,0**
4	4,8	0	5	**2,5**	**2,8**	20	55	**18,0**	**24,0**	100	100	**100,0**	**98,2**
10	2,0	-	-	**-**	**-**	0	10	**2,0**	**2,6**	15	35	**22,2**	**32,1**
40	0,42	-	-	**-**	**-**	-	-	**-**	**-**	0	5	**4,1**	**-**
200	0,07	0	1	**0,8**	**0,6**	0	1	**0,8**	**0,6**	0	1	**0,6**	**1,1**
Pedreira		Sepetiba - Itaguaí/RJ				Sepetiba - Itaguaí/RJ				S.Sebastião - Três Rios/RJ			

OBS.:
Ensaio Brita 1 - Resultado de uma determinação realizada em 04/07/07.
Ensaio Brita 0 - Média de três determinações realizadas em 01/08/07.
Ensaio Granilha - Resultado de uma determinação realizada em 28/06/07.

Notas:
Foi identificado movimentação no TST durante manobra do caminhão aplicador sobre o pavimento, entre as estacas E 452+15m e E 453 - Faixa da direita, ocorrido no dia 07/08/07.

Tabela 6- Características da composição granulométrica e taxa de ligante utilizado no segundo trecho experimental de TST submetido aos ensaios acelerados com o HVS

PROJETO FUNDÃO - SEGMENTOS SIMULADOR

Segmento	Serviço	Estaca	Ext. (m)	Larg. (m)	Área (m2)	Emulsão
(19-BR)	TST	Inicial: E 453 Final: E 455+10m	51,4	10,55	542,27	RRE Comum

Dados da Execução

Data Exec.: 07/08/07

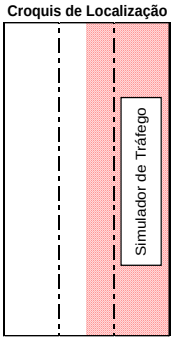
Faixas Executadas:

Faixa Central e Faixa da Direita

Etapas Executivas	Taxas Aplic. (kg/m2)			
	EMA		Agregado	
	Proj.	Exec.	Proj.	Exec.
1ª Cam. - Brita 1	0,70	0,73	20,9	18,27
2ª Cam. - Brita 0	0,90	0,98	8,8	9,29
3ª Cam. - Gran.	0,90	0,88	3,8	5,94
Banho Final	0,80	0,77	-	-
Total	**3,30**	**3,36**	**33,5**	**33,50**

OBS.:

Croquis de Localização



Análise Granulométrica

Peneiras		1ª Camada - Brita 1				2ª Camada - Brita 0				3ª Camada - Granilha			
		Lim. Faixa		%pass.		Lim. Faixa		%pass.		Lim. Faixa		%pass.	
#	mm	mín.	máx.	**Proj.**	**Ensa.**	mín.	máx.	**Proj.**	**Ensa.**	mín.	máx.	**Proj.**	**Ensa.**
1"	25,4	100	100	**100,0**	**100,0**	100	100	**100,0**	**100,0**	100	100	**100,0**	**100,0**
3/4"	19,1	90	100	**92,6**	**95,4**	100	100	**100,0**	**100,0**	100	100	**100,0**	**100,0**
1/2"	12,7	20	45	**28,1**	**50,5**	100	100	**100,0**	**100,0**	100	100	**100,0**	**100,0**
3/8"	9,5	0	10	**7,5**	**28,4**	90	100	**95,0**	**97,2**	100	100	**100,0**	**100,0**
4	4,8	0	5	**2,5**	**11,6**	20	55	**18,0**	**24,0**	100	100	**100,0**	**98,2**
10	2,0	-	-	**-**	**-**	0	10	**2,0**	**2,6**	15	35	**22,2**	**32,1**
40	0,42	-	-	**-**	**-**	-	-	**-**	**-**	0	5	**4,1**	**-**
200	0,07	0	1	**0,8**	**1,0**	0	1	**0,8**	**0,6**	0	1	**0,6**	**1,1**
Pedreira		Sepetiba - Itaguaí/RJ				Sepetiba - Itaguaí/RJ				S.Sebastião - Três Rios/RJ			

OBS.:

Ensaio Brita 1 - Média de duas determinações realizadas em 08/08/07. Agregado fino.

Ensaio Brita 0 - Média de três determinações realizadas em 01/08/07.

Ensaio Granilha - Resultado de uma determinação realizada em 28/06/07.

Notas:

A Brita 1 apresentou carregamento com granulometria mais fina que a de projeto.

Na Tabela 7 estão apresentados os resultados obtidos nos dois trechos experimentais de tratamento superficial triplo – TST submetidos aos ensaios acelerados com o uso do simulador de tráfego móvel com aplicação de carga de 4,1 kN no semi-eixo.

Tabela 7- Resultados obtidos durante a realização dos ensaios acelerados nos TST´s

Trechos	N de Ciclos	Deflexão Máxima (0,01mm)	Mancha de Areia HS (mm)	VRD	Afundamento Trilha de Roda, (mm)			Área Trincada (%)	Temperatura Ar ºC
					Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3		
TST 01	0	114	0,83	72	0	0	0	0,0	29
	8.602	103	0,94	69	0	0	4	0,0	31
	32.400	87	0,88	66	0	0	7	1,2	31
	50.250	105	0,76	69	0	0	7	21,4	30
	74.408	88	0,86	70	0	0	8	35,8	31
	83.000	105	0,85	72	0	2	8	50,7	31
	83.000 + 44.000 BI	115	0,92	73	1	3	8	-----	30
TST 02	0	118	1,34	77	0	0	0	0,0	28
	44.937	132	1,12	67	3	0	0	25,0	23
	68.190	131	1,15	68	4	3	0	32,5	23
	106.310	133	1,21	67	0	3	3	40,8	20
	120.399	132	1,16	70	2	1	3	41,9	24
	145.868	134	1,05	70	3	2	0	42,6	24
	161.685	135	1,19	66	4	2	5	50,0	23

A construção dos trechos experimentais de misturas mornas concentrou-se na Av. Pedro Calmon nas proximidades da Reitoria da UFRJ e em frente ao Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). O local escolhido para a implantação desses trechos apresentava à época, um elevado grau de trincamento além de vários remendos e a presença de

panelas em alguns locais. Após uma avaliação técnica estrutural e funcional o revestimento asfáltico antigo foi parcialmente fresado o que recebeu em seguida uma camada de imprimação em pontos onde na base granular da base estava exposta, com CM-30 e no restante do trecho foi realizado uma pintura de ligação com emulsão asfáltica de ruptura rápida RR-1C.

Em alguns pontos específicos devido a panelas e remendos mal executados foi necessária a execução de uma camada de regularização a qual foi executada com a mistura asfáltica aplicada na respectiva camada de revestimento. O tráfego existente no local, à época, foi classificado de leve a médio isso porque havia um retorno antes dos trechos experimentais, até meados de 2012 que foi fechado a partir de então aumentando o número de veículos neste local.

O ligante básico utilizado nestes trechos foi o CAP 50/70 da REDUC e todas as misturas asfálticas apresentavam a mesma granulometria conforme mostrada na Figura 14. O que variou foi o processo (temperatura) e o aditivo utilizado durante a produção das misturas asfálticas na usina. Ao todo foram construídos 7 trechos experimentais, e destes, 3 trechos foram submetidos aos ensaios acelerados. A Tabela 8 apresenta um resumo dos processos e aditivos usados na construção dos trechos experimentais e destaca os trechos experimentais que foram submetidos ao simulador de tráfego móvel.

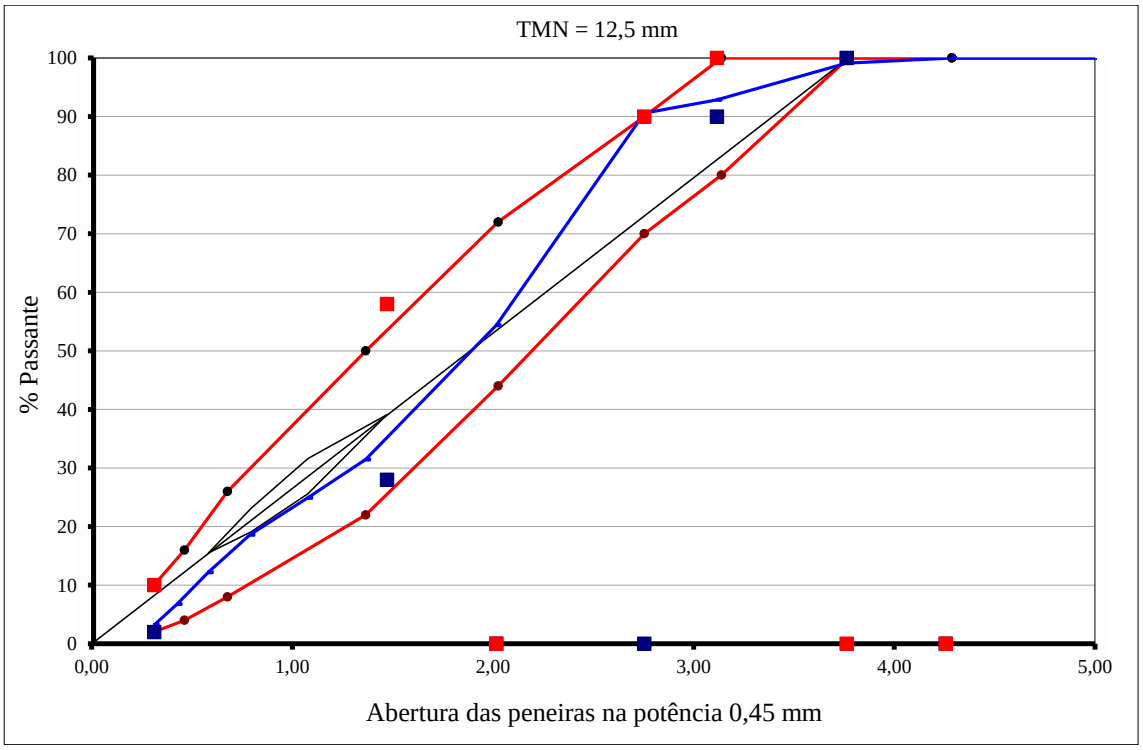


Figura 14- Curva granulométrica utilizada nas misturas asfálticas de referência (Fonte: Luis Nascimento / Petrobras)

Tabela 8- Características das misturas asfálticas mornas construídas na Cidade Universitária (Fonte: Luis Nascimento / Petrobras)

Trecho	**Temperatura do Ligante, ºC**	**Temperatura do Agregado, ºC**	**Processo / Aditivo**	**Teor de Ligante, %**
1	***156***	***170***	***Nenhum***	***5,5***
2	156	170	Nenhum	5,0
3	156	170	2% A-SAT	5,0
4	***156***	***130 a 135***	***Nenhum***	***5,5***
5	***156***	***130 a 135***	***0,5% A-SAT***	***5,5***
6	156	130 a 135	0,5% Zeólita	5,5
7	156	130 a 135	0,5% Zeólita + 0,5% A-SAT	5,5

O critério inicial para a finalização dos ensaios acelerados dos trechos experimentais de misturas mornas seria 10 % de área trincada, porém o trecho mistura morna – 5 apresentou um comportamento diferente dos demais. Verificou-se a posteriori que o local escolhido para a realização dos ensaios acelerados, havia uma estrutura do pavimento diferente dos demais trechos experimentais de misturas mornas por apresentar uma camada rígida de concreto cimento Portland de aproximadamente 35 cm

abaixo da superfície do revestimento onde foram realizados os ensaios acelerados. Essas informações foram possíveis em função dos levantamentos deflectométricos realizados no local e após a realização dos ensaios acelerados foi constatada a existência da camada rígida de concreto pelo uso do Georadar da COPPE e abertura de um poço de sondagem no local.

Especificamente no trecho de mistura morna – 5 o critério de encerramento se deu por decisão da equipe técnica da COPPE e do CENPES após um elevado número de ciclos sem a presença de trincas e o aumento das deflexões ao longo do número de ciclos, conforme mostrado na Tabela 9

Os trechos de mistura morna 4 e 1, foram submetidos aos ensaios acelerados com o uso do simulador de tráfego móvel com carga de 5,1 kN sentido mono direcional e seu encerramento se deu com a presenta de 10 % de área trincada, aproximadamente. O critério para determinação da área trincada foi o mesmo utilizado em todos os trechos experimentais conforme mostrado na Figura 12 e os resultados obtidos durante a aplicação de carga pode ser visto na Tabela 9.

O simulador de tráfego móvel utilizado neste estudo se mostrou uma ferramenta importante na tomada de decisão visto que permitiu aos técnicos avaliar o desempenho de novos produtos e tecnologias, porém o alto custo de locação e despesas oriundas necessárias para o funcionamento do simulador dificultaram a sua continuidade, além dos constantes problemas mecânicos e eletrônicos apresentados durante o período de locação.

Tabela 9- Resultados obtidos durante a realização dos ensaios acelerados nos trechos de Warm Mix Asphalt (WMA).

Trechos	N de Ciclos	Deflexão Máxima (0,01mm)	Mancha de Areia HS (mm)	VRD	Afundamento Trilha de Roda, (mm)			Área Trincada (%)	Temperatura Ar ºC
					Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3		
Trecho Mistura Morna - 5	0	33,6	0,91	78	0	1	2	0,0	28
	10.615	33,6	1,01	77	1	1	2	0,0	27
	23.820	36,6	0,96	71	0	0	1	0,0	28
	50.011	34,8	0,90	73	0	0	3	0,0	28
	62.703	35,6	0,91	73	0	0	3	0,0	28
	77.258	37,4	0,91	69	0	0	3	0,0	28
	99.171	44,0	0,74	70	0	0	3	0,0	28
	107.700	43,0	0,87	74	1	1	3	0,0	28
	123.582	37,8	0,81	72	1	1	3	0,0	28
	150.120	33,1	0,81	58	1	0	1	0,0	28
	160.650	35,8	0,62	71	1	1	1	0,0	28
	175.597	33,1	0,62	76	1	1	1	0,0	28
	207.910	35,8	0,82	73	1	1	1	0,0	28
	223.460	42,0	0,82	73	1	1	1	0,0	28
	259.135	48,8	0,86	72	1	1	3	0,0	28
Trecho de Mistura Morna - 4	0	75,3	1,11	84	2	4	1	0,0	30
	21.322	83,1	1,00	77	1	5	3	0,0	30
	24.842	84,5	1,00	77	1	5	4	0,0	29
	48.928	82,7	0,94	78	2	3	1	0,0	29
	63.788	83,4	1,01	79	1	5	2	0,0	29
	97.813	95,9	0,97	76	2	4	1	0,0	29
	104.844	96,6	0,98	72	1	5	2	0,0	29
	119.370	91,7	1,00	72	1	5	2	0,0	28
	144.982	97,1	0,97	72	1	5	2	2,9	33
	162.603	97,7	1,02	80	2	5	3	6,2	26
	184.831	98,7	0,99	77	2	5	3	8,0	31
	227.560	101,3	1,01	77	2	5	3	10,1	31
Trecho Mistura morna - 1	0	67,1	0,75	87	0	0	0	0,0	30
	28.009	67,0	0,75	87	0	0	0	0,0	32
	106.148	68,2	0,70	67	1	0	0	0,0	31
	157.602	72,3	0,72	67	2	1	1	1,8	28
	219.275	93,7	0,77	72	1	2	0	4,2	24
	235.671	104,9	0,74	68	1	2	0	7,5	24
	259.924	106,2	0,75	70	1	1	0	9,9	25
	283.763	101,3	0,72	69	0	1	1	10,3	27

Em 2012 foi realizado um estudo com o objetivo principal de propor uma metodologia para calibração de modelos matemáticos de evolução da deformação permanente em trilhas de roda de pavimentos asfálticos com o uso do simulador de tráfego móvel linear. Foram avaliadas em laboratório 10 soluções asfálticas, dessas, as 3 melhores soluções asfálticas em relação ao desempenho obtido através dos ensaios de deformação permanente foram aplicadas como camada de rolamento na BR – 376/PR pista norte entre os kms 672 a 670, rodovia que liga as capitais de Florianópolis a Curitiba, com elevado aclive localizada na 3ª faixa de rolamento, normalmente, usado por veículos comerciais pesados e em baixa velocidade (NEGRÃO, 2012). As soluções asfálticas escolhidas para este estudo foram:

- Faixa GAP GRADED – California Department of Transportation (CALTRANS) – CAP AMB;

- Faixa SHRP 12,5 mm – CAP AMP / SBS;
- Faixa SHRP 12,5 mm – CAP AMP / *Reactive Elastomeric Terpolymer* (RET).

A construção dos segmentos se deu após a fresagem do revestimento existente na espessura de 5 cm e aplicação da nova camada de revestimento asfáltico na mesma proporção. O controle tecnológico durante a aplicação da camada do revestimento foi acompanhado pela equipe de técnicos responsáveis neste estudo.

Os ensaios acelerados realizados nos segmentos experimentais com o uso do simulador de tráfego constituem na aplicação de carga de até 6 tf no semi-eixo de roda dupla e o deslocamento transversal de 1 m. Durante os ensaios acelerados foram realizados levantamentos estruturais e funcionais, tais como:

- Levantamento deflectométrico com a viga Benkelman;
- Acompanhamento sistemático da Área Trincada;
- Medidas de Afundamento de Trilha de Roda;
- Medidas de Mancha de Areia – Macrotextura;
- Medidas de Pendulo Britânico – Microtextura.

NEGRÃO (2012) propôs uma metodologia para a utilização de simuladores de tráfego em escala real para calibração de curvas de desempenho para parâmetros funcionais dos pavimentos.

2.5 Ensaios Mecânicos de Misturas Asfálticas Necessários para o Dimensionamento

Segundo MEDINA (1997):

> *"A mecânica dos pavimentos é definida como uma disciplina da engenharia civil que estuda os pavimentos como sistemas em camadas e sujeitos às cargas dos veículos. Faz-se os cálculos das tensões e deformações e deslocamentos, são conhecidos os parâmetros de deformabilidade, geralmente com a utilização de programas computacionais. Verifica-se o número de aplicações de carga que leva o revestimento asfáltico ou a camada cimentada à ruptura por fadiga. Deve-se atentar as deformações permanentes ou deformações plásticas, que variações sazonais e diárias de temperatura, umidade do subleito e das camadas do pavimento podem ser consideradas na sua resposta às cargas do tráfego. Os ensaios dinâmicos ou cargas repetidas dos solos do subleito, misturas asfálticas, cimentadas e materiais granulares, fornecem parâmetros de deformabilidade necessárias ao dimensionamento".*

Um bom projeto de pavimento é aquele que combina os materiais e as espessuras das camadas conforme a rigidez de cada uma dessas camadas, de modo a propiciar uma resposta estrutural do conjunto condizente com as solicitações do tráfego. O resultado dessa combinação definirá a vida útil do pavimento. Porém para dimensionar um pavimento mecanísticamente é necessária a realização de ensaios mecânicos em laboratório para definir as tensões, deformações e deslocamentos e a resistência ao dano. Para as misturas asfálticas são desejáveis os seguintes ensaios:

- Ensaio de Módulo de Resiliência por Compressão Diametral;
- Resistencia à Tração;
- Fadiga por Compressão Diametral;
- Ensaio de Tração Direta;
- Ensaios de Deformação Permanente.

A caracterização dos materiais de pavimentação é uma tarefa complexa devido a sua heterogeneidade em relação aos fatores que afetam as propriedades dos materiais, tais como: questões ambientais, frequência de cargas, estado de tensões e deformações, envelhecimento dos ligantes asfálticos e magnitude. Segundo BERNUCCI *et al.*,(2008) no caso das misturas asfálticas, o envelhecimento gradativo devido a oxidação do ligante asfáltico aumenta a complexidade, pois é difícil a simulação desse fenômeno em

laboratório. A caracterização das misturas asfálticas requer estudos apropriados para minimizar essa variável existente entre o campo e o laboratório.
O ensaio de compressão diametral de cargas repetidas vem sendo realizado no Brasil desde 1980. O primeiro sistema de aplicação de cargas e de leituras de deslocamentos para os ensaios de compressão diametral foram realizados no Laboratório da COPPE em 1979 (PINTO, 1980).

VIANNA (2002) desenvolveu no início de 2001 um sistema totalmente automatizado para controlar o ensaio de compressão diametral e deformação axial estático ou dinâmico. O ensaio de MR em misturas asfálticas é realizado através de uma carga aplicada no plano diametral vertical do corpo de prova cilíndrico, essa carga gera uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação de carga e mede-se o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada em uma dada temperatura, conforme mostrado na Figura 15.

Segundo MEDINA (1997), na prática se aplica a carga por meio de um friso de 12,7 mm com curvatura adequada ao corpo de prova cilíndrico. A aplicação da teoria da elasticidade a misturas asfálticas só é admissível a níveis baixos de tensão de tração, ou seja, 40% ou menos, em relação à ruptura e em temperaturas inferiores a 40ºC. É comum realizar esse ensaio em uma frequência de 1 Hz com 0,1 s de carregamento e 0,9 s de relaxação. Sabe-se que, quaisquer que sejam as condições de ensaio, a elasticidade sempre será uma aproximação em relação ao desempenho em campo das misturas asfálticas.

MEDINA *et al.* (2015) descrevem o ensaio de compressão diametral também para o estudo de fadiga de misturas asfálticas, onde são aplicados vários níveis de tensões calculados como uma porcentagem, geralmente entre 10 a 50% em relação a ruptura estática, denominada RT indireta.

PINTO (1980) descreve que o ensaio de MR pode e deve ser usado como um fator determinante na dosagem de concreto asfáltico, bem como a RT que é um dos critérios na dosagem de misturas asfálticas de acordo com a norma DNIT 031/06 – ES.

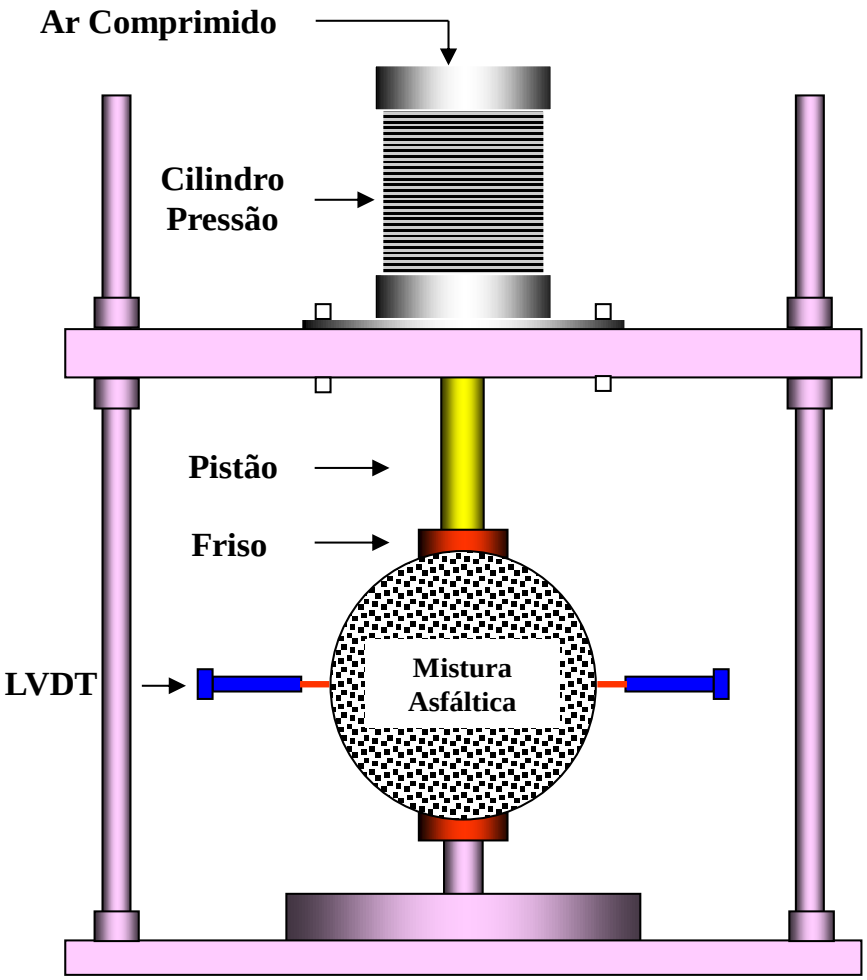


Figura 15 - Esquema do equipamento de ensaio de compressão diametral de cargas repetidas

O ensaio de MR de mistura asfáltica pioneiro no Brasil foi realizado na COPPE em 1979 e desde então vem sendo realizado pesquisas com diferentes misturas asfálticas em todo o país. Nos EUA, embora extinta a norma da *American Society for Testing and Materials* (ASTM D 4123) para o ensaio de MR por compressão diametral, foram desenvolvidas outras linhas de ensaios para a determinação do comportamento tensão – deformação de misturas asfálticas, como o Módulo Complexo e o Módulo Dinâmico que passou a ser utilizado no dimensionamento mecanístico da AASHTO (2002). A ASTM D 4123 foi inicialmente desenvolvida na Universidade de OHIO na década de 1960. O Módulo Complexo E^* é definido como um número complexo que relaciona tensões e deformações para materiais viscoelásticos sujeitos a um carregamento senoidal.

Na França o ensaio para determinar o Módulo Complexo é baseado em um ensaio de flexão de corpo de prova trapezoidal segundo a norma NF 98 – 260 – 2. Esse ensaio é utilizado no método de dimensionamento mecanístico chamada ALIZE. Independentemente do método mais correto a ser utilizado para a determinação do estado das tensões no campo, o importante é dar continuidade na metodologia desenvolvida no país que permitiu acumular sólida experiência. MEDINA e MOTTA (2015) descrevem que cabe aperfeiçoá-la e estabelecer comparações com os dados experimentais de campo.

A resistência à tração – RT é um parâmetro importante para a caracterização de materiais como o concreto de cimento Portland e concreto asfáltico. O ensaio de compressão diametral foi desenvolvido pelo professor Fernando Luiz Lobo Carneiro em 1943 com a finalidade de determinar a resistência à tração de corpos de prova de concreto de cimento Portland. Esse ensaio é conhecido em vários centros de pesquisa internacionais como *Ensaio Brasileiro*. Segundo MEDINA e MOTTA (2015), o professor Lobo Carneiro, como é conhecido no meio técnico desenvolveu o ensaio de compressão diametral ou tração indireta do concreto no Instituto Nacional de Tecnologia no Rio de Janeiro. O professor Lobo Carneiro também foi o responsável pelo desempenho marcante do Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ.

O ensaio para determinar a resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de misturas asfálticas se dá através da compressão diametral. É aplicada uma força entre dois frisos metálicos de 12,7 mm de largura com uma curvatura adequada ao corpo de prova cilíndrico. Esse ensaio de compressão diametral estático vem sendo empregado no Brasil desde 1980. Segundo as normas da ASTM D 4123/82; DNER – ME 138/94 e ABNT NBR 15087/04 não é considerada a influência dos frisos no cálculo da RT conforme mostrado na Figura 16. O cálculo da RT pela expressão (*1)* para misturas asfálticas assume que o corpo de prova rompe devido à tensão de tração uniforme gerada ao longo do diâmetro solicitado que se iguala à tensão máxima admissível do material ($\boldsymbol{\sigma}_{adm}$ = RT), assume-se que a tensão admissível está em regime elástico durante todo o ensaio (BERNUCCI *et al*., 2008). Para determinar o valor da resistência à tração é utilizada a seguinte equação:

$$RT = \frac{2*F}{\pi*D*H} \qquad (1)$$

Onde:

F = Carga de Ruptura

D = Diâmetro do corpo de prova

H = Altura do corpo de prova

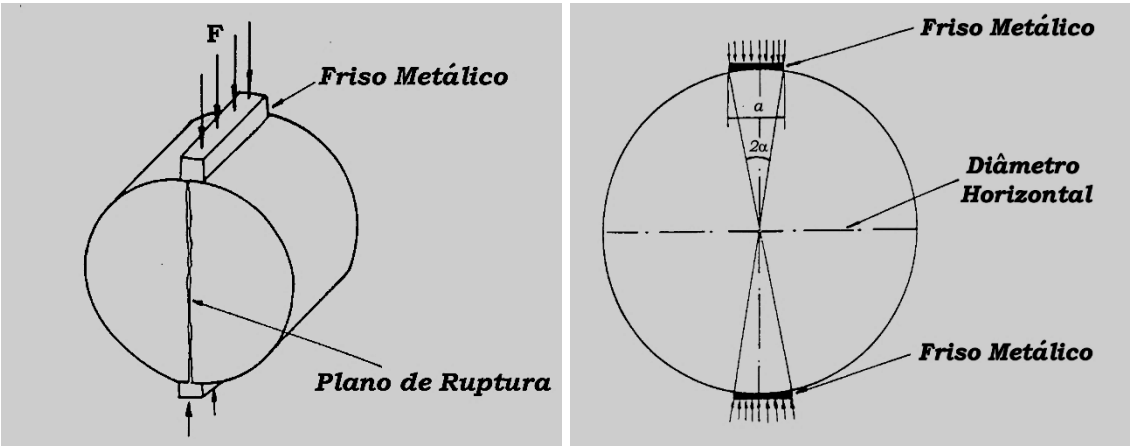


Figura 16 Esquema do ensaio de compressão diametral para misturas asfálticas

A vida de fadiga de misturas asfálticas é definida em termos de vida de fratura ou vida de serviço (BERNUCCI *et al.*, 2008). A vida de fratura se refere ao número total de aplicações de carga necessária para fratura completa do corpo de prova. A vida de serviço se refere ao número total de solicitações dessa mesma carga que reduza o desempenho e a rigidez inicial da amostra a um nível preestabelecido.

O ensaio de fadiga tradicionalmente realizado no país é feito por compressão diametral à tensão controlada. A carga é aplicada em uma frequência de 1 Hz com 0,1 s de carregamento e 0,9 s de relaxação, através de equipamentos pneumáticos e pode-se considerar que o ensaio de compressão diametral gera um estado de tensões no corpo de prova e que no decorrer do ensaio de fadiga a deformação de tração aumenta até o rompimento completo da amostra (MEDINA, 1997).

BERNUCCI *et al*. (2008) dizem que a diferença de tensão máxima de compressão e de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico é considerada como o principal fator desencadeador do trincamento por fadiga nos revestimentos asfálticos em campo.

Como qualquer ensaio de fadiga em laboratório é bastante severo, é necessário ajustar seus valores para a condição de campo, definindo-se FCL. Atualmente existem dois FCL usuais no Brasil em função da fadiga por compressão diametral, definidos por PINTO (1991). Esses fatores foram definidos para ensaios de fadiga em laboratório e acompanhamento sistemático dessas misturas em trechos em campo. Esses fatores, usuais até hoje, podem em algumas situações prever o comportamento de misturas asfálticas em campo, porém como foram definidos com poucos dados podem não ser aplicáveis de forma genérica.

Independentemente do ensaio ou método adotado é comum o uso de FCL devido à dificuldade da previsão do desempenho dos pavimentos em campo. Pode-se ressaltar a não consideração do envelhecimento nas misturas asfálticas no processo do dano no material durante o ensaio além de aspectos presentes no campo que não são simulados em laboratório. Isto aumenta a incerteza do dimensionamento dos pavimentos em relação ao desempenho previsto em campo. O importante é dar continuidade à busca de FCLs calibrados para minimizar o erro entre os ensaios de laboratório e a previsão do desempenho em campo, além da obrigatoriedade de se fazer ensaios mecânicos na fase do pré-projeto.

O ensaio de tração direta foi recentemente proposto como um novo procedimento para determinação da vida de fadiga, que permite obter curvas experimentais por tração direta dos corpos de prova e com a interpretação teórica mais consistente em relação à outras condições de ensaio, baseado em pesquisas desenvolvidas ao longo de muitos anos por pesquisadores americanos liderados por Y. Richard Kim, da *North Carolina State University*, nos EUA.

NASCIMENTO (2014) descreve que esse ensaio foi introduzido no Brasil no CENPES e utiliza na análise um modelo de cálculo denominado S-VECD. O ensaio de fadiga consiste em se aplicar, em um corpo de prova cilíndrico, de 10 cm de diâmetro e 15 cm de altura, de misturas asfálticas, sendo as duas faces (topo e base) coladas nos pratos da prensa, o que permite tracionar o mesmo, com aplicação de deformação cíclica senoidal, de amplitude constante, até atingir a ruptura.

Durante o ensaio são coletados e monitorados a deformação, a carga, o ângulo de fase e o módulo dinâmico. Os resultados dos ensaios de fadiga conduzidos por meio desta metodologia são modelados segundo a mecânica do dano contínuo, VECD. Esse modelo leva em consideração as propriedades fundamentais dos materiais para efetivamente caracterizar o comportamento de misturas asfálticas por meio de um programa experimental simplificado.

A teoria do VECD está baseada em três conceitos principais: Teoria do trabalho potencial de Schapery, Princípio de correspondência elástica – viscoelástica e Superposição tempo – temperatura com dano.

Dois parâmetros principais precisam ser quantificados no modelo VECD: a pseudo – rigidez (C) e o dano (S). A relação entre ambos é única para um dado material sendo definida, na mecânica do dano contínuo, como curva característica de dano, ou seja, a curva C versus S é uma propriedade fundamental do material. Observa-se que, independentemente do ensaio de dano ser cíclico ou monotônico, com controle de tensão ou deformação, com diferentes amplitudes, em diferentes frequências ou até mesmo em diferentes temperaturas, a curva C versus S obtida será a mesma (MARTINS, 2014, e NASCIMENTO, 2015).

Um dos defeitos mais frequente nos pavimentos flexíveis, no Brasil, é o trincamento da camada do concreto asfáltico. Mas, também, ocorrem deformações permanentes ou irreversíveis, principalmente nas trilhas de rodas dos caminhões e corredores de ônibus e que são atribuídos ao revestimento asfáltico ou às outras camadas do pavimento. Nos últimos anos tem sido bastante comum a ocorrência de problemas associados à deformação permanente nos revestimentos asfálticos, no Brasil. Esse tipo de defeito tem o agravante de se manifestar de maneira precoce, o que compromete a serventia dos pavimentos em um curto espaço de tempo.

O estudo de deformação permanente das misturas asfálticas é considerado um problema a parte e em relação ao dimensionamento deve-se dosar as misturas asfálticas de modo a resistir aos esforços do tráfego e à ação do clima. Alguns países propõem valores admissíveis de deformação permanente – Afundamento de Trilha de Roda, por exemplo: para autoestradas o limite máximo aceitável é de 10 mm e em rodovias de

menor volume de tráfego esse limite passa a 16 mm, porém se atingir 20 mm é recomendado o reparo imediato.

Nas camadas abaixo do revestimento asfáltico podem ocorrer deformações permanentes principalmente por densificação adicional pelo tráfego e por ruptura ao cisalhamento, podendo ocorrer em uma ou mais camadas do pavimento, incluindo o subleito. Esses problemas podem ser minimizados com uma melhor seleção dos materiais e compactação adequada, além de um bom projeto estrutural de forma a limitar as tensões atuantes aos níveis admissíveis e seguros. Em geral ensaios mecânicos permitem ao projetista prever futuros problemas de deformação permanente em cada uma das camadas.

Segundo NASCIMENTO (2008), dependendo da magnitude das cargas do tráfego e da resistência relativa das camadas do pavimento, a deformação pode ocorrer no subleito, sub-base, base ou nas camadas asfálticas. Durante as estações quentes do verão a camada asfáltica tende a sofrer mais deformação permanente do que no inverno tendo em vista a perda de rigidez do ligante que pode aumentar o deslocamento do esqueleto mineral da mistura. Também, devido à diminuição do módulo de resiliência das camadas asfálticas nesta estação quente, aumenta a transmissão dos esforços para as outras camadas o que pode aumentar a deformação permanente nas camadas estruturais do pavimento. Outra possibilidade do aumento das deformações permanentes na estrutura é nos períodos de chuva quando é possível a entrada de água nas camadas inferiores de solo.

A seguir estão descritos outros tipos de testes para caracterizar o comportamento de misturas asfálticas:

a. Módulo Dinâmico Uniaxial;

Segundo NASCIMENTO (2008), o ensaio para determinar o módulo dinâmico foi normatizado em 1979 como ASTM D 3497, porém houve depois o estabelecimento da AASHTO TP 62-05, também atualizada como AASHTO T342-11, sendo esta a norma mais atualizada no momento. O ensaio consiste na aplicação de uma carga uniaxial compressiva senoidal em um corpo de prova cilíndrico confinado ou não. Onde a

relação tensão – deformação, durante o carregamento harmônico para materiais viscoelásticos lineares é definida por um módulo complexo (E*). O valor absoluto do módulo complexo |E*| é definida como módulo dinâmico.

O módulo dinâmico é matematicamente definido como a tensão dinâmica máxima (σ_0) dividida pela deformação axial recuperável máxima (ε_0), expressa pela expressão *(2).*

$$|E^*| = \frac{\sigma 0}{\varepsilon 0} Equação \qquad (2)$$

NASCIMENTO (2008) descreve um estudo norte americano realizado pelo *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) e relatado no *Report 465 – Simple Performance Test for Superpave Mix Design*, que apresenta algumas correlações dos ensaios de módulos dinâmicos com o afundamento de trilha de roda observado em campo.

b. Módulo Dinâmico de Cisalhamento;

Este ensaio é realizado segundo o método da AASHTO T320 – 07 *Standard Method of Test for Determining the Permanent Shear Strain and Stiffness of Asphalt Mixtures Using the Superpave Shear Tester*. Foi desenvolvido durante o programa SHRP para medir parâmetros de desempenho dos materiais. Com o resultado desse ensaio, pode-se determinar o comportamento elástico e viscoso das misturas asfálticas através do cálculo do módulo cisalhante de armazenamento (G') e do módulo cisalhante de perda (G").

c. Ensaio Triaxial Convencional

É um ensaio típico de ruptura, porém menos utilizado que o módulo dinâmico e os de carga repetida em relação às deformações permanentes de misturas asfálticas. O ensaio é normatizado segundo método AASHTO T167 – 2010 – *Standard Test Method for Compressive Strenght of Betuminous Mixtures*.

A resistência ao cisalhamento de uma mistura asfáltica pode ser caracterizada através de dois parâmetros da teoria de Mohr – Coulomb, obtidos neste ensaio. Porém os valores destes parâmetros variam substancialmente com as taxas de carregamento, temperatura e propriedades volumétricas das misturas. E a resistência ao cisalhamento, obtida em ensaios uniaxiais, apresenta uma correlação razoável a boa com o desempenho a deformação permanente observado em campo (NASCIMENTO, 2008).

d. Uniaxial Estático – Creep

O ensaio de creep, como é conhecido, é o mais simples para o estudo da deformação permanente de misturas asfálticas. No Brasil esse ensaio foi realizado em algumas pesquisas através da aplicação de cargas compressivas. O ensaio também pode ser realizado através da aplicação de cargas de torção, flexão e tração. O ensaio estático consiste na aplicação de carga de compressão estática ao longo do tempo em um corpo de prova cilíndrico regular. Os corpos de prova ficam em uma câmera a temperatura de 40ºC durante um período de 2 horas aproximadamente para garantir o equilíbrio térmico em toda a amostra. Alguns resultados podem ser vistos, por exemplo, em Sá (1996), que também realizou o mesmo tipo de ensaio com aplicação de carga repetida. VIANNA *et al* (2003) apresentaram uma forma de melhorar a aquisição de dados neste tipo de ensaio realizado com corpos de prova de pequena altura.

O tempo de aplicação de carga pode variar, embora ainda não haja um consenso sobre o assunto. No LABGEO da COPPE o tempo de aplicação de carga foi usualmente de 60 minutos com 15 minutos de descarregamento enquanto este ensaio foi realizado nas décadas de 1990 e 2000. No que se refere ao parâmetro obtido no ensaio de creep estático, trata-se fundamentalmente do histórico de deformação ao longo do período de ensaio.

e. Ensaio Uniaxial de Carga Repetida

Quando se introduziu no Brasil os compactadores giratórios, na década de 2000 basicamente, foi possível preparar corpos de prova cilíndricos de altura maior do que no compactador Marshall e com isto foi possível melhorar os ensaios uniaxiais de previsão

de deformação permanente de misturas asfálticas. Assim, começaram a ser realizados os ensaios denominados de “Flow Number”, um ensaio uniaxial de carga repetida.

Este ensaio uniaxial de carga repetida em misturas asfálticas é realizado em corpos de prova de 10 cm de diâmetro e 145 cm de altura, com um carregamento cíclico de compressão e a deformação permanente acumulada é obtida em função do número de ciclos. O carregamento se dá em um pulso de 0,1 segundos seguido por um repouso de 0,9 segundos, sob carga de 204 kN. Os resultados são apresentados em termos da deformação permanente acumulada versus o número de ciclos de carga.

A deformação permanente acumulada (ε_p) pode ser dividida em três zonas: primárias, secundárias e terciárias. O número de ciclos onde começa o estágio terciário é referido como *Flow Number* (FN). NASCIMENTO (2008) define que o *Flow Number* é o parâmetro oriundo do ensaio uniaxial de carga repetida que melhor se relaciona com a deformação permanente e propõe valores mínimos de FN para determinados volumes de tráfego. Este ensaio é proposto como um critério de dosagem das misturas asfálticas e o valor do FN admissível é função do volume de tráfego.

f. Simuladores de Tráfego Tipo Wheel Track.

Outra forma de determinar o comportamento de misturas asfálticas em relação à deformação permanente é através do uso de simuladores de tráfego de laboratório. No Brasil essa prática vem sendo bastante utilizada bem como o ensaio de FN. Há no Brasil até o momento 4 simuladores franceses LCPC, um localizado no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da USP, um no CENPES, um no LABGEO da COPPE e o outro na UFSC. Existe também o modelo norte americano *Asphalt Pavement Analyser (*APA) localizado no Laboratório Central da BR Distribuidora e alguns resultados obtidos com este equipamento podem ser vistos em Sá (2003).

Ambos os tipos de equipamentos permitem verificar o comportamento das misturas asfálticas em relação à deformação permanente de acordo com normas específicas. O critério de ensaio entre os diferentes tipos de simuladores de tráfego de laboratório apresentam diferenças entre eles. Há outros modelos de simuladores de tráfego de

laboratório no mundo e que podem ser vistos com mais riqueza de detalhes em NASCIMENTO (2008).

2.6 Métodos de Análise de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos Brasileiros

O dimensionamento de um pavimento consiste em determinar as espessuras das camadas que irão compor a estrutura do pavimento a partir da escolha de materiais adequados para cada uma das camadas e de critérios de ruptura estabelecidos nos modelos de análise.

O pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas que é construída sobre a camada final de terraplenagem, também conhecida como subleito, que tem a finalidade de distribuir as cargas do tráfego de forma a não provocar grandes deformações plásticas no subleito e resistir às condições climáticas. Em geral uma estrutura asfálticas é composta por revestimento asfáltico, camadas de base, sub-base e subleito, nomeados de acordo com a sua posição em relação ao topo. O revestimento asfáltico tem a finalidade de transmitir as cargas verticais do tráfego para as camadas inferiores, resistir aos esforços horizontais provenientes da passagem das rodas, impermeabilizar as camadas inferiores e dar conforto e segurança ao usuário.

No passado, o dimensionamento de pavimentos era feito de uma forma totalmente empírica, baseada no conhecimento prático. Atualmente existem métodos de dimensionamento mecanístico – empíricos. A parcela de empirismo nos métodos de dimensionamento pode ser minimizada pelo acompanhamento sistemático de trechos experimentais de campo ajustados com os ensaios mecânicos usuais, gerando o FCL ou a chamada Função de Transferência. O método de dimensionamento é dito mecanístico quando utiliza teoria para prever as tensões e deformações provenientes do tráfego e do clima na estrutura do pavimento.

Em geral os pavimentos são classificados em dois grandes grupos: pavimentos flexíveis e pavimentos rígidos. Os pavimentos flexíveis tradicionais são constituídos por uma ou mais camadas de revestimento asfáltico, aplicada sobre camadas de base e sub-base de material granular. Já os pavimentos rígidos tradicionais são compostos por placas de

concreto de cimento Portland que cumprem a função de revestimento e base, aplicada sobre o subleito, ou sobre a camada de sub-base.

O Relatório Técnico nº1 apresentado ao Ministério dos Transportes dentro do convênio entre COPPE e IPR / DNIT / Ministério dos Transportes, com o apoio do CENPES, apresenta um histórico dos métodos de dimensionamentos de pavimentos no Brasil, tanto para pavimentos novos quanto para projetos de reforço, e faz considerações sobre as dificuldades de se continuar aplicando estes métodos tendo em vista as limitações de cada um (COPPE, 2015).

O método de dimensionamento de pavimentos novos em vigor no Brasil foi estabelecido em 1966, pelo Engenheiro Murilo Lopes de Souza. O método sofreu pequenas atualizações em 1981, feitas pelo autor. É conhecido como Método do CBR, índice usado para quantificar os materiais das camadas granulares e de subleito e parâmetros de projeto. Este método é adotado em todo território brasileiro de forma generalizada e apresenta certas adaptações regionais em relação às especificações dos materiais. Não cabe aqui o histórico deste método que pode ser visto em MEDINA e MOTTA (2005, 2015), que também comentam suas limitações.

Um grande número de contribuições de engenheiros brasileiros para melhorias do dimensionamento foram feitas nas décadas de 1970 e 1980, que podem ser vistas no relatório citado.

A partir da década de 1990 os métodos de dimensionamento propostos no país passaram a ter uma visão mais mecanicista, tal como o apresentado por MOTTA (1991), que propôs um método de dimensionamento mecanístico – empírico baseado em ensaios de carga repetida para obtenção dos módulos de resiliência dos materiais e fadiga e cálculo de tensões e deformações definidas com o uso do programa FEPAVE2.

No mesmo ano, CERATTI (1991) propôs um método de dimensionamento para camadas de base de solo cimento, baseado em ensaios de carga repetida para a obtenção dos módulos de resiliência dos materiais e fadiga, também definido com o uso do FEPAVE2.

FRANCO (2000) desenvolveu o primeiro sistema de dimensionamento automático brasileiro chamado PAVE2000. Neste programa as análises eram calculadas considerando a carga e o clima e o projeto verificado para o período de análise ou variando a espessura até que se obtivesse a vida útil esperada.

FRANCO (2007) apresentou um segundo sistema de dimensionamento automático chamado SisPav que permite a análise linear e não linear das camadas. O sistema utiliza a teoria da elasticidade, por meio do programa Análise Elástica de Múltiplas Camadas – AEMC, cuja base foi a rotina JULEA (*Jacob Uzan Layered Elastic Analysis*) desenvolvida por UZAN, (1978). A abordagem da análise elástica não linear é realizada de forma simplificada, com a divisão das camadas com este comportamento em três subcamadas.

Duas opções de análise são possíveis de serem realizadas. A primeira é o dimensionamento da estrutura propriamente dita, em que o programa analisa os dados de entrada e por meio um algoritmo similar ao de busca binária em tabela ordenada, encontra a espessura da camada que atenda os requisitos de projeto. A segunda análise só realiza uma verificação dos dados e requisitos definidos pelo projetista e informa a vida de projeto que a estrutura pode suportar.

Nas duas análises o programa verifica os danos acumulados por fadiga no revestimento asfáltico ou, se for o caso, na base das camadas cimentadas. Opcionalmente o projeto pode solicitar as estimativas de afundamento de trilha de roda e dos danos relativos à deflexão máxima na superfície do pavimento e à tensão limite no topo do subleito.

O programa SisPav foi desenvolvido em Visual C++, versão 6.0 e buscou alinhar a praticidade e simplificação na entrada dos dados, a agilidade e velocidade nos cálculos e processamento com a apresentação em gráficos e tabelas de fácil manipulação dos resultados, além de valores sugeridos para fins de anteprojeto.

O programa foi desenvolvido com janelas e tabelas facilmente editáveis e com acesso direto a outras ferramentas, como os programas de Elementos Finitos EFin3D e análise elástica de múltiplas camadas AEMC.

Segundo FRANCO (2007) o programa de computador SisPav foi desenvolvido com o objetivo de realizar análises e dimensionamentos de estruturas de pavimentos segundo os conceitos da mecânica dos pavimentos. O SisPav foi dividido em cinco abas, para melhor visualização e controle das informações, que são:

- Projeto;
- Editar;
- Resultados;
- Ferramentas e;
- Ajuda.

No Menu Projeto são disponibilizadas as seguintes funções:

- Novo: Cria um projeto novo com os dados iniciais previamente inseridos no programa;
- Abrir: Abre um arquivo de projeto salvo no disco – extensão .pvt;
- Salvar: Salva os dados do projeto em um arquivo no disco com extensão .pvt;
- Salvar como: Salva os dados do projeto em um arquivo do no disco com outro nome;
- Sair: Finaliza o programa.

No Menu Editar é possível navegar entre as abas Estrutura; Tráfego; Clima e Modelos do Programa. Na aba Resultados aparecem duas opções: uma para iniciar a análise do dimensionamento e a outra para verificar a vida de projeto.

Depois de finalizada a análise de dimensionamento ou vida de projeto o programa libera o acesso à janela Resultados no Menu. A partir desse momento é possível gerar relatórios em formato Word. Também no Menu Ferramentas os elos de acesso direto a outras ferramentas desenvolvidas são disponibilizados.

É necessário selecionar a camada de estrutura que o programa irá dimensionar. O programa limita as espessuras das camadas durante o dimensionamento entre 10 e 60 cm para todas as camadas, com exceção da camada do revestimento que varia de 5 a 20

cm. Quando, durante o dimensionamento, o programa atingir o limite inferior da espessura, significa que a estrutura suporta as condições do carregamento e do clima impostos. Se atingir o limite superior da espessura, significa que a estrutura não atende as exigências de projeto. Neste caso, é necessária a alteração das propriedades dos materiais adicionando ou removendo camadas de forma a adequar a nova estrutura aos requisitos de projeto.

O programa também permite que seja alterado os parâmetros relativos a qualidade dos materiais. Outro fator importante neste programa é a possibilidade de inserir individualmente as informações de cada eixo previsto no tráfego de projeto. O programa SisPav analisa a estrutura do pavimento por um algoritmo desenvolvido por FRANCO (2007) que avalia a configuração do eixo isoladamente e com a previsão da variação lateral do tráfego.

O programa tem campos para inserir até 50 configurações de eixo. Os eixos podem ser repetidos permitindo assim uma variação maior de configurações, além de permitir inserir a taxa de crescimento, carga e a pressão dos pneus. À medida que os eixos são inseridos, o programa calcula automaticamente o número N equivalente de repetições do eixo padrão pelos Fatores de Equivalência de Carga do Método do Murillo Lopes de Souza.

Na tela “Clima” o projetista define o local onde será construída a estrutura do pavimento. O autor disponibilizou as temperaturas médias mensais do ar, à época, de todas as capitais do país, porém o programa não avalia o efeito da variação da umidade sobre os materiais da pavimentação e o subleito, pois considera que a umidade de equilíbrio é alcançada.

Em relação aos modelos de desempenho, FRANCO (2007) descreve que a concepção inicial do programa era desenvolver uma ferramenta que utilizasse os modelos internamente do programa sem a possibilidade do projetista ter acesso aos parâmetros de calibração e aos coeficientes de regressão. No entanto, verificou-se que as informações dos modelos de danos deveriam ser apresentadas e com a possibilidade do projetista alterar os parâmetros, por sua conta e risco.

FRANCO (2007) inseriu nove modelos de previsão de desempenho, que são:

- Fadiga de misturas asfálticas;
- Fadigas de misturas de solo – cimento;
- Fadiga de materiais tratados com cimento;
- Deflexão admissível na superfície do pavimento;
- Deformação permanente de misturas asfálticas;
- Deformação permanente de misturas granulares;
- Deformação permanente de solos laterítico;
- Deformação permanente de solos finos, siltosos e argilosos;
- Tensão limite no topo do subleito.

Permitia-se ao projetista alterar parâmetros para otimizar os cálculos do dimensionamento dos pavimentos onde a análise é dada como concluída quando o consumo do dano crítico, calculado pelos modelos de previsão e acumulados seguindo a lei de Miner, atingir o valor de 1 mais ou menos um valor de tolerância, que no programa é adotado 2%, podendo ser alterado.

O programa também utiliza um nível de confiabilidade nas análises, que pode variar de 50%, como padrão, para 75%; 85%; 90% e 95%. Ressalta-se que a análise de confiabilidade realizada pelo programa é dependente do parâmetro Erro Padrão dos modelos de danos e que não foram tecnicamente testados na tese de FRANCO (2007).

FRANCO (2007) descreve outras opções como a estimativa da deformação permanente na estrutura, com base nos respectivos modelos, prevendo o afundamento de trilha de roda, além da possibilidade de gerar no relatório de projeto, bacias de deflexões de campo para fins de controle construtivo.

Apesar de não ter realizado a calibração dos modelos de previsão, FRANCO (2007) realizou comparações com outros programas de dimensionamento, como o LEDFAA da FAA, e SPDM da Shell.

Nestes testes comparativos o SisPav mostrou dimensionamentos compatíveis e racionais, mas com modelos de previsão de danos não calibrados, é difícil concluir a sua exatidão em relação a validade dos resultados, além dos diferentes critérios de ruptura considerados pelos programas.

O SisPav foi desenvolvido por FRANCO (2007) como um sistema de dimensionamento automático de cunho acadêmico. Este programa vem sendo atualizado dentro do Projeto da Rede Temática de Asfalto desde 2009, e mais recentemente como parte do convênio COPPE/IPR – DNIT para o desenvolvimento do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos brasileiro, e será modificado e consolidado com base na Função de Transferência definida nesta presente tese, com a participação direta do autor do SisPav citado.

2.7 Métodos de Dimensionamento Internacionais

O primeiro método de dimensionamento de pavimentos utilizando o CBR foi desenvolvido na Califórnia nos anos de 1928 e 1929 e resultou em duas curvas "A e B", para dois níveis de tráfego, e determinava a espessura do pavimento a fim de proteger o subleito com determinada capacidade de suporte, medido pelo CBR. O método era exclusivamente para projetos rodoviários, porém foi extrapolado pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE) para dimensionar pavimentos aeroportuários durante a II Guerra Mundial.

Em várias partes do mundo surgiram métodos de dimensionamento baseados no ensaio CBR. Durante muitas décadas do século XX, estes métodos em geral empíricos, foram usados com relativo sucesso para dimensionar pavimentos asfálticos, especialmente enquanto o volume de tráfego era baixo e as cargas dos veículos menores do que as atuais.

Entre 1958 a 1960 a *American Association of State Highway Officials* (AASHO) desenvolveu um dos maiores experimentos rodoviários do mundo, à época, com pistas experimentais compostas de pavimentos flexíveis e rígidos ambos submetidos ao tráfego real controlado e acelerado, com a finalidade de determinar uma metodologia de dimensionamento de pavimentos rodoviários. O legado da AASHO Road Test incluiu a

introdução de conceitos de serventia, fatores de equivalência de cargas e modelos de previsão de desempenho. A AASHO Road Test forneceu subsídios para desenvolver o guia de dimensionamento de pavimentos da AASHO, depois AASHTO.

Este Guia, iniciado em 1961, foi revisto várias vezes até que em 1993 foi divulgada a última versão desta série. Devido à natureza empírica do AASHTO 1993, esses modelos não podiam ser melhorados e assim tornou-se obrigatório o uso de novos conceitos e metodologias por melhores projetos de pavimentos, segundo AASHTO, (1993). A partir de 2002 foi lançado um novo método, desta vez mecanístico – empírico: AASHTO 2002 Design Guide (*Guide for Design of New and Rehabilitated Pavements Stractures)* (NCHRP, 2004).

A Função de Transferência usada no MEPDG (NCHRP, 2004) para determinar a área trincada por fadiga foi assumida por uma função matemática sigmoidal, que correlaciona a área trincada por fadiga e o dano. Os resultados da calibração do MEPDG mostrados na Figura 17 apresentaram um $R^2 = 0,27$.

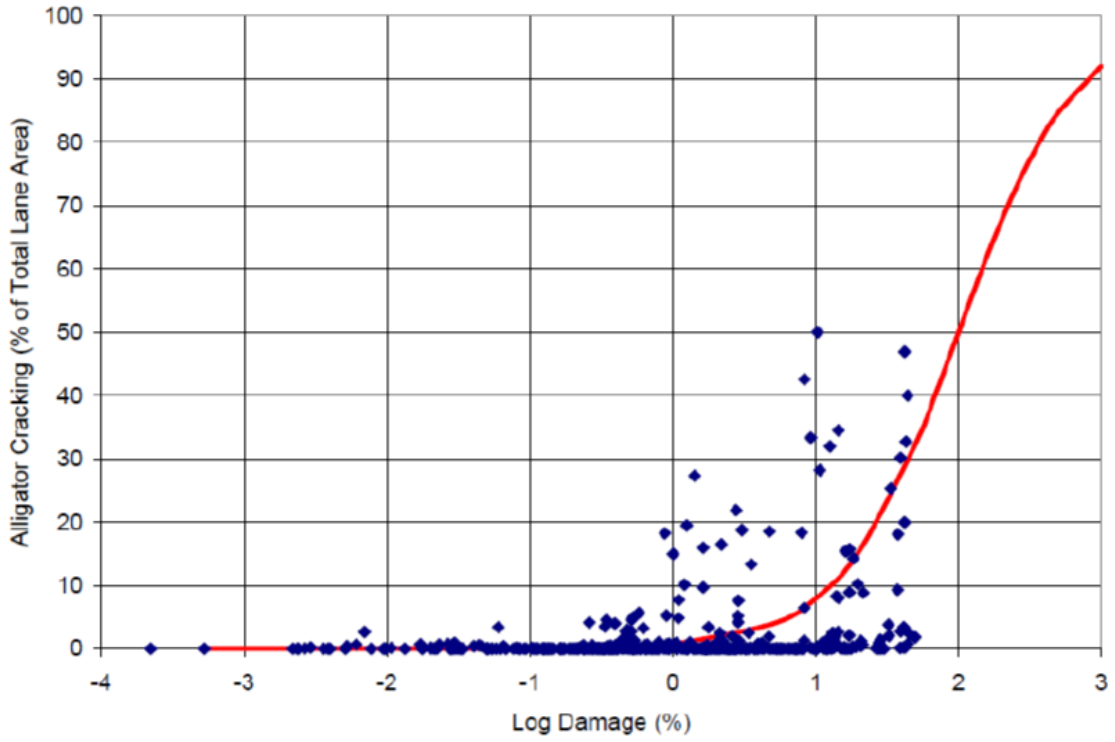


Figura 17 – Resultados da calibração da Função de Transferência sigmoidal do MEPDG dada no NCHRP (2004) – (Fonte: NASCIMENTO, 2015)

O *Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG) evoluiu desde então, teve uma versão modificada em 2004, época em que foi disponibilizado um manual detalhado do programa, suas concepções e fundamentos, além da incorporação de um módulo de clima. Em 2008 foi lançada uma versão atualizada mais concisa do manual. Novamente em 2009 novos ajustes foram realizados e atualmente o método está sendo comercializado como software DARWin-ME *Mechanistic Empirical Pavement Design*. Essa versão é um programa muito rápido e que está preparado para dimensionar até 17 situações de projeto, tais como: Pavimentos novos asfálticos e de concreto cimento Portland, combinações de estruturas e reabilitações, analisa a superposição de revestimentos asfálticos sobre concreto ou vice-versa, faz-se a otimização de espessura automaticamente e tem uma versão para unidades de sistema internacional.

A construção do método é evolutiva e muitos dos seus ajustes vieram de indicações de usuários. O software apresenta modelos de desempenho calibrados para uma situação média americana, mas aconselha-se fazer a calibração específica para cada região. As chamadas Funções de Transferência permitem ajustar a parte empírica do método para cada situação de clima, solos e tráfego, entre outros aspectos.

De acordo com AASTHO (2008) o método apresenta critérios de danos admissíveis para os quatro defeitos considerados:

a) O afundamento de trilha de roda é previsto em termos absolutos, ou seja, o incremento calculado para cada período de análise pode ser acumulado diretamente para toda vida de projeto do pavimento, considerando os somatórios das contribuições de cada camada;
b) O trincamento (térmico e fadiga) é previsto em termos de índices de dano, um parâmetro que representa o somatório dos danos associados aos níveis de deformações e tensões no interior da estrutura do pavimento. O dano é acumulado por período de análise usando a lei de Miner. Esse dano é convertido em trinca usando modelos calibrados que relacionam o dano acumulado com trincas observáveis, chamada Função de Transferência;
c) *International Roughness Index* (IRI);
d) Trincas longitudinais.

O Instituto do Asfalto norte americano (*Asphalt Institute* – AI) propôs, na década de 1980, um método baseado originalmente em análises de dados coletados no AASHO Road Test, e o conceito de desempenho e serventia da AASHO influenciou diretamente a seleção de um nível de serventia mínimo feito na metodologia de projeto do AI. Na versão do guia de projeto do AI, utiliza-se ferramenta computacional SW – 1 "Programa computacional para dimensionamento de espessuras de pavimentos asfálticos do Instituto do Asfalto". Desenvolvido originalmente por Witczak e Huang e denominado DAMA, foi usado pelo guia de projeto do AI para determinar a espessura mínima de pavimento que atenda aos critérios de ruptura por fadiga e deformação permanente. Para a análise de tensão e deformação o programa utiliza foi o programa analítico N – Layer da Chevron. Teve várias atualizações ao longo destas décadas.

Os critérios de falha utilizados pelo "DAMA" são baseados em critérios de deformabilidade dos materiais. O critério de fadiga correlaciona o número máximo de repetições de carga - N_f com a deformação de tração ε_t na base da camada do revestimento e com o módulo dinâmico |E| da mistura. O critério de ruptura por deformação permanente relaciona o número máximo de repetições de carga N_d com a deformação de compressão ε_c no topo do subleito. São usadas as seguintes expressões (3) e *(4)*:

$$N_f = 0{,}0796 * (\varepsilon_t)^{-3{,}291} \, |E|^{-0{,}854} \qquad (3)$$

$$N_d = 1{,}365 \, x \, 10^{-9} * (\varepsilon_c)^{-4{,}477} \qquad (4)$$

Para projetos de restauração, o AI usa o método de espessura efetiva, ou seja, após realizar a análise mecanística e definir a espessura de pavimento necessário para o N de projeto de uma estrutura nova, o método prevê fatores de conversão para o cálculo da espessura efetiva do pavimento existente. Assim, a real espessura do pavimento já deteriorado é reduzida para uma espessura efetiva de contribuição, que deverá ser deduzida do valor da nova espessura calculada (BRITO *et al.*, 2009).

Há vários métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos, nos EUA, Alemanha, Áustria, Bélgica, Espanha, França, Itália, Portugal, Reino Unido e Suíça, entre outros. Há uma tendência na Europa de se estabelecerem catálogos de estruturas, com base em

métodos analíticos ou mecanístico – empíricos. A teoria elástica linear predomina assim como os ensaios de carga repetida, segundo MEDINA e MOTTA (2015). Destaca-se a tendência na Europa de harmonização dos métodos de dimensionamento entre os vários países, assim como tem sido feito com os métodos de ensaios.

Na França desde a década de 1980 se usa um programa conhecido como ALIZE para cálculos de tensão e deformação nos pavimentos. O método de dimensionamento mecanístico empírico ALIZE permitiu a criação de um catálogo de soluções de pavimentos asfálticos em função do volume de tráfego e do módulo de resiliência do subleito, sendo os materiais das camadas de base, sub-base e revestimento especificados pelo módulo de elasticidade. A última versão em forma de catálogo foi feita em 1998.

O objetivo de um catálogo de pavimentos era facilitar o trabalho de engenheiros e projetistas para uso em anteprojetos e orçamentação colocando à disposição várias soluções tecnicamente viáveis para seleção e refinamento posterior no caso de obras novas. Porém no início do século XXI com a popularização dos computadores a França passou a adotar o dimensionamento mecanístico – empírico feito para cada projeto em particular, abandonando gradualmente a ideia do catálogo.

Em 2011 foi lançada uma nova versão do ALIZE-LCPC software1.3 que permite a análise mecanística empírica das estruturas dos pavimentos, e constitui uma ferramenta regulatória para o projeto de pavimento para as rodovias federais francesas. O programa permite levar em conta os efeitos do gelo e degelo no dimensionamento da estrutura do pavimento, tem um módulo de cálculo de tensões e deformações geradas na estrutura do pavimento pelo tráfego e um módulo de retroanálise das bacias de deflexão que permite a obtenção dos módulos elásticos dos materiais das camadas, fazendo a avaliação estrutural de um pavimento em uso e o projeto de reforço, se necessário. O programa também dispõe de telas de entrada de dados e uma biblioteca de valores típicos, com valores de especificações de materiais para várias camadas do pavimento.

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis na Inglaterra *Highways Agency* (HA) é baseado em metodologias empíricas estudadas no país, segundo BRITO *et al.* (2009). O método especifica os tipos de materiais, os critérios para consideração do tráfego, métodos construtivos e considera os seguintes tipos de revestimento asfáltico:

- Macadame Betuminoso Denso – DBM;
- Misturas Asfálticas à Quente;
- Misturas Asfálticas de Alto Módulo.

O dimensionamento de pavimentos flexíveis é feito de maneira simples. Inicialmente determina-se a classe do subleito através de um Ábaco representado por diferentes níveis de tráfego e espessura do revestimento em mm para pavimentos flexíveis com base estabilizada, estabelecida a partir do módulo de resiliência. Definido o nível de tráfego para o período de projeto escolhem – se os tipos de materiais asfálticos. O projetista também escolhe se o projeto será com base estabilizada ou base asfáltica e com isso define-se a espessura do revestimento através do Ábaco.

De acordo com o site www.standardsforhighways.co.uk/ os projetos de dimensionamento para alto volume de tráfego, devem ser dimensionados para um período de 40 anos, enquanto os projetos de pavimentos com menor volume de tráfego devem ser projetados para 20 anos. Além da manutenção permanente a aplicação de um tratamento superficial pode ser necessária, a cada 10 anos e em intervalos de 20 anos dependendo da natureza do tráfego e do requisito local para o atrito.

A *Highways Agency* define valores de módulo de rigidez elástica dos materiais padronizados do Reino Unido para misturas asfálticas, para projeto analítico, a menos que dados confiáveis sejam obtidos. No caso de materiais não padronizados especialmente os provenientes da normalização europeia é necessário que as propriedades sejam conhecidas, tais como: módulo de rigidez em relação a idade, a cura e ao grau de confinamento. As propriedades podem ser obtidas de diversas maneiras, dependendo da natureza dos materiais e das propriedades requeridas no projeto.

O método de dimensionamento de pavimentos asfálticos na Inglaterra ainda permanece com a base empírica predominante no guia oficial do país, embora use características dos materiais medidos por módulo de resiliência ou rigidez.

Apesar de vários estudos recentes caminharem para o uso de método mecanístico, a *Highways Agency*, órgão federal responsável pela manutenção rodoviária do Reino Unido, ainda mantém o método indicado do guia no volume 7 do Manual para Projeto

de Rodovias e Pontes que especifica os tipos de materiais, os critérios para a consideração do tráfego e os métodos construtivos.

Segundo SOARES *et al.* (2009) o método de dimensionamento de pavimentos da Alemanha é regido pelo documento "Diretrizes para Normalização de Pavimentos em Estradas RStO 01" – *Richtlinien für die Standartisierung des Oberbaves von Verkehrsflächen, RStO 01*, editado pelo Centro de Investigação de Estradas e Transportes – *Forschunsgesellschaft für Strassen und Verkehrswesen,* FGSV, vigente desde 2001.

O método é baseado em catálogos com tabelas distintas para pavimentos asfálticos, pavimentos de concreto de cimento Portland e para pavimentos com bases estabilizadas quimicamente, cada um contendo subtipos. A única entrada na tabela é o tráfego que é obtido a partir do número de eixos convertidos para o eixo padrão de 10 tf, acumulados em 30 anos.

Outro aspecto considerado é que o subleito deve ter capacidade de suporte mínimo de 45 MPa medido por ensaio de placa estático com 300 mm de diâmetro. Porém se o subleito superar 80 MPa admite-se a redução nas espessuras do catálogo. Essas soluções foram baseadas na experiência prática, em investigações e cálculos analíticos.

Na Áustria o método de dimensionamento é apresentado em forma de catálogo com três tabelas para cada tipo de pavimento, tais como: pavimento asfáltico, pavimento de cimento portland e pavimento semirrígido. O projetista deve entrar com o tráfego e o tipo de pavimento. Os resultados foram calibrados a partir de dados de rede austríaca e de métodos analíticos elásticos – lineares, considerando temperaturas em cada mês do ano e fazendo o uso da lei de Miner, que representa o dano acumulado da resistência à fadiga. Neste método de dimensionamento o subleito deve alcançar uma capacidade de suporte mínima de 30 MPa medidos no segundo ciclo de cargas do ensaio de placa e o tráfego é obtido através do número de aplicações do eixo padrão equivalente a 100 kN, na faixa de projeto durante o período de projeto.

SOARES *et al*. (2009) descrevem que na Bélgica existe mais de um método em utilização, mas considera-se como padrão o documento "Características de Estradas e

Autopistas" – *Caractéristiques Routières et Autoroutières*, vigente desde 1991. As soluções são apresentadas em duas tabelas: pavimentos flexíveis e semirrígidos, e em pavimento de concreto cimento. A entrada dos dados é em função do tráfego que é considerado pelo VDM 10 anos, com diferentes percentuais de veículos pesados para Autopistas ou outras vias. E em relação ao subleito, são indicadas espessuras de reforço de subleito em função do CBR do terreno natural.

Na Itália o método de dimensionamento é baseado em catálogo para soluções de pré – dimensionamento, regido pelo guia "Pavimentos de Estradas" – *Catálogo dele Pavimentazioni Stradalli*, editado em 1995. O catálogo deixa o projetista responsável pelo ajuste da solução a partir das condições do tráfego, subleito e materiais, onde são definidos oito tipos de rodovias, e para cada tipo são definidas quatro tabelas correspondentes a quatro tipos de pavimentos: flexível, semirrígido, rígido sem e com armadura. A entrada de dados se dá em função do tráfego e do tipo de subleito. Neste método as seções do catálogo também foram definidas com base nos cálculos elástico – lineares, considerando a Lei de Miner.

O subleito é definido em função do MR obtido em ensaio triaxial de carga repetida. Porém admite-se caracterizar o subleito por meio do seu valor de CBR ou pelo módulo de reação obtido no ensaio de placa. São definidas três categorias de MR que variam de 30 a 150 MPa e o tráfego é dividido em seis categorias, medida pelo número de veículos pesados na faixa mais solicitada durante o período de projeto.

SOARES *et al*. (2009) descrevem que o método de dimensionamento da Suíça consta de varias normas, como: SN 40324a denominada "Dimensionamento: Superestrutura das Estradas" – *Dimensionnement: Superstructure dés routes*, vigente desde 2001. O método baseia-se em catálogos, com seis tabelas para pavimentos flexíveis e semirrígidos e quatro para pavimentos de concreto cimento. Para cada uma delas deve-se entrar com o tráfego e com os dados do subleito. São cinco tipos de subleito que podem ser classificados por um dos seguintes parâmetros:

- Ensaio de carga com placas: Módulo, MPa;
- Ensaio de CBR;

- Módulo de reação, semelhante ao usado para caracterização das camadas de suporte dos pavimentos de concreto cimento MPa / m;
- Tráfego: é definido em seis eixos equivalentes avaliados em um dia médio. Esses eixos acumulados são divididos pelo período de projeto e levam em consideração seis categorias.

Na Espanha o método de dimensionamento é baseado na norma 6.1 – 1C "Seções de Pavimentos" *Secciones de firmes*, vigente desde 2003. O método é apresentado por meio de catálogo com entrada do tráfego e tem uma base analítica para pavimentos flexíveis e empíricos para pavimentos rígidos e semirrígidos. São definidas três categorias de subleito baseados no Módulo obtido no segundo ciclo do ensaio de placa, porém para cada tipo há um deslocamento padrão máximo. São indicadas espessuras de reforço de subleito para cada tipo em função das características do terreno natural. São definidas oito categorias de tráfego em função do volume médio diário de veículos pesados na faixa de projeto e no ano de início do funcionamento da via.

Apesar dos métodos de dimensionamentos dos países europeus serem na maioria baseados em catálogos, muitos deles permitem ao projetista, tomadas de decisões alternativas ao proposto no catálogo. Maiores detalhes dos métodos de dimensionamento, baseados em catálogos, podem ser vistos em SOARES *et al.* (2009).

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis Português, segundo o Manual de Concepção de Pavimentos da JAE, chamado MACOPAV é baseado em catálogos elaborados em 1995. Segundo JAE (1995) o manual destina-se a ser aplicado na fase de pré-dimensionamento, devendo as estruturas dos pavimentos serem reajustadas, por meio de cálculo, em fase de projeto de execução. As estruturas propostas pelo manual foram definidas em função da "Classe de Tráfego", da deformabilidade da fundação de suporte do pavimento e dos materiais de pavimentação utilizados.

Na base de cálculo do manual foram consideradas a fadiga de misturas asfálticas e a deformação permanente dos materiais granulares. Basicamente o MACOPAV é um manual que permite ao projetista, em fase de estudos, selecionar uma estrutura de pavimento flexível, em função do nível de tráfego previsto para a rodovia. O MACOPAV pode ser dividido em dois grupos: o primeiro avalia e sistematiza os dados

necessários para o pré – dimensionamento e o segundo define qual estrutura de pavimento melhor se adequa ao projeto. A seguir estão mostrados os parâmetros para o dimensionamento de pavimentos flexíveis:

- Caracterização do tráfego: é dividido em 11 categorias de veículos;
- Fator de agressividade: Definido pela heterogeneidade do tipo de eixo pesado induz nos pavimentos um espectro de carga bastante variável;
- Número acumulado de eixos padrão: É definida a partir do fator de agressividade, calcula-se o eixo padrão acumulado para o período de projeto, através da seguinte expressão *(5)*.

$$N_{dim} = 365 * TMDA_p * C * \alpha * p \qquad (5)$$

Onde:

N_{dim} = Número acumulado de passagens de eixos padrão;
$TMDA_p$ = Tráfego médio diário anual, $_{\text{pesado}}$;
C = Fator de crescimento do tráfego;
α =Fator de agressividade do tráfego pesado;
p = Período de dimensionamento (20 anos).

- Condições climáticas: Depende da localização geográfica do país (considera ou não os efeitos do gelo e degelo);
- Condições hídricas;
- Condições térmicas: O MACOPAV considera o território nacional em três zonas (zona quente, média e temperada) usado somente para a escolha do ligante asfáltico;
- Fundação do pavimento: Capacidade de suporte da fundação;
- Materiais de pavimentação: Materiais betuminosos e materiais granulares;
- Critérios de ruptura: Fadiga e deformação permanente.

MACOPAV propõe para pavimentos flexíveis três estruturas tipo, conforme mostrado na Figura 18:

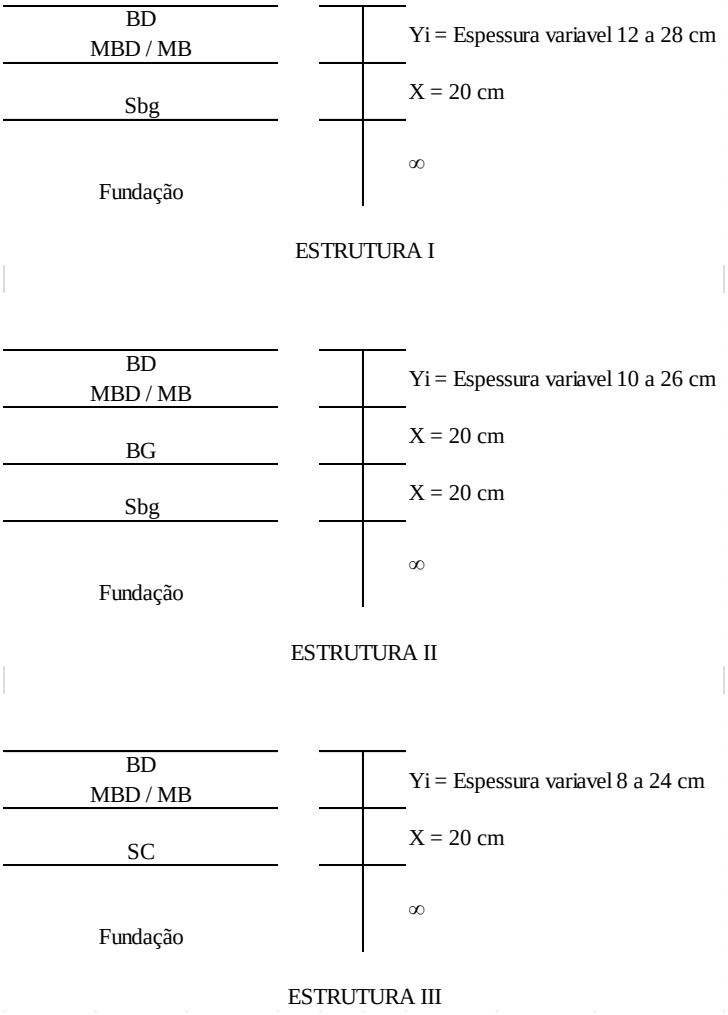


Figura 18 - Geometria das estruturas de pavimento consideradas no catálogo do MACOPAV (Fonte JAE, 1995).

Onde:

BD = Betão Betuminoso ou concreto asfáltico;

MBD = Mistura Betuminosa Densa;

MB = Macadame Betuminoso;

Sbg = Material Britado sem recomposição – camada sub-base;

BG = Material Britado sem recomposição – camada base;

SC = Camada solo – cimento.

Como considerações finais pode-se dizer que o MACOPAV é um método expedito de dimensionamento de estruturas de pavimentos e a metodologia proposta pelo manual inclui varias considerações simplificadas, tais como:

- Clima: considera uma temperatura média de serviços uniforme para todo o território nacional;
- Características dos materiais de pavimentação, principalmente no que diz respeito a misturas betuminosas o manual considera o módulo de deformabilidade de 4000 MPa para todas as camadas betuminosas indiscriminadamente;
- Considera a solicitação do eixo padrão de 80 kN.

A África do Sul é um dos países que desenvolveu tecnologias de avaliação de pavimentos pioneiros, especialmente nas décadas de 1970 / 1980, com a criação e o uso de simuladores de tráfego móvel (HVS). No início de 1980 foi desenvolvido um método SAMDM para projeto de pavimentos novos e reabilitação. O método foi desenvolvido e testado extensivamente, à época, através de testes acelerados com o uso do HVS.

A África do Sul passou para uma fase de catálogo de pavimentos e teve várias versões dos Manuais, tais como: TRH14 (1985) e TRH 14 (1995). O atual manual da África do Sul (*South African Pavement Engineering Manual* – SAPEM) é composto por 14 capítulos, tais como: Introdução do Manual SAPEM, composição do pavimento e comportamento, ensaios dos materiais, padrão de ensaios, gerenciamento e gestão de laboratórios, investigação do pavimento, investigações geotécnicas, fontes dos materiais, materiais e projetos, projeto de pavimento, documentação e contrato, construção e diretrizes, gestão de qualidade e pós execução.

No dimensionamento de pavimentos flexíveis é feita uma distinção entre defeitos estruturais, condição estrutural final e falha estrutural. Os critérios de dimensionamento destinam-se a limitar as condições de ruptura estrutural pela passagem das cargas a valores admissíveis que estejam antes da falha estrutural de pavimentos propriamente. O projeto estrutural de pavimento corresponde a calcular as espessuras das camadas de forma a obter uma capacidade de carga para a demanda de tráfego e dados do meio ambiente. Para o projeto de pavimentos novos é necessário:

- Uso de materiais de resistência e rigidez suficientes nas camadas estruturais para suportar o carregamento;

- Fornecer cobertura suficiente para o subleito para garantir que esteja fora da área de tensão vertical elevada;
- Criar uma base de suporte adequado para as camadas de revestimento;
- Criar uma transição gradual de características de camadas estruturais para o subleito;
- Minimizar a resistência de materiais com o comportamento adequado.

A versão do método de projeto SAMDM Sul Africano mecanístico – empírico de 1996 tem sido amplamente atualizado por muitos anos no país. Atualizado em 2014 o método indica uma gama de módulos de resiliência típicos e resistência dos materiais que são valores de entrada do programa, referentes aos materiais de construção de estradas da África do Sul.

O método atual SAMDM utiliza novos modelos de deformação permanente do subleito. Estes modelos utilizam a deformação elástica na parte superior da camada do subleito para prever a deformação permanente, que é um preditor melhor do que a tensão de compressão vertical. Além disto, novas Funções de Transferência utilizando a deflexão foram desenvolvidas, porém esses novos critérios ainda não foram amplamente implementados.

Atualmente na África do Sul existem mais três programas de dimensionamento:

a) O software Cyrano é amplamente baseado no método de Projeto Sul Africano mecanístico – empírico SAMDM com algumas modificações e adições como: novos modelos de deformação permanente de camadas granulares em função de tensões e mudanças na rigidez de camadas com o numero de ciclos de carga. O software utiliza o Elsyn 5 para o calculo das tensões – deformações.
b) O software PADS (Pavement Analysis and Design Software) o PADS usa um programa GAMES com número irrestrito de camadas e área de contato do pneu não uniforme. O software é composto de um número de componentes independentes que são integradas em um único pacote para o nível de projeto e análise.

c) O software Rubicon Toolbox utiliza o programa WESLEA para análise de tensões e deformações. O software consiste de um número de componentes independentes que podem ser combinadas de acordo com a necessidade do usuário.

O método de dimensionamento mecanístico empírico desenvolvido na Austrália e Nova Zelândia é chamado de *Austroads Pavement Design Guide* (APDG), publicado em 1992 e revisado em 2004. A partir daí varias revisões do guia e do método vem sendo feito a partir da avaliação da aplicação do próprio método, atualmente a versão mais recente é de 2012. O método de 2004 utiliza um processo analítico que define a resposta do pavimento em relação a um carregamento simples em função de respostas críticas:

- Deformação horizontal de tração na base da camada asfáltica ou cimentada;
- Deformação vertical de compressão no topo do subleito.

A deformação é utilizada neste método como parâmetro de entrada no programa para análise do desempenho do pavimento que correlaciona o dano crítico em relação ao tráfego máximo para o período de projeto previsto. O APDG (2004) utiliza um programa computacional chamado CIRCLY para o cálculo das análises mecanísticas. O programa calcula as tensões, deformações e deslocamentos considerando o número N de projeto na estrutura de multi camadas em análise.

A deformação vertical de compressão máxima no topo do subleito é correlacionada ao número N do eixo padrão, necessário para ocorrer a deformação permanente máxima aceitável no pavimento. O método também analisa a máxima tensão horizontal na fibra inferior da camada asfáltica ou cimentada e correlaciona esses valores ao tráfego necessário para o fim da vida de projeto do pavimento em relação ao trincamento por fadiga.

A metodologia mecanística empregada neste programa envolve o cálculo do dano ao pavimento em função das deformações críticas. Esses parâmetros mecanísticamente determinados são correlacionados empiricamente por critérios de falha estabelecidos por relações observadas do desempenho do pavimento em serviço.

Da edição de 1992 para a versão de 2004 a principal mudança foi a adição de análise mecanística com fator de dano acumulado, introduzido nessa versão. O fator de dano é definido para o i-ésimo eixo de carga em relação ao número de repetições de carga em uma dada deformação. Essa deformação é dividida pelo número permitido de repetições de carga da deformação que causaria a ruptura do pavimento. O fator de dano acumulativo é obtido pela soma dos danos gerados de todos os carregamentos do espectro de carga utilizando a hipótese de Miner.

O método de dimensionamento APDG (2004) admite que o pavimento atinge sua vida de projeto quando o dano acumulado é igual a 1,0. E se o dano acumulado for menor do que 1,0 o pavimento tem capacidade de suportar um número de solicitações superior ao projetado.

Atualmente o Guia 2012 Austroads utiliza um programa computacional modificado de 2004, CIRCLY 4 e tem como objetivo selecionar a espessura do pavimento mais econômico e composição que vai fornecer um nível satisfatório de serviço para o tráfego esperado. Mais detalhes do guia 2012 da Austroads pode ser visto no relatório técnico nº 3 da COPPE / UFRJ de 2016.

O Laboratório Nacional de Materiais e Modelos Estruturais (LANAMME) apresentou em 2013 a primeira versão do software CR – ME para projeto mecanístico – empírico na Costa Rica. O software CR – ME é acompanhado de um guia de projeto que serve como diretriz para o projetista. O CR – ME parte de um pré-projeto baseado no método da AASHTO de 1993 e depois avaliam os critérios de deformação permanente e fadiga, bem como os efeitos do clima.

O LANAMME iniciou um guia mecanístico de dimensionamento de pavimentos calibrada para Costa Rica, e foram desenvolvidos modelos de fadiga, deformação permanente e dano por umidade de misturas asfálticas a quente, além de equações de módulos de resiliência para bases granulares e solos, entre outros. Os parâmetros técnicos com os quais a avaliação da rede rodoviária foi realizada nos anos de 2014 e 2015 estão relacionados diretamente com a vida de serviço ou com o custo operacional da frota de veículos em circulação e segurança rodoviária.

A Argentina está desenvolvendo um método de dimensionamento mecanístico – empírico para análise de pavimentos flexíveis chamado BackViDe. O método é constituído de subprogramas por meio de plataforma Fortran e também um programa de retroanálise, com dados de entrada de tráfego baseado no eixo padrão e a influencia do clima.

No BackViDe utilizam-se módulos dinâmicos para misturas asfálticas e módulo de resiliência para materiais granulares. O comportamento analisado é representado em termos de irregularidade superficial, porcentagem de trincas, panelas e afundamento de trilha de roda.

O *Manual de Carreteras* (MC) do Ministério de Obras Públicas (MOP) do Chile teve sua versão atualizada em 2015. O MC da *Dirección de Vialidad* (DV) do Chile é um documento normativo que serve de guia para diferentes ações de competência técnica do serviço. Este documento estabelece critérios, procedimentos, especificações e métodos que indicam as condições a serem cumpridas nos projetos e demais atividades rodoviárias que tem relação com as diversas fases do ciclo de vida de um projeto de estradas.

O MC proposto é baseado no método da AASHTO de 1993 para pavimentos asfálticos e o AASHTO de 1998 para pavimentos rígidos. Porém assinalam que isto não quer dizer que não se possa utilizar outro método comprovado.

De modo geral, a maioria dos países vem desenvolvendo seus próprios métodos de dimensionamento mecanísticos, o que mostra que é a tendência para os métodos de dimensionamentos de pavimentos novos e restaurados. Essa tendência tende a ser cada vez mais difundida e deve ser ajustada periodicamente em nível nacional e regional principalmente em países como o Brasil que apresenta diferenças em relação a clima, materiais e cargas ao longo do seu grande território.

2.8 Cenário Atual do Modal Rodoviário Brasileiro

Uma infraestrutura de transporte é adequada quando proporciona à sociedade um importante desenvolvimento social e cultural, através da mobilidade adequada de

produtos e pessoas. O modal rodoviário brasileiro tem sido a preferência para movimentação de passageiros e de cargas: aproximadamente 61% do transporte de cargas e 90% da movimentação de passageiros é realizada por meio do transporte rodoviário e seguido de 20,7% de modais ferroviários, 13,6% de aquaviário, 4,2% de dutoviário e 0,4% de modal aeroviário (CNT, 2015).

CNT (2015) apresenta no seu relatório geral, que o Brasil tem 1.720.607 km de rodovias, deste total 213.299 km são de rodovias pavimentadas, 1.353.186 km de rodovias não pavimentadas e 154.192 km de rodovias planejadas. Destes 213.299 km de rodovias pavimentadas no Brasil, 66.712 km são de rodovias federais, 119.691 km de rodovias estaduais e 26.826 km de rodovias municipais. Nestes 66.712 km de rodovias federais tem-se 5.830 km de rodovias federais duplicadas, 1587 km de rodovias federais em duplicação e 59.295 km de rodovias federais de pista simples.

Nos últimos dez anos a extensão da malha rodoviária federal pavimentada cresceu 14,7%, passando de 58,2 mil km no ano de 2005 para pouco mais de 66,7 mil km no ano de 2015. Num cenário geral o país está aquém do modal rodoviário necessário para o desenvolvimento sócio econômico e cultural de um país em desenvolvimento.

O Relatório descreve ainda que parte dessas rodovias federais pavimentadas não é considerada adequada para o tráfego de pessoas e produtos. De modo geral muitas rodovias federais foram penalizadas, ao longo dos anos, pela ausência de investimentos em manutenção e/ou conservação favorecendo cada vez mais a depreciação da malha rodoviária brasileira. Outro fator preocupante no cenário brasileiro é o crescente aumento do volume de tráfego, conforme mostrado na Tabela 10, que combinado com as más condições das rodovias, implica em aumento do número de acidentes além do custo para a reabilitação dessas rodovias.

Além da reduzida extensão da malha rodoviária em relação a área total, o Brasil está na 121ª posição do ranking de competitividade global do Fórum Econômico Mundial segundo CNT (2015) em relação à qualidade das rodovias brasileiras, de um total de 140ª países analisados. O Brasil ficou na 6ª posição entre os países da América do Sul, atrás do Chile (35ª), Uruguai (95ª), Argentina (108ª), Bolívia (109ª) e Peru (111ª). Nesta avaliação é utilizado notas que variam de 1 (extremamente subdesenvolvida – entre as

piores do mundo) e 7 (extensa e eficiente – entre as melhores do mundo). No índice de competitividade em questão, o Brasil recebeu a nota 2,7.

Tabela 10 - Frota total de veículos – DENATRAN 2016

FROTA NACIONAL DE VEÍCULOS - BRASIL				
CATEGORIA	JANEIRO DE 2013	JANEIRO DE 2015	JANEIRO DE 2016	TAXA CRESCIMENTO 2015/2016, %
AUTOMÓVEL	42.913.174	48.132.327	49.938.038	3,62
CAMIONETA	2.306.729	2.747.302	2.919.376	5,89
UTILITÁRIO	413.199	570.138	642.063	11,20
CAMINHÃO	2.389.687	2.595.165	2.649.209	2,04
CAMINHÃO TRATOR	495.993	580.264	595.107	2,49
CAMINHONETE	5.278.497	6.282.280	6.606.464	4,91
ÔNIBUS	517.027	576.017	591.659	2,64
MICROÔNIBUS	321.123	362.933	376.144	3,51
MOTOCICLETAS	20.207.322	23.136.549	24.397.950	5,17
TRATOR	27.301	29.790	30.621	2,71
REBOQUE E SEMI-REBOQUE	1.697.266	2.039.205	2.178.700	6,40
OUTROS	20.740	21.701	22.654	4,21
TOTAL	**76.588.058**	**87.073.671**	**90.947.985**	**4,26**
Fonte: Ministério das Cidades, DENATRAN - Departamento Nacional de Trânsito, RENAVAM-Registro Nacional de Veículos Automotores				

No ano de 2015 o cenário avaliado pelos técnicos e apresentado pela CNT (2015) mostra que 57,3% da extensão total avaliada, referentes a rodovias federais apresentam algum tipo de deficiência, seja na pavimentação, sinalização ou na geometria da via. Desse total foi concluído que 6,3% encontram-se em péssimo estado, 16,1% ruim e 34,9% regular e que 42,7% das rodovias pesquisadas (de um total de 43.104 km de extensão) apresentam condições de segurança e desempenho adequadas, classificado como ótimo ou bom no estado geral.

Outro aspecto interessante apresentado neste estudo foram as avaliações das condições superficiais encontradas: identificadas trincas e/ou remendos em 19,9% de 20.007 km avaliados para essas patologias e afundamentos, ondulações e buracos encontrados em 4,4% de 4.463 km avaliados, desgaste encontrado em 39,8% de 100.763 km avaliados e o restante do pavimento de um total de 160.923 km avaliados, ou seja, 35,4% de 35.690 km de pavimento em perfeito estado, dados da CNT, (2015).

2.9 Função de Transferência do Dano Simulado para Área Trincada

O MEPDG usou uma abordagem mecanística que foi empiricamente calibrada utilizando dados de desempenho de campo para estabelecer a seção estrutural necessária

para um determinado conjunto de carga, materiais e condições ambientais. Esta calibração foi realizada para abranger todas as regiões dos EUA, ou seja, definir um fator de calibração nacional, segundo EI – BASYOUNY, (2004 apud SOULIMAN, 2009).

SOULIMAN (2009) descreve que os resultados de previsão do MEPDG a nível nacional foram conduzidos pela universidade do estado do Arizona, no âmbito do projeto NCHRP 1-37A. Este projeto contemplou 134 seções testes com diferentes condições estruturais, tráfego e clima, construídos em diferentes regiões dos EUA. Foram utilizados na calibração nacional dos EUA dois modelos de fadiga (*Shell* e do *Asphalt Institute*) e um de deformação permanente.

Um dos modelos de calibração de fadiga utilizado no estudo da calibração nacional do MEPDG foi proposto por MONISMITH et al (1985 apud SOULIMAN, 2009) mostrado na expressão *(6)*, conhecido como modelo do *Asphalt Institute*:

$$Nf = k1 * \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{k2} * \left(\frac{1}{\boldsymbol{E}}\right)^{k3} \qquad (6)$$

Onde:

$Nf =$ Número de repetições

$\varepsilon_t =$ Deformação de tração no local crítico

$E =$ Rigidez do material – Módulo dinâmico

$k1, k2\ e\ k3 =$ Constantes dos materiais obtidos em laboratório antes da calibração nacional

sendo:

$k1 =$ 0,00432 * C;

C = 10^{M};

M = $4{,}84\left(\frac{Vb}{Va+Vb}\right) - 0{,}69$

Va = Volume de vazios, %

$Vb =$ Volume de ligante efetivo

O principal propósito do estudo de Souliman foi calibrar o modelo MEPDG nacional alterando os fatores de k de modo a reduzir o erro previsto associado com o modelo MEPDG original. Isso foi feito através da multiplicação dos fatores k originais por fatores de calibração nacional apresentado na expressão *(7)*

$$Nf = \beta_{f1,nacional} * \ k1 * \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{\beta_{f2,nacional} * k2} * \left(\frac{1}{E}\right)^{\beta_{f3,nacional} * k3} \qquad (7)$$

Onde:

$\beta_{f1,nacional}, \beta_{f2,nacional}\ e\ \beta_{f3,nacional}$ = Fatores de Calibração Nacional

A equação *(8)* pode ser ainda mais simplificada, como:

$$Nf = \boldsymbol{K1} * \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{\boldsymbol{K2}} * \left(\frac{1}{E}\right)^{\boldsymbol{K3}} \qquad (8)$$

Onde:

$\beta_{f1,nacional} * \ \boldsymbol{K1}$

$\beta_{f2,nacional} * \ \boldsymbol{K2}$

$\beta_{f3,nacional} * \ \boldsymbol{K3}$

Para cada coeficiente ($\boldsymbol{K1}, \boldsymbol{K2}\ e\ \boldsymbol{K3}$) o fator de calibração nacional ($\beta_{fi,nacional}$) foi introduzido para eliminar o viés ("bias") e a dispersão das previsões. Segundo SOULIMAN, (2009) simulações foram realizadas com o uso do software MEPDG para combinações de valores dos fatores de calibração ($\beta_{f2\ e}\ \beta_{f3}$). Além disso, uma solução foi otimizada usando o β_{fi} nacional como uma função em relação a espessura total da camada de concreto asfáltico. Este último foi usado para minimizar o erro na fase da propagação de fissuras e trincas por fadiga.

Foram utilizados valores de 0,8; 1,0 e 1,2 utilizando o modelo original do MEPDG na deformação $\beta_{f2,nacional}$, valores de 0,8; 1,5 e 2,5 para o fator de calibração do módulo. Foram aplicadas diferentes combinações de ($\beta_{f2\ e}\ \beta_{f3}$) e verificou-se que a melhor combinação foi de 1,2 e 2,5, para os dois fatores de calibração, respectivamente.

O modelo de fadiga final utilizado na calibração nacional do MEPDG está mostrado na expressão *(9)*.

$$Nf = 0{,}00432 * C * \beta_{f1,nacional} * 0{,}007566 \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{3{,}9492} * \left(\frac{1}{E}\right)^{1{,}281} \qquad (9)$$

Após análise entre os dois modelos de fadiga avaliados neste estudo da calibração nacional (*Shell* e o *Asphalt Institute*) o modelo do AI foi, então escolhido para o Design Guide de 2002.

A Função de Transferência definida pelo modelo de fadiga usado na calibração do MEPDG foi assumida por uma função matemática sigmoidal, conforme mostrado na expressão *(10)*, onde 100% do dano corresponde a F.C. igual a 50% de Área Trincada.

$$F.C. = \left(\frac{6000}{1+e^{c1-c2*\log D}}\right) * \left(\frac{1}{60}\right) \qquad (10)$$

Onde:

$F.C.$ = Trincas por fadiga, % da área;

D = dano em porcentagem;

$c1\ e\ c2$ = Coeficientes de regressão;

A constante 6000 é a área total da faixa analisada;

$\frac{1}{60}$ = é o fator de conversão para obter área trincada em %.

Os coeficientes de regressão ($c1\ e\ c2$) foram definidos com a ferramenta Solver.

$c1 = +2 * c2$

$c2 = -2{,}40874 - 39{,}748*(1 + h_{ac})^{-2{,}856}$

SOULIMAN, (2009) descreve que vários estados já haviam concluídos suas calibrações locais, enquanto que outros estados estavam em processo de finalização. O

referido autor relata alguns dos estados que já concluíram suas calibrações, descritos a seguir.

Em Wisconsin, a calibração local para o modelo de fadiga do MEPDG foi desenvolvido por KANG e ADMAS, (2007). Os fatores de calibração do modelo de fadiga estão relacionados com condições climáticas, carga, tipo de eixos e estrutura do pavimento e o modelo de fadiga MEPDG foram calibrados em uma base regional destes fatores.

Essa calibração foi feita comparando o desempenho do pavimento observado em campo com o desempenho previsto. Os valores padrão no MEPDG foram aplicados inicialmente e em seguida os fatores de calibração foram ajustados para minimizar a diferença entre os desempenhos do pavimento observado e previsto.

O coeficiente β_{f1} , neste caso, foi assumido como sendo 1,0, para todas as seções, devido a espessuras das camadas asfálticas serem superiores a 3" (7,6 cm). Já os três valores de β_{f2} e β_{f3} utilizados para a definição dos coeficientes de calibração final foram 0,8; 1,0 e 1,2 para β_{f2} e 0,8; 1,5 e 2,5 para β_{f3}.

Os valores definidos dos fatores de calibração finais apresentados pelo estado de Wisconsin foram β_{f1} = 1,0 ; β_{f2} = 1,2 e β_{f3} = 1,5, e o $c1$ e $c2$ obtido foi de 1,0 para ambos os coeficientes baseados na Função de Transferência do modelo de fadiga.

No estado de Washington a calibração local foi feita pelo Departamento de Transportes do estado de Washington (WSDOT). O WSDOT realizou a calibração baseado na segunda metodologia recomendada pelo manual do MEPDG, que considera metade dos segmentos experimentais para calibração e a outra metade dos segmentos para a validação da Função de Transferência. Os valores definidos pelo WSDOT foram: β_{f1} = 0,96; β_{f2} = 0,97 e β_{f3} = 1,03 e os valores dos coeficientes $c1$ e $c2$ foram: 1,071 e 1,0, respectivamente, baseados na Função de Transferência do modelo de fadiga.

MUTHADI, (2007) realizou uma calibração no estado da Carolina do Norte. Neste estudo, foi utilizada a ferramenta Solver do Excel, para minimizar o somatório de erro

ao quadrado em função da diferença da área trincada prevista e observada em campo, variado os coeficientes $c1\ e\ c2$.

JUDOUN, (2011) realizou a recalibração final de modelos de previsão do desempenho de pavimentos flexíveis no estado da Carolina do Norte, baseado em 12 segmentos experimentais representativos das estruturas comumente utilizadas no estado. O autor obteve novas constantes para a Função de Transferência.

Segundo SOULIMAN, (2009) embora o erro padrão obtido apresente uma redução significativa após a calibração, os resultados da área trincada prevista não apresentaram uma boa previsão. O referido autor comenta que uma possível razão para essa previsão não adequada é devido a inclusão de seções testes do Departamento de Transportes da Carolina do Norte (NCDOT) no processo de calibração.

Os valores definidos pelo NCDOT foram: β_{f1} = 1,0 ; β_{f2} = 1,0 e β_{f3} = 1,0 e os coeficientes $c1\ e\ c2$ obtidos foram: 0,44 e 0,15, respectivamente, baseados na Função de Transferência do modelo de fadiga.

NASCIMENTO, (2015) realizou sua tese com segmentos experimentais construídos e monitorados na Cidade Universitária da UFRJ – Projeto Fundão e definiu um Fator de Transferência baseado em curvas de fadiga definidas por tração direta e no módulo dinâmico. O referido autor utilizou o modelo viscoelástico de dano continuo (LVECD) para a determinação dos danos médios acumulados de 27 segmentos experimentais contemplados para a definição da FT, depois validada com segmentos experimentais construídos e monitorados em diferentes regiões do país.

Pesquisadores da Universidade do estado da Carolina do Norte desenvolveram e implantaram o modelo VECD, referido como o programa *Layered Viscoelastic Continuum Damage* (LVECD). Essa ferramenta tem mostrado um bom potencial para ser usada como uma abordagem confiável na previsão do desempenho e serve como base para o FHWA / PRS. Atualmente o programa LVECD está sendo verificado com resultados de desempenho observados em campo a partir de vários segmentos experimentais construídos em diferentes regiões dos EUA (NASCIMENTO, 2015).

NASCIMENTO (2015) diz que o conceito de calibração é mais extenso e objetivo do que o processo de validação, uma vez que engloba uma comparação direta entre os defeitos previstos e os observados em campo, onde uma Função de Transferência e seus respectivos erros de previsão devem ser determinados sob condições específicas. Assim o trabalho de calibração exige um acompanhamento sistemático do desempenho observado em campo, em escala real, submetida ao tráfego real, a fim de ser utilizado na análise do pavimento.

NASCIMENTO, (2015) definiu duas funções: uma função "S" onde obteve duas constantes A e B, baseado no dano@0,35 que foram 0,008274 e 0,635237, respectivamente. E uma Função de Transferência onde obteve duas constantes C1 e C2 que foi 7272,68 e 8,6629, respectivamente com um R^2 de 0,72, mostrada na expressão *(11)* e obteve um erro médio padrão de 0,97%. Mais detalhes do procedimento para a definição da Função de Transferência definidas pelo referido autor estão descritos no capítulo 5 deste estudo, visto que a presente pesquisa se baseou em alguns procedimentos propostos por Nascimento.

$$CA = C1 * \left(\frac{N}{N_f}\, red_S\right)^{c2} \qquad (11)$$

Onde:

$CA =$ Porcentagem de área trincada;
$C1\ e\ C2 =$ Constantes de ajuste
$\frac{N}{N_f}\, red_S =$ Dano médio reduzido baseado na Função "S".

3 PROJETO FUNDÃO

O Projeto Fundão é o nome que foi dado a um projeto de pesquisa feito em parceria entre o CENPES, COPPE/UFRJ e a Prefeitura da Cidade Universitária da UFRJ, com o objetivo de testar novos produtos asfálticos em desenvolvimento e novas tecnologias, fazer acompanhamentos sistemáticos de trechos experimentais, auxiliar na capacitação de técnicos, alunos de graduação e pós-graduação, realizar estudos de SMS em pavimentação e ainda, não menos importante, melhorar as condições de trafegabilidade nas principais vias da Cidade Universitária.

O Projeto Fundão teve início em 2006 e foi realizado na Cidade Universitária da UFRJ que se situa na Ilha do Fundão, na cidade do Rio de Janeiro, daí o nome "Projeto Fundão". A Cidade Universitária está localizada na região norte do município do Rio de Janeiro próximo ao Aeroporto Internacional Tom Jobim "Galeão" e da confluência das Linhas Vermelha e Amarela, vias muito importantes no município que apresentam alto volume de tráfego.

Este projeto foi conduzido em parceria entre o CENPES e a COPPE/UFRJ – Setor de Geotecnia e Pavimentos, em dois convênios específicos (Termos de Cooperação Fundão 1 e 2) que repassavam recursos para a universidade e esta fazia a contratação dos serviços de pavimentação, pessoal especializado e a compra de insumos necessários para o andamento dos trabalhos de pavimentação e pesquisa. As atribuições e responsabilidades da COPPE/UFRJ, representada pelo LABGEO do Programa de Engenharia Civil (LABGEO/PEC) nesta pesquisa foram vinculadas principalmente a:

- Levantamentos de dados de campo;
- Executar os procedimentos experimentais previstos de dosagem;
- Analisar e apontar as soluções tecnológicas;
- Contratar os serviços de pavimentação conforme planejado;
- Fazer o acompanhamento sistemático dos trechos experimentais contemplados nesta pesquisa;
- Elaborar relatórios técnicos referentes aos períodos de análise;

- Realizar as atividades do projeto respeitando as normas de segurança vigentes.

É importante enfatizar que o CENPES acompanhou e deu apoio à COPPE/UFRJ em todas as etapas do Termo de Cooperação e que todas as decisões foram tomadas em comum acordo. Ao todo foram construídos 113 segmentos experimentais na Cidade Universitária e dentre estas soluções utilizadas nesta pesquisa de doutorado destacam-se: o uso de misturas mornas com da metodologia desenvolvida e patenteada pelo CENPES, uso de produtos comerciais de terceiros, misturas a quente com o uso de ligantes convencionais e modificados com borracha ou polímeros, uso de agregados alternativos como a argila calcinada. As soluções a frio como tratamentos superficiais simples, duplo e triplo, microrrevestimentos e pré-misturados a frio em diferentes níveis de tráfego: baixo, médio e alto, não serão objeto de análise na presente tese. A extensão contemplada neste projeto, nas etapas 1 e 2, foi de aproximadamente 12 km na sua maioria compostas com três faixas de rolamento, totalizando aproximadamente 130.000m² de testes.

3.1 Histórico da Cidade Universitária

A Ilha do Fundão, que abriga a Cidade Universitária da UFRJ, é uma ilha artificial surgida a partir da interligação de oito ilhas (Cabras, Pindaí do Ferreira, Pindaí do França, Baiacu, Fundão, Catalão, Bom Jesus e Sapucaia), segundo informações do site www.pu.ufrj.br.

A ideia da construção de um campus único para a Universidade Federal é datada de 1935. Em 1944 foi criado, por um decreto presidencial do então presidente Getúlio Vargas o Escritório Técnico da Universidade do Brasil (ETUB) para promover o planejamento e a construção das obras da Cidade Universitária. A ETUB foi responsável pelas obras de implantação e pela construção dos primeiros prédios da Cidade Universitária, e o nome Ilha do Fundão foi herdado da maior ilha das oito reunidas.

Em 1948, após vários estudos, optou-se por situar a Cidade Universitária em uma ilha artificial na Baía de Guanabara, no Estuário de Manguinhos, na Enseada de Inhaúma formada pelos rios Jacaré, Farias e Timbó. No período de 1949 a 1952 ocorreram as

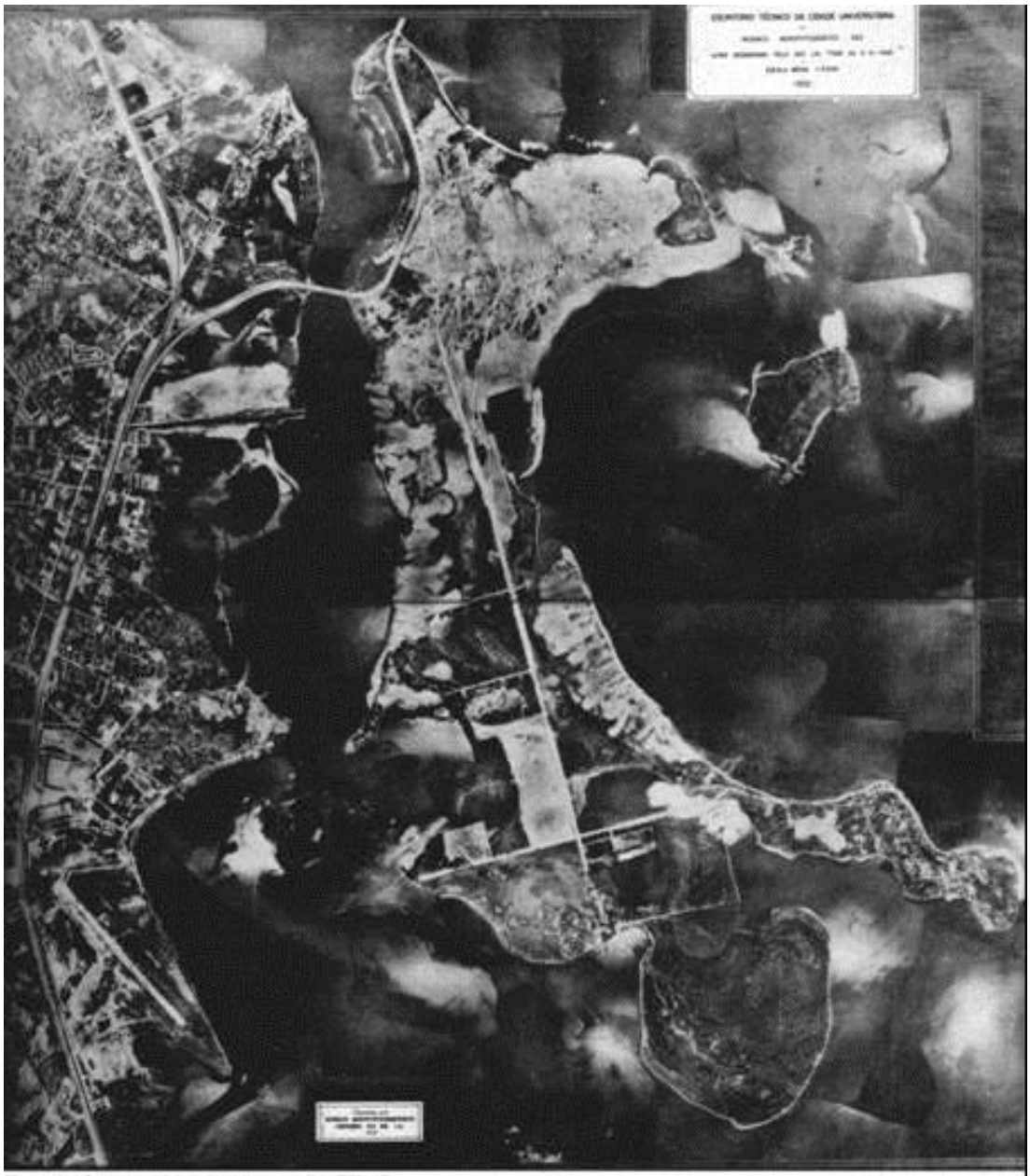
obras de aterramento para interligação das ilhas, dando origem a Ilha da Cidade Universitária da Universidade do Brasil, também conhecida como Ilha do Fundão, com uma superfície de 4,8 milhões de metros quadrados, conforme mostradas nas Figura 19 e Figura 20.

O campus da Cidade Universitária que teve como objetivo concentrar os cursos de graduação da Universidade do Brasil em uma única região, também serviu nos primeiros anos para disputas de corridas de carro, conforme mostrados na Figura 21. No tempo em que as corridas de carro estavam começando no país e ainda não havia sido construído o Autódromo de Jacarepaguá, algumas disputas foram realizadas nas avenidas da Cidade Universitária do ano de 1957 até o final da década de 1960.

A Cidade Universitária foi projetada para uma população inicial de 25 mil pessoas, que poderia chegar a 40 mil, entre alunos, professores, funcionários e pacientes do Hospital Universitário, visto que havia a previsão de habitações para 10 mil alunos e 300 famílias de professores. Estima-se que hoje mais de 60 mil pessoas frequentem a ilha do Fundão diariamente.

A Ilha da Cidade Universitária tem atualmente um conjunto de edificações que congregam 60 unidades acadêmicas e instituições afins conveniadas, além de setores técnicos, esportivos e administrativos da UFRJ. A Cidade Universitária conta com cerca de 40 ruas e avenidas, as principais foram pavimentadas há mais de 40 anos, portanto tendo atingido com certeza a vida útil prevista de projeto e superando a fase que permite a recuperação somente por manutenção localizada.

Durante esse tempo de uso, o volume de tráfego aumentou significativamente, bem como o peso dos veículos comerciais, seja ônibus ou caminhões, principalmente após a construção do acesso da Ilha do Fundão à linha Vermelha sentido Zona Sul. De acordo com a última contagem de tráfego realizada em 2011, cerca de 40.000 veículos circulam diariamente na Cidade Universitária. Hoje a malha urbana e os complexos arquitetônicos desta minicidade, ocupam aproximadamente 50% do território atual da Ilha, conforme mostrado nas Figura 22 e Figura 23.



Fotografia extraida do acervo do ETUB
Mosaico Aerofotográfico das Ilhas designadas pelo Dec. Lei 7565 de 02/05/1945
Executado por Serviços Aerofotométricos Cruzeiro do Sul S.A. - 1952

Figura 19 – Fotografia extraída do acervo do EUTB – mosaico aero fotográfico das ilhas designadas pelo Dec. Lei 7565 de 02/05/1945.



Figura 20 - Imagem fotográfica antes e depois do aterro (Fonte www.pu.ufrj.br)

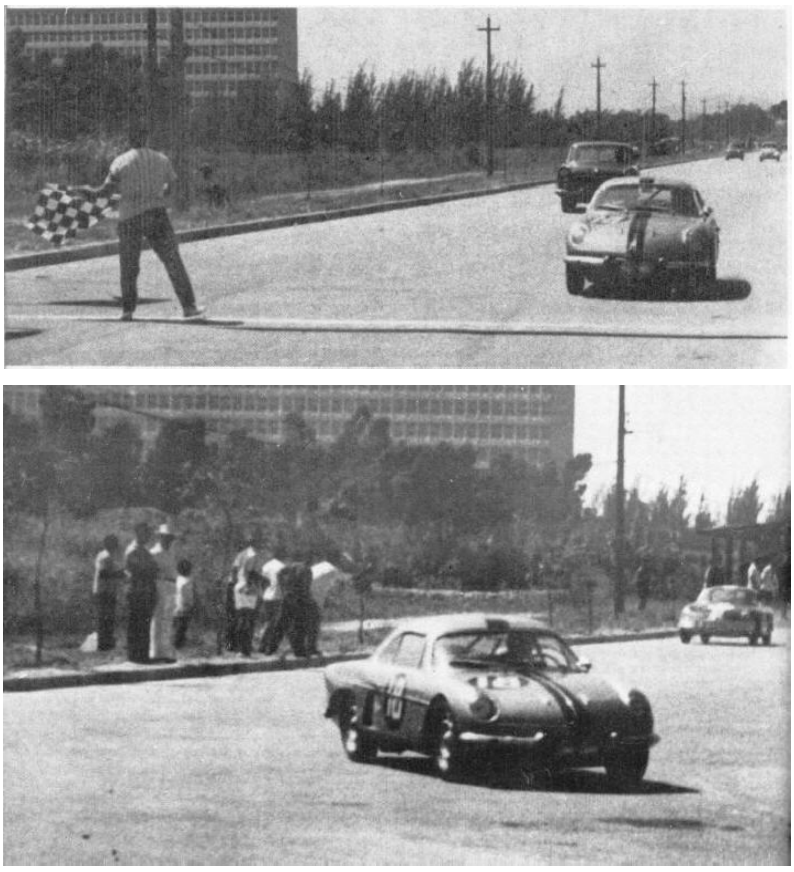


Figura 21- Corridas de carros nas vias da Cidade Universitária (Fonte www.pu.ufrj.br)

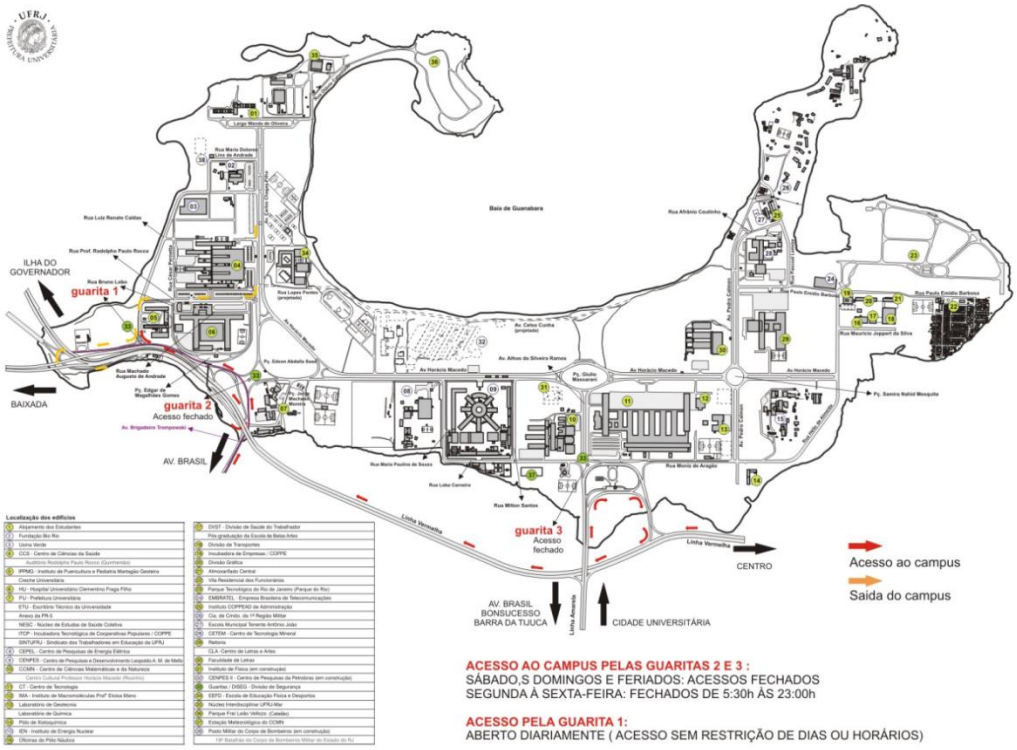


Figura 22- Ilha do Fundão Cidade Universitária (site prefeitura UFRJ) Fonte www.pu.ufrj.br ano 2009.



Figura 23- Localização da Ilha do Fundão (imagem produzida através Google Earth – janeiro de 2009)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Introdução

Neste capítulo estão descritos os materiais e métodos utilizados nas diferentes etapas do Projeto Fundão que serão utilizados na presente tese para se obter a Função de Transferência. Vale ressaltar que o autor da presente tese participa ativamente de todas as etapas deste projeto desde sua concepção e implantação em 2006.

Na Etapa de pré execução estão apresentados os procedimentos e ensaios realizados na primeira fase. Foram realizados levantamentos funcionais e estruturais em todo trecho experimental, além da abertura de três poços de sondagem localizados em pontos específicos da Cidade Universitária: Av. Horácio de Macedo, estaca 134, Av. Carlos Chagas Filho, estaca 287 e na Av. Pedro Calmon, estaca 454.

Na etapa de execução estão apresentados os procedimentos e resultados da determinação das misturas asfálticas a quente e a frio, análise dos agregados e ligantes, definição da solução asfáltica para cada segmento experimental, acompanhamento sistemático durante a construção dos segmentos, procedimentos adotados para a avaliação dos segmentos experimentais.

Na etapa de pós execução estão apresentados os levantamentos funcionais e estruturais dos segmentos construídos no Projeto Fundão, procedimentos para o cálculo da retroanálise definida dos segmentos a quente avaliados nesta pesquisa e relato do programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas e suas principais mudanças.

4.2 Materiais e Métodos Empregados na Etapa de Pré Execução do Projeto Fundão

No projeto de pesquisa desenvolvido de comum acordo entre CENPES e a COPPE/UFRJ, foi definida a extensão total do trecho a ser restaurado e sua disposição na malha viária do Fundão. A extensão total foi de aproximadamente 12 km totalizando aproximadamente uma área de 130.000m² de testes, onde os trechos foram demarcados

de acordo com a condição do pavimento na época e o volume de tráfego. As ruas e avenidas contempladas no Projeto Fundão etapa 1 e 2, são:

- Av. Pedro Calmon;
- Av. Horácio de Macedo;
- Av. Carlos Chagas Filho;
- Rua Maria Paulina de Souza;
- Rua Lobo Carneiro;
- Rua Milton Santos;
- Rua Maria Dolores Lins de Andrade;
- Rua Professor Rodolfo Paulo Rocco.

A primeira atividade realizada após a assinatura do convênio entre o CENPES e a COPPE/UFRJ foi a demarcação do trecho (estaqueamento) tomando como base um ponto de referência localizado na Avenida Pedro Calmon próximo ao laboratório de Geotecnia e Pavimentos esquina com a Rua Hélio de Almeida. O estaqueamento consistiu em materializar nos meios-fios as estações ou estacas de referência demarcadas de 20 em 20 metros para facilitar e referenciar as diferentes proposições das soluções e os levantamentos, com o padrão habitual utilizado no meio rodoviário brasileiro.

O planejamento de restauração e/ou construção de uma malha viária é essencial que se tenham os dados estruturais existentes, a serventia da superfície do pavimento e dados do volume de tráfego. Assim, para gerar as informações técnicas que permitiram embasar as proposições e análises de soluções tecnológicas para cada segmento, foram realizados pela equipe de técnicos da COPPE/UFRJ e do CENPES, os primeiros levantamentos nas vias escolhidas de acordo com o projeto no ano de 2006 entre as estacas 0 até a estaca 545:

- Levantamento deflectométrico a cada 20 metros com o uso da viga Benkelman automatizada desenvolvida e construída no Setor de Mecânica dos Pavimentos, laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ;
- Determinação dos segmentos homogêneos – Método AASHTO, 1993;

- Levantamento de defeitos e determinação do Índice de Gravidade Global – IGG, segundo a norma DNIT PRO – 006/2003;
- Abertura de 3 poços de sondagens distribuídos em locais definidos pelos técnicos responsáveis da COPPE/UFRJ e do CENPES e a coleta dos materiais para a realização dos ensaios de caracterização e ensaios mecânicos de módulo de resiliência dos materiais constituintes das camadas, realizados no Laboratório de Geotecnia e Pavimentos;
- Levantamento com o georadar para tentativa de reconhecimento das camadas dos pavimentos, visto que não foi possível recuperar as informações históricas da época da construção das vias da Cidade Universitária (LOPES,2009);
- Levantamentos de Irregularidade da superfície de acordo com os conceitos internacionais, IRI com o uso do perfilometro a laser pertencente a Universidade Federal do Ceará – UFC realizados em março de 2007;
- Levantamento dos defeitos do pavimento existente por Levantamento Visual Contínuo (LVC) e filmagem das condições superficiais dos segmentos na época, dentro da pesquisa de REIS (2007);
- Contagem do tráfego classificatória por tipo de veículo e a intensidade por faixa de rolamento em diferentes pontos da Cidade Universitária.

Para a determinação das bacias deflectométricas neste levantamento de 2006 nas vias da Cidade Universitária foi utilizada a viga Benkelman automatizada, construída e projetada pelos engenheiros do LABGEO da COPPE/UFRJ. Os levantamentos contaram com o apoio dos técnicos da COPPE/UFRJ e do CENPES e foram realizados a cada 40 metros na faixa central, na trilha de roda interna, conforme apresentado na Figura 24. A Figura 25 apresenta somente o cenário de deflexão máxima obtido em 2006, porém foram realizadas as bacias deflectométricas em todos os levantamentos. A carga utilizada no eixo simples de roda dupla atendeu as exigências da norma do DNIT – ME 135/10 de 8,2 tf no eixo e pressão de pneu de 80 libras.



Figura 24 - Levantamento deflectométrico com o uso da viga Benkelman automatizada nas vias da Cidade Universitária – fevereiro de 2006

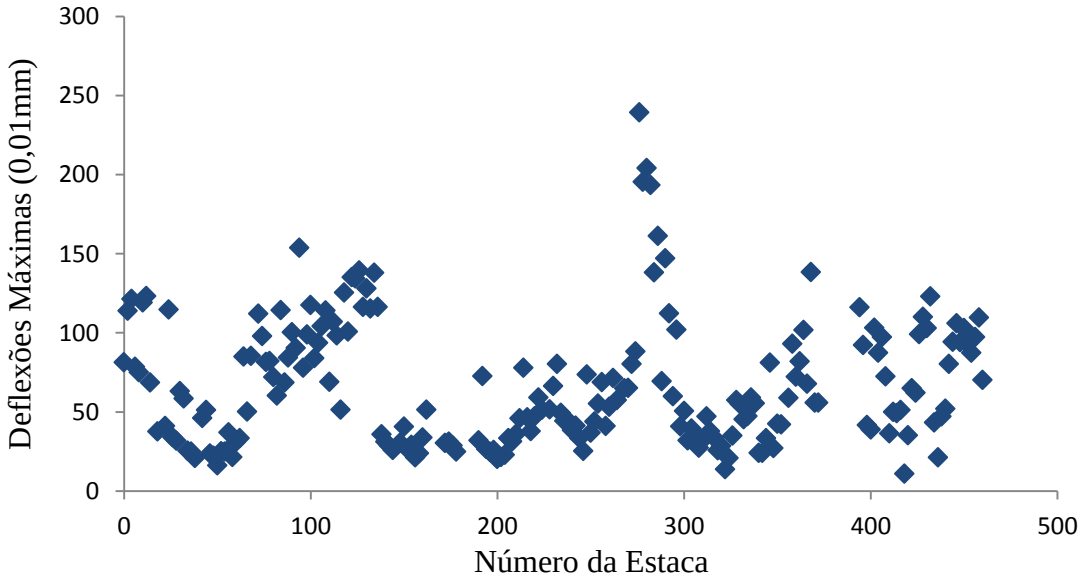


Figura 25 - Deflexões máximas medidas na faixa central dos trechos do Projeto Fundão, antes de qualquer intervenção, com o uso da viga Benkelman eletrônica.

Após os levantamentos deflectométricos realizados nas vias selecionadas da Cidade Universitária foram definidos os segmentos homogêneos, de acordo com o método da AASTHO, (1993) baseado nas deflexões máximas (D_0) e nas deflexões a (D_{600}) e (D_{1200}) milímetros. O método se baseia nas diferenças acumuladas para a definição dos segmentos homogêneos. A variação do coeficiente angular da curva obtida pela sequência de cálculos indica uma mudança no comportamento médio de um segmento

para outro, caracterizando matematicamente as extremidades dos segmentos homogêneos, conforme mostrado na Figura 26. O engenheiro Luiz Nascimento, coordenador do CENPES neste estudo, definiu, com base nos levantamentos deflectométricos, os segmentos homogêneos de acordo com o método da AASHTO, conforme apresentado na Tabela 11.

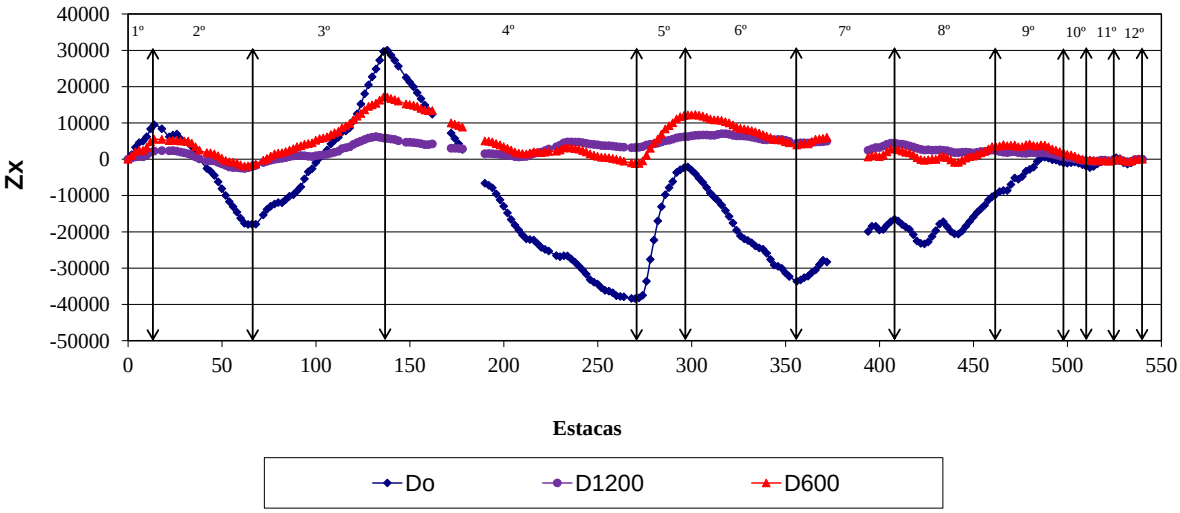


Figura 26- Curva obtida pelo método das diferenças acumuladas da AASHTO para determinação dos segmentos homogêneos – modificada de Nascimento, (2015).

Tabela 11 - Resumo dos trechos homogêneos das vias do Fundão com suas respectivas nomenclaturas

Segmento Homogêneo	Estacas	Localização
1°	0 – 17	Geotecnia - Rotatória
2º	18 – 68	Rotatória – Reitoria
3°	69 – 139	Reitoria – Rotatória CT
4°	139 – 273	Rotatória CT - Alojamento
5°	274 – 296	Alojamento – Bio Rio
6°	297 – 356	Bio Rio – Prefeitura UFRJ
7°	357 – 408	Prefeitura UFRJ – Rotatória CT
8º	409 – 461	Rotatória CT - Geotecnia
9°	462 – 496	CENPES – Trevo
10º	497 – 512	Trevo – Linha Amarela
11º	513 – 526	Linha Amarela – Trevo
12º	527 – 545	Trevo - CENPES

A próxima etapa dos estudos preliminares realizados no Projeto Fundão foi o levantamento do Índice de Gravidade Global (IGG), de acordo com a norma do DNIT PRO-006/2003. Os levantamentos de defeitos foram realizados em abril de 2006 nas vias da Cidade Universitária contempladas entre o 1º e o 8º segmento. No 9º ao 12º segmento não foi realizado o levantamento do IGG.

A Figura 27 mostra exemplos das condições superficiais existentes na época, das vias da Cidade Universitária e a Figura 28 os valores do IGG médio de alguns dos segmentos homogêneos definidos na Tabela 11. Pode-se observar que pelos valores do IGG em praticamente todos os casos o conceito dos segmentos era "péssimo". Esses conceitos e limites do IGG estão apresentados na Tabela 12 de acordo com a norma do DNIT PRO-006/2003. Também foram realizados levantamentos visuais contínuos filmados – LVC, dentro do escopo da dissertação de mestrado do aluno Carlos Alberto Ramin Reis, que podem ser vistos em REIS (2007).



Figura 27 – Exemplos de condições superficiais existentes na época (2006) nas vias da Cidade Universitária

Tabela 12 - Conceitos de degradação do pavimento em Função do IGG

Conceitos	Limites
Ótimo	$0 < IGG \leq 20$
Bom	$20 < IGG \leq 40$
Regular	$40 < IGG \leq 80$
Ruim	$80 < IGG \leq 160$
Péssimo	$IGG > 160$
Norma do DNIT PRO – 006/2003	

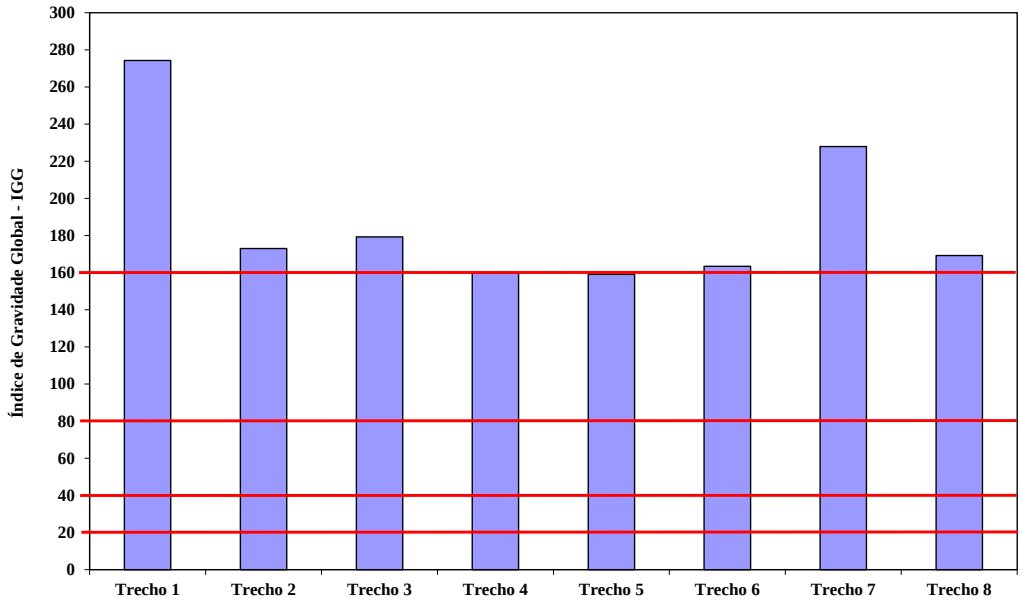


Figura 28 - Valores médios do IGG em 2006 de alguns dos segmentos homogêneos das vias do Projeto Fundão

Na etapa seguinte ao levantamento de defeitos superficiais para definir o IGG foram abertos três poços de sondagens, o primeiro localizado na estaca 134 situado na Avenida Horácio de Macedo próximo à Faculdade de Letras, o segundo na estaca 287 situado na Avenida Carlos Chagas Filho em frente ao BIO RIO e o terceiro na estaca 454 situado na Avenida Pedro Calmon em frente ao laboratório de Geotecnia e Pavimentos, abertos na faixa da direita. Foram realizados ensaios de frasco de areia de acordo com a norma DNER – ME 092/94 e umidade em cada camada para verificação do grau de compactação e da umidade *in situ.* Também foram coletados os materiais constituintes de cada camada e levados ao LABGEO onde foram submetidos aos ensaios de caracterização, compactação e módulo de resiliência. Os resultados estão descritos nas Tabela 14, Tabela 15 e Tabela 15 correspondentes a cada poço de sondagem. Os corpos de prova moldados para a determinação da curva de compactação foram utilizados para a realização dos módulos triaxiais no LABGEO.

Nas Figura 29, Figura 30, Figura 31, Figura 32, Figura 33, Figura 34 e Figura 35 estão apresentados os resultados de caracterização dos poços de sondagem correspondentes a cada camada coletada. A Figura 36 apresenta o perfil estrutural dos poços de sondagens e na Figura 37 as diferentes etapas durante a abertura dos poços de sondagens. Não foi possível realizar os ensaios mecânicos da camada de base coletados nos três poços de

sondagem devido a problemas de falta de material fino causados pelo bombeamento desse material durante muitos anos uma vez que as condições superficiais das vias da Cidade Universitária apresentavam elevado grau de trincamento. LOPES *et al.* (2009) apresentam estudo com o uso do GPR nas vias da Cidade Universitária que comtemplam 11 segmentos cuja localização e espessura das camadas estão apresentadas na Tabela 16.

Tabela 13 - Resultados dos ensaios de compactação e módulo de resiliência dos materiais coletados no poço de sondagem localizado na estaca 134.

Estaca 134 camada Sub-base				
Ensaios *in situ*	h(%)	9,2	Sigma **d**	Sigma **3**
	$\gamma(g/cm^3)$	1,971		
Ensaio de Compactação	h(%)	5,5		
	$\gamma(g/cm^3)$	2,166		
Primeiro Ponto (MR)	h(%)	6,7	$y = 264,5X^{0,1692}$	$y = 510,9X^{0,3641}$
	$\gamma(g/cm^3)$	1,948	$r^2 = 0,2320$	$r^2 = 0,7086$
Segundo Ponto (MR)	h(%)	8,5	$y = 260,8X^{0,1615}$	$y = 491,6X^{0,3494}$
	$\gamma(g/cm^3)$	1,971	$r^2 = 0,2336$	$r^2 = 0,7215$
Terceiro Ponto (MR)	h(%)	10,9	$y = 277,1X^{0,1857}$	$y = 525,0X^{0,3703}$
	$\gamma(g/cm^3)$	1,954	$r^2 = 0,2822$	$r^2 = 0,7407$
Estaca 134 camada reforço Subleito				
Ensaios *in situ*	h(%)	20,3	Sigma **d**	Sigma **3**
	$\gamma(g/cm^3)$	1,673		
Ensaio de Compactação	h(%)	21,4		
	$\gamma(g/cm^3)$	1,669		
Primeiro Ponto (MR)	h(%)	16,4	$y = 106,6X^{-0,4012}$	$y = 92,2X^{-0,3684}$
	$\gamma(g/cm^3)$	1,601	$r^2 = 0,9144$	$r^2 = 0,5084$
Segundo Ponto (MR)	h(%)	18,7	$y = 46,0X^{-0,6394}$	$y = 34,0X^{-0,6112}$
	$\gamma(g/cm^3)$	1,649	$r^2 = 0,9321$	$r^2 = 0,5618$
Terceiro Ponto (MR)	h(%)	20,6	Ensaio não realizado	
	$\gamma(g/cm^3)$	1,671		
Estaca 134 camada Subleito				
Ensaios *in situ*	h(%)	22	Sigma **d**	Sigma **3**
	$\gamma(g/cm^3)$	1,6		
Ensaio de Compactação	h(%)	22,6		
	$\gamma(g/cm^3)$	1,598		
Primeiro Ponto (MR)	h(%)	19,2	$y = 102,4X^{-0,4207}$	$y = 95,6X^{-0,3570}$
	$\gamma(g/cm^3)$	1,563	$r^2 = 0,7888$	$r^2 = 0,3757$
Segundo Ponto (MR)	h(%)	21,5	$y = 38,8X^{-0,7384}$	$y = 27,6X^{-0,7035}$
	$\gamma(g/cm^3)$	1,595	$r^2 = 0,8963$	$r^2 = 0,5367$
Terceiro Ponto (MR)	h(%)	24,1	Ensaio não realizado	
	$\gamma(g/cm^3)$	1,58		

Tabela 14 - Resultados dos ensaios de compactação e módulo de resiliência dos materiais coletados no poço de sondagem localizado na estaca 287.

Estaca 287 camada Sub-base				
Ensaios *in situ*	h(%)	13,5	Sigma **d**	Sigma **3**
	$\gamma(g/cm^3)$	1,869		
Ensaio de Compactação	h(%)	14,3		
	$\gamma(g/cm^3)$	1,749		
Primeiro Ponto (MR)	h(%)	12,1	$y = 103,2X^{-0,1286}$	$y = 156,2X^{0,0433}$
	$\gamma(g/cm^3)$	1,85	$r^2 = 0,1294$	$r^2 = 0,0097$
Segundo Ponto (MR)	h(%)	14,1	$y = 64,1X^{-0,0841}$	$y = 122,5X^{0,1602}$
	$\gamma(g/cm^3)$	1,863	$r^2 = 0,0311$	$r^2 = 0,0745$
Terceiro Ponto (MR)	h(%)	16,6	Ensaio não realizado	
	$\gamma(g/cm^3)$	1,782		
Estaca 134 camada Subleito				
Ensaios *in situ*	h(%)	16,4	Sigma **d**	Sigma **3**
	$\gamma(g/cm^3)$	1,75		
Ensaio de Compactação	h(%)	16,6		
	$\gamma(g/cm^3)$	1,607		
Primeiro Ponto (MR)	h(%)	13,2	$y = 52,7X^{-0,3697}$	$y = 58,7X^{-0,2546}$
	$\gamma(g/cm^3)$	1,708	$r^2 = 0,6190$	$r^2 = 0,1936$
Segundo Ponto (MR)	h(%)	15,3	$y = 57,2X^{-0,2454}$	$y = 75,6X^{-0,0969}$
	$\gamma(g/cm^3)$	1,742	$r^2 = 0,3363$	$r^2 = 0,0346$
Terceiro Ponto (MR)	h(%)	16,8	$y = 35,5X^{-0,2888}$	$y = 56,6X^{-0,0654}$
	$\gamma(g/cm^3)$	1,748	$r^2 = 0,2474$	$r^2 = 0,5367$

Tabela 15 - Resultados dos ensaios de compactação e módulo de resiliência dos materiais coletados no poço de sondagem localizado na estaca 454.

Estaca 454 camada Sub-base				
Ensaios *in situ*	h(%)	9	Sigma **d**	Sigma **3**
	$\gamma(g/cm^3)$	2,036		
Ensaio de Compactação	h(%)	9,2		
	$\gamma(g/cm^3)$	1,955		
Primeiro Ponto (MR)	h(%)	6,3	$y = 239,5X^{0,0155}$	$y = 359,8X^{0,1546}$
	$\gamma(g/cm^3)$	1,97	$r^2 = 0,0030$	$r^2 = 0,2007$
Segundo Ponto (MR)	h(%)	7,6	$y = 263,5X^{0,0842}$	$y = 420,8X^{0,2302}$
	$\gamma(g/cm^3)$	2,015	$r^2 = 0,0834$	$r^2 = 0,4110$
Terceiro Ponto (MR)	h(%)	10,1	$y = 161,2X^{0,0346}$	$y = 238,9X^{0,1649}$
	$\gamma(g/cm^3)$	2,023	$r^2 = 0,0128$	$r^2 = 0,1918$
Estaca 454 camada do Subleito				
Ensaios *in situ*	h(%)	19,5	Sigma **d**	Sigma **3**
	$\gamma(g/cm^3)$	1,71		
Ensaio de Compactação	h(%)	21,7		
	$\gamma(g/cm^3)$	1,667		
Primeiro Ponto (MR)	h(%)	18	Ensaio não realizado	
	$\gamma(g/cm^3)$	1,675		
Segundo Ponto (MR)	h(%)	19,2	$y = 18,9X^{-0,8995}$	$y = 11,6X^{-0,8806}$
	$\gamma(g/cm^3)$	1,717	$r^2 = 0,8985$	$r^2 = 0,5680$
Terceiro Ponto (MR)	h(%)	19,2	Ensaio não realizado	
	$\gamma(g/cm^3)$	1,67		

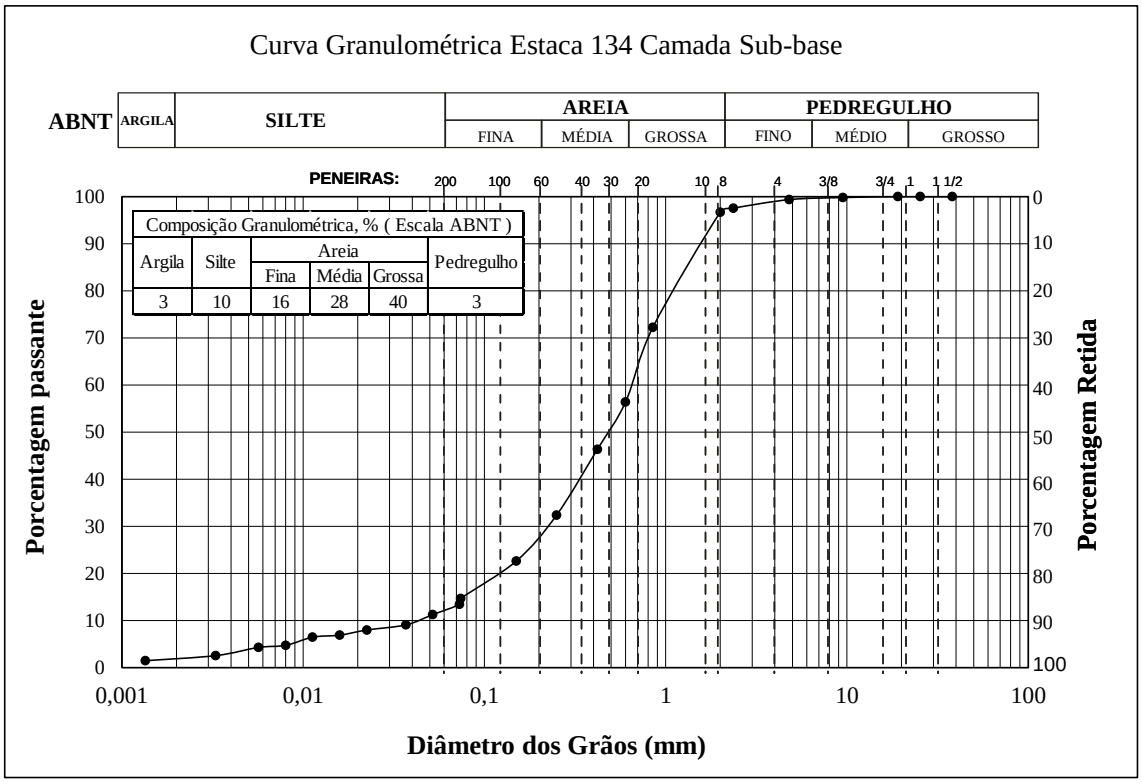


Figura 29 - Curva granulométrica da camada de sub-base da estaca 134 do Projeto Fundão

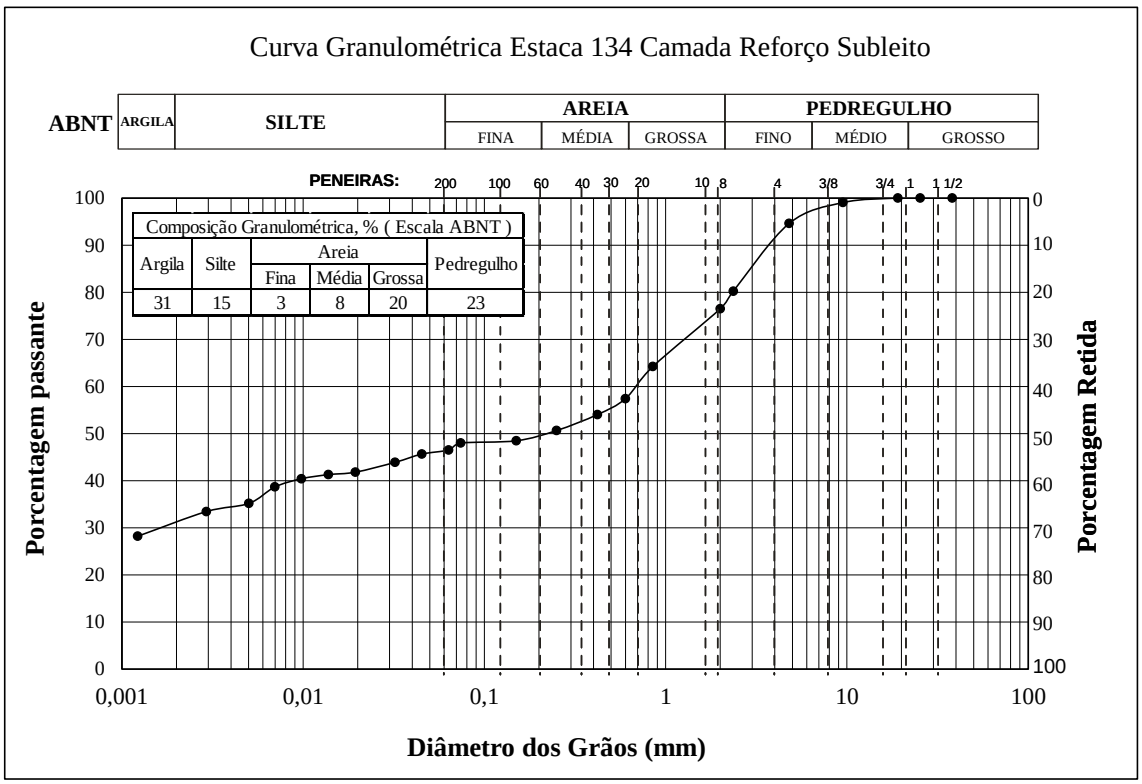


Figura 30 - Curva granulométrica da camada de reforço do subleito da estaca 134 do Projeto Fundão

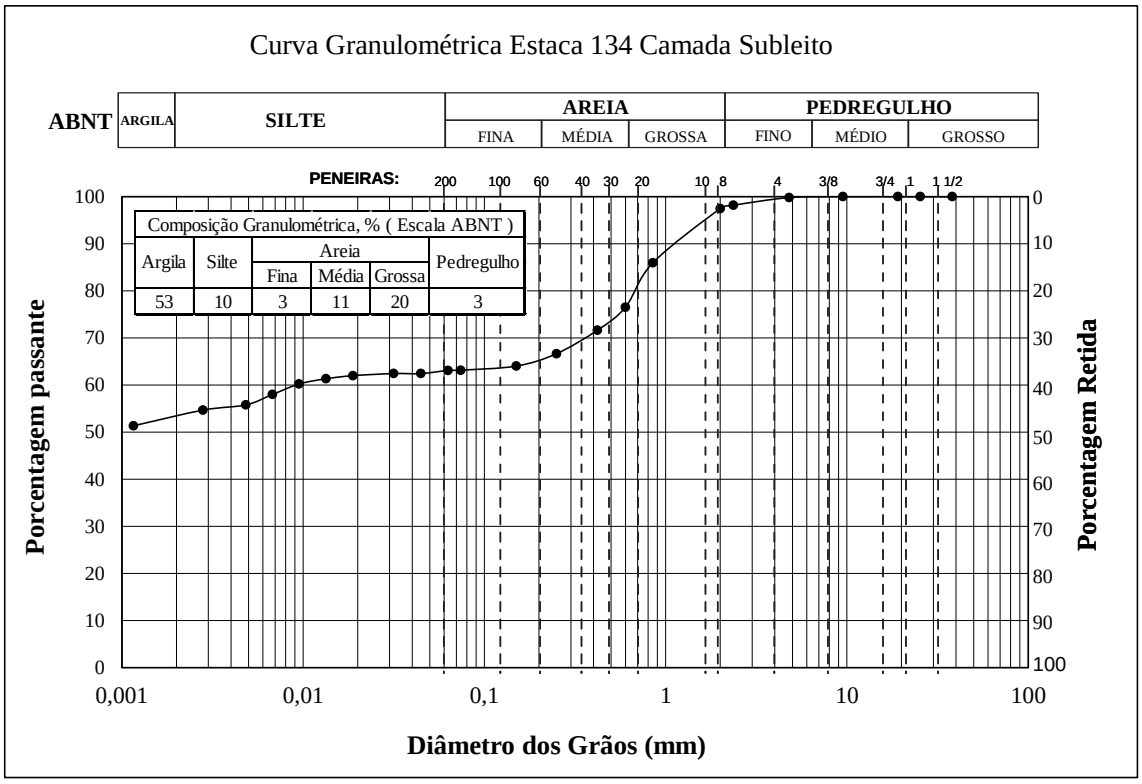


Figura 31 - Curva granulométrica da camada do subleito da estaca 134 do Projeto Fundão

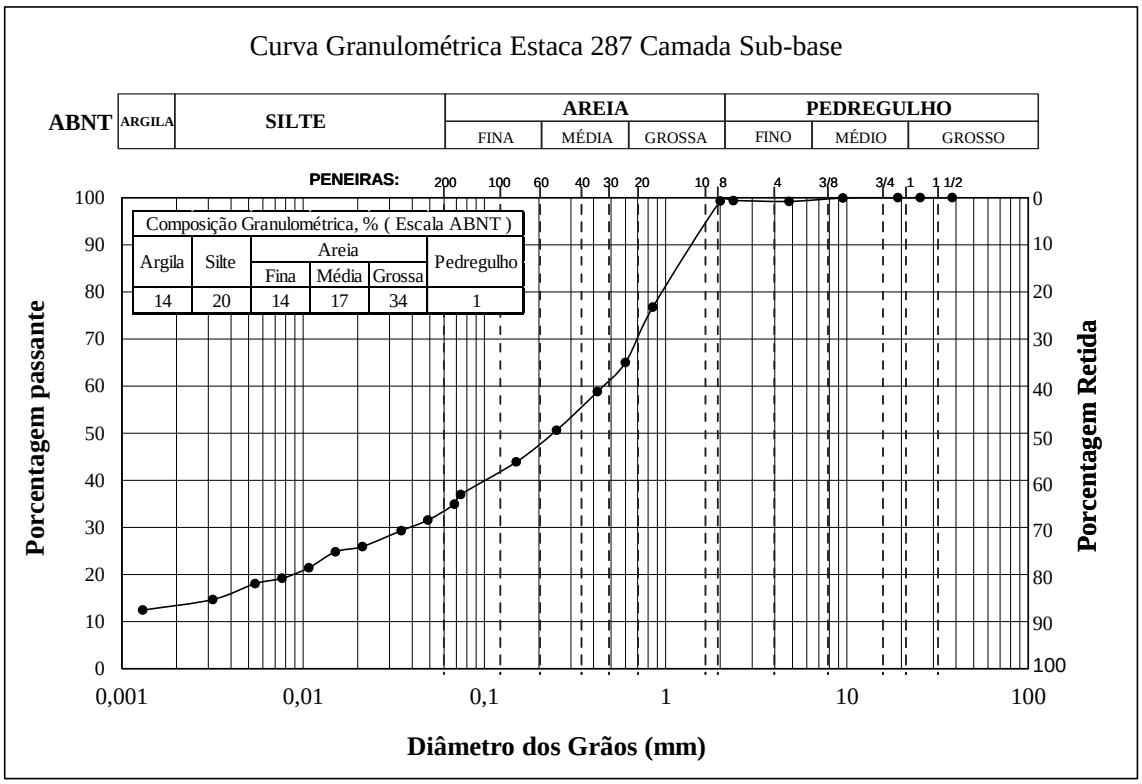


Figura 32 - Curva granulométrica da camada de sub-base da estaca 287 do Projeto Fundão

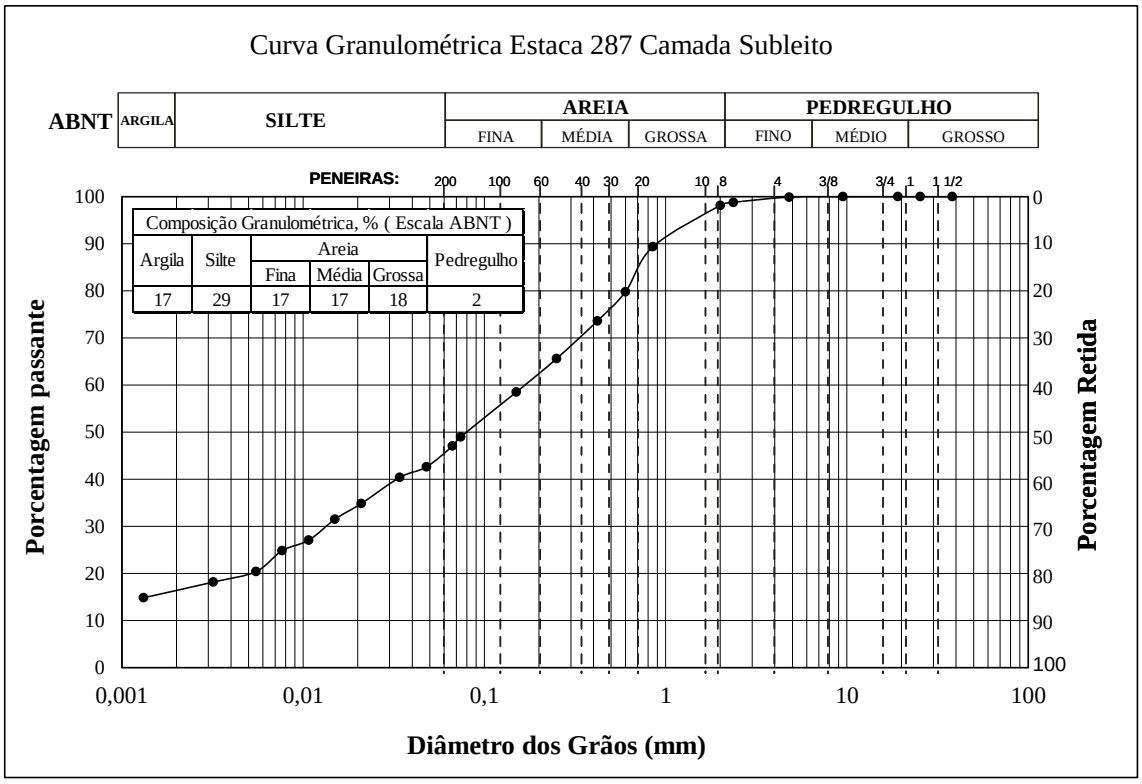


Figura 33 - Curva granulométrica da camada do subleito da estaca 287 do Projeto Fundão

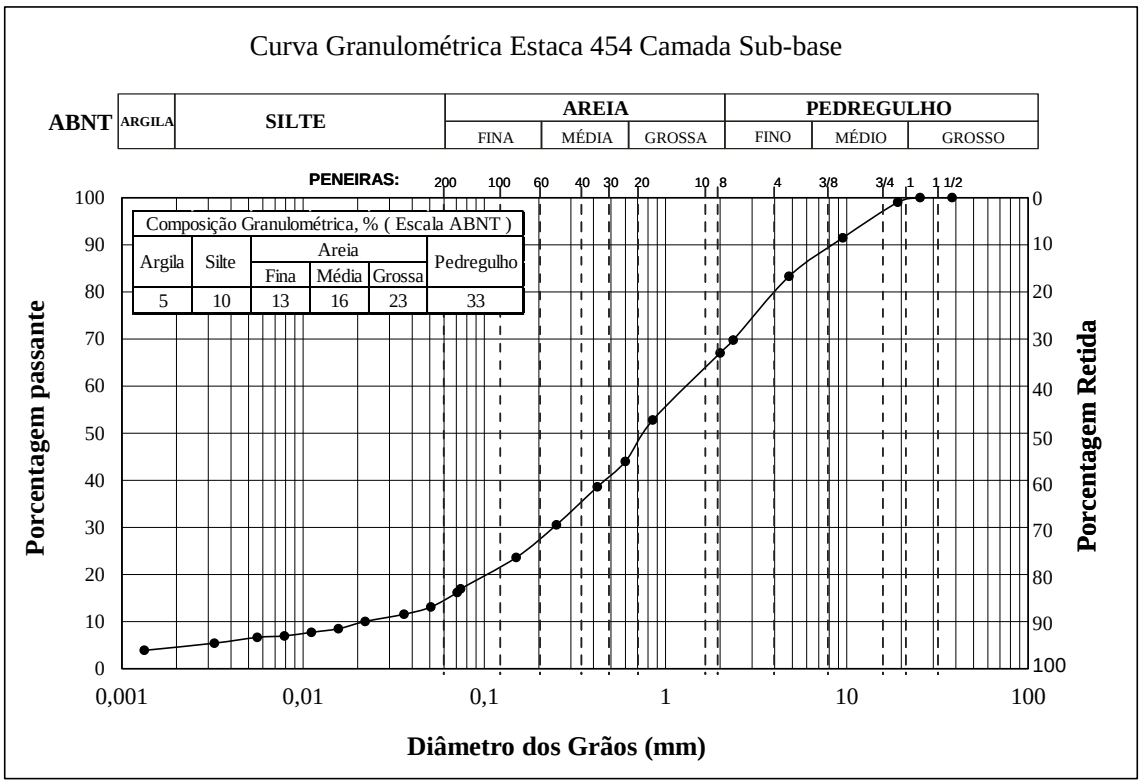


Figura 34 - Curva granulométrica da camada de sub-base da estaca 454 do Projeto Fundão

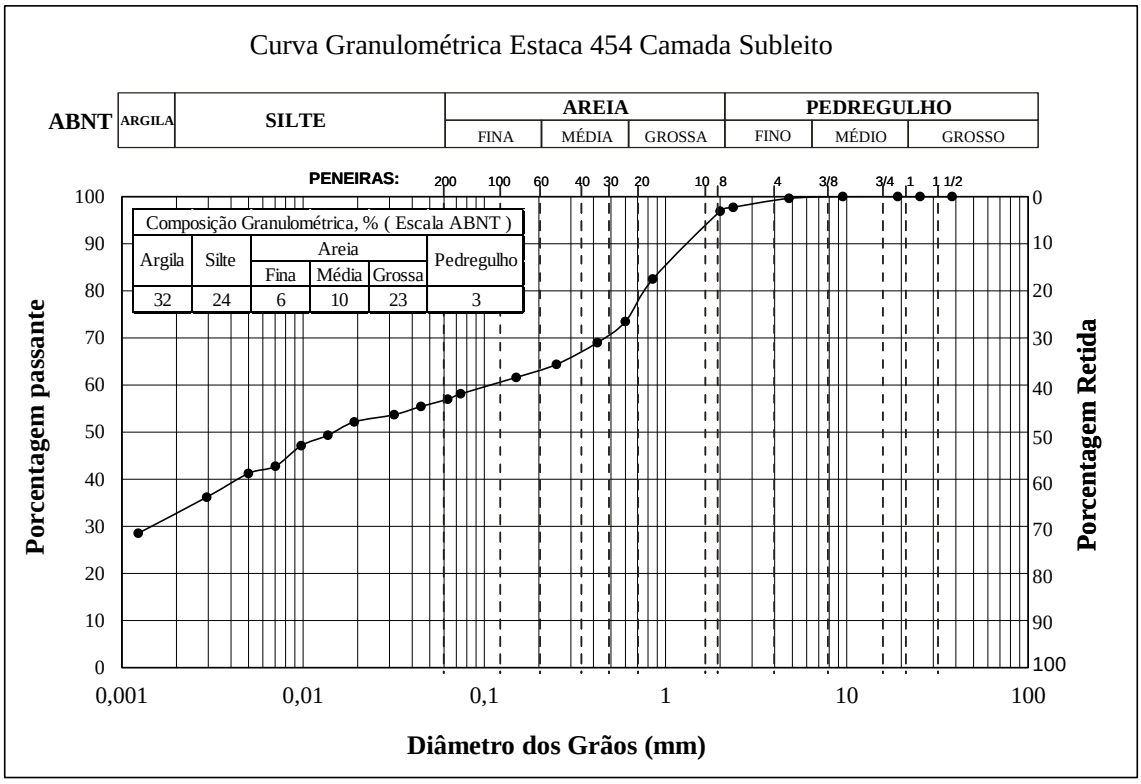


Figura 35 - Curva granulométrica da camada do subleito da estaca 454 do Projeto Fundão



Figura 36 - Perfis estruturais dos poços de sondagem realizados no Projeto Fundão em 2006



Figura 37 - Aspectos da abertura dos poços de sondagem Projeto Fundão em 2006

Tabela 16 - Segmentos homogêneos identificados com o uso do GPR por LOPES (2009).

Segmento Homogêneo	Localização do Segmento (Estacas)	Espessura da camada, cm		
		Revestimento	Base Granular	Sub-base granular
1	0 a 21	7	23	29
2	63 a 68	11	24	18
3	68 a 89	5	19	19
4	90 a 120	6	16	36
5	126 a 158	6	15	39
6	158 a 236	8	10	25
7	352 a 382	6	15	13
8	391 a 417	6	14	4
9	425 a 450	6	18	40
10	462 a 512	12	38	24
11	513 a 545	10	42	23

Na etapa seguinte após a abertura dos poços de sondagens, foram realizados os levantamentos do índice de irregularidades IRI (m/km) com o uso do Perfilômetro a laser da Universidade Federal do Ceará sob a responsabilidade do professor Sérgio Benevides, que realizou os levantamentos e o processamento dos dados das vias da Cidade Universitária. As medidas foram realizadas levando em consideração os segmentos homogêneos determinados pela deflexão. Os levantamentos de irregularidade foram realizados na faixa central das ruas da Cidade Universitária contempladas neste estudo. Os resultados do índice de irregularidade estão apresentados nas Figura 38 e Figura 39, a cada 40 metros, separados em duas partes: do 1º ao 8º segmentos homogêneos correspondentes a Av. Horácio de Macedo, Av. Carlos Chagas Filho e Av. Pedro Calmon e do 9º ao 12º correspondentes aos segmentos experimentais das vias do entorno do CENPES (Rua Milton Santos, Rua Lobo Carneiro e Rua Maria Paulina de Souza).

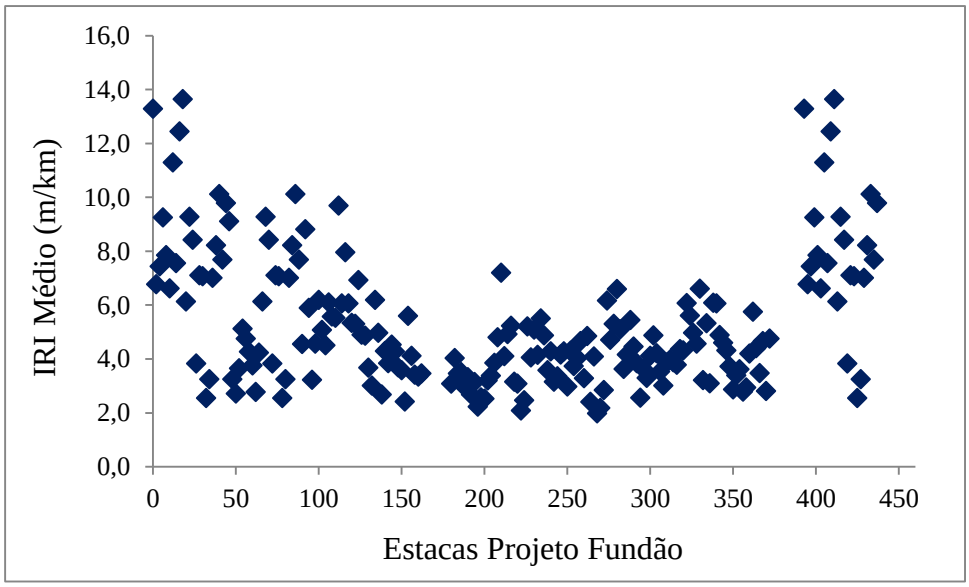


Figura 38 - Resultado do IRI médio das trilhas de roda da faixa central dos segmentos homogêneos 1º ao 8º do Projeto Fundão em 2006 (Nascimento et al., 2009)

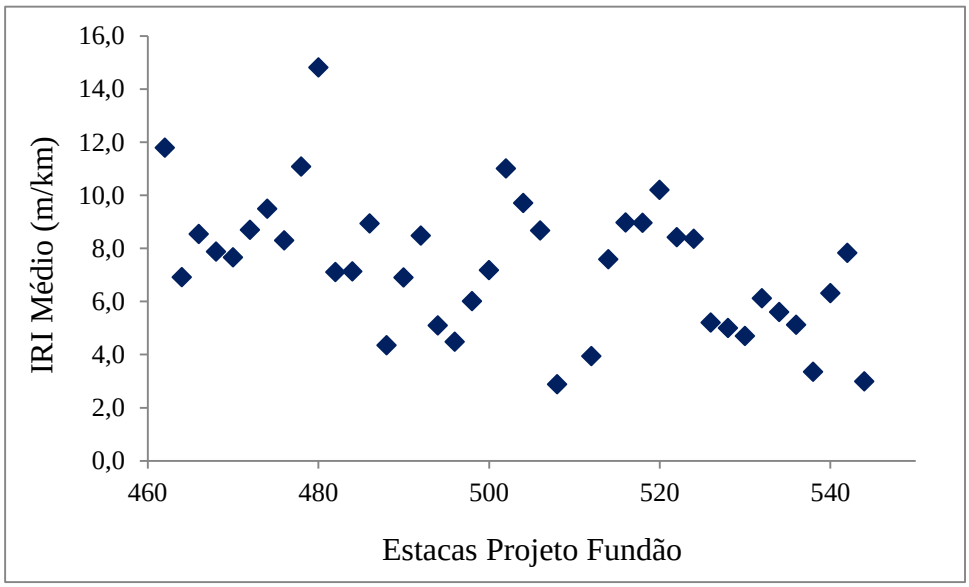


Figura 39 - Resultado do IRI médio das trilhas de roda da faixa central dos segmentos homogêneos 9º ao 12º do Projeto Fundão em 2006 (Nascimento et al., 2009)

A primeira avaliação do tráfego na Cidade Universitária se deu no segundo semestre de 2009, realizada em seis pontos estratégicos, conforme descritos a seguir:

- Av. Horácio Macedo, em frente ao CENPES – sentido Prefeitura Universitária (PU) – Reitoria;
- Acesso à Cidade Universitária confluência da Linha Amarela e Vermelha;

- Acesso à Cidade Universitária confluência da Linha Vermelha e Av. Brasil próximo a Prefeitura Universitária;
- Av. Horácio Macedo, em frente a Faculdade de Letras – sentido Reitoria – PU;
- Saída da Cidade Universitária – sentido Linha Vermelha – Av. Brasil – Baixada Fluminense.

A contagem do tráfego foi realizada das 08:00 as 18:00, ininterruptamente, por faixa de rolamento e de forma classificatória por tipo de veículo comercial. A Figura 40 mostra o panorama geral do volume de tráfego diário, à época, realizados nos seis locais levantados. Os horários que antecederam esse levantamento bem como os horários que sucederam foram definidos com o auxilio das câmeras de segurança instaladas no campus Universitário da UFRJ, fornecidas pelo Departamento de Segurança da UFRJ. Pode-se observar na Figura 41 que o tráfego apresenta três picos de maior intensidade: o primeiro entre 07:00 e 09:00 horas da manhã, o segundo entre 12:00 e 13:00 horas e o terceiro próximo das 17:00 da tarde.

À época desta contagem, a Cidade Universitária apresentava um volume de tráfego diferente do cenário atual, porque não havia sido construída a ponte estaiada "Ponte do Saber" que liga a ilha do Fundão com a Zona Sul. Além disso, os acessos à Cidade Universitária eram fechados a partir das 23:00 até 04:00 da manhã, bem como nos domingos e feriados. Durante esse período somente o portão de acesso ao Hospital Universitário permanecia aberto por 24 horas.

Com a abertura dos portões de acesso e a construção da ponte estaiada em fevereiro de 2012, o número de veículos que circulam na Cidade Universitária aumentou significativamente, principalmente o de veículos de passeio. A Cidade Universitária se tornou uma rota alternativa dos motoristas, em ambos os sentidos: Zona Sul ou Baixada Fluminense. Em 2015 o VDM, segundo dados fornecidos pelo ex prefeito da UFRJ, Ivan do Carmo, circulavam diariamente na Cidade Universitária cerca de 40.000 veículos / dia.

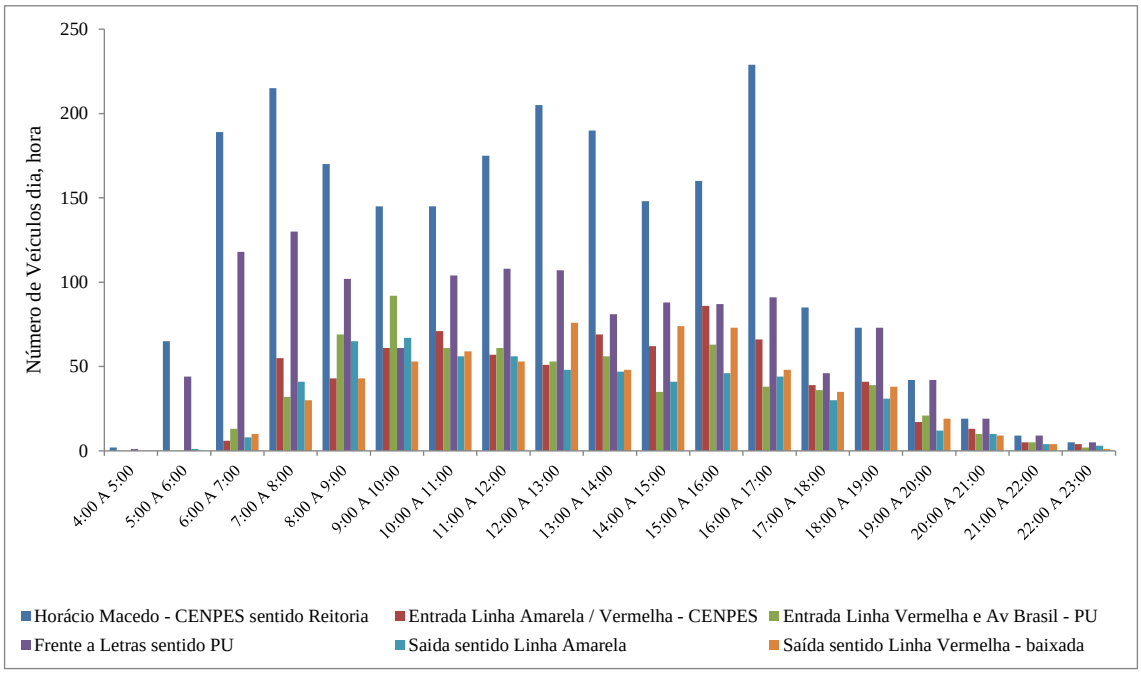


Figura 40 - Distribuição de veículos comerciais por hora dos locais levantados na Cidade Universitária em 2009

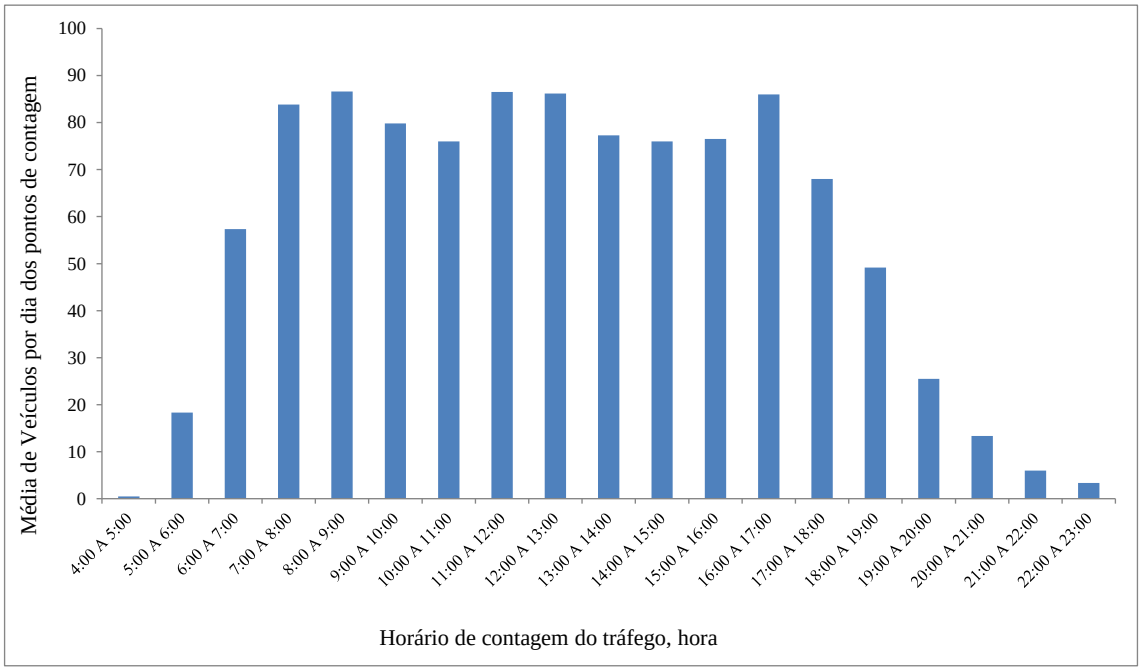


Figura 41 – Volume médio diário referente aos seis locais de contagem do tráfego comercial em 2009

4.3 Materiais e Métodos Empregados na Etapa de Execução

Neste capítulo estão descritos de forma resumida as principais propriedades das soluções asfálticas a quente e a frio realizadas no Projeto Fundão, que contemplam os 113 segmentos experimentais construídos na Cidade Universitária desde o início do estudo em 2006. Todos os segmentos foram de restauração com diferentes concepções: com ou sem fresagem, fresagem parcial ou total, microrrevestimento, tratamento superficial e pré misturado a frio. Também estão apresentados de forma mais detalhadas os segmentos de CBUQ que foram avaliados e monitorados desde sua implantação.

4.3.1 Misturas Asfálticas

A escolha dos agregados se deu após estudos específicos de diferentes pedreiras localizadas na região metropolitana do Rio de Janeiro. Os ensaios relativos aos agregados minerais das camadas de misturas asfálticas empregadas nos trechos experimentais foram realizados pelo CENPES com o objetivo de selecionar a mais adequada entre as pedreiras. Foram selecionadas seis pedreiras: Pedreira Sepetiba, Nova Santa Luzia, São Pedro, Emasa, Convém Mineração e a Pedreira Vigné. Os agregados minerais foram coletados nas pedreiras e foram submetidos aos seguintes ensaios:

- Caracterização granulométrica;
- Massa Específica real e aparente e absorção dos agregados graúdos e miúdos de acordo com AASHTO 85/08 e AASHTO 84/04;
- Índice de forma de acordo com a norma ASTM D 4791/05;
- Sanidade de acordo com a norma do DNIT 089/94;
- Equivalente de areia de acordo com a norma da ASTM D 2419/02;
- Angularidade do agregado miúdo de acordo com a norma da AASHTO T 304/15;
- Abrasão Los Angeles de acordo com a norma AASHTO T 96/02 e;
- Análise Petrográfica.

Além dos ensaios físicos, todos os agregados, à exceção do oriundo da pedreira Vigné, foram submetidos às avaliações litológicas (análises macroscópicas e petrográficas) realizadas pela Gerência de Sedimentologia e Petrologia do CENPES (GSEP)

(NASCIMENTO *et al*, 2009). Na Tabela 17 estão apresentados os resultados das análises físicas dos agregados minerais utilizados nos segmentos experimentais – Pedreira Sepetiba e Pedreira Vigné. Os demais agregados oriundos das pedreiras: Nova Santa Luzia, São Pedro, Emasa e a Convém Mineração não apresentaram bons resultados e foram descartados pelo CENPES.

Tabela 17 - Resultado da caracterização física dos agregados (Nascimento et al., 2009)

Propriedades	Resultados	
	Sepetiba	Vigné
Partículas chatas e alongadas – agregado graúdo (1:5)	1,0%	-
Perda por Abrasão Los Angeles	43,3%	21,0%
Massa específica real dos agregados graúdos	2,792	2,668
Massa específica aparente dos agregados graúdos	2,669	2,538
Absorção dos agregados graúdos	0,8%	1,91%
Massa específica real dos agregados miúdos	2,781	2,655
Massa específica aparente dos agregados miúdos	2,693	2,399
Absorção dos agregados miúdos	3,01%	4,02
Equivalente de Areia	84,0%	-
Angularidade dos agregados miúdos – Método A	40,0%	-
Ensaio de durabilidade - Sanidade	10,3%	1,5 a 2,7%
Os agregados da Sepetiba II têm propriedades similares ao da Sepetiba I, exceto na abrasão Los Angeles, apresentando valores da ordem de 48 a 50%.		

Após estes ensaios comparativos, foram selecionados os agregados da pedreira Sepetiba para a construção dos trechos experimentais a quente, morno e frio com o objetivo de manter os agregados de mesma origem para os diferentes testes. Excepcionalmente no segmento de Pré - misturado à frio e no segmento de asfalto colorido, os agregados utilizados são oriundos da Pedreira Vigné conforme apresentado na Tabela 18 e mostrado na Figura 42. As denominações Sepetiba I e II, correspondem a duas análises realizadas durante o Projeto Fundão, a primeira corresponde as análises de 2006 e a segunda a 2008/2009.

Tabela 18 - Distribuição granulométrica das misturas asfálticas a quente utilizadas no Projeto Fundão (convencionais, modificadas e especiais)

Peneira, mm	% Passante			
	Sepetiba I	Sepetiba I	Sepetiba II	Vigné
	Densa 19,1mm	Densa 12,5mm	Densa 2 19,1mm	PMF
25	100,0	100,0	100,0	100,0
19	97,4	99,1	97,6	100,0
12,5	79,2	92,8	74,8	100,0
9,5	72,6	90,6	66,9	99,9
4,75	54,5	54,4	42,8	63,7
2,00	37,7	31,5	33,8	33,2
1,18	29,9	24,9	28,7	23,5
0,59	22,4	18,6	21,4	16,3
0,3	14,7	12,2	13,9	10,0
0,15	8,2	6,8	7,7	5,5
0,075	3,9	3,2	3,8	2,8
Classificações				
Faixa DNIT	B	C	B	-
Superpave	19,1mm	12,7mm	19,1mm	-
Comportamento	Fino	Graúdo	Fino	-

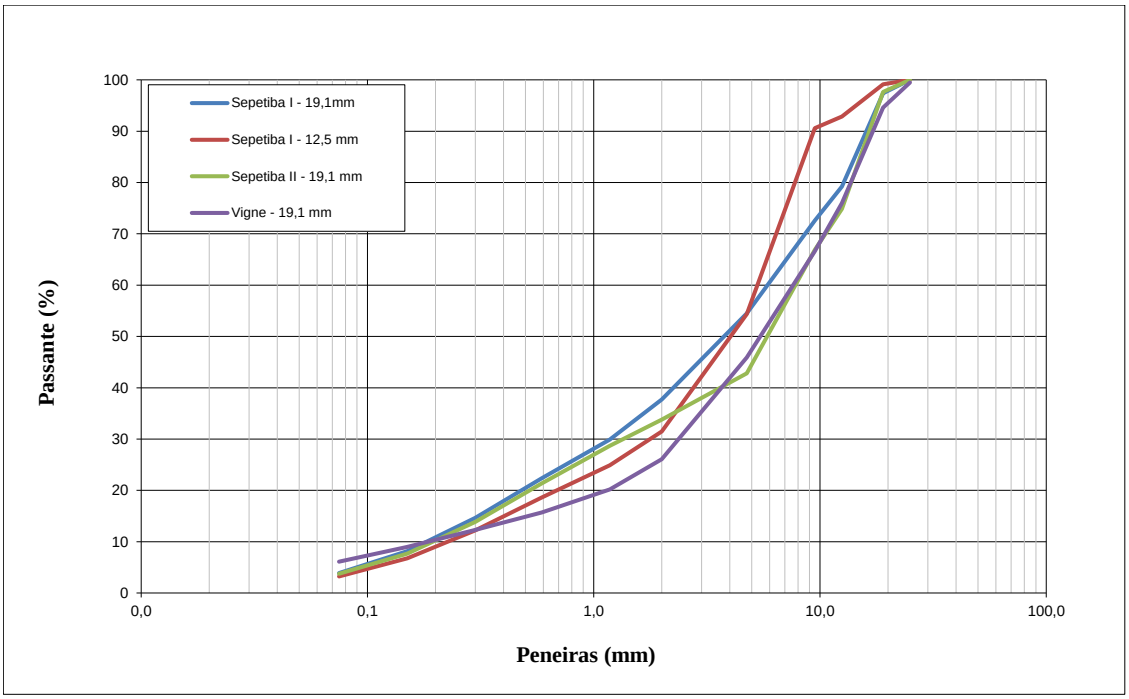


Figura 42 - Distribuição granulométrica dos agregados das misturas asfálticas a quente aplicadas no Projeto Fundão

Os ligantes asfálticos utilizados neste projeto foram caracterizados segundo a classificação brasileira (Resolução nº 19 ANP, 2005) e também por desempenho seguindo as recomendações Superpave (AASHTO M 320/2005). Na Tabela 19 estão apresentados os resumos das propriedades dos ligantes e emulsões asfálticas utilizadas nas dosagens. De acordo com NASCIMENTO *et al*. (2009) os ligantes asfálticos identificados como modificado foram formulados no CENPES, sendo produtos não comerciais, bem como a emulsão RL IBVT que é um produto não comercial e foi formulada na BR Petrobras Distribuidora.

Tabela 19 - Resumo das propriedades dos ligantes e emulsões asfálticas utilizados nas dosagens do Projeto Fundão (NASCIMENTO et al., 2009)

Resumo dos resultados dos ligantes asfálticos					
Produto	Penetração 25ºC, dmm	Ponto de amolecimento, ºC	PG	Visc. Brookfield 135ºC, cP	Jnr @64ºC e 3,2 KPa, 1/KPa
CAP 30/45	34	53,8	70-16	515,0	----
CAP 50/70	43*	48,7	64-16	445,0	----
CAPFLEX S 65/90	57	77,2	70-22	1512,0	----
CAPFLEX B	69	55,6	64-22	1732,0	----
Mod. Elvaloy	54	61,0	70-22	1162,0	0,36
Mod. PPA	43	57,5	70-22	597,5	1,19
Mod. EVA	64	58,2	64-16	748,3	3,22
Mod. SBS + PPA	41	68,6	70-10	1256	0,39
Betuflex	----	----	----	----	----

Resumo dos resultados das emulsões asfálticas						
Produto	Resíduo Asfáltico, %	Peneira, %	Visc. SSF, 25ºC	Testes de Resíduo		
Emulsão				Penetração 25ºC	Ponto Amolecimento ºC	Recup. Elástica %
RR – 2C	65,0	0,0	29,0	51,0	48,0	----
RRE – Flex R	65,0	0,0	29,0	51,0	57,0	60,0
RRE – Flex S	65,0	0,0	29,0	51,0	57,0	75,0
Emuflex	63,0	0,0	30,0	52,0	57,0	63,0
RL IBVT	60,2	0,0	18,0	62,0**	49,1**	----
*- Resultados fora do especificado						
**- Resultados obtidos diretamente no IBVT antes de ser emulsificado						

Após a análise dos agregados minerais e a caracterização dos ligantes asfálticos, foram realizadas as dosagens das misturas asfálticas a quente, mornas e a frio. No caso das misturas a quente e morna, foi empregada a metodologia com compactador giratório Superpave preconizada pela norma AASHTO M 323/04. Ressalta-se que os revestimentos asfálticos à quente, estudados neste projeto, foram os primeiros dosados com o compactador giratório aplicados em pavimentos brasileiros.

Segundo NASCIMENTO *et al.* (2009), tais dosagens foram realizadas em corpos de prova de 150 mm e altura de 110 mm aproximadamente, com 100 giros (N_{des}). Conforme especificado na AASHTO R 35/04, este N_{des} é aplicado para tráfegos de médio a pesado, em rodovias urbanas, intermunicipais e interestaduais, com $N_{inicial}$ de 8 giros e $N_{máximo}$ de 160 giros. Excepcionalmente para a mistura à quente com o ligante CAPFLEX B – asfalto borracha, foi empregado o método de dosagem Marshall, com 75 golpes por face. Na Tabela 20 está apresentado um resumo das dosagens referentes às principais misturas asfálticas à quente, aplicadas em segmentos experimentais da Cidade Universitária. Outras misturas asfálticas a quente foram utilizadas no Projeto Fundão, tais como: misturas asfálticas modificadas com ligante asfáltico 60/85 TMN 19,1mm, CIRA TMN 9,5mm, Bio Asfalto, Argila Calcinada, entre outras, porém não foram contempladas nesta presente tese por diversas razões, especialmente por não dispor de curvas de fadiga por compressão diametral.

Independentemente da metodologia adotada na moldagem, todas as misturas asfálticas à quente foram submetidas ao condicionamento durante 2 horas em estufa, na temperatura de compactação, de acordo com o procedimento AASHTO R 30/02 – *Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt*.

Além dos parâmetros tradicionais de dosagem, seguindo os procedimentos do Relatório Técnico LPE 009/08, foi calculado o parâmetro *Construction Densification Index* (CDI), para todas as misturas asfálticas à quente que foram dosadas com o compactador giratório. Durante os processos de dosagem foram realizados ensaios mecânicos para a determinação do MR e da RT, de acordo com a AASHTO TP 31/96, a 25ºC. Em termos de adesividade foram realizados ensaios de Dano por Umidade Induzida (DUI), segundo AASHTO T 283/06.

Tabela 20 - Resumo das dosagens das misturas a quente do Projeto Fundão (NASCIMENTO et al., 2009)

Tipo de Ligante	Faixa # Densa, mm	Teor de Ligante, %	VAM, %	RBV, %	CDI	RT 25ºC MPa
50/70 REDUC	12,5	5,5	14,6	73,6	91	1,39
50/70 REDUC	19,1	5,0	13,9	70,8	100	1,13
30/45 REDUC	12,5	5,5	14,8	73,0	97	1,71
30/45 REDUC	19,1	5,0	13,7	71,0	82	1,78
CAPFLEX S 65/90	19,1	5,0	14,0	72,0	81	1,11
CAPFLEX B	19,1	5,4	14,8	72,0	*-	1,38
Mod. Elvaloy	19,1	4,6	13,2	70,0	27	1,44
Mod. PPA	19,1	4,8	13,4	70,0	34	1,20
Mod. EVA	19,1	4,5	13,4	70,0	29	1,40
Mod. SBS + PPA	19,1	4,9	13,6	71,0	35	1,38
Betuflex	19,1	4,6	13,5	70,0	36	0,90

As dosagens das misturas a frio foram realizadas pela BR Distribuidora. Para a dosagem dos tratamentos superficiais o método utilizado foi o método direto com ensaio de placa – mosaico, enquanto para o microrrevestimento foi utilizado o método recomendado pela International Slurry Surfacing Association – ISSA, com uso dos ensaios Wet Track Abrasion Test – WTAT, Loaded Wheel Test – LWT, Wet Stripping Test – WST e o teste de compatibilidade Schulze Breuer e Ruck. Na Tabela 22 e Tabela 22 estão apresentados os resumos das dosagens realizadas pela BR Distribuidora referentes às soluções a frio.

O controle tecnológico foi realizado em todas as etapas do processo de construção dos segmentos experimentais, que tiveram acompanhamentos tecnológicos na usina e em campo, visando garantir os parâmetros de projeto, além de mapear e caracterizar os materiais aplicados em campo.

Nas etapas de fresagem parcial ou total o controle tecnológico da superfície restante se deu de maneira subjetiva, ou seja, foi monitorado o aspecto geral do substrato, relacionado ao acabamento, irregularidade, espessura, integridade da camada remanescente além da desagregação da camada granular no caso da fresagem total. Nos

casos de fresagem total, a camada granular remanescente foi umedecida, recompactada e imprimada novamente. O revestimento asfáltico foi aplicado somente após a realização dos ensaios de frasco de areia para determinação da densidade in situ e dos levantamentos deflectométricos com o uso da viga Benkelman eletrônica.

Tabela 21 - Resumo das dosagens de tratamentos superficiais à frio (NASCIMENTO et al., 2009)

Emulsão Asfáltica	Tipo de Tratamento	Camada	Taxa de emulsão, l/m²	Taxa de agregados, kg/m²	Faixa #
RRE Flex R	TSS - SAMI	Única	0,94	10	DNIT B
RR – 2C	TSD	1	1,0	18,1	DNIT A
		2	1,0	8,8	DNIT B
		3	0,8	----	----
RRE Flex R	TSD	1	1,0	18,1	DNIT A
		2	1,0	8,8	DNIT B
		3	0,8	----	----
RRE Flex S	TSD	1	1,0	18,1	DNIT A
		2	1,0	8,8	DNIT B
		3	0,8	----	----
RR – 2C	TST	1	2,0	18,1	I-S DER/PR
		2	0,8	8,8	I-S DER/PR
		3	0,6	4,2	I-S DER/PR
RRE Flex R	TST	1	2,0	18,1	I-S DER/PR
		2	0,8	8,8	I-S DER/PR
		3	0,6	4,2	I-S DER/PR
RRE Flex S	TST	1	2,0	18,1	I-S DER/PR
		2	0,8	8,8	I-S DER/PR
		3	0,6	4,2	I-S DER/PR

Tabela 22 - Resumo das dosagens do microrrevestimento e do pré misturado à frio (NASCIMENTO et al., 2009)

Microrrevestimento à frio (MRAF)					
Emulsão Asfáltica	Nº camadas	Espessura, mm	Teor de emulsão, %	Adição de Água, %	Faixa #
Emulflex	2	12,0	12,0	10,0	ISSA
Pré Misturado à Frio (PMF)					
Emulsão Asfáltica	Teor de emulsão, %	Adição de Água, %	Volume de Vazios, %	VAM, %	RBV, %
RL IBVT	8,5	3,0	10,9	20,8	47,9

Pode-se dizer que o controle tecnológico mais rigoroso foi realizado durante a aplicação das camadas asfálticas. A escolha da usina de asfalto se deu após reuniões entre o CENPES, COPPE/UFRJ e consultores convidados com o objetivo de definir uma empresa do ramo que tivesse o compromisso de produzir um produto de qualidade e com experiência no mercado. Foi indicada na ocasião a usina de asfaltos da Craft Engenharia que manifestou interesse na participação deste estudo, aceitando todo o controle exigido.

No caso das misturas asfálticas a quente e morna, todas produzidas na usina de asfalto da Craft Engenharia, duas equipes monitoravam o processo: uma na usina de asfalto e a outra em campo, junto aos segmentos experimentais. A Craft Engenharia ficou responsável pela usinagem, a quente e morna e aplicação das misturas asfálticas resultantes, bem como pela aquisição dos agregados da pedreira Sepetiba. Os ligantes asfálticos utilizados na fabricação das misturas asfálticas foram escolhidos pelo CENPES e COPPE/UFRJ e a solicitação e a compra dos produtos, feitas pela COPPE.

A equipe de controle tecnológico instalada no laboratório da usina de asfalto da Craft Engenharia, geralmente composta por técnicos do CENPES, verificava a temperatura dos ligantes, agregados e da mistura, além da verificação do teor de ligante e da granulometria dos agregados. Durante a produção da massa asfáltica eram coletadas amostras de ligante e massa asfáltica para análises posteriores em laboratório (Caracterização e Recuperação do ligante). A equipe da usina foi responsável também pelo controle no manuseio dos agregados na usina, de maneira a evitar a segregação e contaminação.

A equipe do controle tecnológico em campo realizava o controle das temperaturas de chegada da massa asfáltica em campo e de compactação. Realizava a demarcação do início e fim da mistura asfáltica de cada caminhão, bem como o controle durante o processo de espalhamento e compactação. Dava suporte à logística de trafegabilidade do local, auxiliando no fechamento e liberação dos segmentos bem como na tomada de decisão em campo. Amostras das misturas asfálticas eram coletadas dos caminhões para análise posterior em laboratório.

Os segmentos a frio construídos no Projeto Fundão foram controlados pela equipe de técnicos da BR Distribuidora, visto que o preparo das misturas era feito in loco. Segundo NASCIMENTO *et al.*, (2009) os tratamentos superficiais foram certificados em termos da taxa de distribuição dos agregados e da emulsão. Além disso, a granulometria dos agregados e as propriedades das emulsões foram determinadas de maneira periódica, dada a sua importância para a qualidade do serviço geral. Controles similares foram realizados nos segmentos com microrrevestimento e PMF.

De modo geral, todas as etapas do processo construtivo dos segmentos experimentais foram tecnologicamente controladas e estão mapeadas no banco de dados da pesquisa. Obviamente, há casos pontuais onde os requisitos tecnológicos não atenderam ao esperado, porém estão discriminados no banco de dados esses desvios, e caso se detectem interferências no desempenho dos segmentos experimentais destes pontos de restauração de revestimento os mesmos serão correlacionados.

O Projeto Fundão contempla 113 segmentos experimentais, desse total cerca de 60% são de misturas mornas ou quentes, construídos ao longo de 12 km de extensão entre os anos de 2006 a 2009, nas principais vias da Cidade Universitária (concentrados na sua maioria nas Av. Horácio de Macedo e Av. Pedro Calmon). Os demais, 40% do trecho, são de misturas a frio, como: TSS, TSD, TST, PMF e microrrevestimento.

4.4 Avaliação e Monitoramento dos Segmentos Experimentais Construídos no Projeto Fundão

A execução dos segmentos experimentais se deu após análises realizadas na fase da pré-execução com a escolha de soluções pertinentes na ocasião para cada segmento

experimental. De forma resumida estão apresentados os principais dados de projeto e o procedimento desenvolvido para os acompanhamentos sistemáticos dos segmentos experimentais.

Dada a extensão de vias levantadas no Projeto Fundão, com inúmeros segmentos homogêneos, conforme apresentado na Tabela 11, surgiram várias opções de soluções de pavimentação a serem testadas, segundo NASCIMENTO *et al.*, (2009), levando em conta variáveis, tais como:

- Revestimento asfáltico com misturas a quente e a frio;
- Preparo do pavimento (fresagem parcial ou total, recapeamento, soluções funcionais);
- Deformabilidade do segmento (deflexões baixas, média e alta);
- Volume de tráfego de veículos (baixo, médio e alto).

Os revestimentos asfálticos avaliados nesta pesquisa estão divididos em dois grupos principais: misturas à quente e mornas e soluções a frio. Cada grupo apresenta uma série de sub variáveis, tais como:

- Tipo de ligante ou emulsão;
- Origem do agregado – mistura a quente (a maioria foi com a mesma pedreira);
- Granulometria (Tamanho Máximo Nominal e faixa contínua ou descontínua);
- Processo de fabricação (usina ou campo);
- Método de dosagem: Para misturas asfálticas usinadas os métodos utilizados foram: Marshall e Superpave. Para misturas a frio como: Tratamento Superficial o método direto com ensaio de placa "mosaico" e o Microrrevestimento foram utilizados os métodos recomendados pelo *International Slurry Surfacing Association* (ISSA), fazendo uso dos ensaios *Wet Track Abrasion Test* (WTAT), Loaded Wheel Test (LWT), Wet Stripping Test (WST) e o teste de compatibilidade *Schulze – Breuer e Ruck*.

Quanto ao preparo do pavimento, os testes incluíram a aplicação dos revestimentos nas seguintes condições:

- Diretamente sobre o substrato antigo – normalmente trincado (basicamente as soluções a frio);
- Com fresagem parcial do revestimento antigo – normalmente trincado;
- Com fresagem total do revestimento antigo seguido por recompactação da camada de base;
- Aplicação prévia de uma membrana absorvedora de tensões sobre o revestimento antigo trincado – *Stress Absorving Membrane Layer* (SAMI);
- Intervenções na camada de base.

Em relação à deformabilidade, os segmentos apresentaram diferentes seções homogêneas com comportamento diversificado. Assim pode-se dizer que o mesmo par "tipo de revestimento asfáltico – modo de preparo" quando aplicado em diferentes seções homogêneas caracteriza segmentos diferentes, o mesmo ocorre em relação ao volume de tráfego de veículos.

Na Tabela 23 e Tabela 24 estão apresentadas as soluções implantadas na Cidade Universitária, que vem sendo monitoradas desde a sua construção, que ocorreram entre 2006 e 2009. Ressalta-se que a maior parte dos revestimentos asfálticos foi aplicada em diferentes condições de preparo do pavimento e também em estrutura com variadas deformabilidades, resultando em várias combinações de segmentos experimentais para cada mistura asfáltica dosada.

Tabela 23 - Revestimentos asfálticos de CBUQ implantados no Projeto Fundão (Nascimento et al., 2009)

Tipo	Ligante Asfáltico	Origem do Agregado	Granulometria	Observações
REVESTIMENTOS A QUENTE E MORNO	CAP 50/70 REDUC	Sepetiba I	Densa 12,5mm	----
	CAP 50/70 REDUC	Sepetiba I	Densa 19,1mm	----
	CAP 30/45 REDUC	Sepetiba I	Densa 12,5mm	----
	CAP 30/45 REDUC	Sepetiba I	Densa 19,1mm	----
	CAPFLEX S 65/90	Sepetiba I	Densa 19,1mm	SBS
	CAPFLEX B	Sepetiba I	Densa 19,1mm	AMB
	CAP 30/45 REDUC - camada superior CAPFLEX S 65/90 - camada inferior	Sepetiba I	Densa 19,1mm	2 CAMADA
	MODIFICADA ELVALOY	Sepetiba II	Densa 19,1mm	CENPES
	MODIFICADA PPA	Sepetiba II	Densa 19,1mm	CENPES
	MODIFICADA EVA	Sepetiba II	Densa 19,1mm	CENPES
	MODIFICADA SBS + PPA	Sepetiba II	Densa 19,1mm	CENPES
	BETUFLEX	Sepetiba II	Densa 19,1mm	SBS – IASA
	CAP 50/70 REDUC	Sepetiba I	Densa 12,5mm	MORNA
	CAP 50/70 REDUC + ZEÓLITA	Sepetiba I	Densa 12,5mm	MORNA
	CAP 50/70 REDUC + A-SAT	Sepetiba I	Densa 12,5mm	MORNA
	CAP 50/70 REDUC + A-SAT + ZEÓLITA	Sepetiba I	Densa 12,5mm	MORNA
	CAP COLOR FLEX	Vigné	Densa 19,1mm	CENPES

Tabela 24 - Soluções asfálticas à frio, implantados no Projeto Fundão (Fonte: Nascimento, et al., 2009)

Tipo	Ligante Asfáltico	Origem do Agregado	Granulometria
REVESTIMENTOS A FRIO	EMULSÃO RR – 2C	Sepetiba I	TSD
	EMULSÃO RRE FLEX R	Sepetiba I	TSD
	EMULSÃO RR – 2C	Sepetiba I	TST
	EMULSÃO RRE FLEX S	Sepetiba I	TST
	EMULSÃO RRE FLEX R	Sepetiba I	TST
	EMULSÃO RRE FLEX R + SELA TRINCA	Sepetiba I	TST
	EMULFLEX	Sepetiba I	MRAF
	EMULFLEX + SELA TRINCA	Sepetiba I	MRAF
	EMULSÕES RRE FLEX R + EMULFLEX	Sepetiba I	Cape Seal TSS + MRAF
	EMULSÕES RRE FLEX R + EMULFLEX	Sepetiba I	Cape Seal TSD + MRAF
	EMULSÃO RRE FLEX R	Sepetiba I	SAMI TSS + CBUQ
	EMULSÃO RL IBVT	Vigné	PMF

Para a avaliação e monitoramento dos segmentos experimentais foi criado um formulário padrão mostrado na Figura 43, contendo todas as informações importantes para a análise dos trechos. Além dos dados na forma de números, também foram desenvolvidos gráficos com a evolução das propriedades, croquis de defeitos, fotos, entre outras informações, tudo reunido em um formulário padrão, descrito detalhadamente a seguir:

- Data da construção: início da construção do segmento;
- Data da atualização: data do último levantamento;
- Localização do segmento:
    - Início e fim da (estaca);
    - Extensão, m;
    - Faixa de rolamento: esquerda, centro ou direita.
- Tráfego de veículos: contagem classificatória do tráfego de veículos da Cidade Universitária, foi calculado o N_{anual} para cada segmento experimental utilizando os fatores de equivalência do DNIT e considerando a soma do tráfego de todas as faixas da pista (esquerda, centro e direita). Foi estabelecida uma taxa de

crescimento de 3 % ao ano, sendo o $N_{acumulado}$ calculado desde a construção do segmento até a data da atualização do formulário;

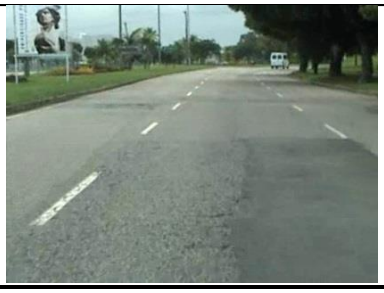
- Condições do pavimento anterior:
    - Valor e conceito do IGG
    - Valor de IRI antes da intervenção e sua classificação;
    - Deflexão máxima característica do pavimento, antes da construção do segmento experimental.
- Preparo do pavimento: informações referentes ao preparo do pavimento antigo antes da aplicação do novo revestimento asfáltico:
    - Fresagem: sim ou não, parcial, total ou reciclagem;
    - Intervenções na base: sim ou não, recompactação, reconstrução;
    - SAMI: sim ou não;
    - Pintura de Ligação: sim ou não e o tipo se for o caso;
    - Imprimação: sim ou não e o tipo se for o caso.
- Revestimento asfáltico aplicado:
    - Número de camadas: quantidade de camadas aplicadas;
    - Espessura, mm: média dos corpos de prova extraídos em campo;
    - Ligante: informação sobre o tipo de ligante e sua origem;
    - PG_{des}: Valor do PG do ligante utilizado para dosagem da mistura asfáltica;
    - Granulometria: Informações dos agregados e o tamanho máximo nominal ou faixa granulométrica;
    - Dosagem: Método utilizado e o número de giros ou golpes adotado;
    - MR_{des}, MPa: Valor do MR médio da mistura obtida durante a dosagem;
    - MR_{fi}, MPa: Valor do MR médio de corpos de prova extraídos em campo no primeiro levantamento após a construção;
    - % Vv_{fi}: Valor médio do volume de vazios de corpos de prova extraídos em campo no primeiro levantamento após a construção;
    - Hs_i: Valor médio inicial da mancha de areia; desde 2009 utiliza-se o perfilometro a laser para determinar a Macrotextura do pavimento;
    - BPN_i: Valor médio inicial do Pêndulo Britânico; desde 2009 utiliza-se o Grip Tester.

- Gráfico “Evolução do IRI” valor médio da Irregularidade determinado pelo perfilômetro a laser a cada 20 m medidos em todas faixas de rolamento usando 5 sensores lasers;
- Gráfico “Evolução da Macrotextura” valor médio da Macrotextura determinado pelo perfilometro a laser a cada 20 m em todas faixas de rolamento;
- Gráfico “Evolução da Área Trincada” Valor calculado a partir do número de defeitos: Ressalta-se que no cálculo da porcentagem de área trincada todos os defeitos de trincas e fissuras foram considerados sem diferenciação. Cada seção experimental foi dividida em retângulos de 2 m de comprimento por 1/3 da largura da faixa. Qualquer defeito associado ao trincamento em um retângulo “i” torna sua área totalmente trincada, sendo a porcentagem de área trincada a relação entre o número de retângulos com a presença de trincas e/ou fissuras e o número total de retângulos do segmento experimental;
- Gráfico “Evolução da Trilha de Roda” desde 2009 é medido com o perfilometro a laser, usando 5 sensores lasers devidamente posicionados para a medida do afundamento das trilhas de roda interna e externa, em todas as faixas de rolamento. A barra a laser abrange praticamente toda a largura da faixa de rolamento, pois mede 2,9 metros de largura;
- Inventário de defeitos: é um croqui com ilustrações esquemáticas dos defeitos monitorados que são inseridos em planilhas padrão para o levantamento de defeitos ao longo do segmento, conforme mostrado na Figura 44, tipos de defeitos avaliados.

A Figura 43 apresenta um exemplo deste formulário padrão, desenvolvido nesta pesquisa para a análise dos segmentos experimentais. Na Figura 44 está apresentada a legenda de defeitos para auxiliar os técnicos durante os levantamentos de defeitos em campo. Após levantados todos os defeitos do segmento experimental, os mesmos são inseridos em uma planilha eletrônica e comparados com os defeitos observados em campo levantados nos anos anteriores. Na Figura 45 mostra-se um exemplo de um levantamento de defeitos do segmento experimental Segmento a Quente nº5 – SQ5, cujo último levantamento foi realizado no ano de 2015.

Extração de corpos de prova imediatamente após a execução dos segmentos, foram realizados para a verificação dos parâmetros volumétricos e mecânicos das misturas asfálticas. Observou-se que o volume de vazios das misturas asfálticas aplicadas em campo apresentaram em média 7% de vazios, o que era esperado visto que as dosagens foram realizadas com o compactador giratório SUPERPAVE para 4% de vazios como critério para definir o teor de projeto. Esse volume de vazios de projeto, como sabido, é esperado em campo na fase final da vida de serviço, período em que surgem as trincas por fadiga na camada do revestimento asfáltico.

Identificação:	**Segmento Quente 5 - SQ5**		**Fase: I**
Data da construção:	09/02/2007	**Data da atualização:**	10/02/2015
Localização		**Tráfego de veículos**	
	Estaca / **+ metros**	**N_{anual}:**	2,50E+06
Início:	136 / 0	**Taxa de crescimento anual, %:**	3,0
Fim:	148 / 0	**Tempo em serviço, anos:**	8,00
Extensão, m:	240,0	**$N_{acumulado}$:**	2,22E+07
Faixas:	E/C/D		

Condições do pavimento anterior				**Imagem do pavimento anterior**
IGG:	164	**Conceito IGG:**	Péssimo	**Data da foto: 13/10/2006**
IRI, m/km:	3,26	**Classificação IRI:**	Ruim	
D_{0c}, 0,01mm:	121			
Preparo do pavimento				
Fresagem:	Parcial			
Intervenção na base:	não			
SAMI:	não			
Pintura de ligação:	RR-1C			
Imprimação:	não			

Revestimento asfáltico aplicado				**Imagem do pavimento novo**
N° de camadas:	1			**Data da foto: 02/10/2009**
Espessura, mm:	60			
Ligante:	30/45 REDUC	**PG_{des}:**	70-16	
Agregados:	Sepetiba I			
Granulometria:	TMN = 19,1mm			
Dosagem:	Superpave N_{des} = 100 giros			
MR_{des}, MPa:	11400	**Hs_i, mm:**	0,63	
MR_{fi}, MPa:	6862	**BPN_i:**	62	
% $Vv_{fi:}$	5,14			

Observações	**A porcentagem de vazios foi obtida 3 meses após a abertura ao tráfego**

Figura 43 - Formulário padrão dos principais dados de cada segmento experimental



Figura 44 - Legenda com os tipos de defeitos representados no croqui de defeitos dos segmentos experimentais

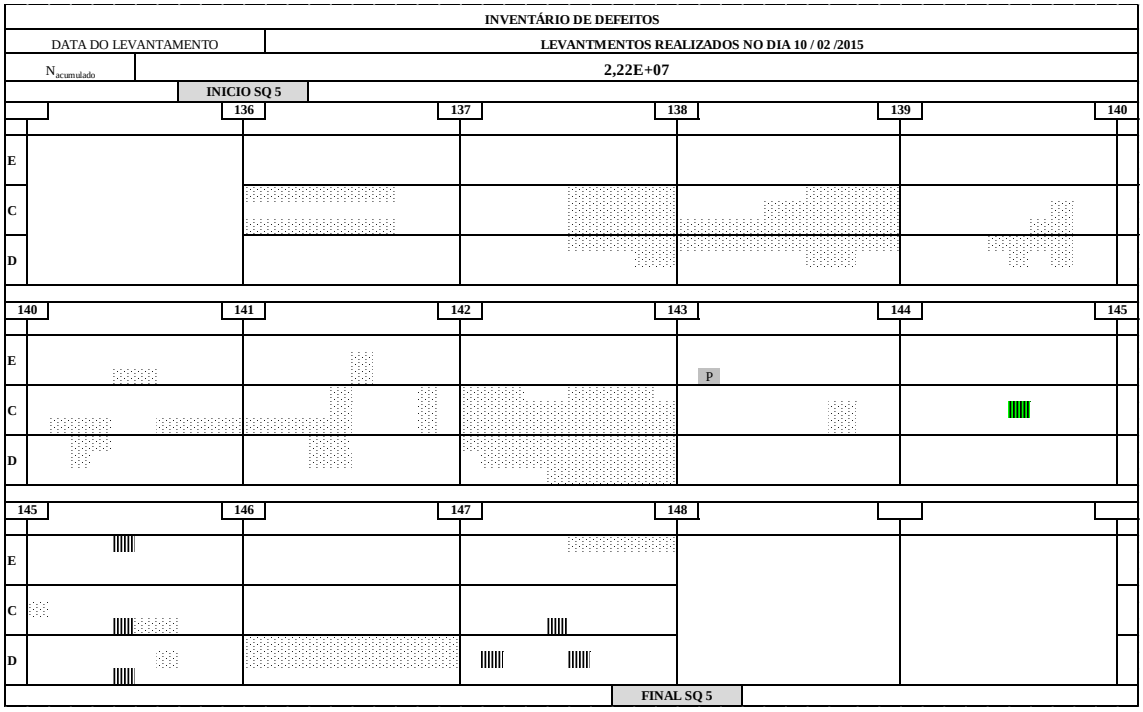


Figura 45 - Inventário de defeitos do segmento à quente (SQ) 5 referente ao ano de 2015

Esses dados funcionais e estruturais são inseridos no banco de dados de cada segmento correspondente e são avaliados seus desempenhos em função da evolução do IRI, Macrotextura, Porcentagem de Área Trincada e Afundamento de trilha de roda, além dos levantamentos deflectométricos. As Figura 46, Figura 47, Figura 48 e Figura 49 apresentam essas evoluções desde a implantação até o ano de 2015, de um dos segmentos experimentais. Todos os segmentos experimentais realizados no Projeto Fundão foram devidamente inseridos no formulário padrão Figura 43 com as principais informações de cada segmento e são avaliados periodicamente pela equipe de técnicos da COPPE e do CENPES. Esse banco de dados está armazenado em arquivos eletrônicos na COPPE e no CENPES.

Na Figura 46 o ponto em destaque na cor "azul" corresponde ao resultado de irregularidade medida antes da recuperação asfáltica, ou seja, sobre o revestimento antigo. Essa informação é importante para a análise comparativa entre a irregularidade antiga com a medida na nova camada asfáltica.

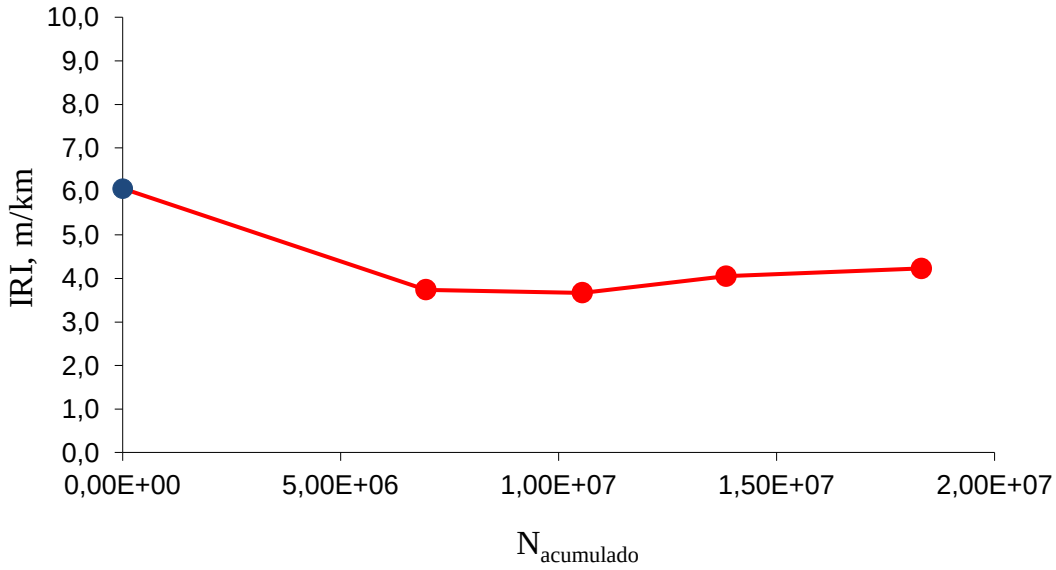


Figura 46 - Evolução da irregularidade do SQ 5 desde a sua implantação em 2006 até 2015

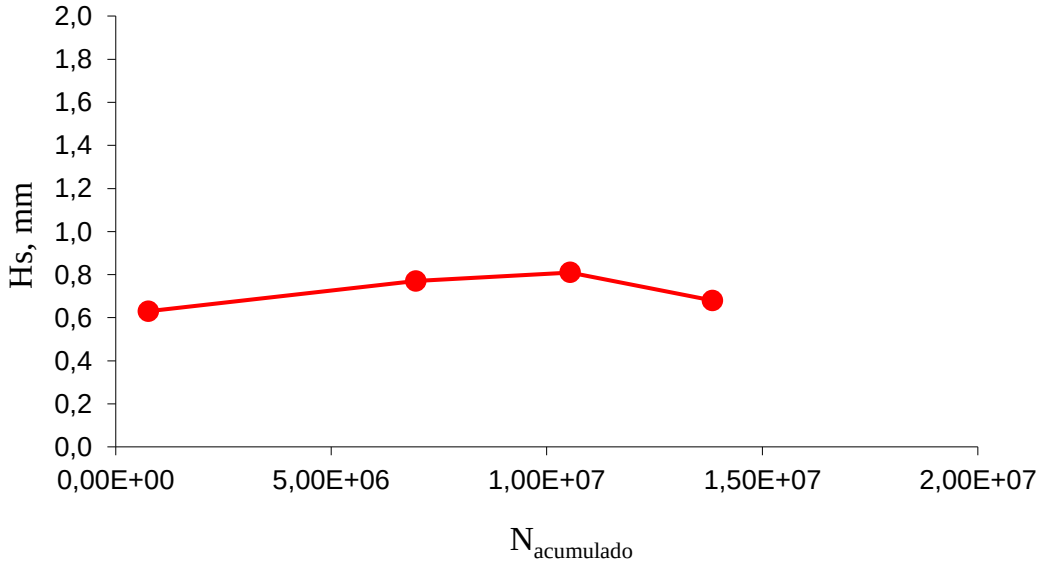


Figura 47 - Evolução da macrotextura do SQ 5 desde a sua implantação em 2006 até 2015

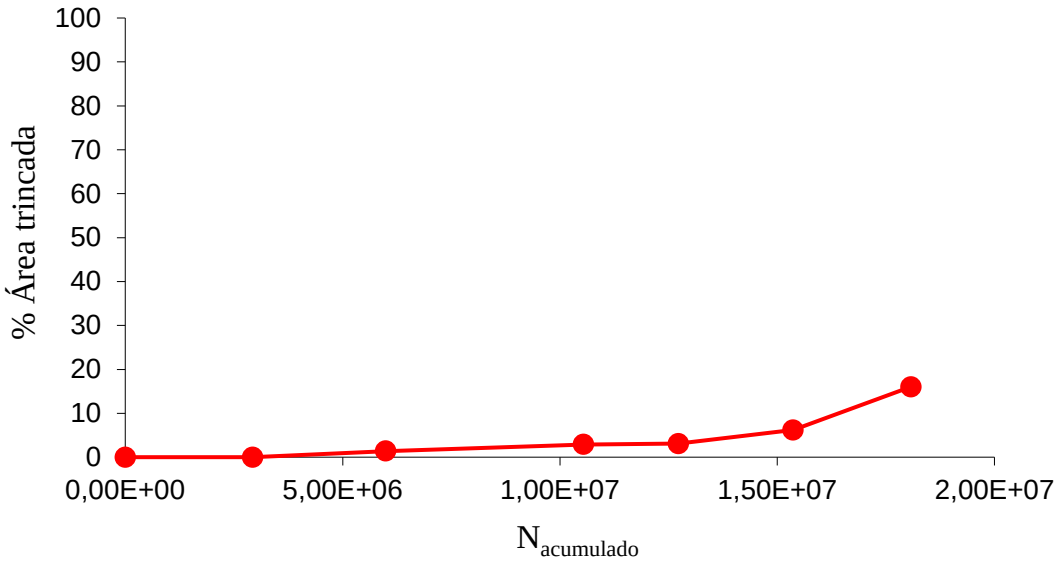


Figura 48 - Evolução da porcentagem de área Trincada do SQ 5 desde a sua implantação em 2006 até 2015

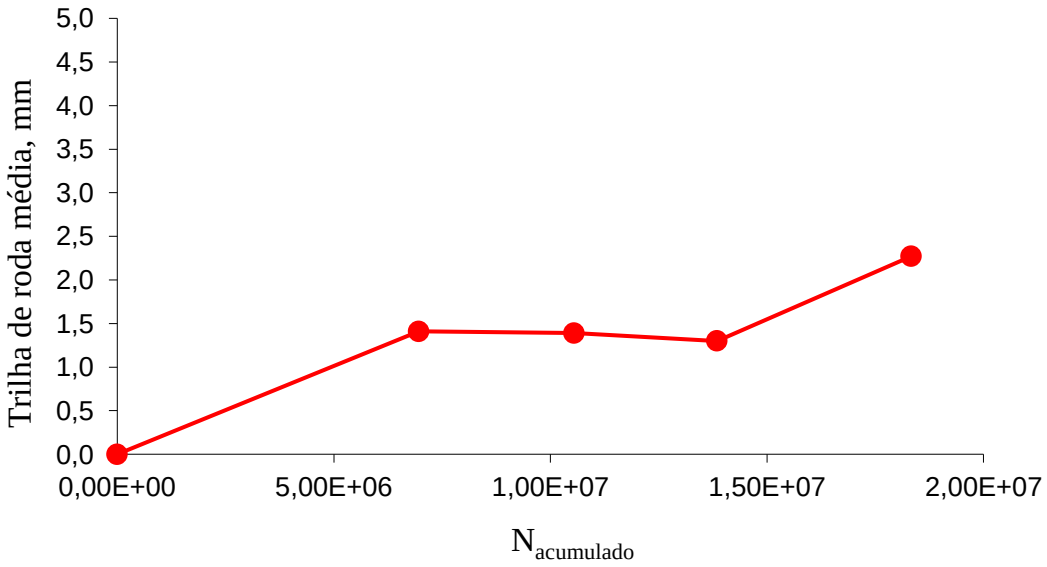


Figura 49 - Evolução do afundamento de trilha de roda do SQ 5 desde sua implantação em 2006 até 2015

4.5 Critério Utilizado na Retroanálise das Bacias Deflectométricas de 2015 para Determinação da Função de Transferência

A Mecânica dos Pavimentos está baseada em cálculos de tensões e deformações de sistemas de camadas, em geral utilizando a teoria da elasticidade sendo necessário se conhecer os módulos de elasticidade e o coeficiente de Poisson de cada material que constitui o pavimento.

O uso do FWD nos levantamentos deflectométricos no trecho experimental do Projeto Fundão, deu-se a partir de 2009 com a chegada do FWD do CENPES. A partir de 2012 com a chegada do FWD do LABGEO da COPPE os levantamentos deflectométricos passaram a ser realizados pelos técnicos da COPPE, conforme ilustrado na Figura 50. Os FWD do CENPES e da COPPE são da marca Kuab e modelo KUAB 2M-FWD, fabricado em 2008 e 2012, respectivamente. É importante mencionar que as deflexões medidas com o FWD do CENPES entre os anos de 2009 e 2011 e o FWD da COPPE entre os anos de 2012 a 2015 não apresentaram variações significativas em cada segmento.

MORAIS (2015) realizou um estudo com diferentes FWD, modelo e marca, em quatro locais diferentes no Rio de Janeiro com o objetivo de comparar diferentes equipamentos

quanto à sua repetibilidade e sua reprodutibilidade: três locais localizados na Cidade Universitária e um na Rodovia Raphael de Almeida Magalhães, conhecida com Arco Metropolitano. O estudo da autora permitiu a comparação dos equipamentos e o desenvolvimento de uma proposta de procedimento para calibração de FWD no Brasil. Uma análise detalhada deste estudo pode ser visto na referida autora.



Figura 50 - Laboratório móvel e FWD da COPPE

Ao se fazer uma medida deflectométrica em um ponto do pavimento, sabe-se que esta deflexão resulta da contribuição de todas as camadas incluindo o subleito e, portanto está vinculada aos módulos de elasticidade de cada uma delas e do subleito. Assim, a retroanálise nada mais é do que se resolver o problema inverso em relação ao dimensionamento de um pavimento, ou seja, têm-se as deformações resultantes de um carregamento conhecido e deseja-se conhecer os módulos que condizem com aquelas deformações elásticas (MEDINA e MOTTA, 2015).

Atualmente no Brasil estão disponíveis inúmeros programas de retroanálise para pavimentos asfálticos, tais como: ELMOD da Dynatest, Kuab, EVERCALC versão gratuita, BAKFAA versão gratuita, RETROANÁLISE da Dynatest, Pavisys,

RETRAN2C e RETRAN5L, REVAP, etc. Nesta tese foi utilizado o BackSisPavBR versão gratuita, desenvolvido na COPPE por Filipe Franco em 2015 que determinou o módulo de elasticidade das camadas do pavimento dos segmentos a quente do Projeto Fundão. A Figura 51 apresenta a interface do programa.

Para este estudo foi realizada a retroanálise de todos os segmentos experimentais a quente referentes às deflexões de 2015. Após realizados os levantamentos deflectométricos os resultados das bacias foram processados e separados por segmento e subdivididos por faixa de rolamento, visto que há grande heterogeneidade do tráfego entre as faixas de rolamento, e calculada a bacia média ± desvio padrão.

No processo para determinação do módulo de elasticidade dos segmentos definidos com o uso do programa de retroanálise BackSisPavBR foram definidos critérios para a estimativa dos módulos a fim de minimizar o número de variáveis, tais como:

- A opção da camada de revestimento asfáltico ser Aderido ou Não Aderido:
    - Foi definido que a primeira camada do revestimento asfáltico será considerada aderida para fins de obtenção do módulo, quando a camada asfáltica existente não tiver sofrido nenhuma intervenção, como fresagem parcial ou total. Caso ocorra uma dessas intervenções é considerada para fins de retroanálise como Não Aderido.
- Limites máximos de Módulo de Resiliência do revestimento asfáltico baseado em resultados mecânicos realizados em laboratório, de corpos de prova extraídos em 2015 de campo;
- Os valores de Poisson foram iguais em todos os segmentos experimentais, variando em função do material constituinte da camada, sendo 0,30 para revestimentos asfálticos; 0,35 para camada de base granular; 0,40 para camada de sub-base e 0,45 para camada do subleito, adotados para todos os segmentos.

Verificou-se os módulos de elasticidade retroanalisados para a bacia média ± desvio padrão de todos os segmentos, porém as retroanálises das bacias deflectométricas nas condições de ± desvio padrão não apresentaram boa correlação com os danos médios acumulados analisados com o programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas, e foram excluídos na análise. A partir dessa definição foram retroanalisados somente as

bacias médias de cada segmento correspondente a faixa de rolamento Esquerda, Centro ou Direita, visto que na maioria dos casos os segmentos eram de pequena extensão. Os critérios definidos para cada segmento utilizados na retroanálise, bem como os resultados dos módulos retroanalisados foram inseridos no programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas – AEMC para o cálculo do Dano Médio Acumulado (DMA).

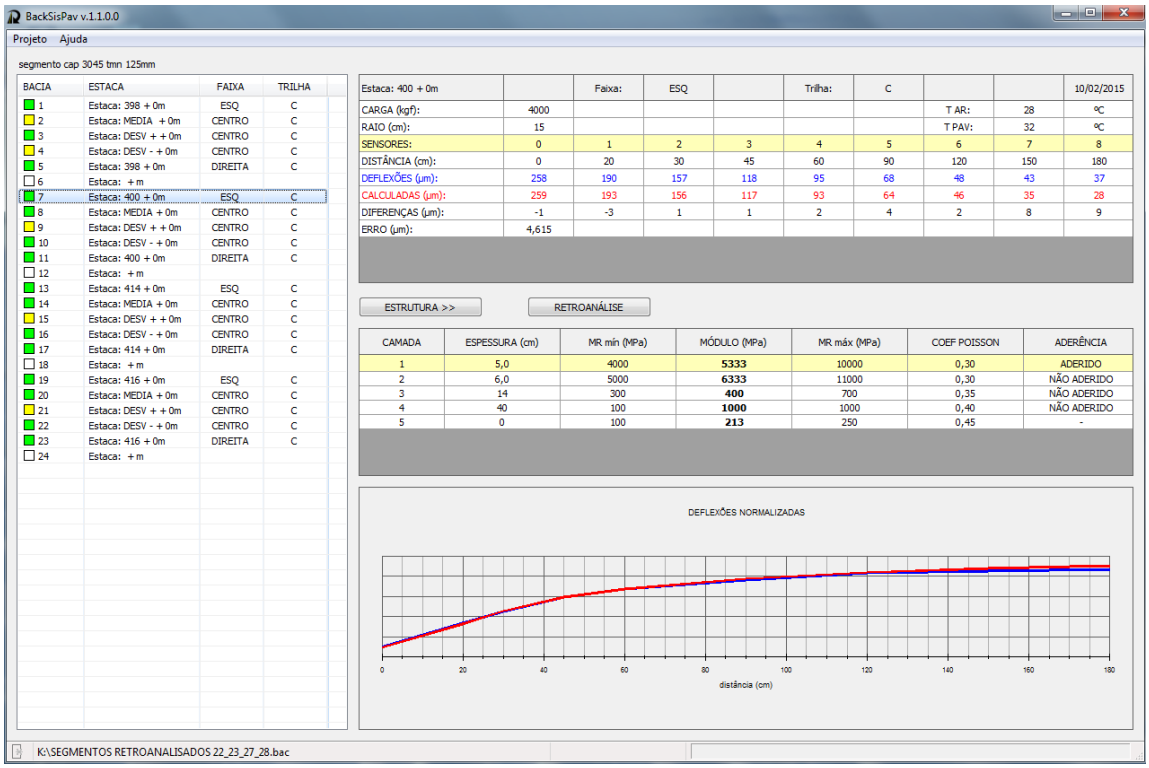


Figura 51 – Interface do programa de retroanálise – BackSisPavBR- Versão 1.1.0.0 por Franco em 201, utilizada nesta tese

4.6 Análise Elástica de Múltiplas Camadas - AEMC

FRANCO (2007) desenvolveu um programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas – AEMC, específico para o cálculo das tensões, deformações e deslocamentos de pavimentos asfálticos, com rotinas para entrada de dados e apresentação de resultados. O programa processa os cálculos com base no programa JULEA, alterado para atender o formato de entrada de dados gerados pelo AEMC.

O autor citado fez alterações em seu programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas – AEMC para servir aos propósitos desta pesquisa. As mudanças ocorreram

em relação à análise do dano médio acumulado em até duas camadas de revestimento asfálticos, porém a principal mudança se deu no cálculo do dano distribuído em 110 pontos: uma decisão importante visto que o dano não é mais calculado somente na fibra inferior da camada e sim em toda a camada asfáltica, conforme mostrado na Figura 52. Esses danos médios acumulados são gerados para duas camadas asfálticas, se houver, permitindo simular o que acontece no pavimento. Essas mudanças permitiram verificar que os danos que eventualmente ocorrem de cima para baixo também afetam a velocidade do dano.

Outra mudança no programa foi a possibilidade de analisar o dano médio acumulado com base no dano livre ou limitado (0 – 1). No capítulo 5 estão detalhadas as diferenças entre estes dois e os resultados gerados considerando um ou outro critério. O programa permite ainda gerar contornos de dano acumulado para cada período da análise em função dos eixos x e z em relação ao dano gerado no período. A Figura 53 apresenta a interface do programa AEMC com essas modificações e a Figura 54 a evolução do dano médio acumulado de um segmento com duas camadas de revestimento asfáltica novas. Mais detalhes do programa AEMC original podem ser vistos em FRANCO (2007).

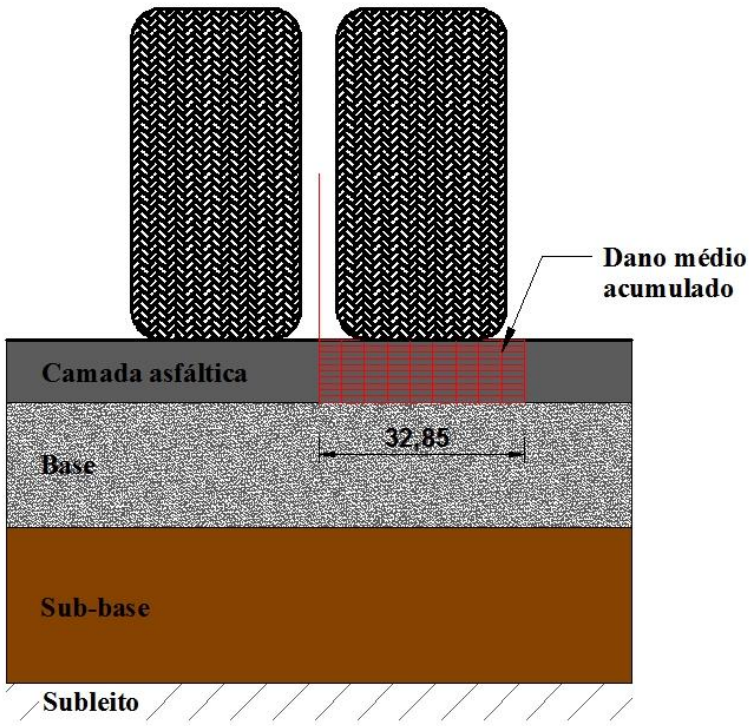


Figura 52 - Perspectiva da distribuição dos 110 pontos gerados no AEMC (Nascimento, 2015).

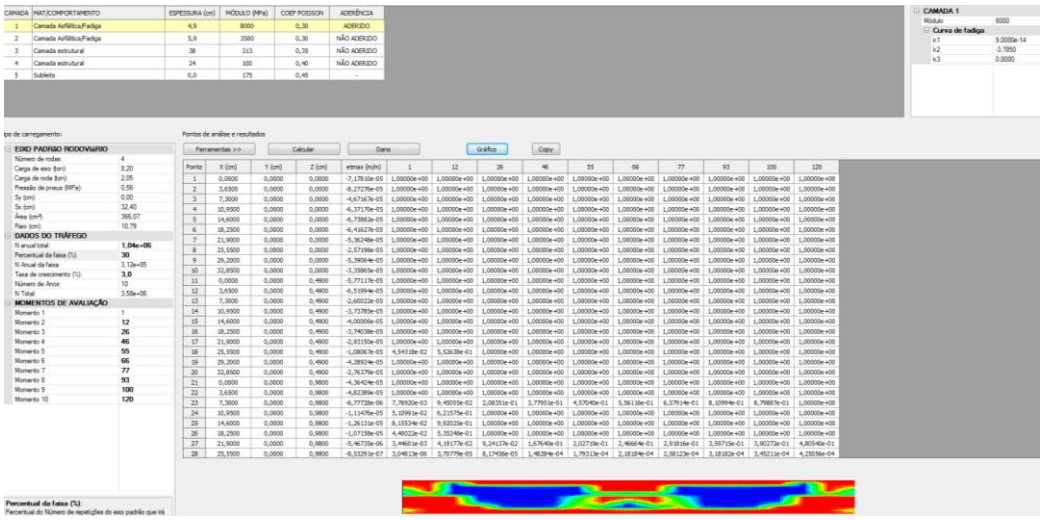


Figura 53 - Interface do programa AEMC modificado em 2015 utilizado nesta pesquisa

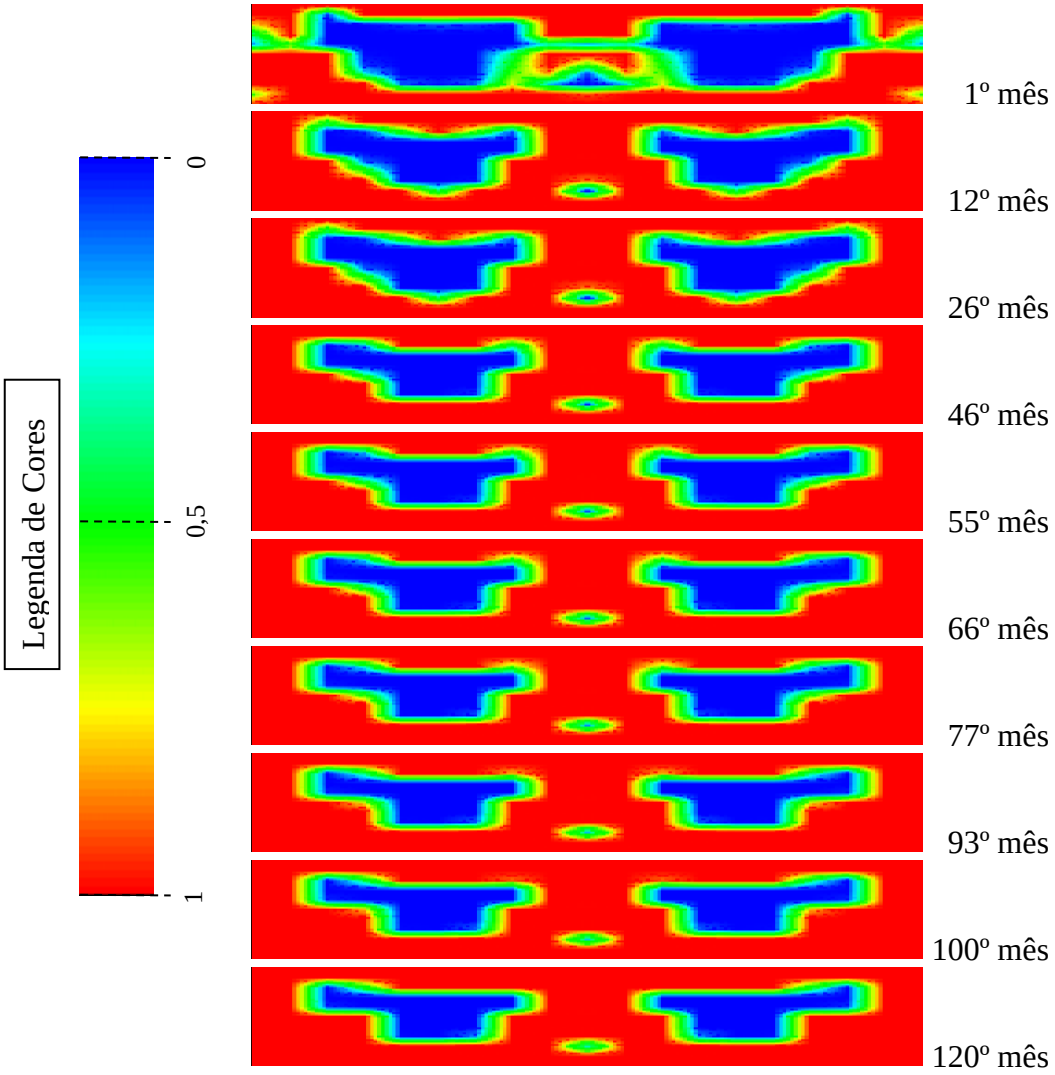


Figura 54 – Exemplo de evolução do dano médio acumulado gerado pelo AEMC – segmento com duas camadas de revestimento asfáltico novos – Projeto Fundão

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Estão apresentados os resultados dos segmentos experimentais de misturas à quente construídos e monitorados no Projeto Fundão, que serviram de parâmetro para a determinação de uma Função de Transferência a ser implantada no Método de Dimensionamento Mecanístico – Empírico Brasileiro definida em função da fadiga por compressão diametral, do Módulo de Resiliência e das observações do desempenho dos segmentos experimentais do Fundão.

5.1 Resultados dos Ensaios Mecânicos

A Função de Transferência obtida nesta tese foi desenvolvida em função da fadiga por compressão diametral e do Módulo de Resiliência. Apesar de existirem ensaios mais modernos para a determinação dos parâmetros mecânicos das misturas asfálticas, como o ensaio de tração direta com deformação controlada para determinação da curva de fadiga e o módulo dinâmico, estes ainda estão restritos a poucos centros de pesquisa no Brasil.

No Brasil o ensaio mais difundido e utilizado para a determinação dos parâmetros mecânicos das misturas asfálticas ainda é o ensaio por compressão diametral de cargas repetidas, que vem sendo realizado no Brasil desde 1980. O LABGEO da COPPE foi o pioneiro no país, implantando o sistema de aplicação de cargas e leituras de deslocamentos para o ensaio de compressão diametral em 1979, segundo PINTO (1980), e na versão automatizada por VIANNA (2002).

Em 2014 o LABGEO / COPPE fez um apanhado das curvas de fadiga em seu banco de dados e classificou-as em função do tipo de ligante e do Tamanho Máximo Nominal (TMN) dos agregados, catalogando mais de 220 curvas de fadiga realizadas desde o ano de 2000, quando foi criado o banco de dados. Em 2014 foi realizada uma regressão dessas curvas de fadiga por família, para definir as constantes “k1, k2 e k3” do modelo $N = k1 * \varepsilon_t^{k2} * MR^{k3}$, que substituíram as de Franco (2007) no programa de dimensionamento mecanístico empírico SisPav e foram inseridas no SisPav a partir da versão 2.1.2, com o objetivo de auxiliar o projetista na fase de anteprojeto. Essas constantes foram definidas com o auxilio de um programa estatístico.

O presente trabalho tem como objetivo definir uma Função de Transferência para o nível A do programa de dimensionamento SisPavBR com o uso de curvas de fadiga obtidas por compressão diametral realizadas no LABGEO / COPPE e no CENPES, calibrada com dados dos segmentos experimentais construídos e monitorados no Projeto Fundão. O procedimento para a determinação da Função de Transferência é baseado no modelo proposto por Nascimento (2015), modificado pelo autor da presente tese em alguns aspectos, que serão mostrados a seguir.

A Tabela 25 apresenta as constantes "k1 e k2" das curvas de fadiga representadas pelo modelo mostrado na expressão *(12)* referente as misturas asfálticas aplicadas em segmentos experimentais na Cidade Universitária. A Figura 55 mostra o resultado das curvas de fadiga das 6 misturas asfálticas utilizadas nesta tese, realizadas no LABGEO, exceto a mistura asfáltica modificada com borracha que foi realizada pela Gerência de Lubrificantes e Produtos Especiais do CENPES.

$$N = k1 * \epsilon_t^{k2} \qquad (12)$$

A Tabela 25 apresenta também um resumo dos resultados mecânicos de MR e RT das misturas asfálticas utilizadas neste estudo, correspondentes aos resultados obtidos durante a dosagem. É importante ressaltar que todos os ensaios de fadiga e de módulo de resiliência foram realizados a 25ºC, por compressão diametral de cargas repetidas, submetidos a uma frequência de 1 Hz com 0,1 s de carregamento e 0,9 s de relaxação, com os corpos de prova preparados após duas horas de envelhecimento em estufa.

Tabela 25 - Resultados da fadiga e MR e RT de misturas asfálticas usadas no Projeto Fundão

MISTURA ASÁLTICA	VALORES DE PROJETO		Nº PROTOCOLO	FADIGA	
	MR, MPa	RT, MPa		k1	k2
CAP 30/45 TMN 12,5mm	8950	2,08	F 19/07	5E -14	-3,992
CAP 30/45 TMN 19,1mm	11613	2,65	F 47/07	9E - 14	-3,785
CAP 50/70 TMN 12,5mm	8289	1,91	F 21/07	3E- 12	-3,780
CAP 50/70 TMN 19,1mm	9588	2,04	F 23/07	1E - 12	-3,599
CAPFLEX 65/90 TMN 19,1mm	3184	1,28	F 03/07	3E – 11	-3,535
CAPFLEX B TMN 19,1mm	5105	1,23	AB 296/07*	4E - 12	-3,654
Fadiga AB 296/07* foi realizada no CENPES					

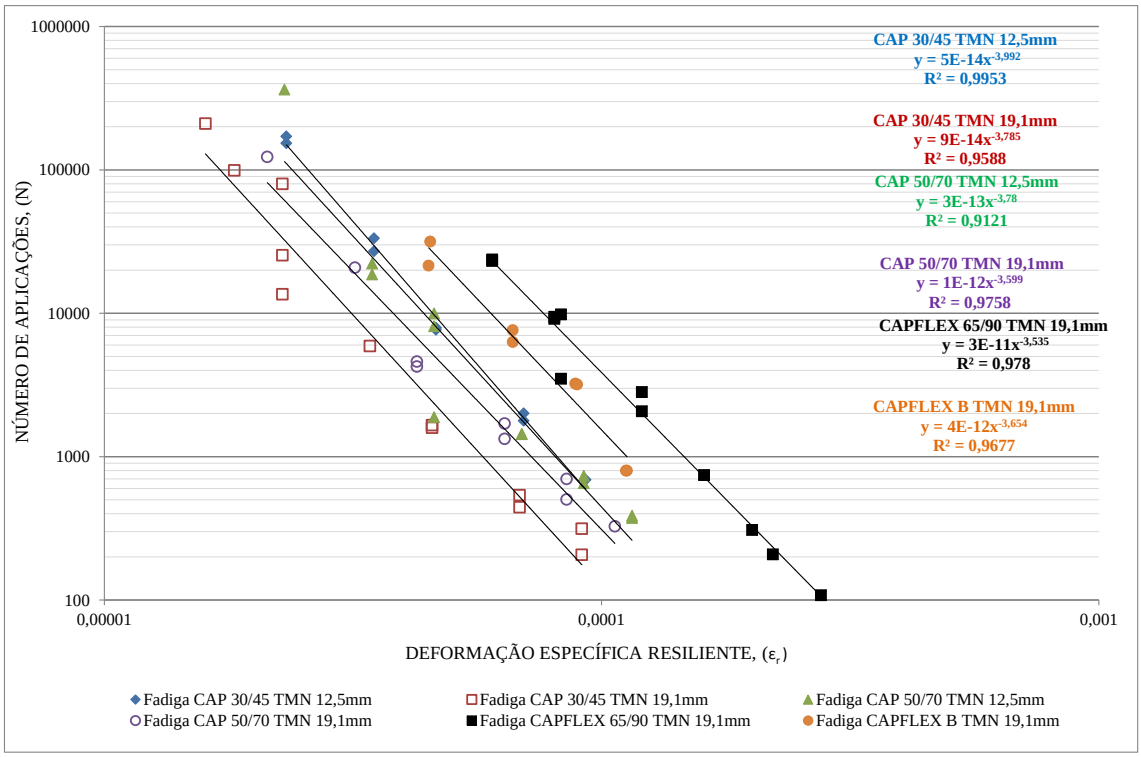


Figura 55 – Resultado das curvas de fadiga de misturas asfálticas aplicadas em segmentos experimentais do Projeto Fundão utilizadas neste estudo

5.2 Resultados dos Segmentos Experimentais à Quente Contemplados Nesta Tese

Após a construção dos segmentos experimentais se deu o acompanhamento sistemático dos mesmos, baseado nos critérios definidos e apresentados no capítulo 4. Todos os segmentos foram monitorados e submetidos a levantamentos deflectométricos, levantamento visual contínuo de defeitos, medidas de irregularidade, afundamento de trilha de roda, macro e microtextura, periodicamente.

A maioria dos segmentos experimentais foi construído no ano de 2007, com exceções dos segmentos experimentais SQ 1 e SQ 2 que foram construídos em novembro de 2006. Os segmentos de ligantes modificados pelo CENPES como: Elvaloy, PPA, EVA e SBS + PPA, construídos em 2008 não estão incluídos neste estudo para a determinação da Função de Transferência por não terem sido realizadas as curvas de fadiga por compressão diametral, correspondentes.

A escolha dos segmentos experimentais utilizados para a determinação da Função de Transferência se deu após a determinação de todas as curvas de desempenho geradas

pela monitoração periódica, de um total de 54 segmentos experimentais observa-se que cada segmento possui 3 faixas de rolamento, o que triplica o número de segmentos experimentais. Isto implicou no descarte de alguns segmentos que apresentaram problemas durante a fase de execução. Outro fator de descarte foram os trechos com misturas asfálticas para as quais não foram realizadas curvas de fadiga por compressão diametral.

Alguns segmentos da faixa da direita foram excluídos porque a partir de 2010 passaram a servir durante o dia de estacionamento de veículos e / ou foram depois designados como faixas de ciclovia. Muitos desses segmentos no início das avaliações vinham sendo monitorados, porém mudanças no setor de planejamento da PU alteraram essas avaliações, inclusive provocando o aumento do VDM nas demais faixas de rolamento.

O critério para a determinação da porcentagem de área trincada e outros defeitos, explicado no capítulo 4, serviu de base para o procedimento descrito no SRTA de 2010. A Figura 56 mostra o esquema utilizado para determinação da porcentagem de área trincada, referente a uma faixa de rolamento entre duas estacas. Essa faixa de rolamento é dividida visualmente em três subfaixas no sentido do tráfego (faixa da roda da direita, faixa do centro entre as rodas e faixa da roda da esquerda): cada subfaixa corresponde a 1/3 da largura total da faixa de rolamento.

No sentido do tráfego o esquema é dividido em 10 subseções de 2 metros cada, criando células de 2 m de comprimento por 1/3 da faixa de largura. Na maioria dos casos as faixas de rolamento no Projeto Fundão são de 3,6 m de largura. Assim tem-se células de 1,2 m de largura por 2 m de comprimento, totalizando 30 células entre duas estacas, consecutivas.

Embora todos os tipos de defeitos tenham sido levantados ao longo das avaliações dos segmentos do Projeto Fundão, para o objetivo desta tese somente será analisada a área trincada, já que esta tem objetivo de estabelecer a Função de Transferência Campo Laboratório quanto à fadiga.

A Figura 56 mostra, como exemplo, os defeitos observados em campo de um dos segmentos experimentais. Com esses defeitos alocados em cada célula, em função do

observado em campo, é possível quantificar a área trincada do segmento, através da seguinte expressão *(13).*

$$AT = \frac{N_{TRINCADO}}{N_{TOTAL}} \; X \; 100 \qquad (13)$$

Onde:

$AT =$ Área Trincada, %

$N_{TRINCADO} =$ Número de células trincadas

$N_{TOTAL} =$ Número total de células do segmento experimental

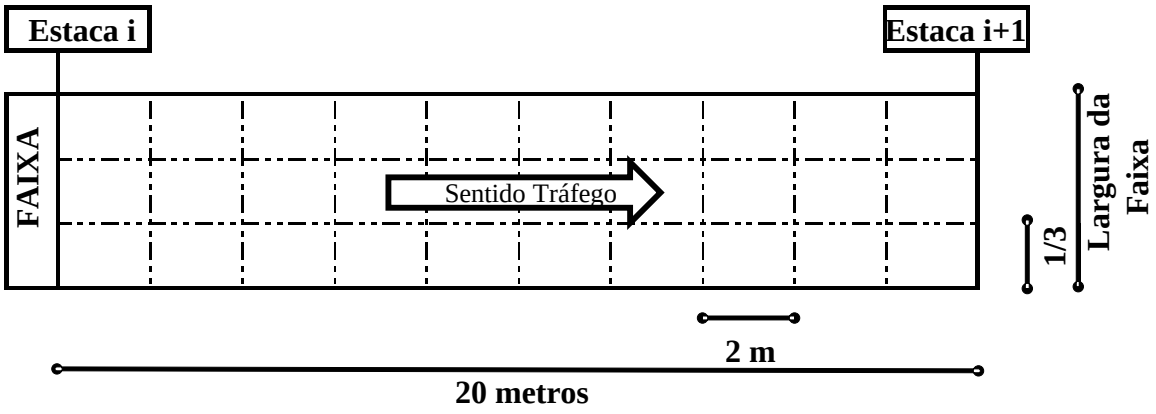


Figura 56 – Critério de mapeamento dos defeitos nos segmentos experimentais do Projeto Fundão

A Tabela 26 apresenta as porcentagens de área trincada observadas em campo, referentes aos segmentos experimentais definidos neste estudo desde a sua implantação até os levantamentos realizados no ano de 2015.

Tabela 26 - Porcentagens de área trincada observadas em campo dos segmentos experimentais utilizados neste estudo.

Ligante	SQ	2007/08	06/2009	12/2010	11/2011	10/2012	09/2013	03/2015
30/45 *	**1 – E**	0	1,17	----	1,65	2,34	----	9,20
30/45 *	**2 – E**	0	0,33	2,93	3,76	3,90	8,84	21,45
30/45 *	**2 – D**	0	31,67	42,85	43,63	49,63	67,36	71,30
30/45 *	**3 – E**	0	1,42	3,33	----	----	15,17	23,33
30/45 *	**5 – E**	0	0,56	----	----	1,22	2,22	2,56
30/45 *	**5 – C**	0	1,67	4,78	8,33	22,78	30,05	----
30/45 * 65/90 *	**10 – E**	0	0	----	----	4,76	13,81	----
30/45 * 65/90 *	**11 – E**	0	0	0	----	0,70	1,89	7,3
30/45 * 65/90 *	**11 – D**	0	0,70	----	----	4,56	12,84	14,8
30/45 * 65/90 *	**12 – E**	0	0	0	----	5,18	----	11,11
30/45 * 65/90 *	**12 – D**	0	0	0	----	4,74	5,48	----
30/45 * 65/90 *	**13 – E**	0	0	3,63	----	6,42	8,12	12,36
30/45 * 65/90 *	**15 – E**	0	0	----	----	3,33	8,88	18,22
30/45 * 65/90 *	**17 – E**	0	0	0	----	15	27,11	32,11
30/45 * 65/90 *	**18 – E**	0	0	0	0	0	0	0,56
30/45 *	**19 – C**	0	0	----	----	29,62	36,57	55,24
30/45 *	**33 – E**	0	2	1,60	1,60	----	22,93	42
30/45 *	**33 – D**	0	----	6,67	----	----	10,13	12
30/45 *	**34 – E**	0	0,67	6,67	10,67	----	14,93	24,93
30/45 *	**34 – D**	0	0	----	4	----	27,33	33,30
30/45 *	**35 – E**	0	0	0	----	1,45	2,03	7,24
30/45 *	**35 – C**	0	0	8,70	----	----	25,8	30,72
30/45 *	**35 – D**	0	0	10,14	----	----	20,29	31,88
30/45 *	**40 – E**	0	0	0	0	0	0	0
30/45 *	**40 – C**	0	0	0	0	----	6,14	21,06
30/45 *	**41 – E**	0	0	0	0	0	3,7	21,10

continua

Ligante	SQ	2007/08	06/2009	12/2010	11/2011	10/2012	09/2013	03/2015
30/45 *	**42 – E**	0	5	----	----	----	11,33	28,83
30/45 *	**42 – D**	0	12,17	----	25	35	----	44
30/45 *	**80 – C**	0	0	12,31	20,51	33,03	----	----
30/45 **	**23 – C**	0	0	0	4,6	----	----	17
50/70 **	**26 – E**	0	0	15,3	37	40,13	40,60	41,13
50/70 **	**26 – C**	0	0,53	----	30,67	37,13	41,30	43,37
50/70 **	**26 – D**	0	8,06	----	26	----	40,20	45,07
50/70 *	**29 – E**	0	0,93	----	1,54	2,47	9,60	----
50/70 *	**29 – D**	0	0	0,2	0,2	----	1,13	2,27
65/90 *	**6 – E**	0	0	----	----	0,07	1,41	2,50
65/90 *	**6 – C**	0	13,80	----	----	----	24,37	25
65/90 *	**8 – E**	0	-	----	----	2,0	----	4,47
65/90 *	**8 – C**	0	4,57	----	----	10	----	15,24
65/90 *	**14 – D**	0	0	----	----	7,40	20,24	24,36
AMB *	**38 – E**	0	0,50	----	0,83	4,16	10	25,83
AMB *	**43 – C**	0	0,26	0,67	----	1,33	4,13	6,53
AMB *	**43 – D**	0	0,93	----	2,40	5,07	10,27	13,6
AMB *	**65 – E**	0	0	0	0	0	0,55	2,78
AMB *	**65 – C**	0	0	0	0	0	0	1,10

* Misturas asfálticas com Tamanho Máximo Nominal 19,1 mm

** Misturas asfálticas com Tamanho Máximo Nominal 12,5 mm

5.3 Resultados da Retroanálise dos Segmentos Experimentais Obtidos das Bacias Deflectométricas com o Uso do FWD no Ano de 2015

Conforme comentado no capítulo 4 foi realizada a retroanálise de todos os segmentos experimentais selecionados para esta tese com base em medidas deflectométricas realizadas com o uso do FWD no ano de 2015. A Tabela 27 apresenta o resumo dos valores de módulo de elasticidade retroanalisados pelo programa BackSisPavBR além das considerações adotadas na retroanálise e na determinação do dano médio acumulado.

Na Tabela 27 estão apresentados os Segmentos a Quente (SQ) e sua respectiva faixa de rolamento (Esquerda, Centro ou Direita), tipo de ligante asfáltico, Tamanho Máximo Nominal, Início e fim do segmento (estacas + metros), valores de MR retroanalisados dos SQs definidos pelo Programa de retroanálise BackSisPavBR calculado em função

da média das bacias deflectométricas de cada segmento, a % de erro da bacia retroanalisada comparada com a bacia medida, a frequência do tráfego no SQ, consideração da camada de revestimento asfáltico aderida ou não aderida (aderido foi considerado quando o preparo do pavimento não sofreu nenhuma alteração, ou seja, sem fresagem e não aderido quando o preparo do pavimento sofria alterações como: fresagem parcial ou fresagem total da camada asfáltica), além do número N no segmento até março de 2015.

Os resultados dos módulos de resiliência apresentados na Tabela 27 correspondem aos valores de módulos retroanalisados com o programa BackSisPavBR para cada um dos segmentos experimentais. Esses módulos foram utilizados para a determinação do dano médio acumulado e mostraram-se muito parecidos com os módulos de resiliência de projeto das misturas.

Tabela 27 - Resultados da retroanálise dos segmentos experimentais contemplados neste estudo

Segmento a Quente - SQ	Ligante	TMN mm	Estacas		Valores de MR das camadas obtidas pela Retroanálise – Programa BackSisPavBR, MPa.					Erro %	Camada Aderida Não Aderida	Frequência Tráfego na Faixa, %	Preparo do Pavimento	Número N Anual no Segmento – FEC USACE
			Início	Fim	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4	Camada 5					
SQ 01 - E	30/45	19,1	68	89	13286	2167	300	165	88	2,75	NÃO	40	PARCIAL	$1,30 \times 10^6$
SQ 02 - E	30/45	19,1	90	112	14500	3500	750	325	150	7,70	NÃO	15	PARCIAL	$1,20 \times 10^6$
SQ 02 - D	30/45	19,1	90	112	14000	2944	475	165	125	4,83	NÃO	15	PARCIAL	$1,20 \times 10^6$
SQ 03 - E	30/45	19,1	112	120	15000	3500	750	175	125	9,88	NÃO	30	PARCIAL	$1,85 \times 10^6$
SQ 05 - E	30/45	19,1	136	148	15500	4500	950	638	200	14,13	NÃO	20	PARCIAL	$2,50 \times 10^6$
SQ 05 - C	30/45	19,1	136	148	14800	2500	950	475	150	11,56	NÃO	80	PARCIAL	$2,50 \times 10^6$
SQ 10 - E	30/45 + F-65/90	19,1	491	498	8000	----	313	100	175	3,86	SIM	30	TOTAL	$1,04 \times 10^6$
SQ 11 - E	30/45 + F-65/90	19,1	498	507+10	10500	----	425	600	225	3,95	SIM	40	TOTAL	$9,20 \times 10^5$
SQ 11 - D	30/45 + F-65/90	19,1	498	507+10	14000	----	525	463	213	3,78	SIM	60	TOTAL	$9,20 \times 10^5$
SQ 12 - E	30/45	19,1	507+10	512	14200	1500	375	163	400	9,13	NÃO	40	PARCIAL	$9,20 \times 10^5$
SQ 12 - D	30/45	19,1	507+10	512	14500	3500	900	350	400	7,17	NÃO	60	PARCIAL	$9,20 \times 10^5$
SQ 13 - E	30/45	19,1	512	507+10	14500	4000	400	70	450	7,93	NÃO	40	PARCIAL	$1,29 \times 10^6$
SQ 15 - E	30/45 + F-65/90	19,1	517+10	520+10	12214	----	238	400	250	3,45	SIM	15	TOTAL	$1,29 \times 10^6$
SQ 17 - E	30/45 + F-65/90	19,1	520+10	526+10	12833	----	375	225	175	5,17	SIM	15	TOTAL	$1,29 \times 10^6$
SQ 18 - E	30/45 + F-65/90	19,1	526+10	538	11857	----	300	165	125	4,00	SIM	15	TOTAL	$1,39 \times 10^6$
SQ 19 - C	30/45	19,1	538	545	14600	2800	618	263	125	9,95	NÃO	15	PARCIAL	$1,39 \times 10^6$
SQ 33 – E*	30/45	19,1	16	21	14500	8500	850	500	150	8,11	SIM	15	NÃO	$1,90 \times 10^6$
SQ 33 – D*	30/45	19,1	16	21	13643	5556	600	183	125	8,31	SIM	15	NÃO	$1,90 \times 10^6$

Continua

Segmento a Quente - SQ	Ligante	TMN mm	Estacas		Valores de MR das camadas obtidas pela Retroanálise – Programa BackSisPavBR, MPa.					Erro %	Camada Aderida Não Aderida	Frequência Tráfego na Faixa, %	Preparo do Pavimento	Número N Anual no Segmento
			Início	Fim	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4	Camada 5					
SQ 34 - E	30/45	19,1	63	68	14000	3444	750	350	100	8,29	SIM	15	NÃO	$1,30 \times 10^6$
SQ 34 - D	30/45	19,1	63	68	12214	2722	770	450	90	7,82	SIM	15	NÃO	$1,30 \times 10^6$
SQ 35 - E	30/45	19,1	233	236	15500	3000	850	500	200	7,32	NÃO	15	PARCIAL	$1,48 \times 10^6$
SQ 35 - C	30/45	19,1	233	236	16500	5500	750	400	150	6,21	NÃO	70	PARCIAL	$1,48 \times 10^6$
SQ 35 - D	30/45	19,1	233	236	14500	4500	700	288	125	8,03	NÃO	15	PARCIAL	$1,48 \times 10^6$
SQ 40 - E	30/45	19,1	434+10	438+05	14000	4500	850	470	200	9,37	NÃO	20	PARCIAL	$1,90 \times 10^6$
SQ 40 - C	30/45	19,1	434+10	438+05	12500	4556	750	450	200	6,9	NÃO	80	PARCIAL	$1,90 \times 10^6$
SQ 41 - E	30/45	19,1	438	441	10056	2944	263	450	200	7,68	NÃO	20	PARCIAL	$1,90 \times 10^6$
SQ 42 - E	30/45	19,1	441	445	14000	3500	663	225	118	9,89	NÃO	15	PARCIAL	$1,90 \times 10^6$
SQ 42 - D	30/45	19,1	441	445	15000	3500	850	363	100	14,63	NÃO	15	PARCIAL	$1,90 \times 10^6$
SQ 80 - C	30/45	19,1	120	126	14167	1000	700	250	125	4,65	NÃO	80	PARCIAL	$2,50 \times 10^6$
SQ 23 - E	30/45	12,5	399	401	8000	7333	700	600	200	9,20	NÃO	15	NÃO	$2,53 \times 10^6$
SQ 26 - E	50/70	12,5	403	413	15000	3500	750	238	118	10,39	NÃO	15	PARCIAL	$2,53 \times 10^6$
SQ 26 - C	50/70	12,5	403	413	13778	1900	850	350	130	9,22	NÃO	70	PARCIAL	$2,53 \times 10^6$
SQ 26 - D	50/70	12,5	403	413	16500	3500	800	163	135	9,37	NÃO	15	PARCIAL	$2,53 \times 10^6$
SQ 29 - E	50/70	19,1	148	158	15000	4500	850	600	200	9,81	NÃO	15	PARCIAL	$2,50 \times 10^6$
SQ 29 - D	50/70	19,1	148	158	15000	5500	950	688	250	13,57	NÃO	15	PARCIAL	$2,50 \times 10^6$
SQ 06 - E	F-65/90	19,1	462	480	8600	----	475	110	180	9,86	NÃO	15	TOTAL	$1,04 \times 10^6$
SQ 06 - C	F-65/90	19,1	462	480	8000	----	450	100	210	9,93	NÃO	70	TOTAL	$1,04 \times 10^6$
SQ 08 - E	F-65/90	19,1	482	489	7800	----	588	100	263	7,16	NÃO	30	TOTAL	$1,04 \times 10^6$
SQ 08 - C	F-65/90	19,1	482	489	8800	----	475	90	200	11,23	NÃO	70	TOTAL	$1,04 \times 10^6$
SQ 14 - D	F-65/90	19,1	512	517+10	8500	800	425	100	550	9,00	NÃO	50	PARCIAL	$1,29x\ 10^6$
SQ 38 - E	AMB	19,1	430+10	517+10	8000	3500	675	350	135	11,03	NÃO	30	PARCIAL	$1,90 \times 10^6$
SQ 43 - C	AMB	19,1	445	450	7111	1700	200	200	100	4,94	SIM	60	NÃO	$1,90 \times 10^6$
SQ 43 - D	AMB	19,1	445	450	7500	1300	400	200	110	2,66	SIM	10	NÃO	$1,90 \times 10^6$
SQ 65 - E	AMB	19,1	351	352	7333	9167	850	875	450	6,59	SIM	15	NÃO	$2,20 \times 10^6$
SQ 65 - C	AMB	19,1	351	352	5667	7111	650	400	175	3,46	SIM	70	NÃO	$2,20 \times 10^6$

5.4 Desenvolvimento da Função de Transferência

A proposta de método de dimensionamento mecanístico – empírico, denominado SisPavBR para o dimensionamento de pavimentos asfálticos novos ou restaurados, está sendo desenvolvida para permitir que o projetista utilize um dos dois níveis previstos no programa: Nível A e Nível B. Basicamente o que difere entre os dois níveis é a forma de caracterizar a mistura asfáltica. O nível A considera o revestimento asfáltico como elástico e caracterizado pelos ensaios de Módulo de Resiliência e Fadiga por compressão diametral de carga repetida, e enquanto o nível B considera o revestimento viscoelástico e é baseado em ensaios de Módulo dinâmico e Fadiga por tração direta por deformação controlada.

NASCIMENTO (2015) realizou seu doutorado na Universidade da Carolina do Norte, e definiu uma Função de Transferência utilizando 27 segmentos experimentais construídos e monitorados na Cidade Universitária – Projeto Fundão. Esta Função de Transferência é baseada na utilização de um programa denominado *Layered Viscoelastic Pavement Analysis for Critical Distresses* (LVECD), que utiliza os resultados de ensaios uniaxiais cíclicos, módulo dinâmico e de tração direta com carregamentos sob deformação controlada das misturas asfálticas para definir a fadiga.

A Figura 57 mostra os resultados das áreas trincadas observadas em campo versus as áreas trincadas previstas pela Função de Transferência definida por NASCIMENTO (2015), sendo que o R^2 encontrado foi 0,72, praticamente três vezes o valor obtido pelo (NCHRP, 2004).

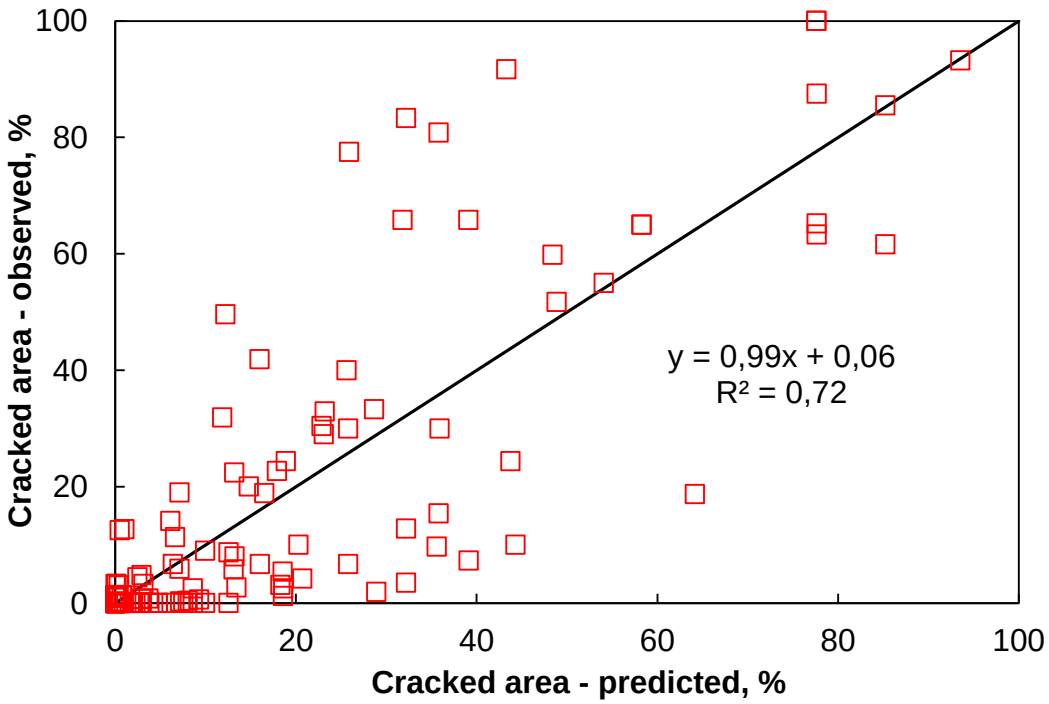


Figura 57 - Resultados da calibração da Função de Transferência definida por Nascimento em 2015, baseada na Função "$S_{T\,0,35}$" Fonte: (NASCIMENTO, 2015)

O presente trabalho é baseado no procedimento definido por NASCIMENTO (2015) para a determinação da Função de Transferência usando também segmentos experimentais construídos e monitorados no Projeto Fundão. Nesta presente pesquisa as respostas de tensão e deformação e os danos do pavimento foram calculados com o programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas – AEMC, baseados nos ensaios de compressão diametral de carga repetida habituais no Brasil (MR e Fadiga).

Para a determinação do dano acumulado foi utilizado o programa de análise elástico de múltiplas camadas desenvolvido por FRANCO (2007), modificado para este estudo. Como comentado no capítulo 4 o AEMC utilizado neste estudo difere do anterior, porque calcula o dano médio acumulado distribuído em 110 pontos da camada de revestimento e permite ainda, calcular o dano médio em até duas camadas asfálticas. O programa calcula para cada período, o dano médio distribuído em 110 pontos, em uma grade de 10 pontos distribuídos na direção horizontal a partir do centro do carregamento (considerando o eixo padrão) – ponto 0 cm até 32,85 cm e 11 pontos distribuídos na direção vertical à 0,01 mm da superfície igualmente distribuídos em função da espessura da camada asfáltica, conforme mostrado na Figura 52. Pode-se dizer que essa distribuição em 110 pontos é o grande diferencial do programa na versão atual, uma vez

que na versão anterior do AEMC o dano era calculado somente na fibra inferior do revestimento, como é praxe corrente nos métodos mecanísticos – empíricos de dimensionamento.

Outra opção implantada no programa AEMC é a possibilidade de se determinar o dano médio acumulado de duas formas: dano livre ou dano limitado entre 0 a 1, onde dano 0 corresponde a situação sem trinca e 1 dano máximo (ou trinca total). Em todos os 45 segmentos experimentais selecionados para esta tese foram calculados os danos médios acumulados nos 110 pontos considerando o dano livre e o dano limitado, utilizando para cada segmento experimental as duas situações, conforme apresentado na Tabela 28, para um caso, como exemplo.

Note que nos dois casos (Dano Livre, Dano Limitado) que corresponde a comparar as deformações calculadas com a curva de fadiga do material, os danos médios tem diferentes condições como: propriedades das misturas asfálticas, volume de tráfego, estrutura do pavimento, clima, e vida de projeto, conforme apresentado nas Figura 59, Figura 60 para dano livre e Figura 61, Figura 62 para dano limitado.

A Função de Transferência desta tese é baseada nos ensaios mecânicos de módulo de resiliência e fadiga por compressão diametral de cargas repetidas de misturas asfálticas, proposto no método de dimensionamento mecanístico – empírico brasileiro, nível A do SisPavBR. A finalidade da Função de Transferência é transformar o dano acumulado em área trincada prevista, por meio de duas constantes C1 e C2 definidas no processo de calibração dos 45 segmentos experimentais avaliados do Projeto Fundão. A Figura 58 apresenta um fluxograma dos procedimentos realizados para a determinação da Função de Transferência. Na sequência estão detalhados os passos realizados para a definição da Função de Transferência.

Segundo NASCIMENTO (2015) o dano médio acumulado plotado versus a área trincada (AT) pode ter seu início deslocado horizontalmente, usando uma taxa variável de crescimento do dano, para obter uma única relação entre a AT e o deslocamento do dano médio acumulado, correspondente a vários segmentos utilizados no desenvolvimento da Função de Transferência. Assim baseado no referido autor este deslocamento foi adaptado nesta presente tese onde definiu-se, por interações

sucessivas, um valor de dano médio reduzido dos 45 segmentos experimentais como sendo o dano de referência para uma AT igual a 10% (AT@10%). Na sequência estão apresentados os procedimentos e as etapas para a determinação da Função de Transferência definida nesta tese a partir de cálculos.

O valor de Área Trincada igual a 10% como critério para determinar o dano reduzido foi proposto por NASCIMENTO (2015) que definiu esse percentual para verificar a correlação entre o nível do dano simulado no início do trincamento e o índice da taxa de crescimento do dano. A seguir está apresentado o roteiro, passo a passo, constando de 19 itens para a determinação da FT na presente pesquisa.

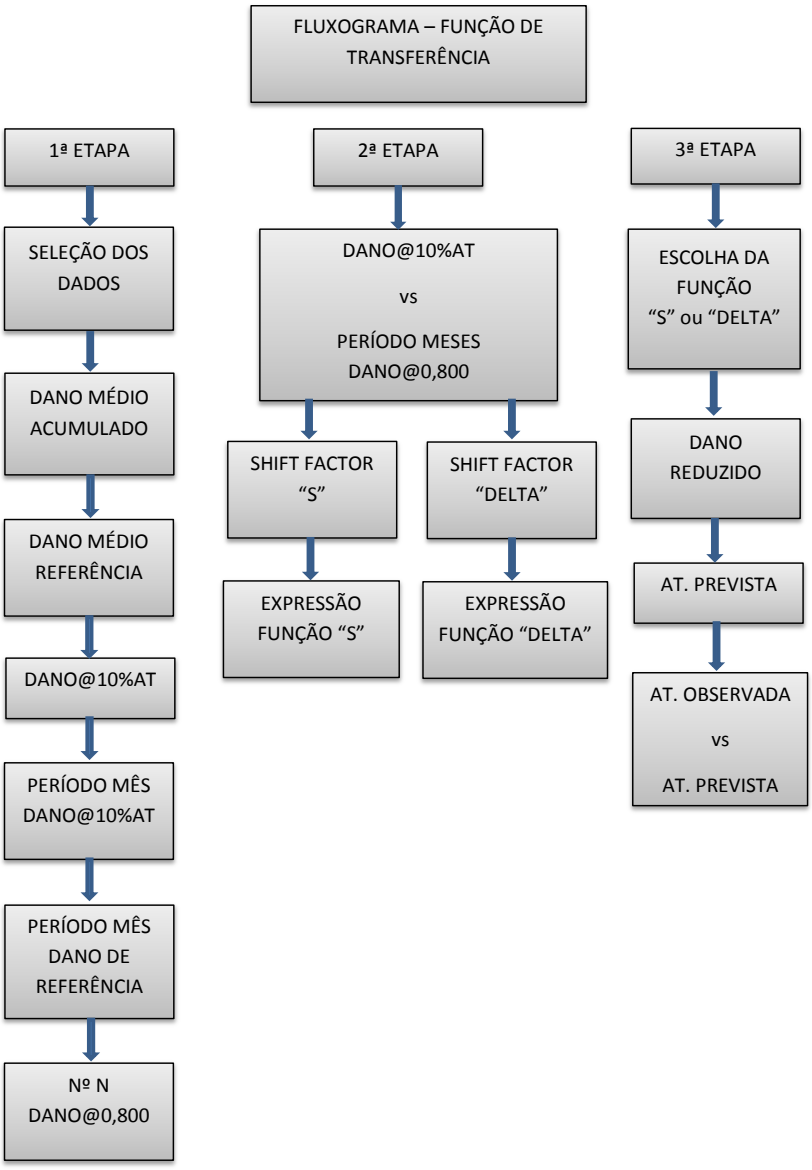


Figura 58 - Fluxograma para determinação da Função de Transferência

Na Tabela 28 as linhas denominadas ano dos levantamentos, período em meses e N acumulado correspondem ao ano que foi realizado o levantamento de defeitos, o período em meses a partir da data da construção do segmento e o número de veículos desde sua implantação. Na tabela, AT Observada é a porcentagem de área trincada observada em cada período, a linha AT prevista corresponde a área trincada prevista pela FT proposta nesta tese e a diferença do erro é definida como diferença entre a AT prevista menos a AT observada elevada ao quadrado.

5.4.1 Roteiro da Metodologia de Obtenção da Função de Transferência (Passo 1 a 19)

Passo 1: Seleção dos dados, foi criada uma planilha Excel com os dados de cada segmento experimental, ano das avaliações, período em meses em relação a data da construção, N acumulado com taxa de crescimento de 3% para cada faixa de rolamento, AT observado em campo em cada período de avaliação e os danos médios acumulados calculados pelo programa AEMC, exemplo na Tabela 28;

Tabela 28 - Exemplo dos dados de um segmento experimental – Projeto Fundão

SQ 43 FAIXA DA DIREITA - ESTACAS 445 - 450 CAPFLEX B TMN										
ANO LEVANTAMENTOS	2007	-	2009	2010	2011	2012	2013	2015	-	-
PERÍODO (MESES)	1	12	26	46	55	66	77	93	100	120
N ACUMULADO	3,29E+03	4,00E+04	8,82E+04	1,60E+05	1,93E+05	2,35E+05	2,78E+05	3,43E+05	3,72E+05	4,59E+05
AT OBSERVADA (%)	0,01		0,93		2,40	5,07	10,27	13,60		
DANO ACUMULADO	0,2952	0,6006	0,6951	0,7437	0,7546	0,7621	0,7655	0,7702	0,7723	0,7785
DANO REDUZIDO	0,3014	0,6132	0,7096	0,7593	0,7704	0,7780	0,7815	0,7863	0,7885	0,7948
AT PREVISTA (%)	**0,00**	**0,00**	**0,13**	**2,08**	**3,76**	**5,62**	**6,73**	**8,63**	**9,64**	**13,34**
ERRO (DIFERENÇA ²)	0,00		0,63		1,85	0,30	12,53	24,70		

Passo 2: Os danos médios acumulados foram obtidos com o uso do programa AEMC, para danos Livre e Limitado, distribuídos em 110 pontos divididos em 10 períodos de projeto, conforme mostrado nas Figura 59, Figura 60 para dano médio acumulado livre e Figura 61, Figura 62 para o dano médio acumulado limitado, apresentado na escala aritmética e semi log, para cada um dos casos;

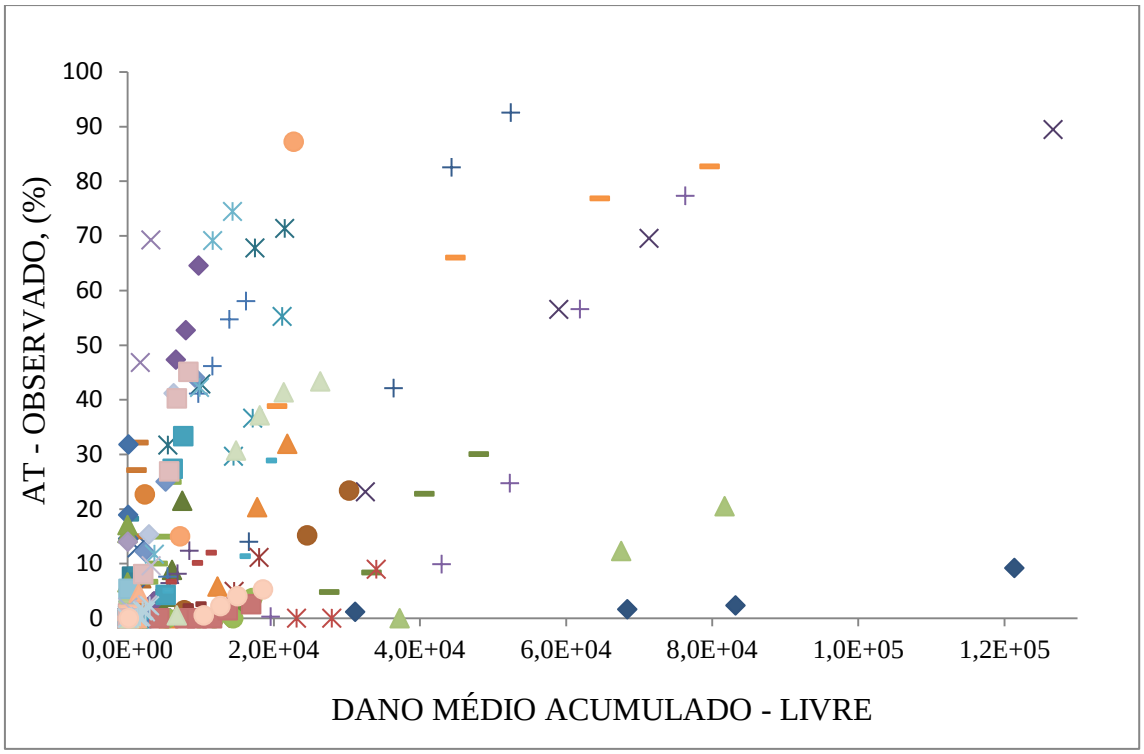


Figura 59 - Dano médio acumulado – livre dos 45 segmentos experimentais avaliado neste estudo – escala aritmética.

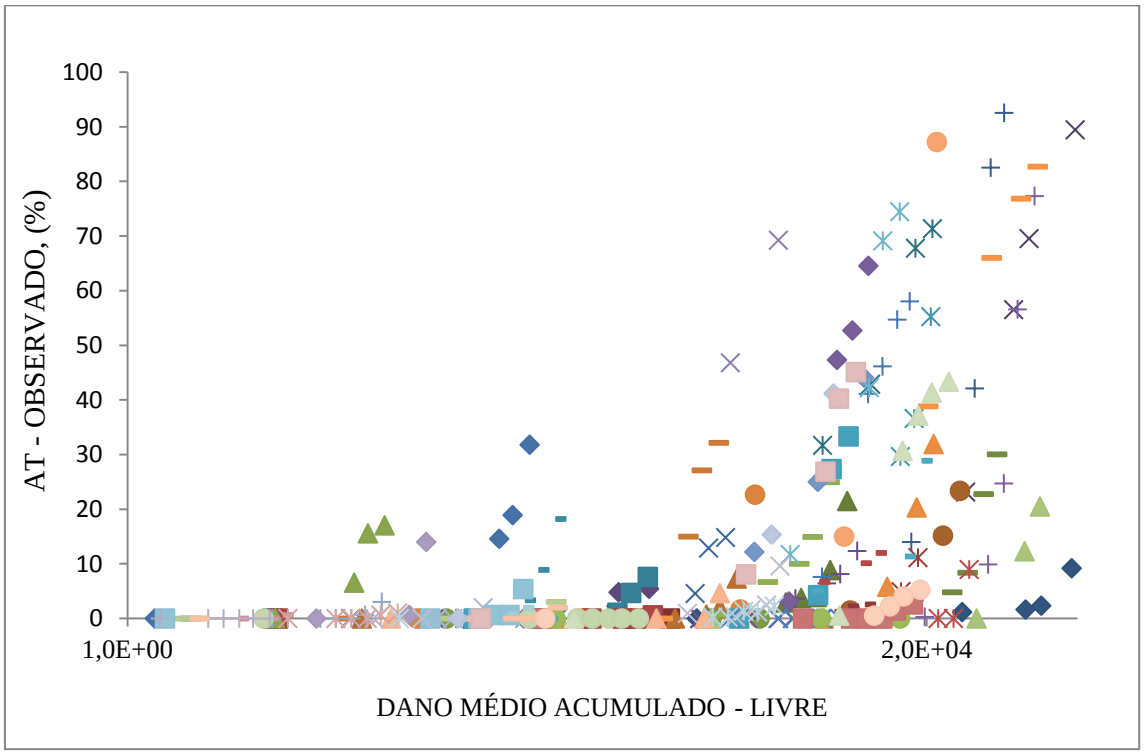


Figura 60 - Dano médio acumulado – livre dos 45 segmentos experimentais avaliado neste estudo – escala semi log.

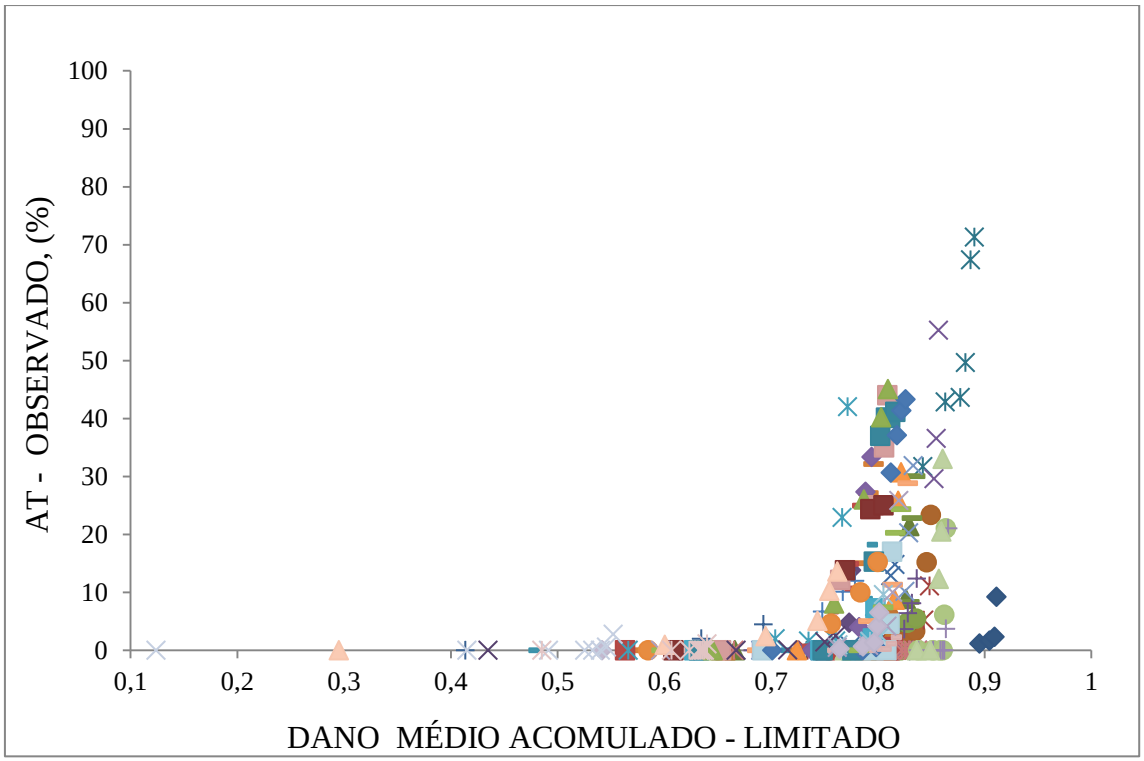


Figura 61 - Dano médio acumulado - limitado dos 45 segmentos experimentais avaliados neste estudo – escala aritmética.

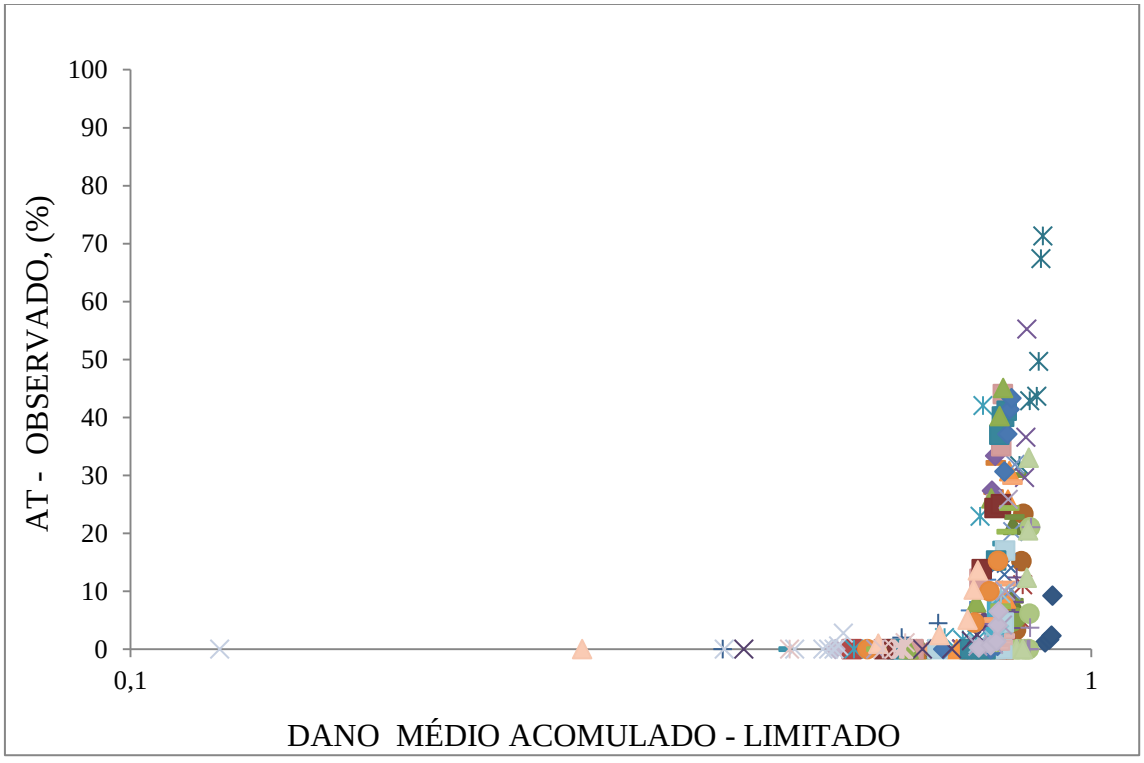


Figura 62 - Dano médio acumulado - limitado dos 45 segmentos experimentais avaliados neste estudo – escala semi log.

Passo 3: Determinar o dano médio acumulado de referência. Esse valor foi definido pela média dos danos médios acumulados de todos os segmentos experimentais avaliados neste estudo nos dois casos (Livre e Limitado): o dano médio para o dano livre foi igual a D@12.400 e o valor do dano médio acumulado para o dano limitado foi igual a D@0,800 para área trincada observada de 10% para os dois casos. Os Passos 4 ao 18, apresentam os resultados e procedimentos realizados para o dano limitado, visto que a partir daqui decidiu-se que não valia a pena prosseguir com a análise por dano livre;

Passo 4: Após definido o dano médio acumulado de referência para o dano limitado (D@0,800) determinou-se o valor do dano médio acumulado para uma AT igual a 10%. O valor do (Dano@10%AT) é definido quando o dano médio acumulado atinge 10% de área trincada, calculado por regressão dos pontos entre o dano acumulado e a AT observada em campo;

Passo 5: Determinar o período em meses onde ocorre o Dano@10%AT. O período em meses pode ser calculado de duas formas: por regressão ou definido graficamente, conforme mostrado na Figura 63, com as ordenadas y em meses e a abcissa x em AT observada em campo;

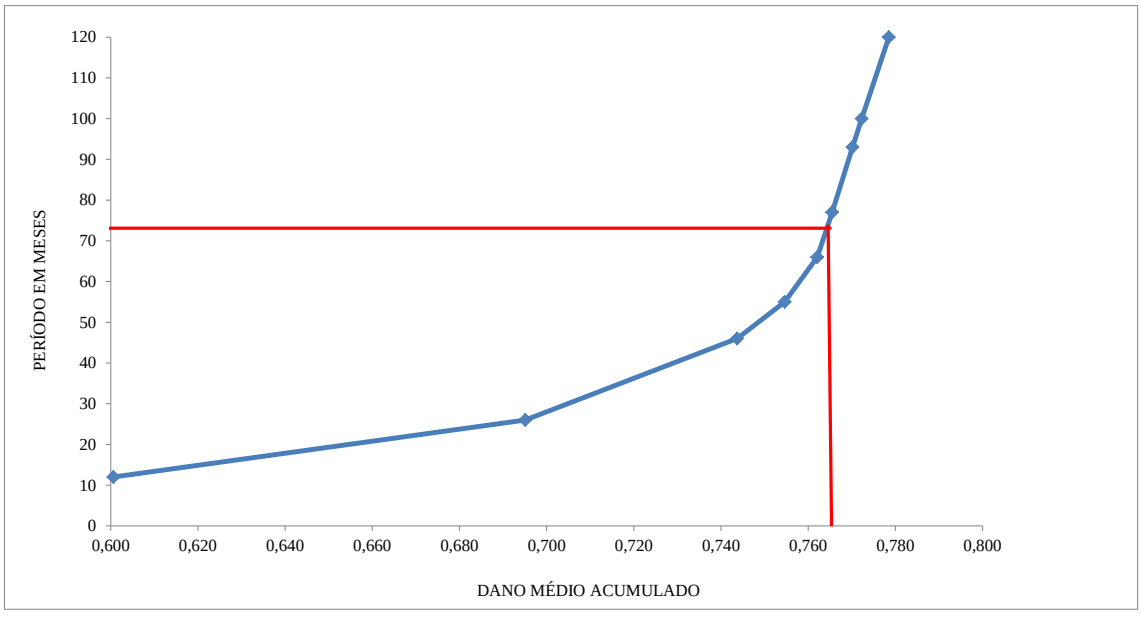


Figura 63 - Determinação do período em meses em função do Dano@10%AT – exemplo SQ43 D

Passo 6: Determina-se o número N para o Dano@0,800 através da expressão *(11)*:

$$N@0{,}800 = \frac{(N\ 12º\ mês\ x\ ((1+\left(\frac{3}{100}\right))^{\left(\frac{Mês@10\%}{12}\right)}}{(1-\left(1+\left(\frac{3}{100}\right)\right))} \qquad (8)$$

Onde:

$N\ 12º\ mês$ = Número N no 12º mês

$Mês@10\%$ = Período em meses que ocorreu o Dano@10%

Passo 7: Determinar o período que ocorreu o Dano@0,800 em meses: Procedimento pode ser definido de três formas: Analiticamente, graficamente plotando nas coordenadas y do período em meses e nas abcissas x os valores do dano médio acumulado de cada segmento, ou ainda utilizando o programa AEMC, onde verifica-se os danos médios acumulados e o período em meses, alterando o período até atingir um Dano@0,800;

Exemplo: Na Tabela 28 tem-se os danos médios acumulados e o período em meses, observa-se que no 120º mês o dano acumulado é menor que 0,800. No programa AEMC deste segmento aumenta-se o período em meses, neste caso, e calcula-se o dano médio acumulado, somente para definir o período em meses. Ao atingir o Dano@0,800 esse período em meses é definido;

Passo 8: Definidos os parâmetros: Danos@10%AT, Período em meses@10%AT, número N para o Dano@0,800 e o período em meses@0,800 é plotado um gráfico com as coordenadas y em função do Dano@10%AT e na abcissa x o valor do período em meses@0,800, de todos os 45 segmentos experimentais definidos neste estudo. Com esses dados plotados define-se a linha de tendência / regressão, conforme apresentado na Figura 64;

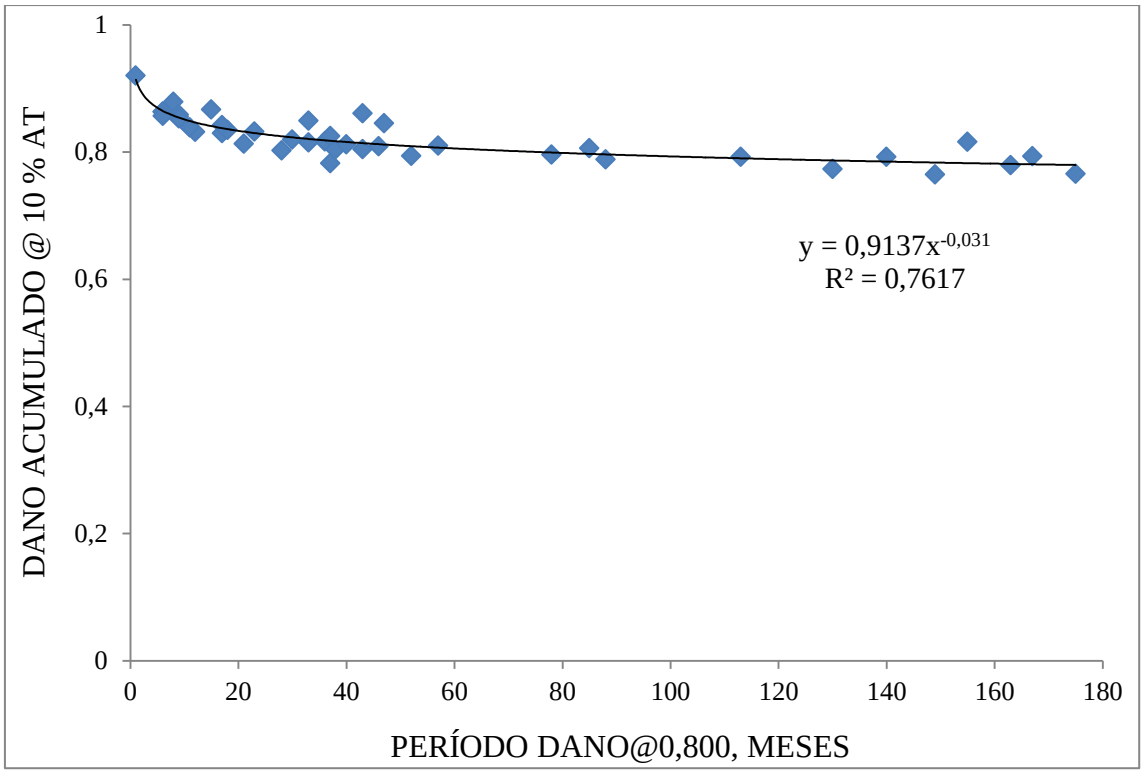


Figura 64 - Dano médio para Dano@10% de AT versus Dano@0,800 – dano limitado dos 45 segmentos experimentais

Passo 9: Após definida a expressão de correlação Dano@10%AT e o Período em meses@0,800, neste caso uma relação potencial para os dados da presente pesquisa, expressa por Y = A x ^{B} verifica-se o comportamento dos Danos@10%AT em função do Shift Factor "S" ou "DELTA", apresentados nos passos seguintes;

Passo 10: O Shift Factor "S" é definido pela expressão *(12)*, calculado para cada um dos segmentos experimentais, definidos neste estudo:

$$Shift\ Factor\ "S" = \frac{Dano@0{,}800}{Dano@10\%AT} \qquad (9)$$

Passo 11: Definidos Shift Factor "S" para cada um dos segmentos experimentais é plotado um gráfico com os dados da Shift Factor "S" em relação período em meses@0,800, como uma relação potencial, expressa por Y = A x ^{B}, onde A = 0,8756, B = 0,0307 e x é o Período em meses@0,800. Observa-se que nesta

pesquisa os resultados obtidos na Figura 64 apresentaram boa correlação com os obtidos na Figura 65, considerando o R^2;

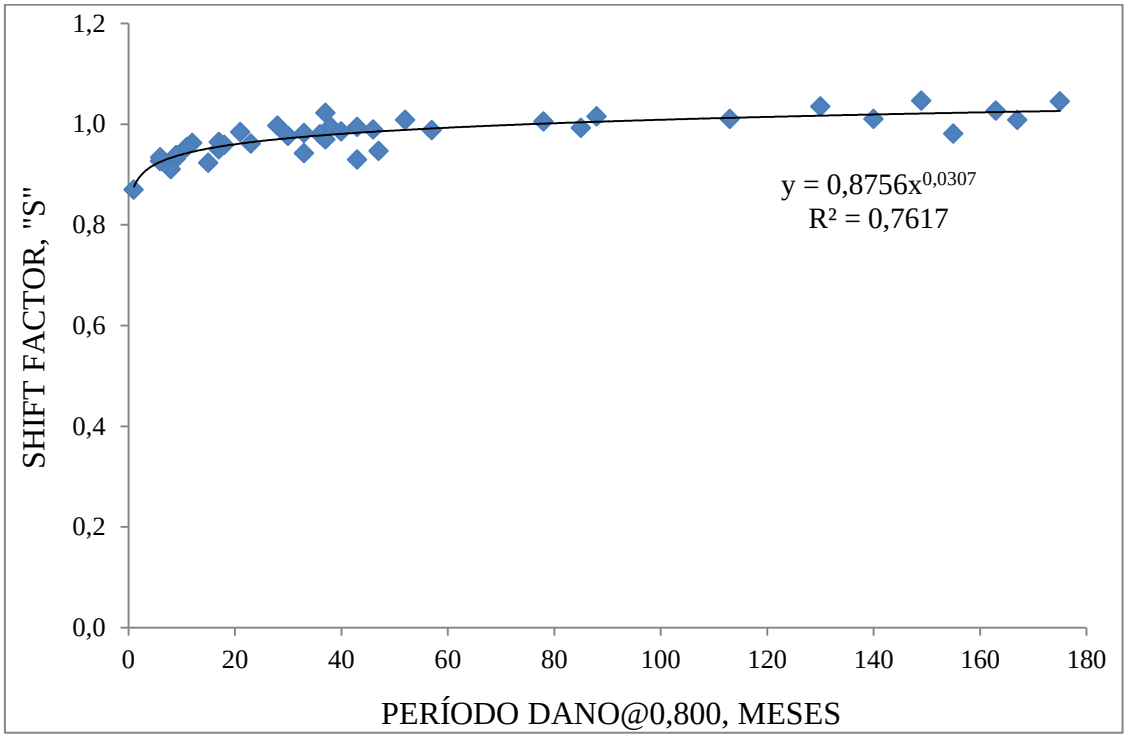


Figura 65 – Resultados da Função "S" Dano@0,800 dividido *Dano@10% de AT – dano limitado dos 45 segmentos experimentais*

Passo 12: O Shift Factor "DELTA" é definido pela expressão *(13)*, calculada para cada um dos segmentos experimentais, definidos neste estudo:

$$Shift\ Factor\ "DELTA" = Dano@10\%AT - Dano@0{,}800 \qquad (10)$$

Passo 13: Com a escolha do "procedimento" Shift Factor "S" calcula-se a Função "S" para cada um dos segmentos experimentais pela expressão *(14)*:

$$Função\ S = A\ x\ (Período\ meses@0{,}800)^B \qquad (11)$$

Onde:

$A\ e\ B$ = São constantes do Shift Factor "S" obtidas com o uso da ferramenta Solver do Excel.

Passo 14: Definida a Função "S" para cada um dos segmentos definidos neste estudo, determina-se o Dano $_{reduzido}$ através da expressão *(15)*:

$$Dano_{reduzido} = Dano\ médio\ acumulado\ x\ Função\ "S" \qquad (12)$$

Passo 15: Definido o Dano $_{reduzido}$ para cada um dos períodos conforme mostrado na Tabela 28, determina-se a AT $_{prevista}$, pela da expressão *(16)*:

$$AT_{prevista} = C1\ x\ (Dano_{reduzido})^{C2} \qquad (13)$$

Onde:

$C1\ e\ C2 =$ São obtidos com o uso da ferramenta Solver do Excel. Durante a definição das constantes C1 e C2, foi verificado o somatório de erro mínimo, que serviu de referência para o ajuste da Função de Transferência. Esse somatório de erro é a diferença ao quadrado da $AT_{prevista}$ menos $AT_{observada}$. Quanto menor o somatório de erro melhor é o ajuste da FT;

Passo 16: Com os resultados das $AT_{prevista}$ definidos para todos os segmentos experimentais foi plotado um gráfico da $AT_{prevista}$ versus $AT_{observada}$, conforme apresentado na Figura 66. Observa-se que os resultados de AT estão expressos no domínio do tempo e que ao se plotar a AT em relação ao número N esse erro é pequeno. Outra observação que pode ser destacada é o fator angular próximo de 1, o que significa que os resultados não estão concentrados em um dos lados, e se distribuem igualmente nos dois quadrantes. O R^2 obtido na FT desta pesquisa foi de 0,56, o dobro do encontrado em calibração do método americano MEPDG de 2004 conforme mostrado na Figura 17 da revisão bibliográfica.

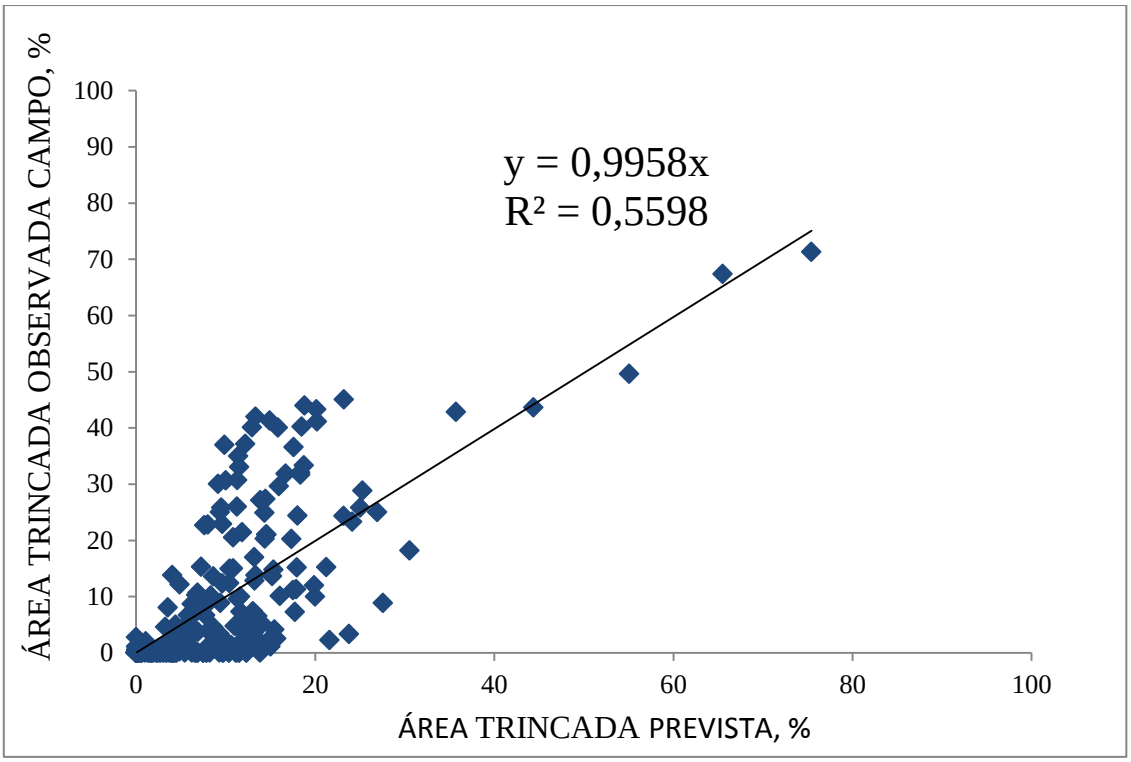


Figura 66 - Comparação da área trincada observada versus área prevista com base na função "S" – Dano@0,800

Passo 17: Definido a $AT_{prevista}$ é plotado um gráfico com os resultados do Dano $_{reduzido}$ versus a $AT_{prevista}$, conforme mostrado nas Figura 67 e Figura 68 representadas na escala aritmética e semi log, respectivamente;

Passo 18: Definida a FT em função do dano limitado em relação a Função "S", realizou-se o mesmo procedimento para determinar a FT em função do dano limitado em relação a Função "DELTA", com o objetivo de avaliar o melhor desempenho entre as Funções propostas. Porém o resultado observado na Figura 69 mostra que o shift factor "DELTA" plotado em relação ao período em meses@0,800, com uma relação potencial, expressa por $Y = 0{,}0808 \times^{-0{,}386}$ com $R^2 = 0{,}2027$ teve ajuste muito inferior. Com esse resultado foi descartado o procedimento "DELTA", o que também ocorreu em NASCIMENTO (2015);

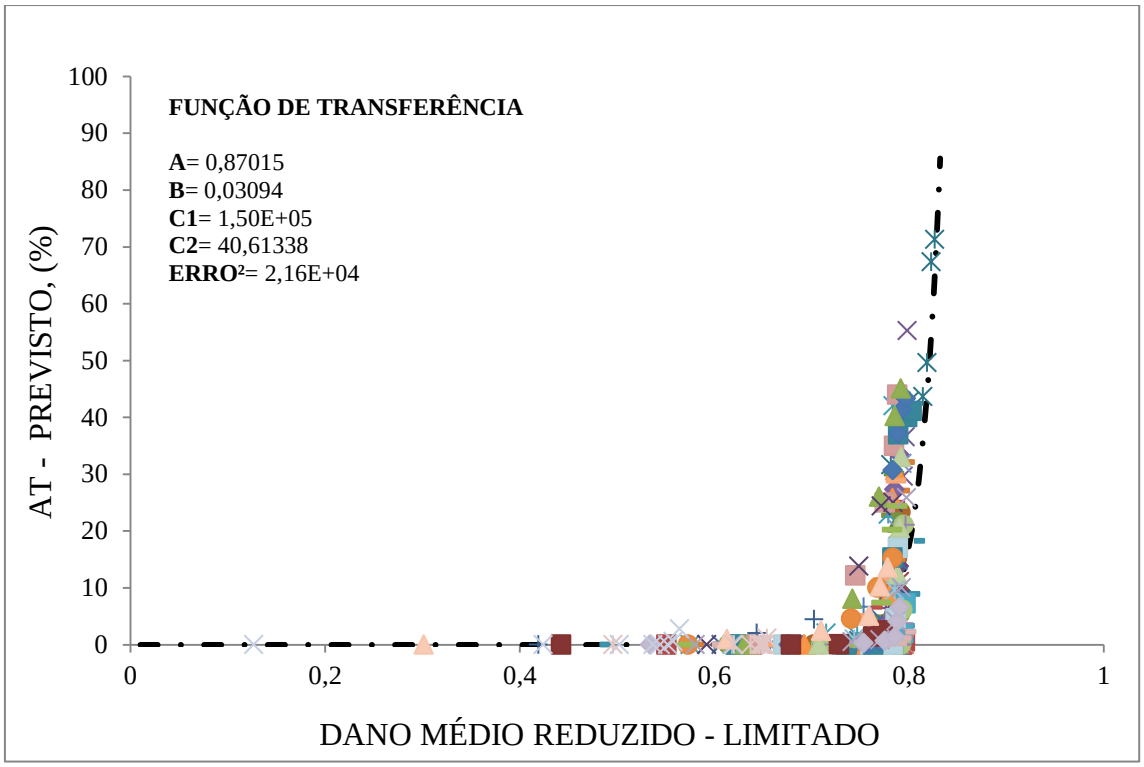


Figura 67 - Dano médio reduzido – limitado dos 45 segmentos experimentais avaliados nesta pesquisa – escala aritmética.

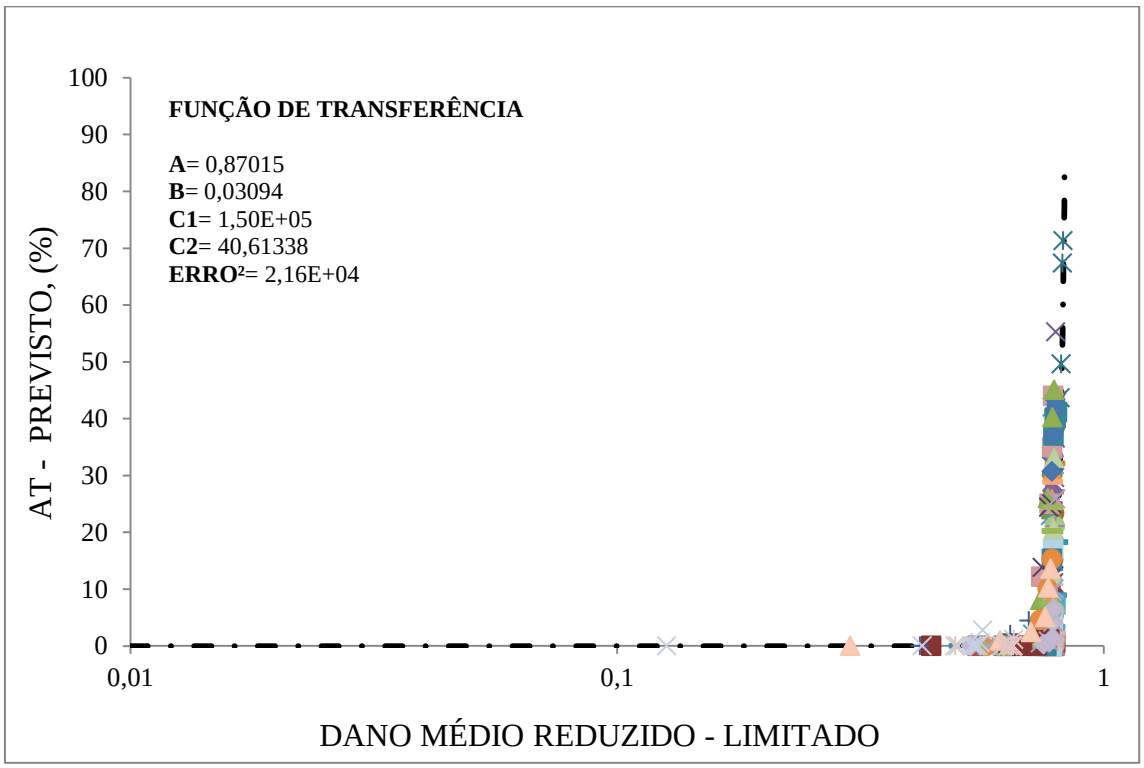


Figura 68 - Dano médio reduzido – limitado dos 45 segmentos experimentais avaliados nesta pesquisa – escala semi log.

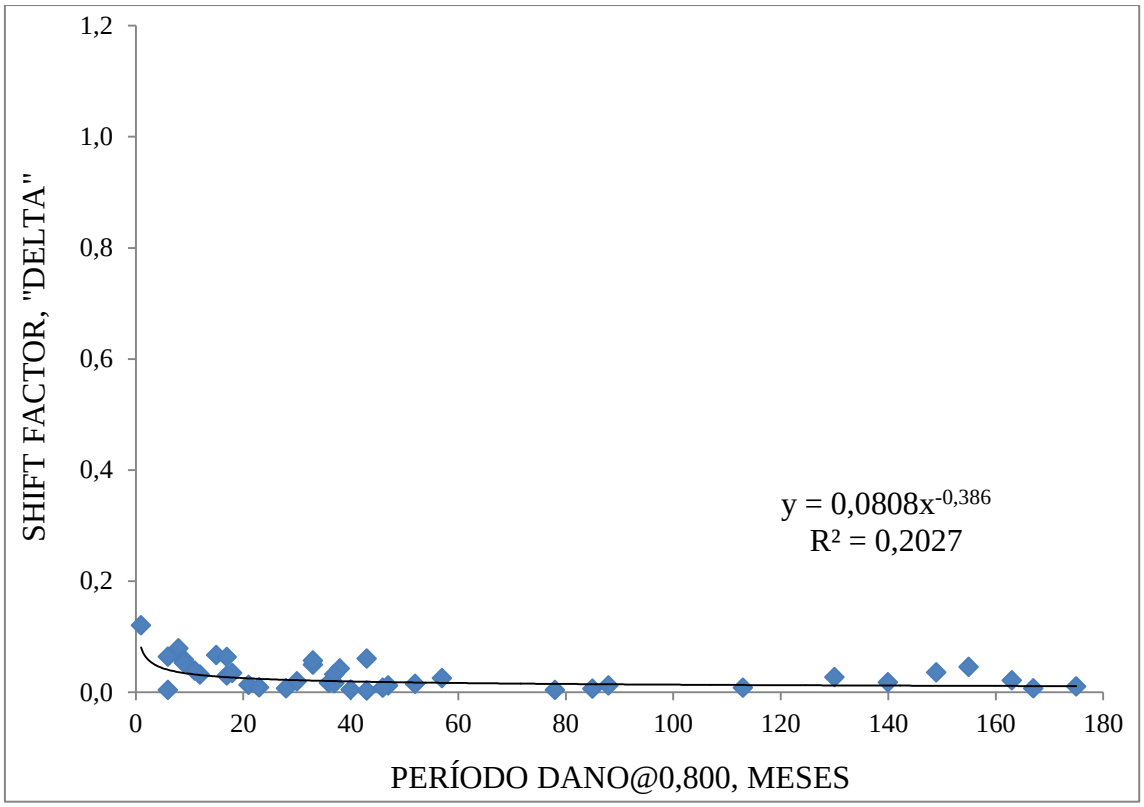


Figura 69 – Resultados da Função DELTA Dano@10% de AT menos Dano@0,800 – dano limitado dos 45 segmentos experimentais

Passo 19: Definida a FT em função do dano limitado em relação a Função "S", realizou-se o mesmo procedimento de cálculo para o dano livre, conforme apresentado na Figura 70. Observa-se que os resultados apresentaram grande dispersão o que levou a desistência da análise do dano livre.

A Função "S" para o dano médio acumulado limitado apresentou um resultado satisfatório, e foi adotado para a determinação da Função de Transferência para o nível A do método de dimensionamento em desenvolvimento. A Tabela 29 apresenta um resumo dos coeficientes da Função de Transferência e do Shift Factor "S" definidos nesta pesquisa que foram inseridas no programa de dimensionamento mecanístico – empírico SisPavBR.

Tabela 29- Coeficientes gerados para o cálculo da Função de Transferência

Baseado no Dano@0,800	
Coeficientes do Shift Factor apresentado na expressão *(14)*	
A	0,8756
B	0,0307
Constantes da Função de Transferência baseado no Dano@0,800 apresentado na expressão *(16)*	
C1	1,50E+05
C2	40,61338

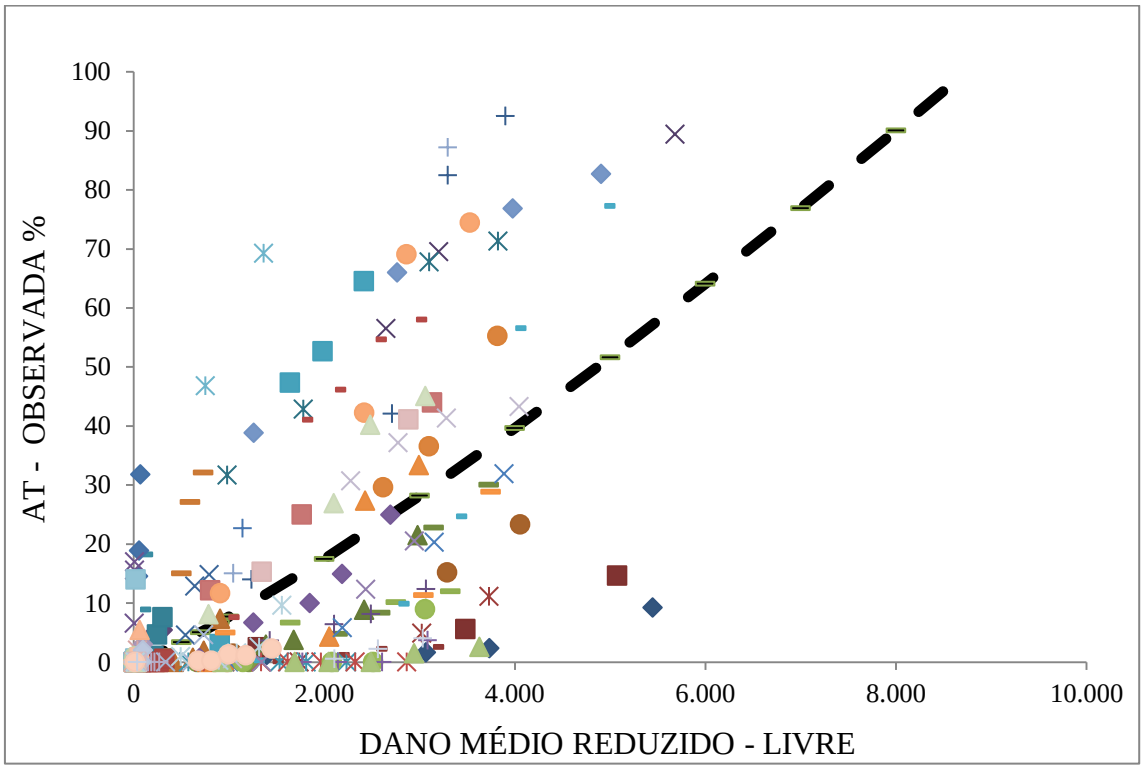


Figura 70 - Dano médio reduzido – livre gerado com os 45 segmentos experimentais avaliados neste estudo – escala aritmética.

Definida a Função de Transferência em função do dano limitado, os 45 segmentos experimentais foram avaliados em relação a $AT_{prevista}$ versus $AT_{observada}$, conforme apresentados nas Figura 71 até Figura 115 para cada um deles. Em alguns segmentos pode-se observar que não há bom ajuste em relação a $AT_{prevista}$ versus $AT_{observada}$. Uma possível explicação pode estar no procedimento de ensaio de fadiga por compressão diametral de carga repetida que é severo e às vezes a curva deste ensaio não fica bem definida. Também pode estar relacionado a possíveis erros do levantamento de defeitos. Porém, de modo geral, o ajuste entre $AT_{prevista}$ versus $AT_{observada}$ apresentou uma boa correlação para maioria dos segmentos analisados;

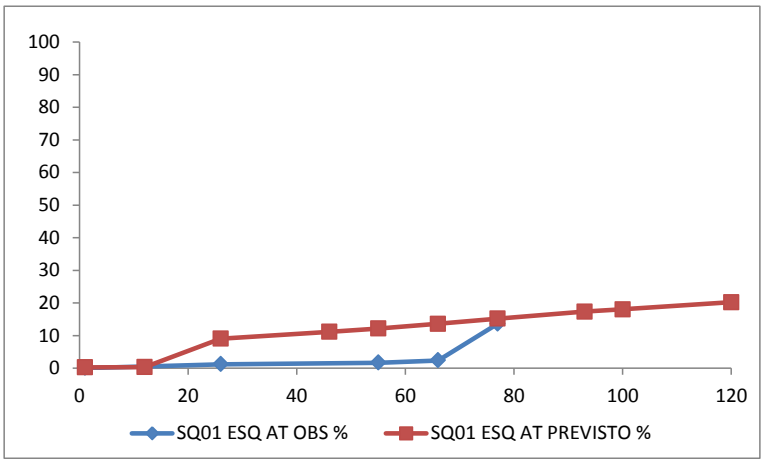


Figura 71 - Comparação SQ 01 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

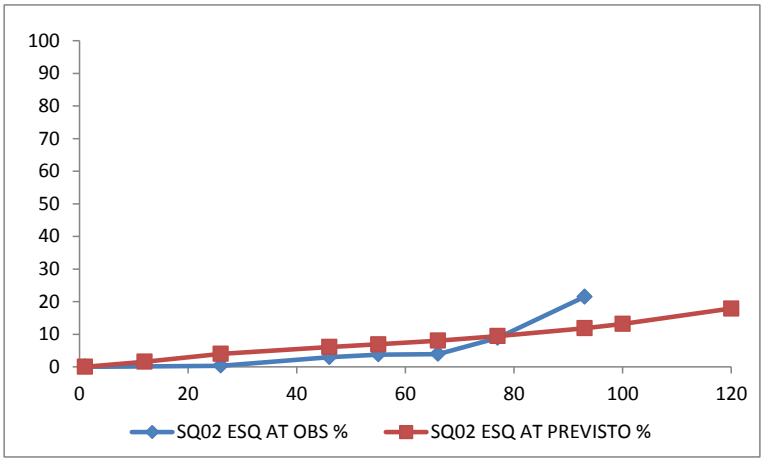


Figura 72 - Comparação SQ 02 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

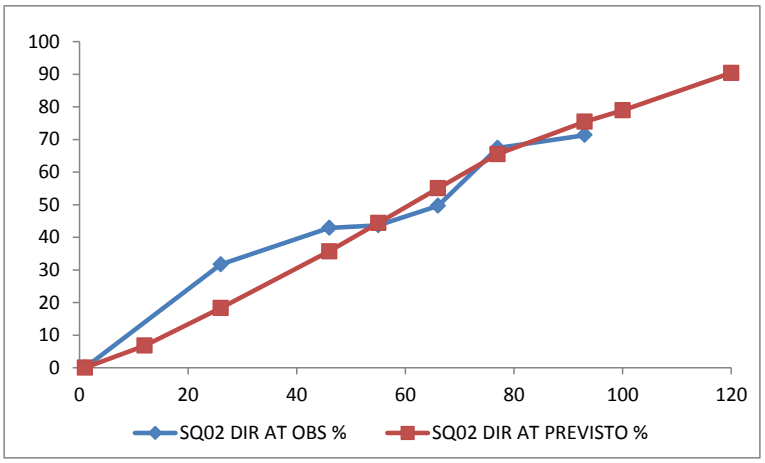


Figura 73 - Comparação SQ 02 D - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

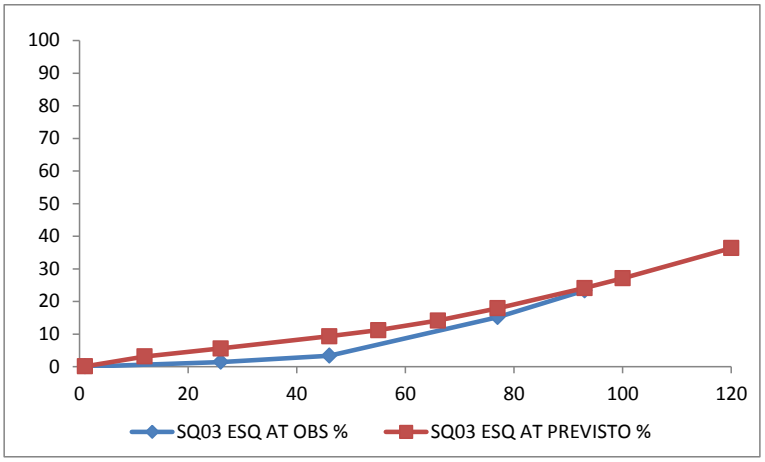


Figura 74 - Comparação SQ 03 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

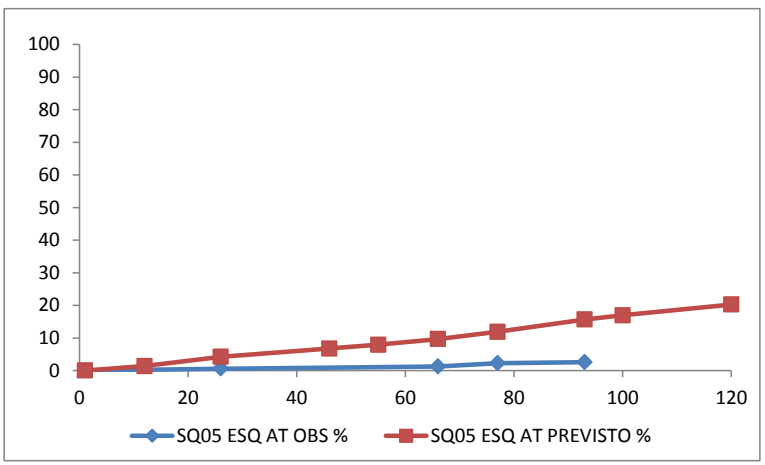


Figura 75 - Comparação SQ 05 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

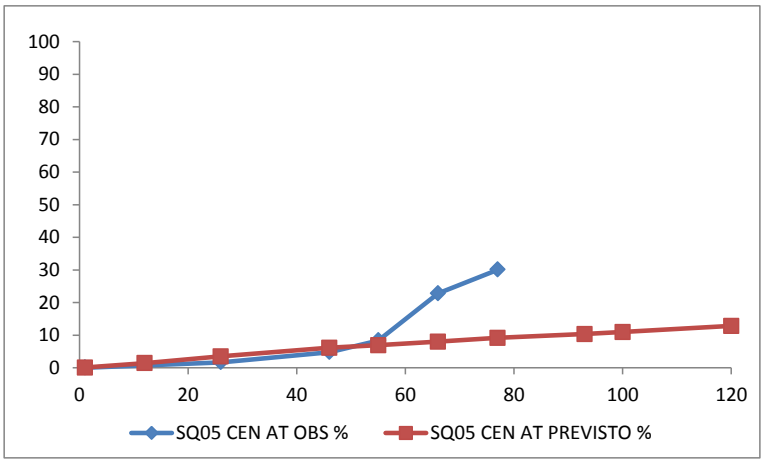


Figura 76 - Comparação SQ 05 C - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

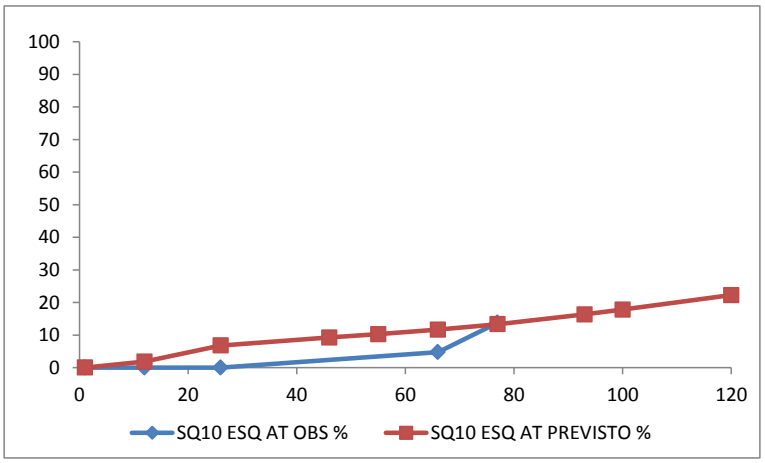


Figura 77 - Comparação SQ 10 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

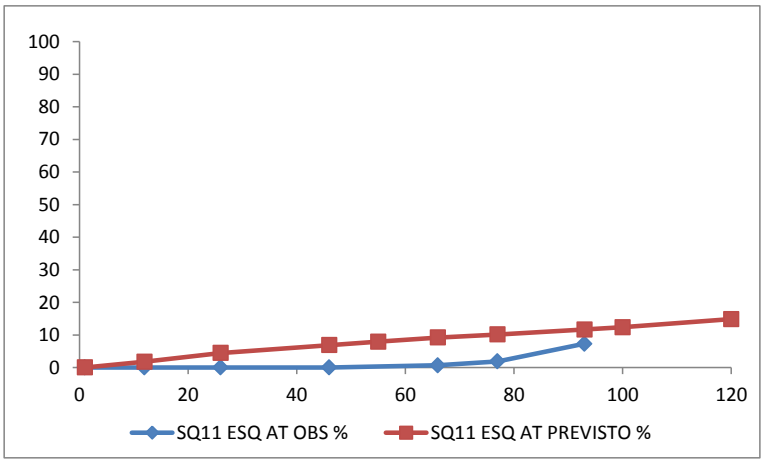


Figura 78 - Comparação SQ 11 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

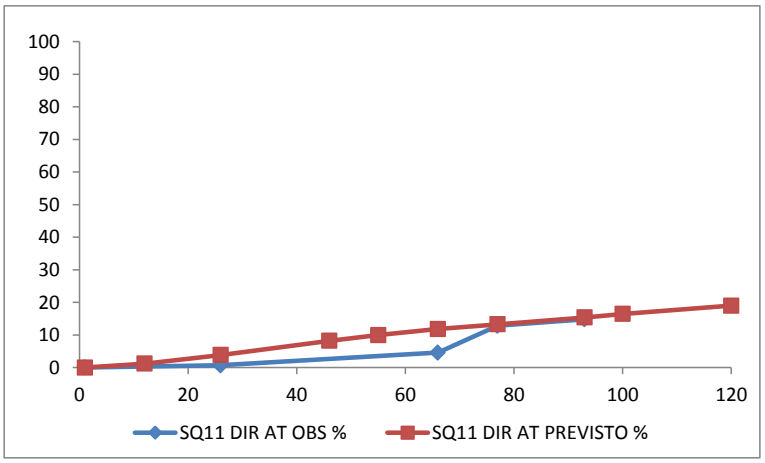


Figura 79 - Comparação SQ 11 D - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

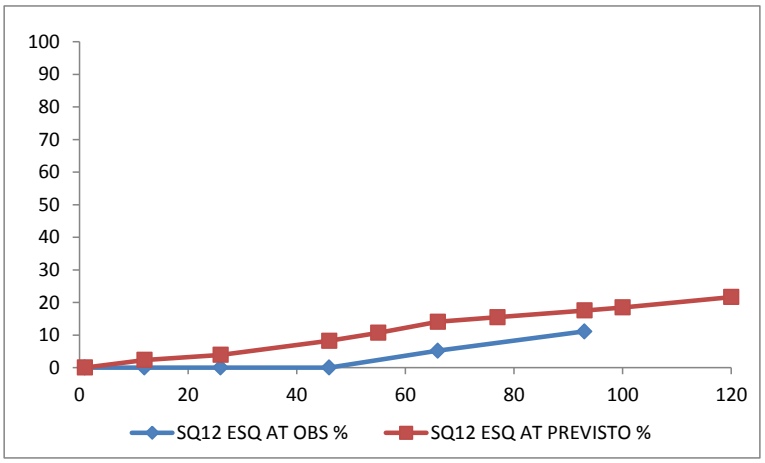


Figura 80 - Comparação SQ 12 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

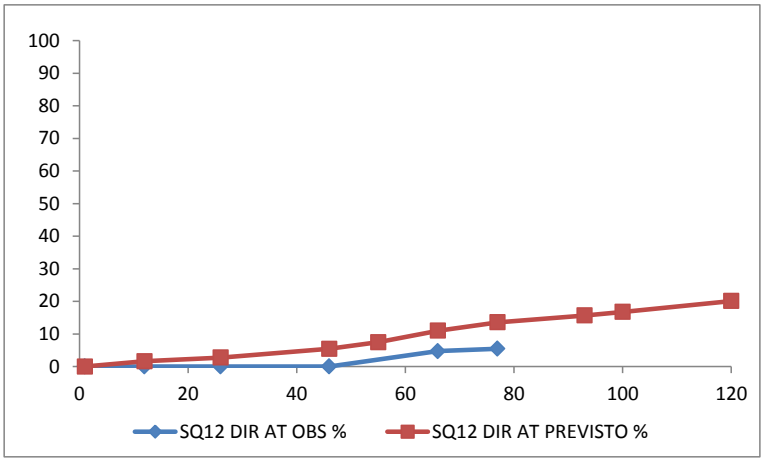


Figura 81 - Comparação SQ 12 D - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

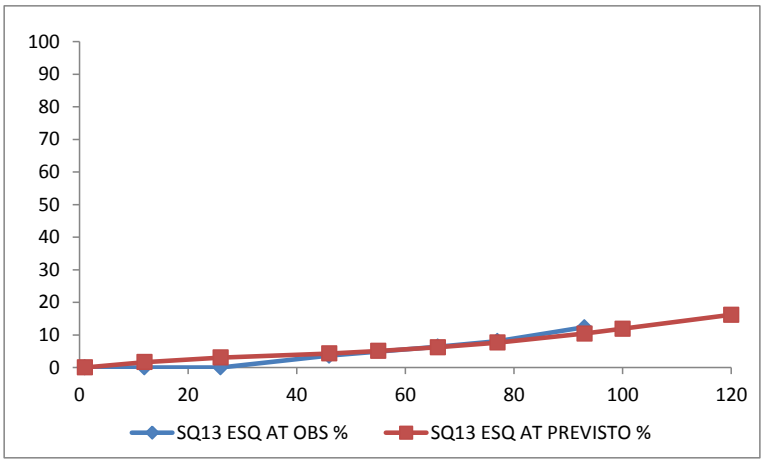


Figura 82 - Comparação SQ 13 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

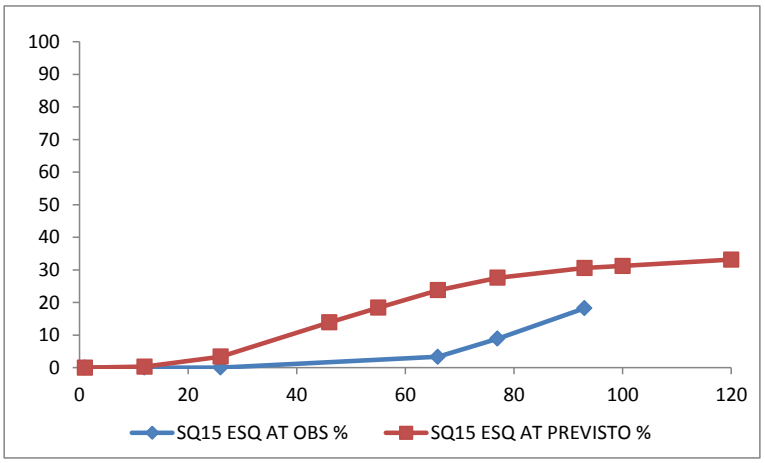


Figura 83 - Comparação SQ 15 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

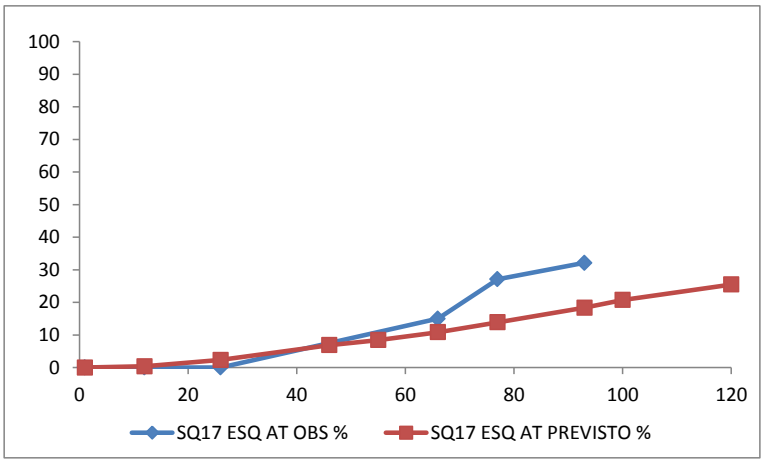


Figura 84 - Comparação SQ 17 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

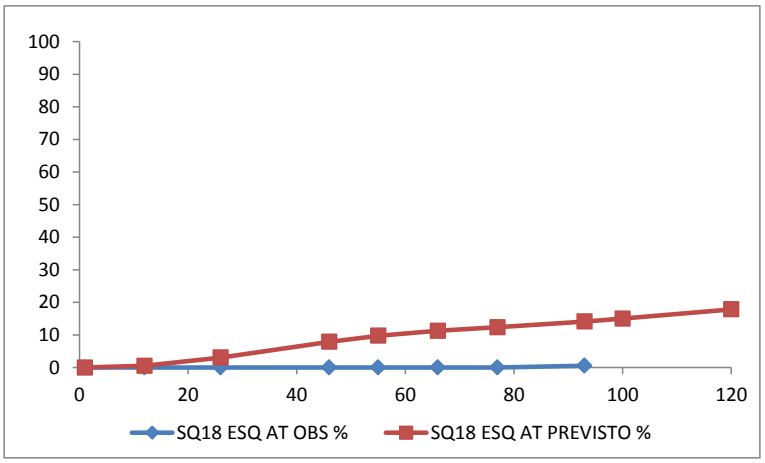


Figura 85 - Comparação SQ 18 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

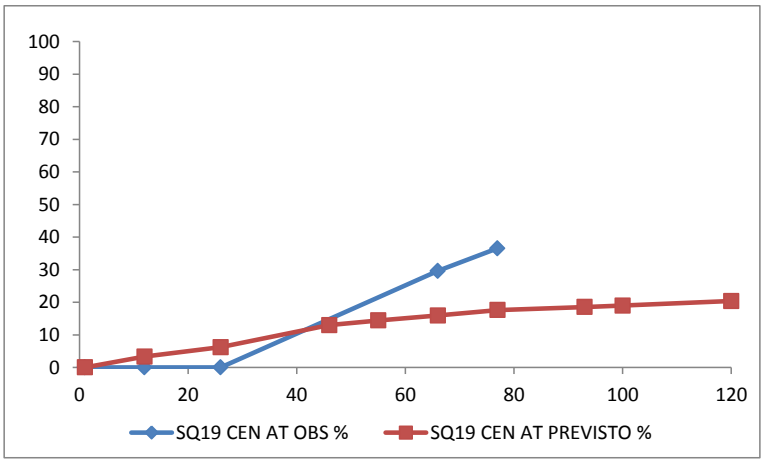


Figura 86 - Comparação SQ 19 C - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

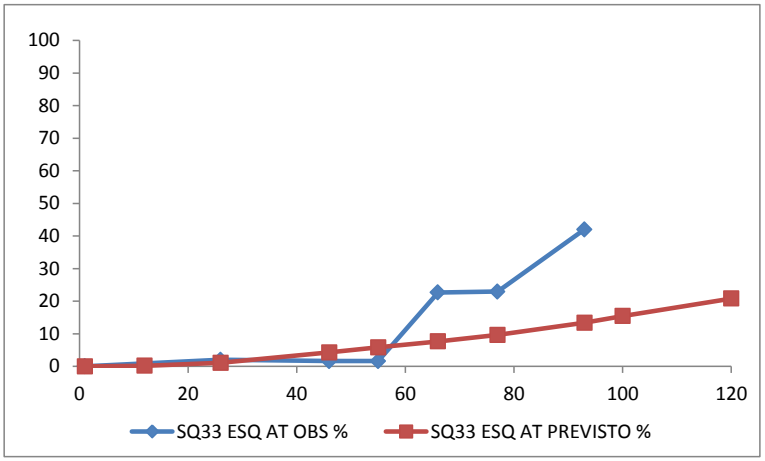


Figura 87 - Comparação SQ 33 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

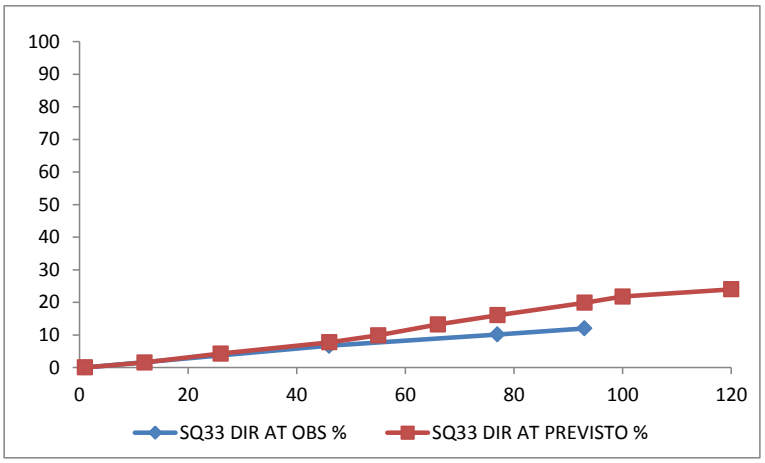


Figura 88 - Comparação SQ 33 D - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

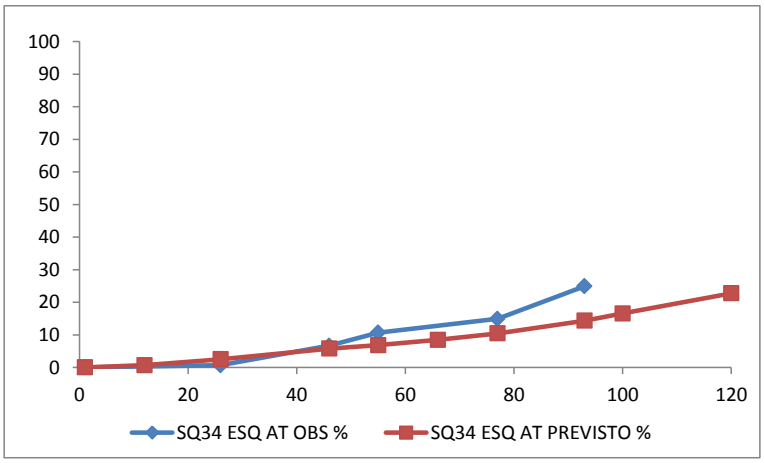


Figura 89 - Comparação SQ 34 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

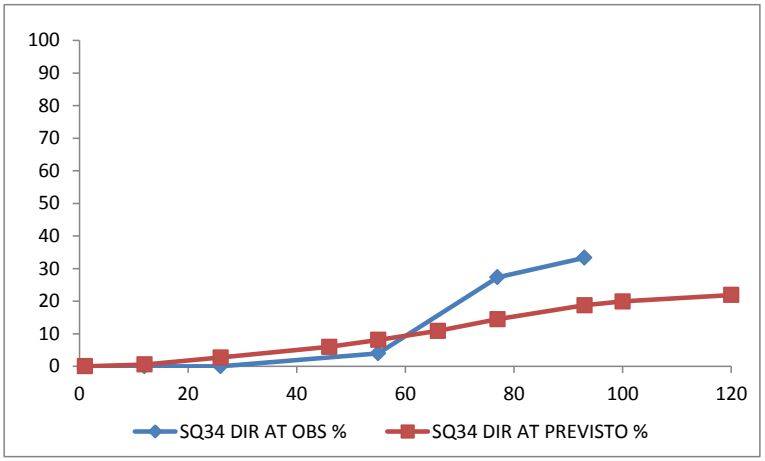


Figura 90 - Comparação SQ 34 D - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

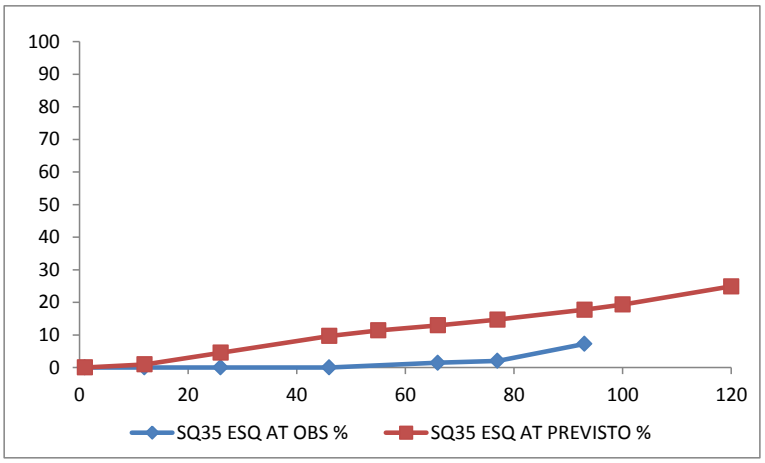


Figura 91 - Comparação SQ 35 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

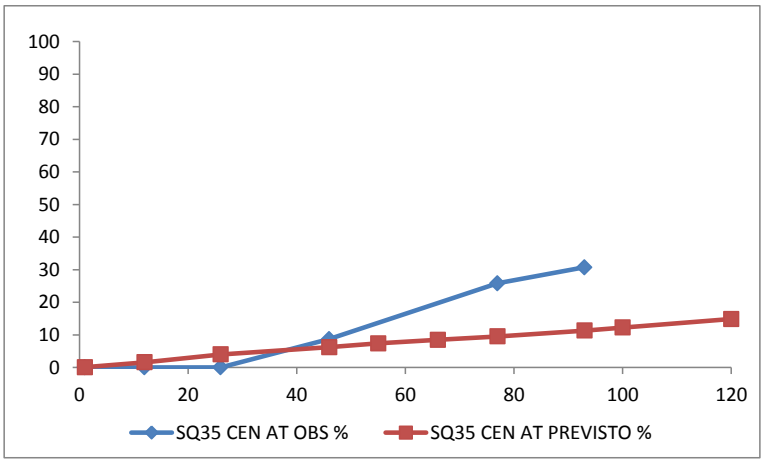


Figura 92 - Comparação SQ 35 C - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

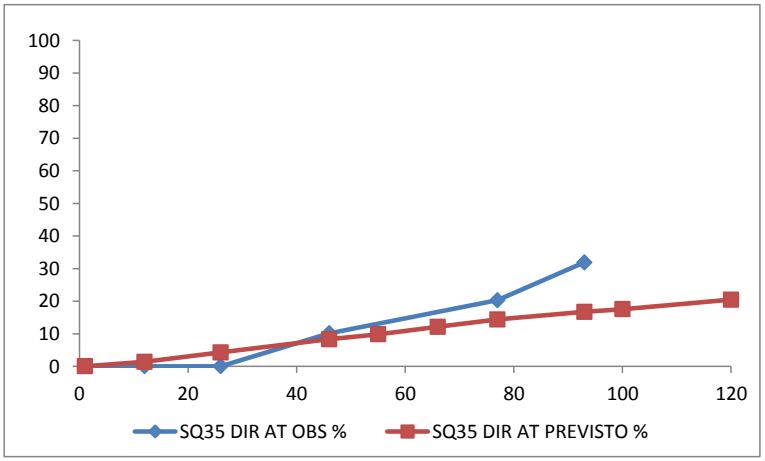


Figura 93 - Comparação SQ 35 D - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

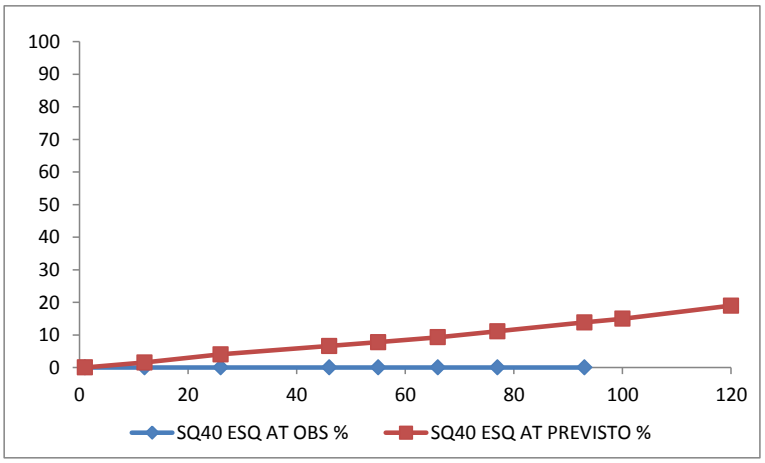


Figura 94 - Comparação SQ 40 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

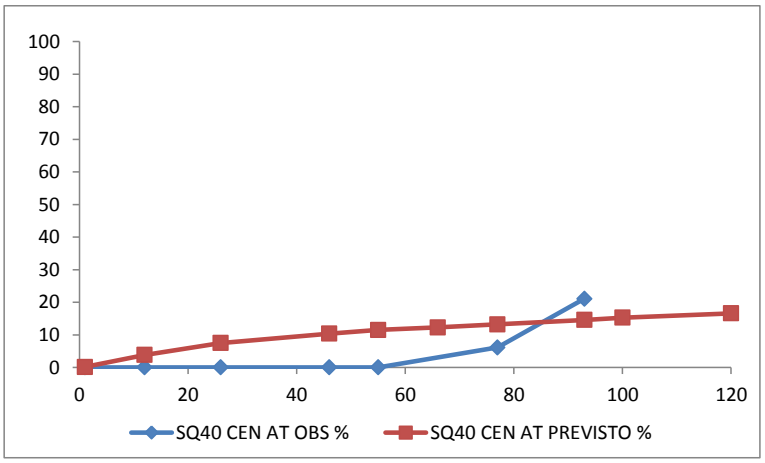


Figura 95 - Comparação SQ 40 C - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

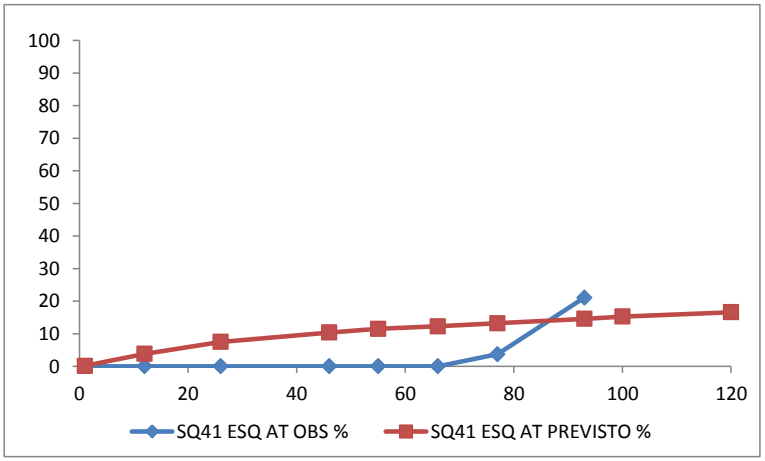


Figura 96 - Comparação SQ 41 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

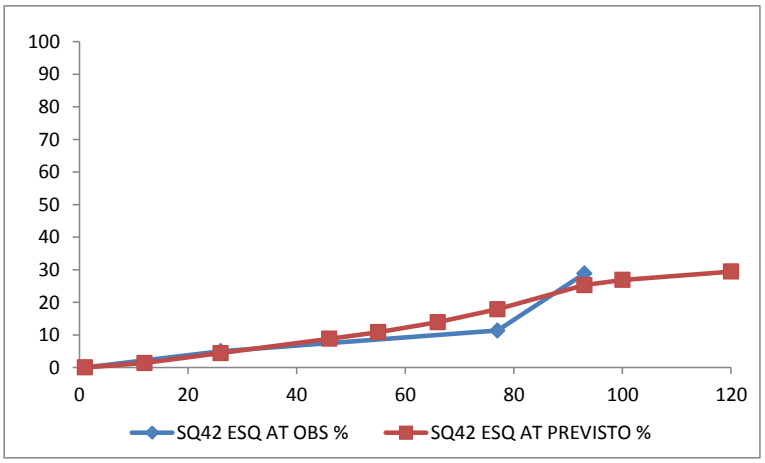


Figura 97 - Comparação SQ 42 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

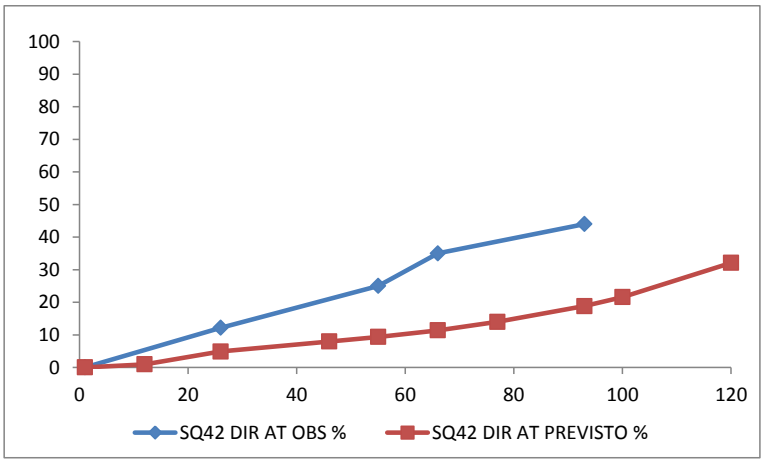


Figura 98 - Comparação SQ 42 D - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

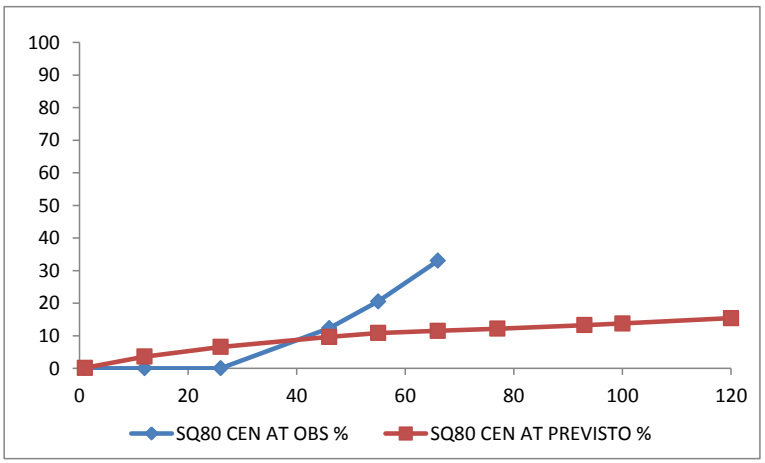


Figura 99 - Comparação SQ 80 C - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

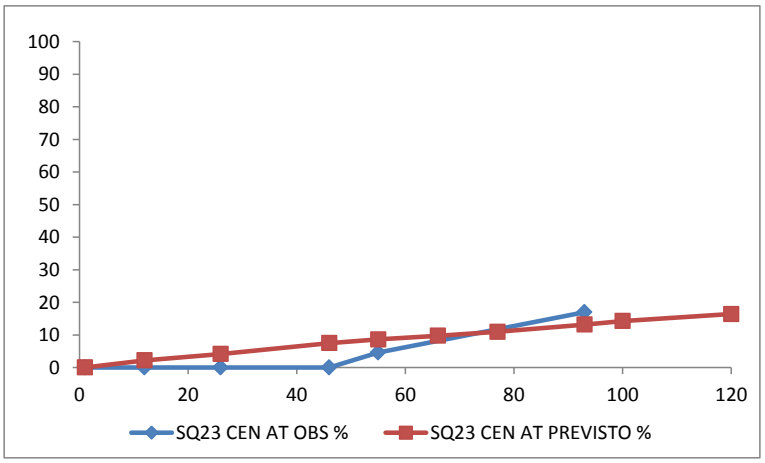


Figura 100 - Comparação SQ 23 C - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

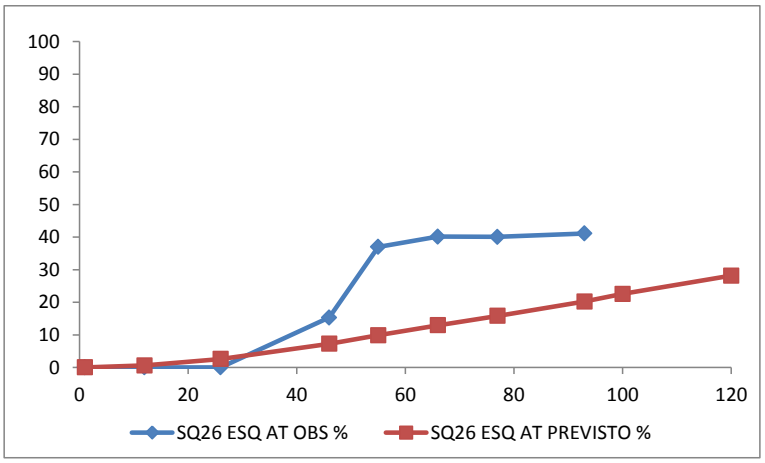


Figura 101 - Comparação SQ 26 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

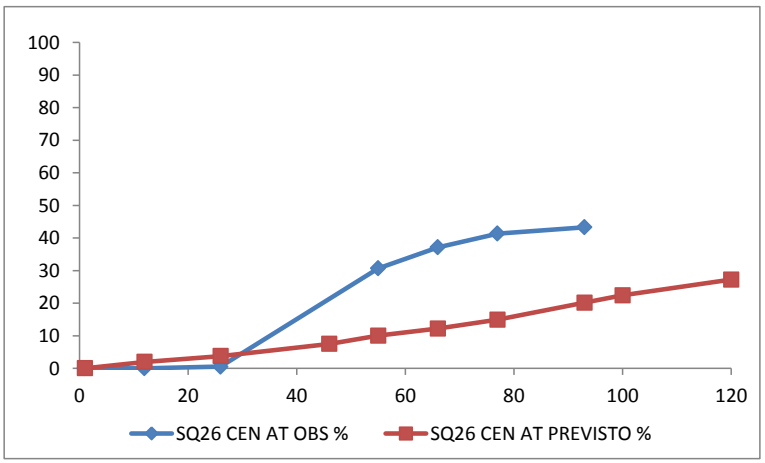


Figura 102 - Comparação SQ 26 C - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

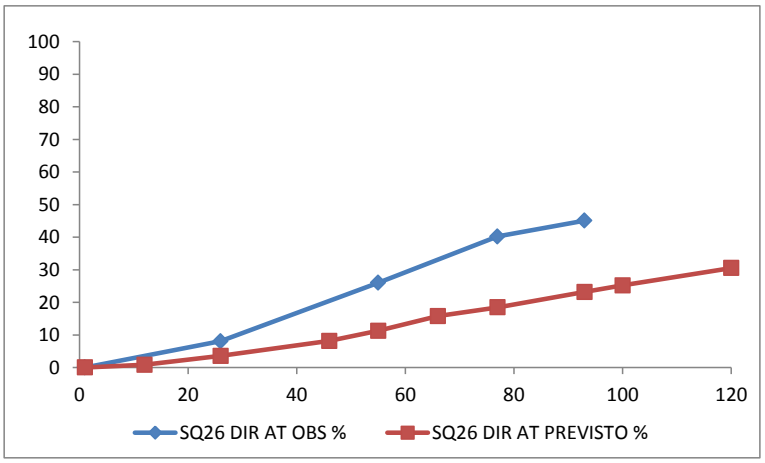


Figura 103 - Comparação SQ 26 D - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

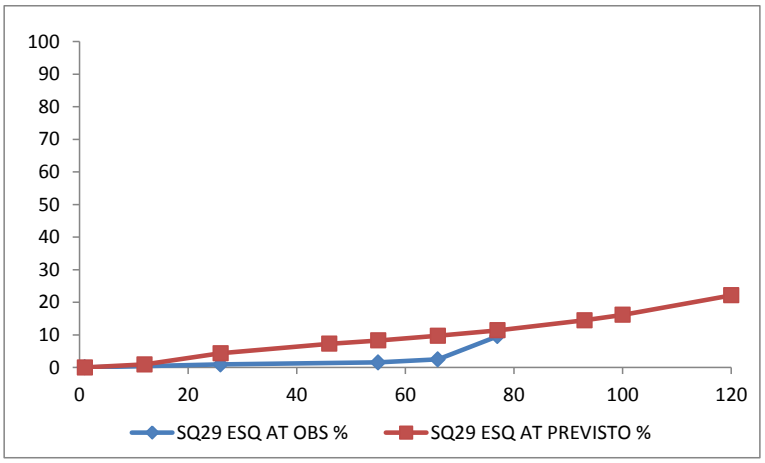


Figura 104 - Comparação SQ 29 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

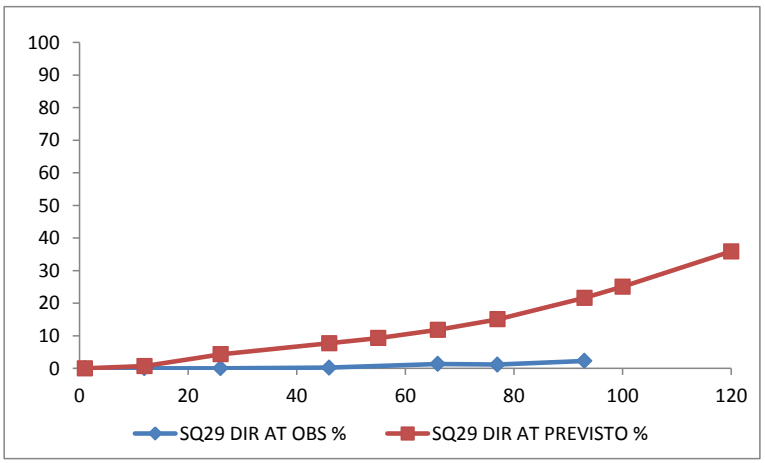


Figura 105 - Comparação SQ 29 D - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

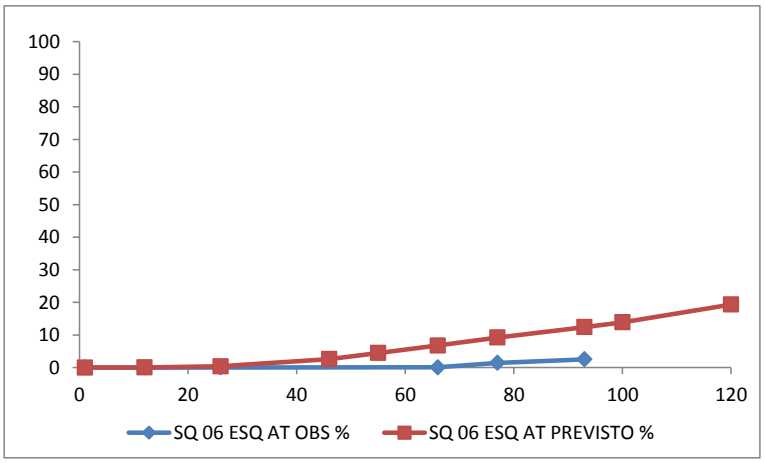


Figura 106 - Comparação SQ 06 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

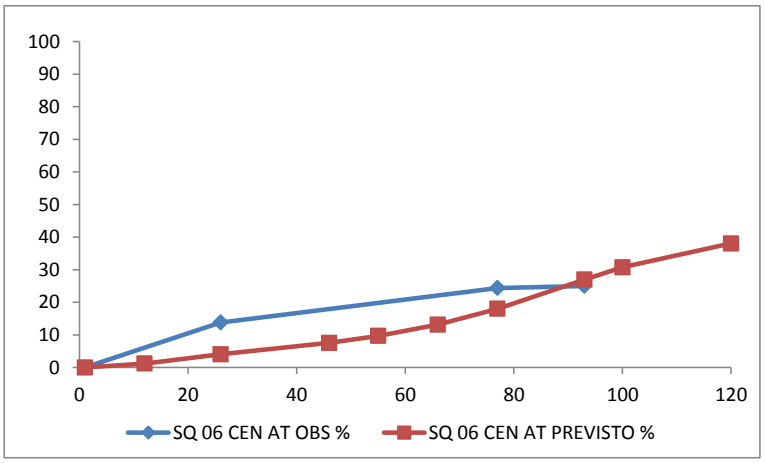


Figura 107 - Comparação SQ 06 C - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

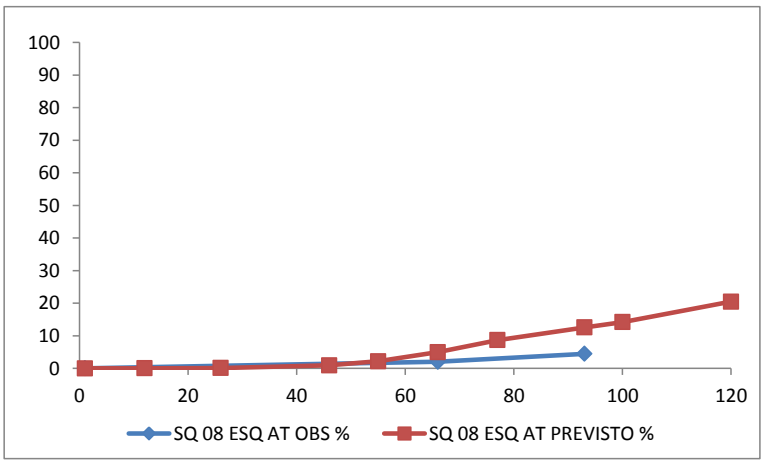


Figura 108 - Comparação SQ 08 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

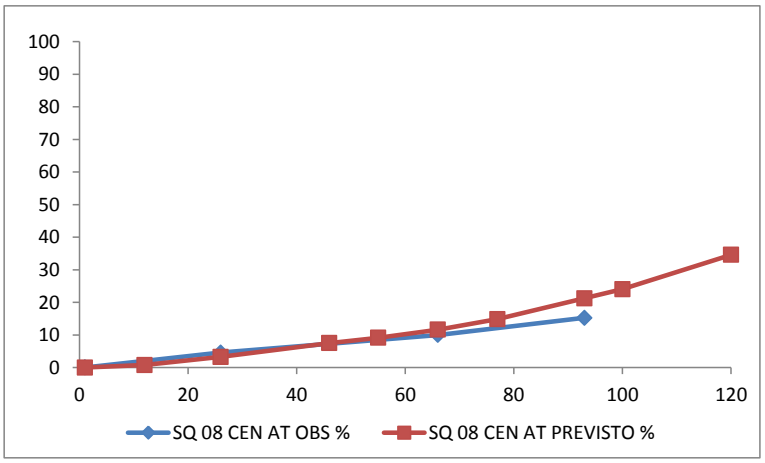


Figura 109 - Comparação SQ 08 C - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

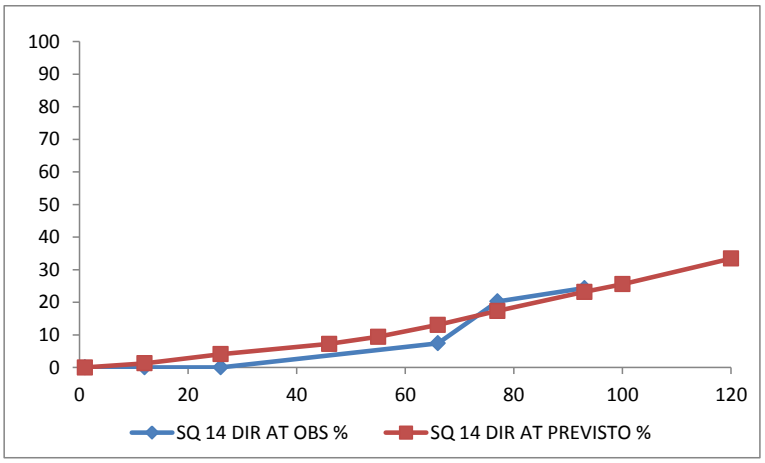


Figura 110 - Comparação SQ 14 D - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

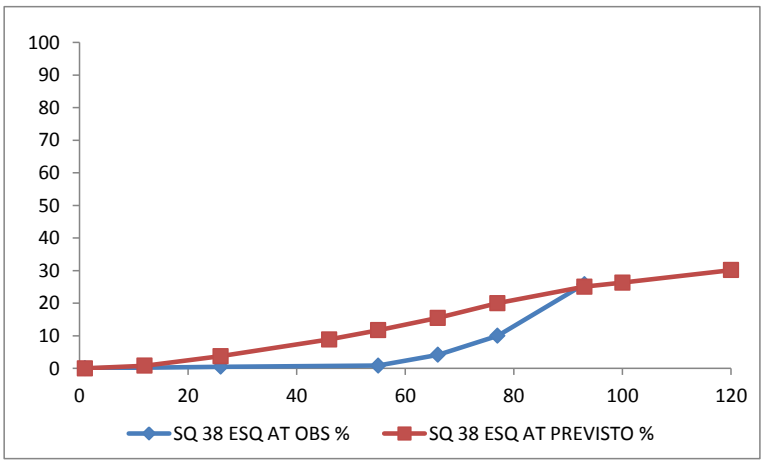


Figura 111 - Comparação SQ 38 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

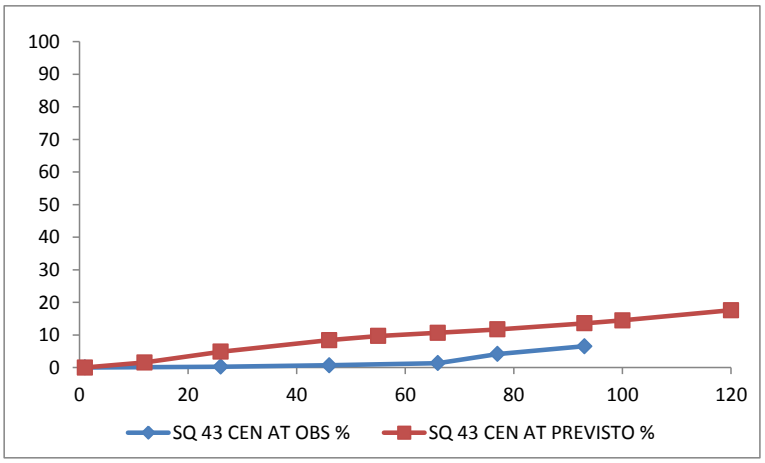


Figura 112 - Comparação SQ 43 C - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

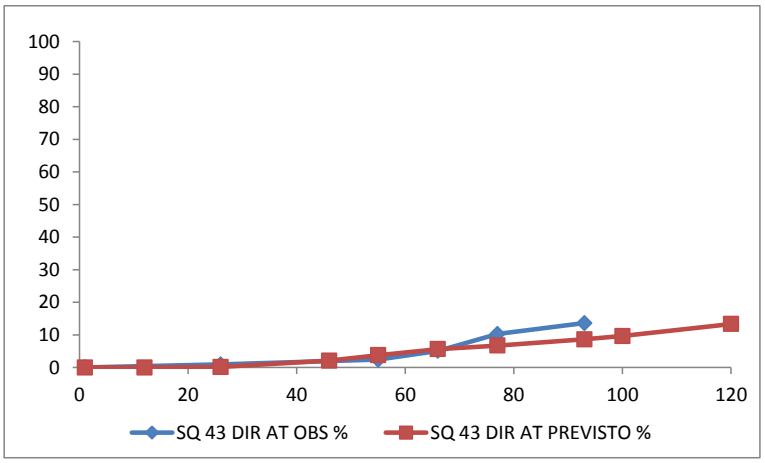


Figura 113 - Comparação SQ 43 D - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

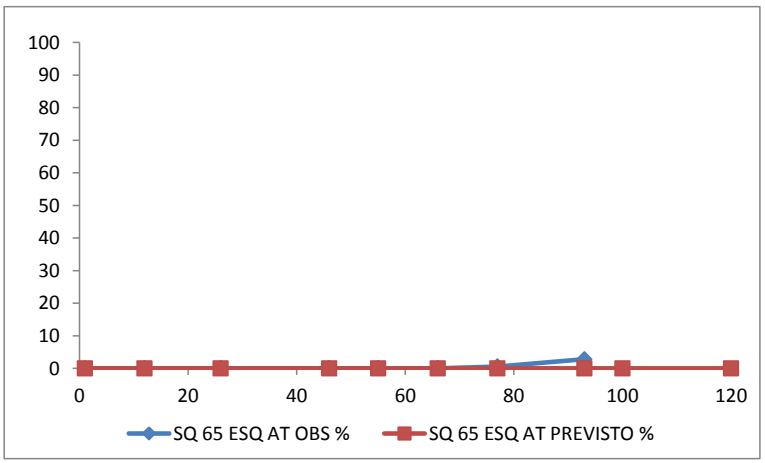


Figura 114 - Comparação SQ 65 E - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

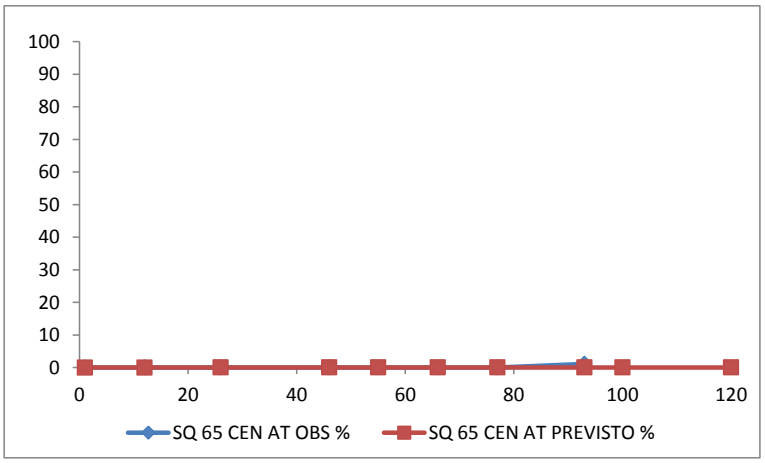


Figura 115 - Comparação SQ 65 C - AT $_{prevista}$ versus AT $_{observada}$ com a FT definida nesta pesquisa

Na Figura 116 foram comparados os danos médios acumulados referente as misturas asfálticas com CAP 30/45 com TMN 19,1 mm, calculados com o programa AEMC, com a curva de fadiga definida por compressão diametral no LABGEO da COPPE em duas condições diferentes: na primeira condição foi calculado o dano médio acumulado nos 110 pontos levando em consideração a segunda camada asfáltica (revestimento antigo) como camada de revestimento, independente da fresagem parcial ou não e na segunda condição foi calculado o dano médio acumulado nos 110 pontos levando em consideração a segunda camada asfáltica como camada de base, independentemente se a camada asfáltica existente teve fresagem parcial ou não.

Na Figura 117 foram comparados os danos médios acumulados referentes as misturas asfálticas com CAP 30/45 com TMN 19,1 mm, calculados com o programa AEMC, com a curva de fadiga definida por compressão diametral no LABGEO da COPPE e a curva de fadiga por tração direta definida por NASCIMENTO (2015) utilizando o AEMC para o cálculo do dano médio acumulado.

Observa-se que o tipo de ensaio de fadiga, tração direta ou compressão diametral, tem influência significativa no resultado do dano médio acumulado, o que impacta na determinação da Função de Transferência e mostra a importância em se determinar uma FT com base em procedimento de ensaio específico e no monitoramento de segmentos por longo período.

Não é possível utilizar uma calibração campo – laboratório, obtido com um conjunto de dados, que resultam de ensaios específicos e análise de tensões específicas para avaliar trechos ou projetos com outros tipos de ensaios.

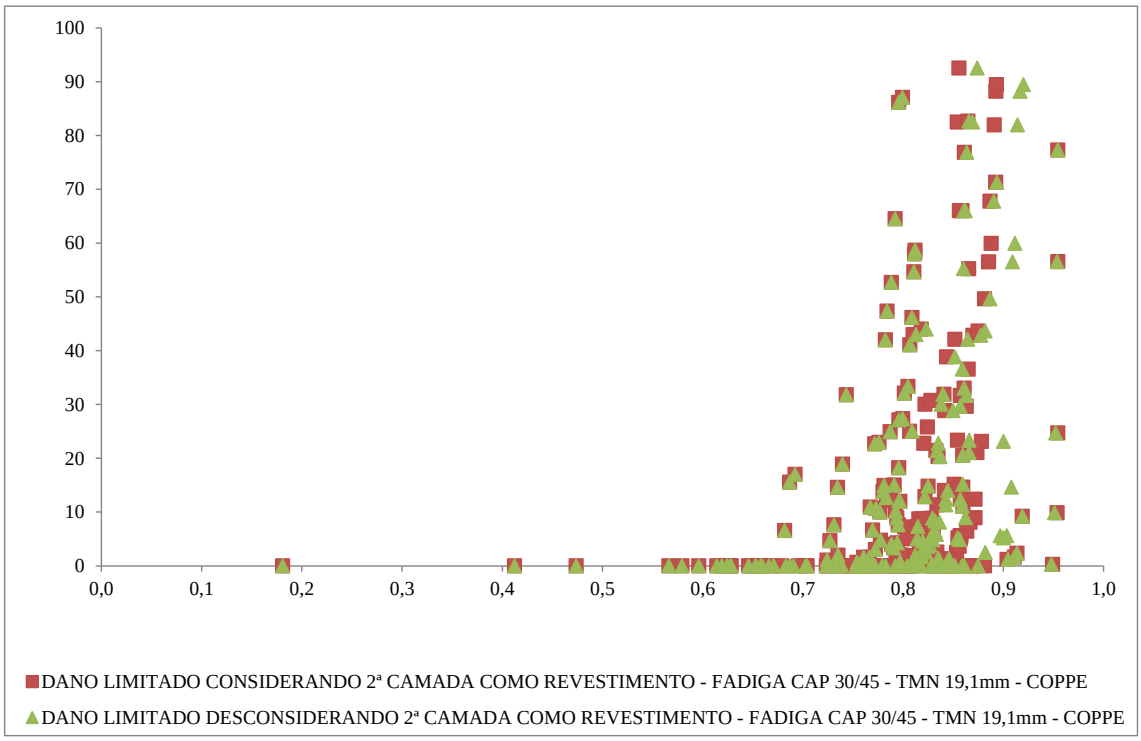


Figura 116 – Comparação do dano médio acumulado utilizando o AEMC em segmentos experimentais construídos com CAP 30/45 com fadiga por compressão diametral alterando a segunda camada asfáltica.

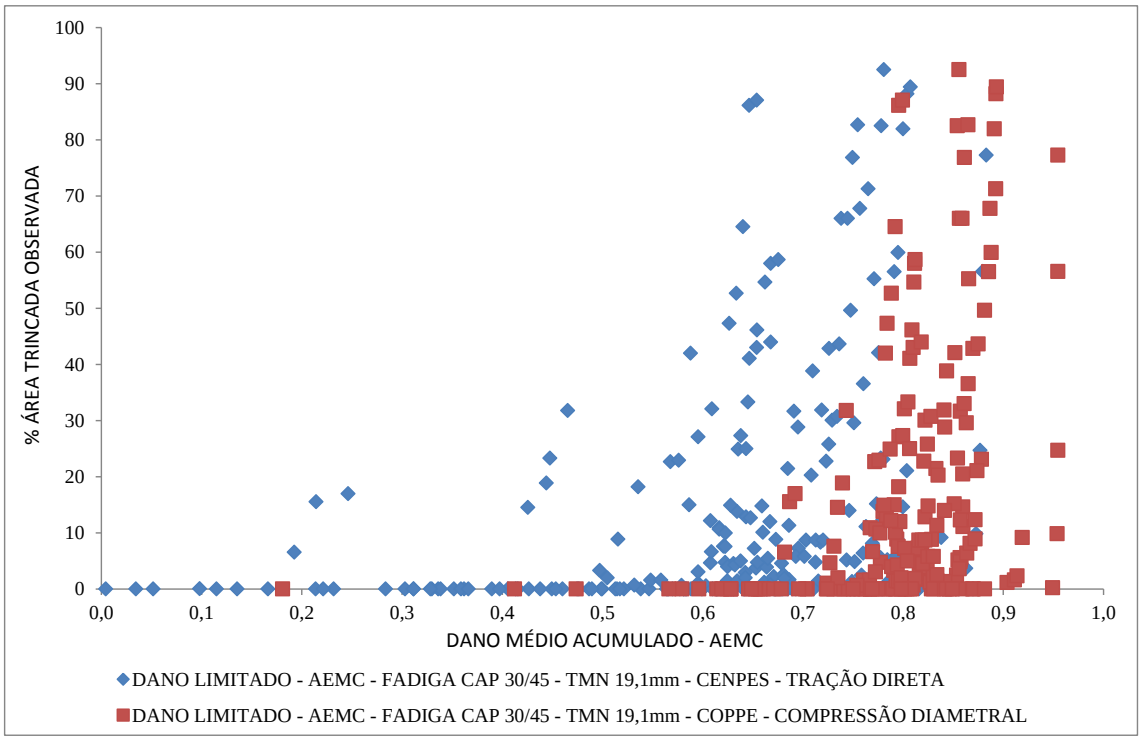


Figura 117 – Comparação do dano médio acumulado utilizando o AEMC em segmentos experimentais construídos com CAP 30/45 com fadiga por compressão diametral e tração direta.

5.5 Parâmetros Estatísticos

A fim de implementar no AEMC o critério de dano médio reduzido na Função de Transferência em relação a AT para projetos de pavimentos asfálticos, modelos de previsão de erro devem ser estabelecidos para que critérios de confiabilidade possam ser aplicados à análise dos pavimentos. A determinação do erro das equações e a confiabilidade utilizados nesta tese, foram baseados nos procedimentos adotados pela AASHTO no MEPDG (NCHRP, 2004) e também usado por NASCIMENTO (2015)

Com base no método empregado por NASCIMENTO (2015), o erro padrão médio foi calculado para diferentes intervalos do dano médio reduzido desta pesquisa, definindo assim um erro médio padrão. A Figura 118 apresenta o erro padrão médio correspondente aos 27 segmentos experimentais avaliados no Projeto Fundão, obtido pelo referido autor na sua tese de doutorado defendida na Carolina do Norte, EUA.

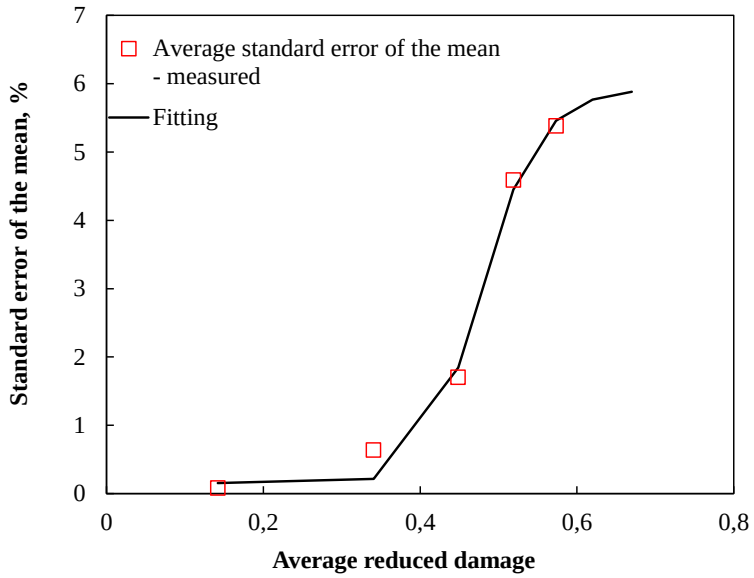


Figura 118 – Média do erro padrão versus dano médio reduzido ($S_{T0,35}$) todos os segmentos. Fonte (NASCIMENTO, 2015)

A Figura 119 mostra o erro em relação à área trincada prevista menos a área trincada observada, na previsão de trincas por fadiga em relação ao dano médio reduzido. Observa-se que o erro previsto considerado está relacionado ao Dano@0,800 para os segmentos experimentais do Projeto Fundão. Mostra-se que o erro previsto aumenta, quando o dano médio reduzido aumenta, conforme visto na Figura 120.

Assim foi adotado o critério de Erro de NASCIMENTO (2015) adaptado para as condições desta pesquisa. Nesta pesquisa a função de erro determinada foi inserida no SisPavBR, e permite que, conforme o dano previsto, seja incorporado o erro da análise, expresso pela equação sigmoidal *(20)*, que neste caso não chega a ser uma equação completa sigmoidal porque se trabalhou com AT observada de até 60% nesta pesquisa.

$$Fator\ de\ Erro = a + \frac{b}{(1+exp^{\,c-d*log(100*Dano_{\ reduzido})})} \qquad (20)$$

Onde:

$Fator\ de\ Erro$ = Erro médio padrão obtido a partir da calibração de campo dos segmentos do Projeto Fundão;

$Dano_{\ reduzido}$ = Dano médio reduzido baseado no Dano@0,800;

Coeficientes de ajuste - a, b, c, d

Nesta tese obteve-se:

$a = 0{,}004$

$b = 32{,}834$

$c = 115{,}683$

$d = 59{,}187$

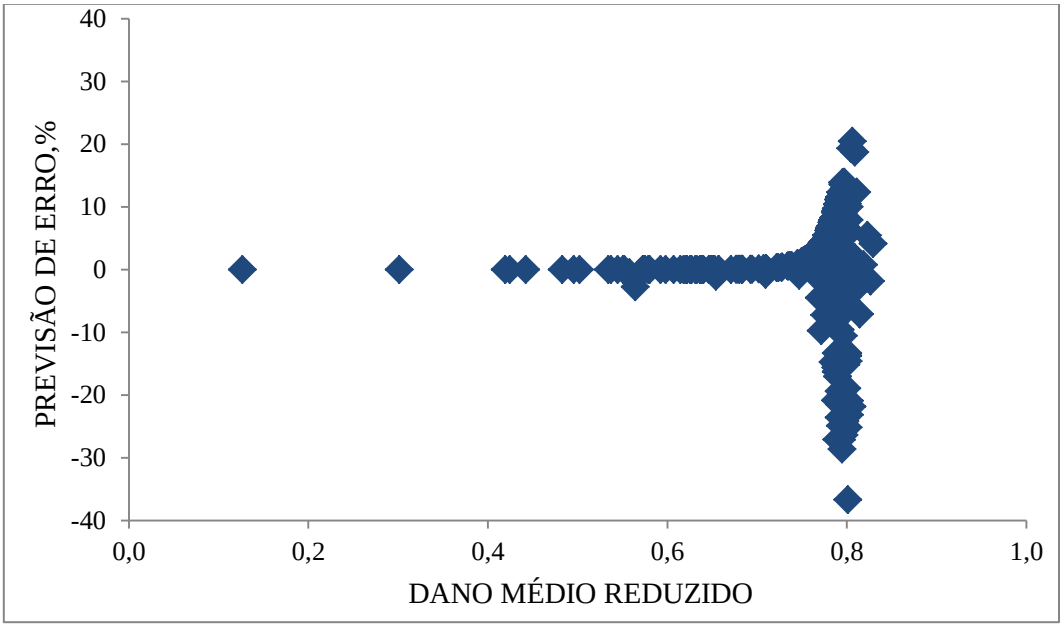


Figura 119 - Erro previsto versus dano médio reduzido baseado no Dano@0,800 – segmentos experimentais Projeto Fundão

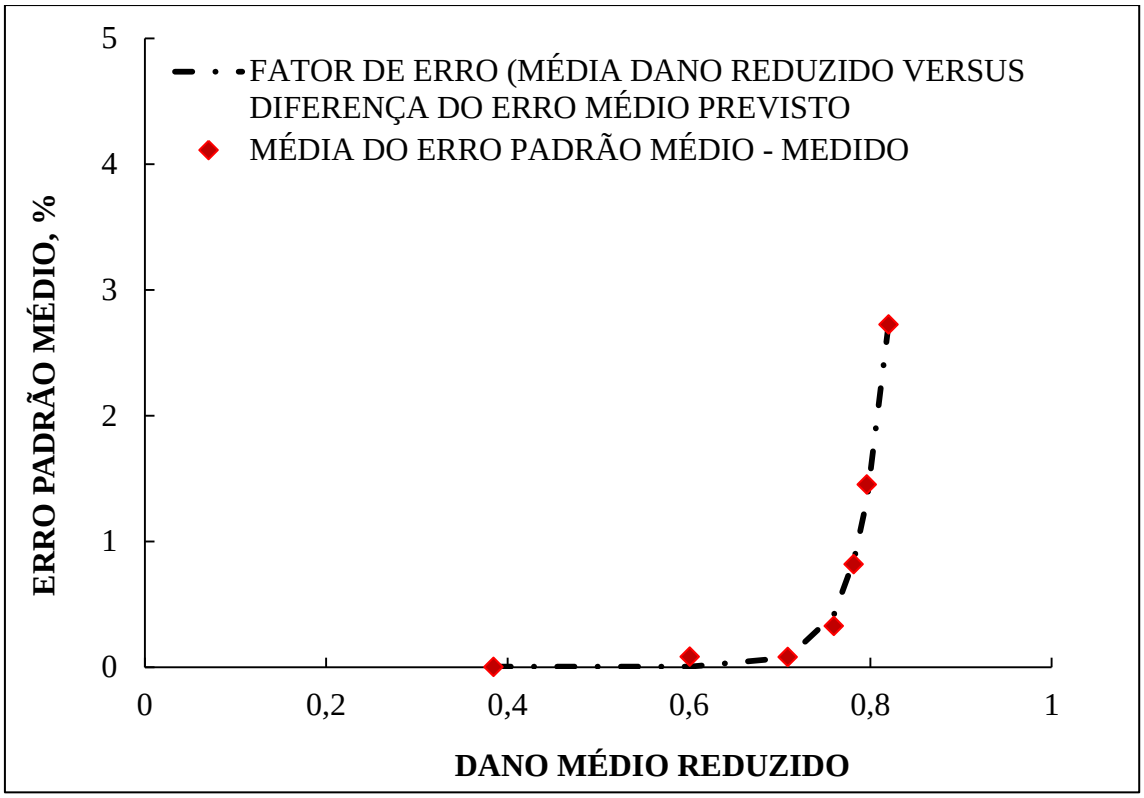


Figura 120 - Erro padrão medido versus dano médio reduzido baseado no Dano@0,800 – segmentos experimentais Projeto Fundão

A Tabela 30 apresenta os resultados dos intervalos dos danos médios reduzidos e os erros padrões médios medidos, e mostra que a diferença de erro médio para os segmentos experimentais do Projeto Fundão é de 0,38% e erro médio padrão é de 0,54%. No NCHRP (2004) o erro padrão médio definido no MEPDG americano foi 5,01%, para um limite de 65% de área trincada. NASCIMENTO (2015) obteve um erro padrão médio de 0,97% para todos os segmentos avaliados e validados. Comparando o erro padrão médio obtido neste estudo com base nos segmentos experimentais avaliados no Projeto Fundão pode-se dizer que este é aproximadamente dez vezes menor que o obtido no MEPDG.

A seguir está descrito o procedimento de cálculo apresentado na Tabela 30:

- Intervalo dano reduzido: Definido aleatoriamente;
- Média do dano reduzido: Média do Dano reduzido para cada intervalo;
- Número de séries: contagem numérica de danos reduzidos para cada intervalo;

- Diferença do erro média, %: Média da AT prevista menos AT observada em campo para cada intervalo;
- Diferença desvio padrão, %: Desvio padrão da AT prevista menos AT observada em campo para cada intervalo;
- Diferença do erro médio do desvio padrão: Diferença do desvio padrão dividido pela raiz quadrada do número de série para cada intervalo;
- Diferença média do erro previsto, %: Calculada pela equação sigmoidal (14) com o uso da ferramenta Solver do Excel, ajustando as constantes a, b, c e d;
- Fator de erro²: definida pela equação 10*(Diferença média do erro previsto – diferença do erro médio do desvio padrão)² ;
- Σ erro: É o somatório dos fatores de erro elevado ao quadrado.

A Figura 121 mostra a diferença entre a AT prevista e a AT observada para os 45 segmentos desta pesquisa. Observa-se que essa diferença está relativamente bem distribuída e não concentrada em uma única zona. Esses valores são observados dentro de um cenário de tempo, o que mostra que não são tendenciosos para nenhum dos casos. Os resultados plotados abaixo da linha zero significam que a AT observada em campo é maior que a AT prevista e vice versa para os valores positivos, acima da linha zero.

Tabela 30 - Parâmetros estatísticos para previsão de erro – segmentos experimentais Projeto Fundão

Intervalo $Dano_{reduzido}$	Média $Dano_{reduzido - I}$	Número Séries	Diferença Média Erro,%	Diferença Desvio Padrão,%	Diferença Erro Médio Desvio Padrão	Diferença Média Erro Previsto,%	Fator de Erro²
< 0,5	0,3847	7	-0,01	0,000	0,0000	0,00	0,00
0,5 – 0,65	0,6012	34	-0,11	0,481	0,0826	0,00	0,06
0,65 – 0,75	0,7093	29	0,08	0,433	0,0804	0,07	0,00
0,75 – 0,77	0,7600	25	1,80	1,635	0,3271	0,42	0,08
0,77 – 0,79	0,7821	88	1,73	7,672	0,8178	0,85	0,01
0,79 – 0,81	0,7964	88	-1,18	13,614	1,4512	1,34	0,12
0,81 – 0,83	0,8205	6	2,27	6,670	2,7230	2,75	0,01
TOTAL	----	**277**	**0,38**	**8,900**	**0,54**		

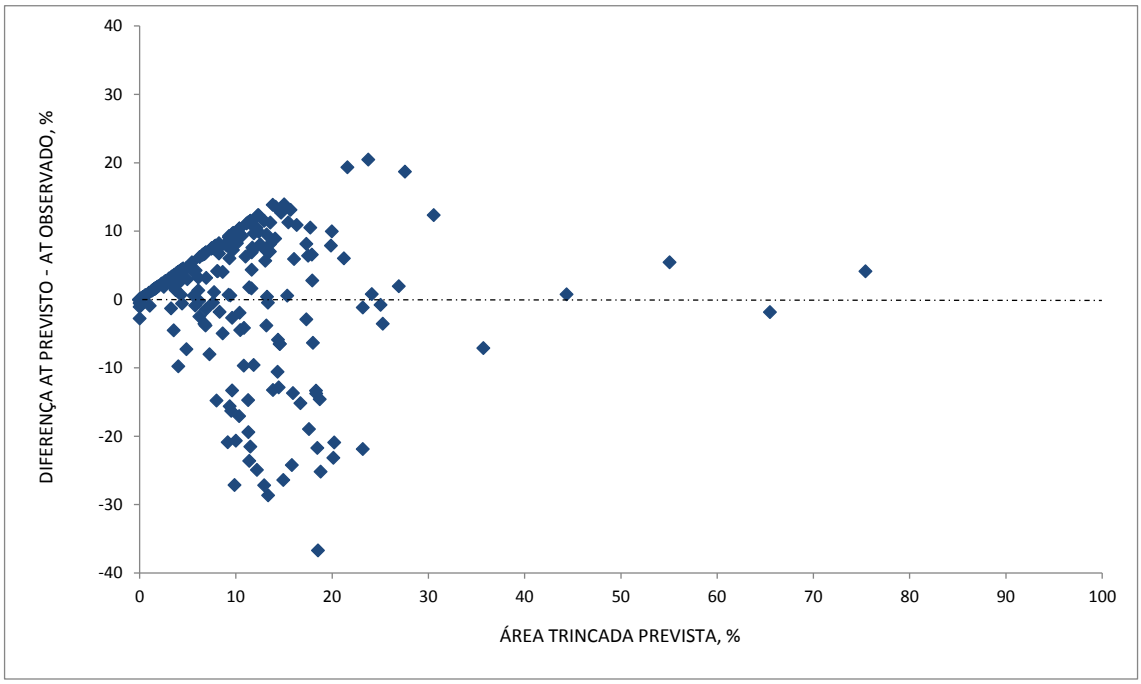


Figura 121 - Diferença entre a AT prevista menos a AT Observada – segmentos Fundão

Foram definidos os valores do Shift Factor "S" (A e B), baseado no Dano@0,800 e a Função de Transferência (C1 e C2), conforme apresentado na Tabela 29, e esses coeficientes foram inseridos no SisPavBR versão 2.1.3.0 na aba Modelagem – item Funções Campo – Laboratório e transformam o dano médio acumulado calculado no programa em AT prevista.

Também estão inseridos na aba Modelagem os coeficientes **a, b, c** e **d** da curva de erro padrão, apresentados na Tabela 30, que calculam o ajuste de erro considerando o dano reduzido baseado no intervalo do erro padrão. O método de confiabilidade é baseado no guia de projeto da AASHTO (NCHRP, 2004) onde a abordagem considera que os modelos de previsão dos danos por área trincada possuem uma distribuição probabilística do tipo Normal dentro do intervalo de dano de interesse do dimensionamento.

Com isso é possível obter no dimensionamento de pavimentos asfálticos uma previsão de área trincada ao longo do período de projeto baseada na confiabilidade desejada, ou seja, calcula-se a área trincada para uma determinada confiabilidade (50, 85, 90 ou 95%, definido no SisPavBR) e aplica-se o erro médio padrão calculado pela equação *(16),*

definindo um fator de ajuste (desvio padrão). Esse fator de ajuste é multiplicado com a área trincada prevista para uma determinada confiabilidade, conforme mostrado na expressão *(17).*

$$ATprevista\ P = AT_P * 1 + FA * CP \qquad (14)$$

Onde:

$ATprevista\ P =$ Área trincada por fadiga com nível de confiabilidade P, em %;

$AT_P =$ Área trincada prevista considerando os dados de entrada médios correspondentes a 50% de confiabilidade, em %;

$FA =$ Fator de ajuste;

$CP =$ Confiabilidade normal padrão.

5.6 Validação da Função de Transferência com Trechos Experimentais Nacionais

Definida a Função de Transferência com base em 45 segmentos experimentais construídos e monitorados desde a sua implantação na Cidade Universitária, referentes a seis tipos de misturas asfálticas mostradas no capítulo 4, que transforma o dano produzido pela passagem do tráfego em área trincada por fadiga, buscou-se validar a FT com segmentos experimentais construídos e monitorados pela COPPE fora da Cidade Universitária e alguns externos construídos e monitorados por universidades pertencentes à Rede Temática de Asfaltos.

O critério para a seleção dos segmentos experimentais externos se deu levando em conta os seguintes pontos: existência de curva de fadiga por compressão diametral e de MR da mistura asfáltica, conhecimento dos parâmetros estruturais, do volume de tráfego e da taxa de crescimento e que já tivessem vários períodos de avaliação da AT. Assim os trechos selecionados foram 13 distribuídos em diferentes regiões do país, conforme mostrado a seguir:

- COPPE – BR 116/RJ – Concessionária Rio Teresópolis – 3 segmentos;

- COPPE – BR 040/RJ – Concessionária Concer – 4 segmentos;
- UFSM* – Av Hélvio Basso – 1 segmento;
- EPUSP* – SP 345 – 2 segmentos;
- UFRGS* – BR 290/RS – CONCEPA – 1 segmento;
- UFC – CE 085 e BR 222/CE – 1 segmento cada – total de 2 segmentos.

Os trechos destacados (*) também foram usados para validar a Função de Transferência de NASCIMENTO, (2015).

Com essas informações foram calculados os danos médios acumulados definidos com o programa AEMC e definida a AT prevista. Na Tabela 31 estão apresentados os resultados da AT observada em campo comparada com os resultados da AT prevista com a FT definida neste estudo e inserida no SisPavBR para o nível A do MEPDG proposto.

De modo geral os resultados obtidos da AT prevista para os segmentos experimentais de validação da FT proposta na presente tese apresentaram uma boa correlação com AT observada em campo a menos de dois segmentos da Concer que tiveram problemas durante a execução, conforme relatado no capítulo 2.

As Figura 122, Figura 123 e Figura 124 mostram a AT observada em campo nos trechos CRT, onde foi definido o percentual de 40% para encerramento dos ensaios acelerados (FRITZEN *et al.*, 2007) com o uso do simulador de tráfego e para a monitoração com o tráfego comercial. O N correspondente ao HVS foi calculado convertendo o número de ciclos obtido com o simulador de tráfego móvel considerando a carga aplicada no semieixo do trem de carga do HVS utilizando o Fator de Equivalência da USACE, usual no Brasil, e plotado versus a AT prevista com a FT. Os valores mostrados na AT observada correspondem ao período em meses que os segmentos foram submetidos ao tráfego comercial até atingir 40% de área trincada, conforme descrito no capítulo 4 deste estudo.

Tabela 31 - Resultados da AT observado versus AT previsto em relação ao último levantamento de campo disponível, definidos com a FT desta tese.

Segmentos Nacionais	Número N – ano 2015	AT campo, %		Fadiga		MR MPa
		AT Observado	AT Previsto	k1	k2	
CRT – I	3,66E+06	40,0	25,7	6E-09	-2,788	7976
CRT – II	4,11E+06	40,0	37,1	3E-08	-2,638	6779
CRT – III	3,88E+06	40,0	37,2	1E-10	-3,201	3001
CONCER 50/70 ESQ	2,97E+06	13,7	15,9	2E-14	-4,079	9470
CONCER 50/70 DIR	1,68E+07	48,4	33,4			
CONCER 30/45 ESQ	1,05E+06	4,0	4,2	2E-11	-3,288	10062
CONCER 30/45 DIR	4,20E+06	13,8	1,1			
UFSM – AV. HÉLVIO BASSO	1,39E+06	0,2	1,7	4E-05	-1,999	4901
USP – CAP 30/45	7,30E+05	0,0	0,0	1E-09	-3,304	8074
USP – CAP 50/70	7,30E+05	0,0	13,3	3E-05	-2,098	6908
UFRGS – II	2,42E+07	0,0	0,0	5E-17	-4,366	5517
UFC TRECHO 1 BR/222 – CAP 50/70 CAPA / BINDER	4,39E+05	0,0	2,71	5E-15 2E-11	-4,091 -3,334	4027 4651

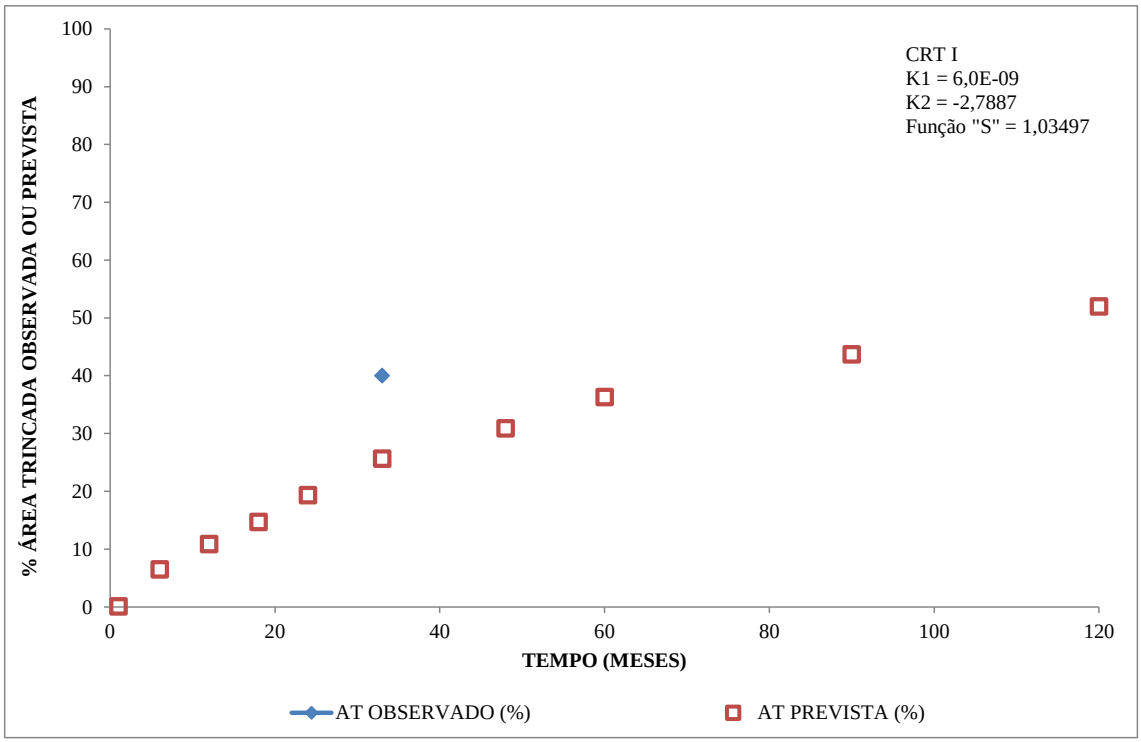


Figura 122 - Comparação da AT $_{observada}$ versus AT $_{prevista}$, com a Função de Transferência – CRT - I

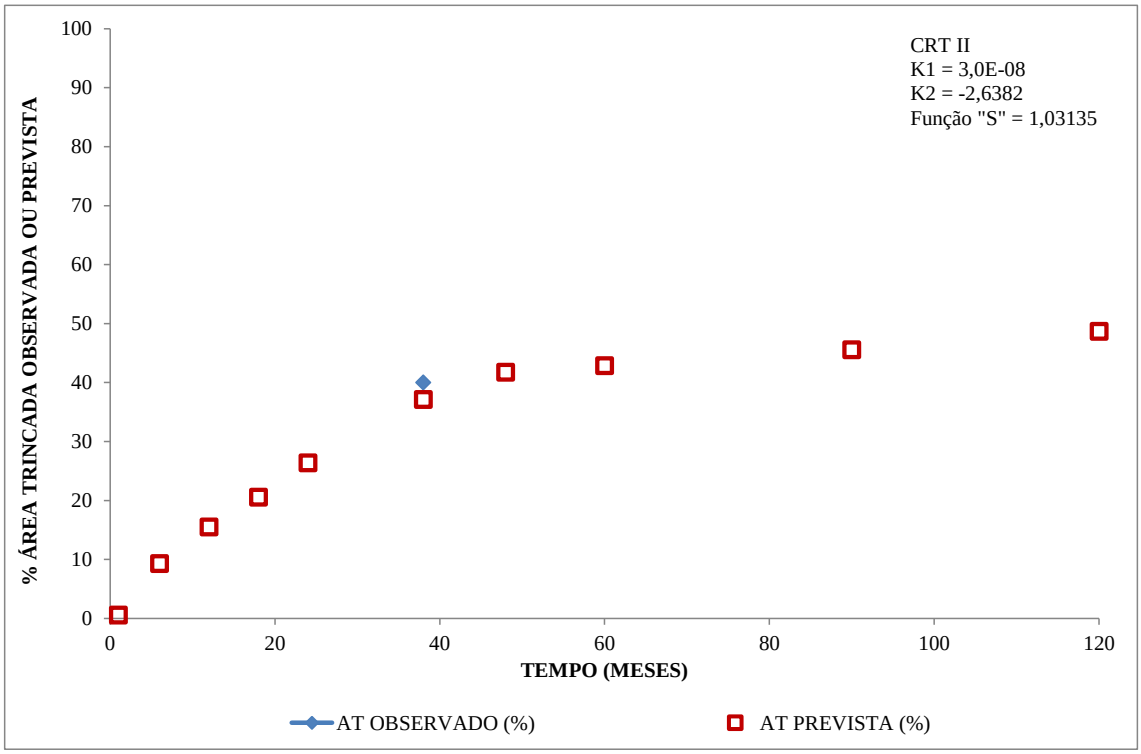


Figura 123 - Comparação da AT $_{observada}$ versus AT $_{prevista}$, com a Função de Transferência – CRT – II

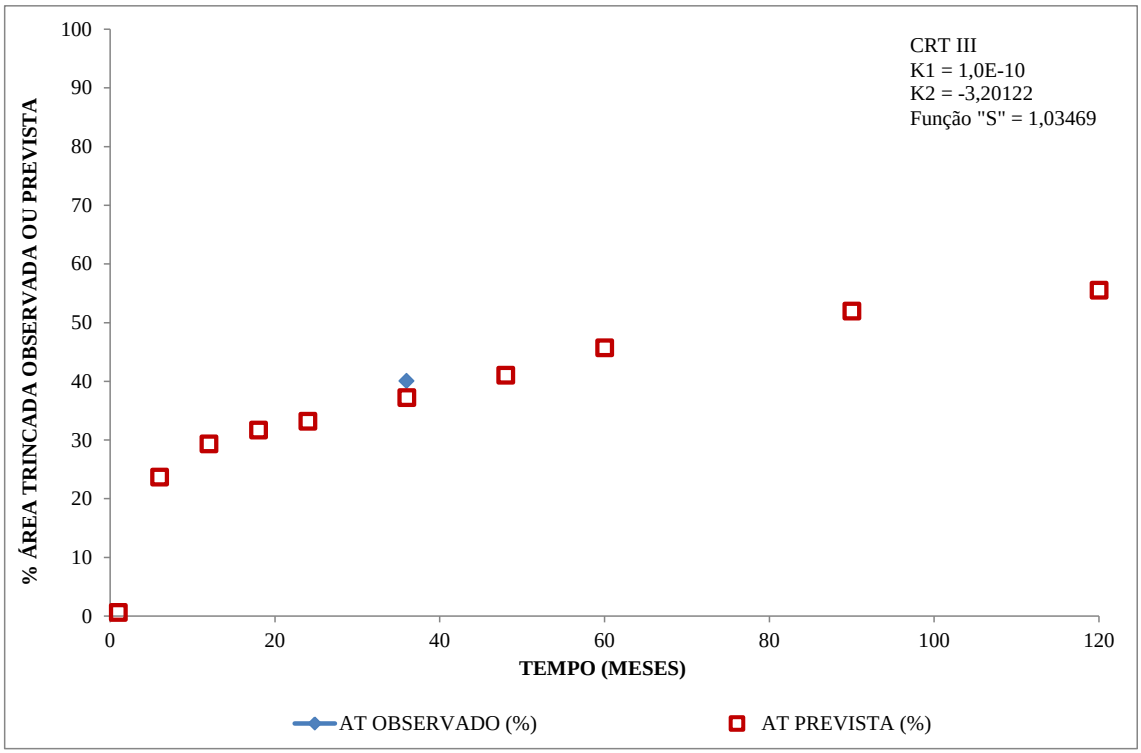


Figura 124 - Comparação da AT $_{observada}$ versus AT $_{prevista}$, com a Função de Transferência – CRT – III

As Figura 125 e Figura 126 correspondem aos segmentos experimentais construídos na BR 040 no ano de 2010 com CAP 50/70. O segmento experimental da faixa da direita mostra diferença significativa entre a AT observada versus AT prevista. Acredita-se que esse fato esteja relacionado a problemas construtivos do segmento, visto que a massa asfáltica desse segmento permaneceu no caminhão durante longo período, exposta a altas temperaturas, acelerando o processo de envelhecimento antes da colocação e compactação.

As Figura 127 e Figura 128 mostram os resultados dos segmentos experimentais com CAP 30/45 usinados como mistura morna utilizando o procedimento patenteado pelo CENPES. Na Figura 128 a diferença da AT Observada para a AT prevista pode estar relacionada ao fato de que um dos caminhões que transportava a massa asfáltica teve problemas mecânicos a cerca de 40 km do local dos segmentos e ficou longo tempo parado o que levou o motorista do caminhão seguinte a parar e prestar socorro mecânico ao primeiro.

Todos esses problemas técnicos associados à falta de controle tecnológico, pode levar ao insucesso da previsão da AT, e podem acontecer em obras, visto que o dano médio acumulado é calculado em função da curva de fadiga de laboratório que não leva em consideração esses problemas construtivos e a falta de controle tecnológico.

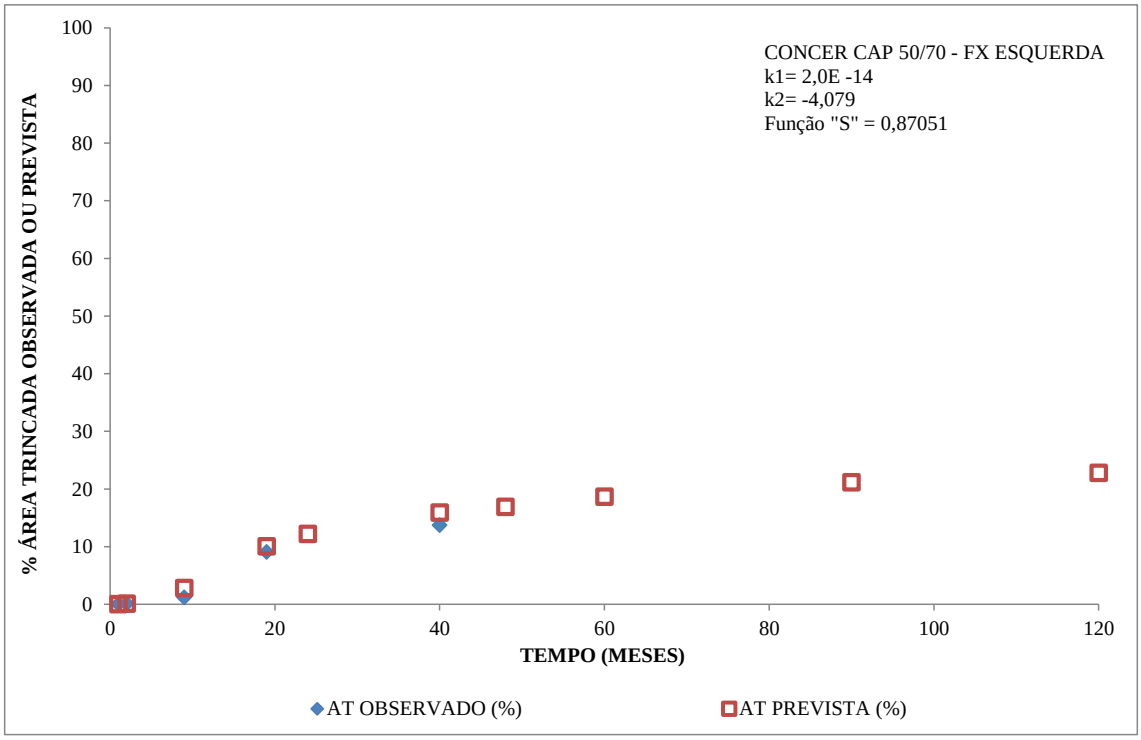


Figura 125 - Comparação da AT $_{observada}$ versus AT $_{prevista}$, com a Função de Transferência – CONCER CAP 50/70 – esquerda.

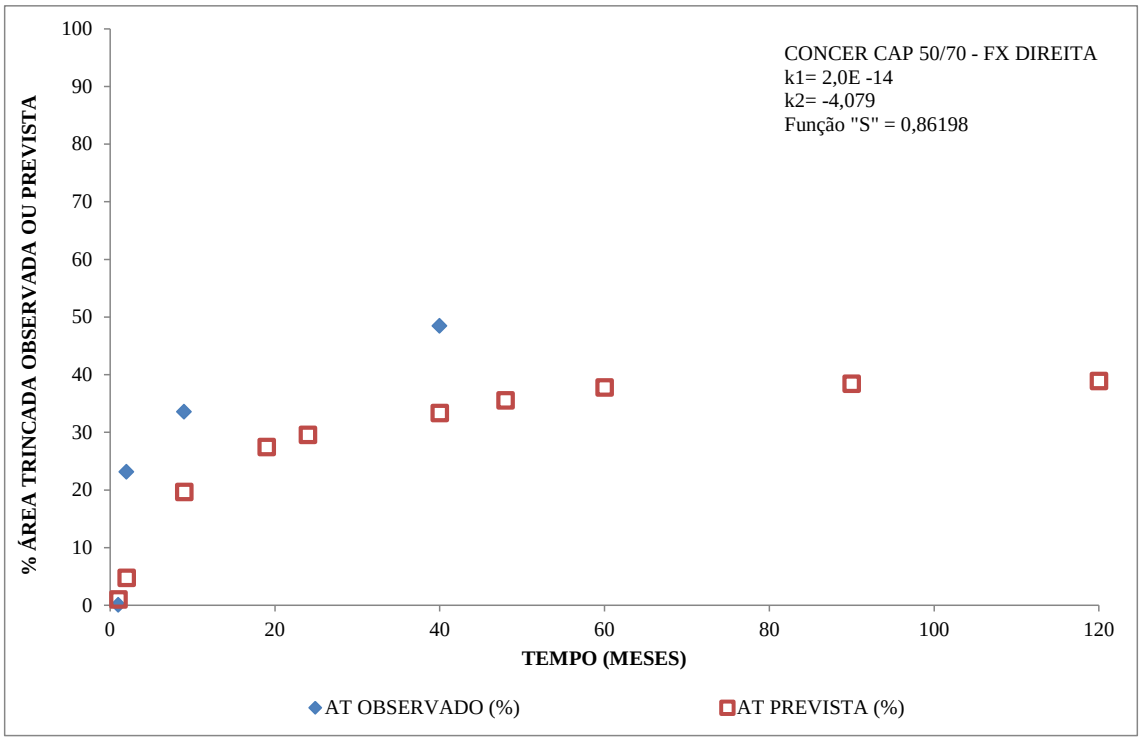


Figura 126 - Comparação da AT $_{observada}$ versus AT $_{prevista}$, com a Função de Transferência – CONCER CAP 50/70 – direita.

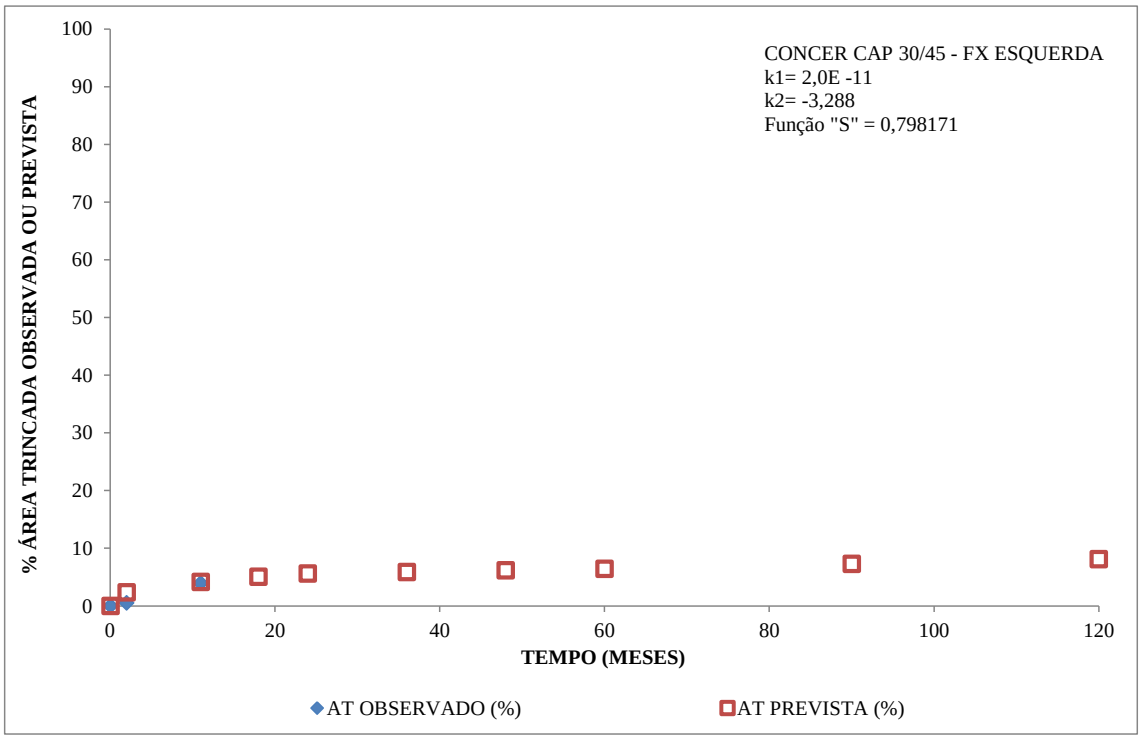


Figura 127 - Comparação da AT $_{observada}$ versus AT $_{prevista}$, com a Função de Transferência – CONCER CAP 30/45 – esquerda.

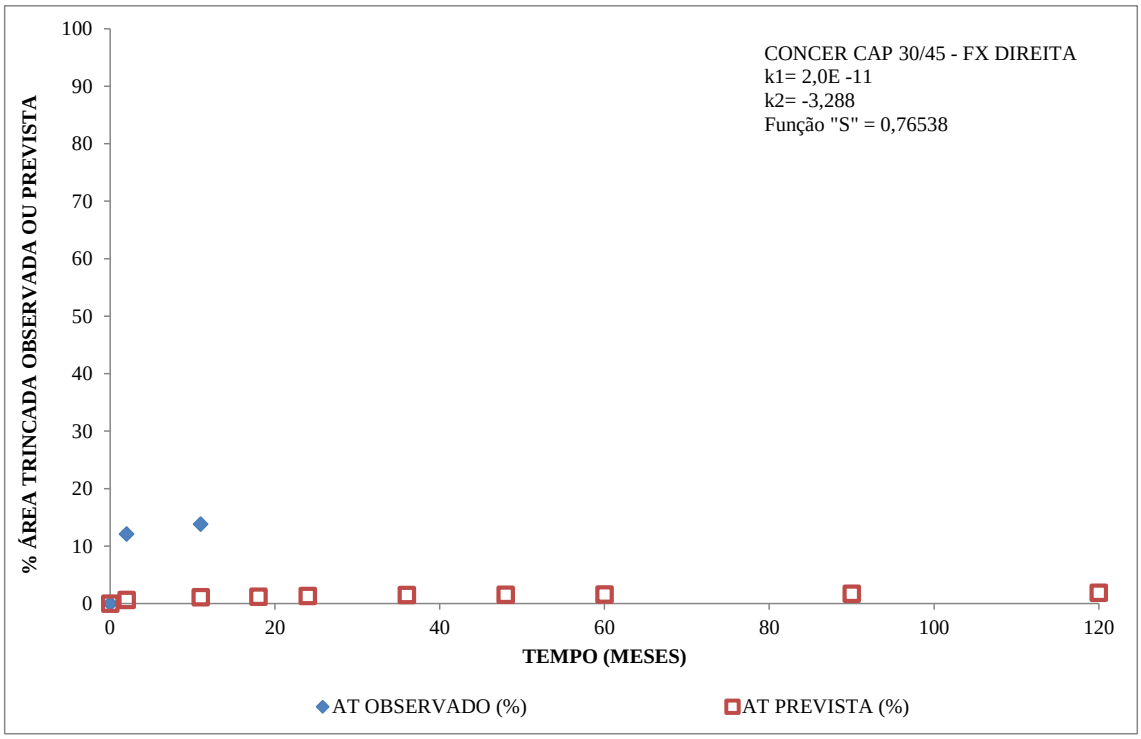


Figura 128 - Comparação da AT $_{observada}$ versus AT $_{prevista}$, com a Função de Transferência – CONCER CAP 30/45 – direita.

A Figura 129 apresenta os resultados do segmento experimentais da UFRGS – II, que mostra uma boa correlação entre a AT observado versus AT prevista. Isso ocorre também no segmento da UFSM mostrado na Figura 130. As Figura 131 e Figura 132 correspondem aos segmentos construídos e monitorados pela EPUSP. Apenas no segmento experimental da EPUSP mostrado na Figura 132 apresentou uma pequena diferença entre a AT observada e a AT prevista.

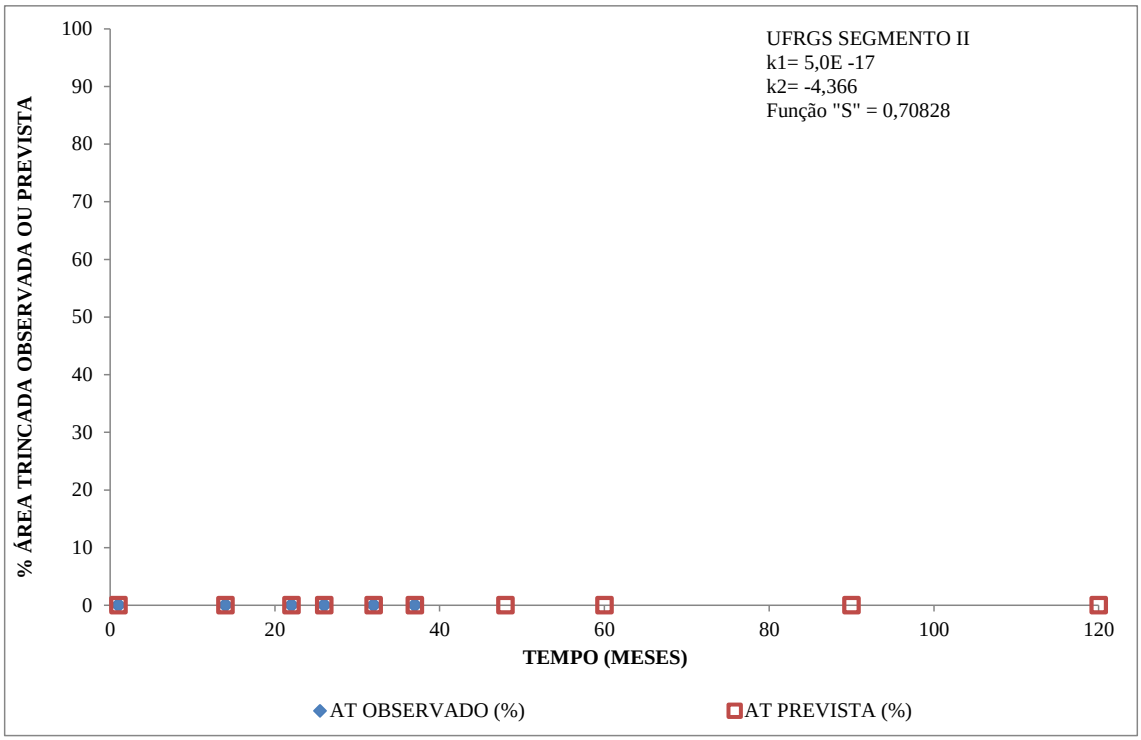


Figura 129 - Comparação da AT $_{observada}$ versus AT $_{prevista}$, com a Função de Transferência – UFRGS - II.

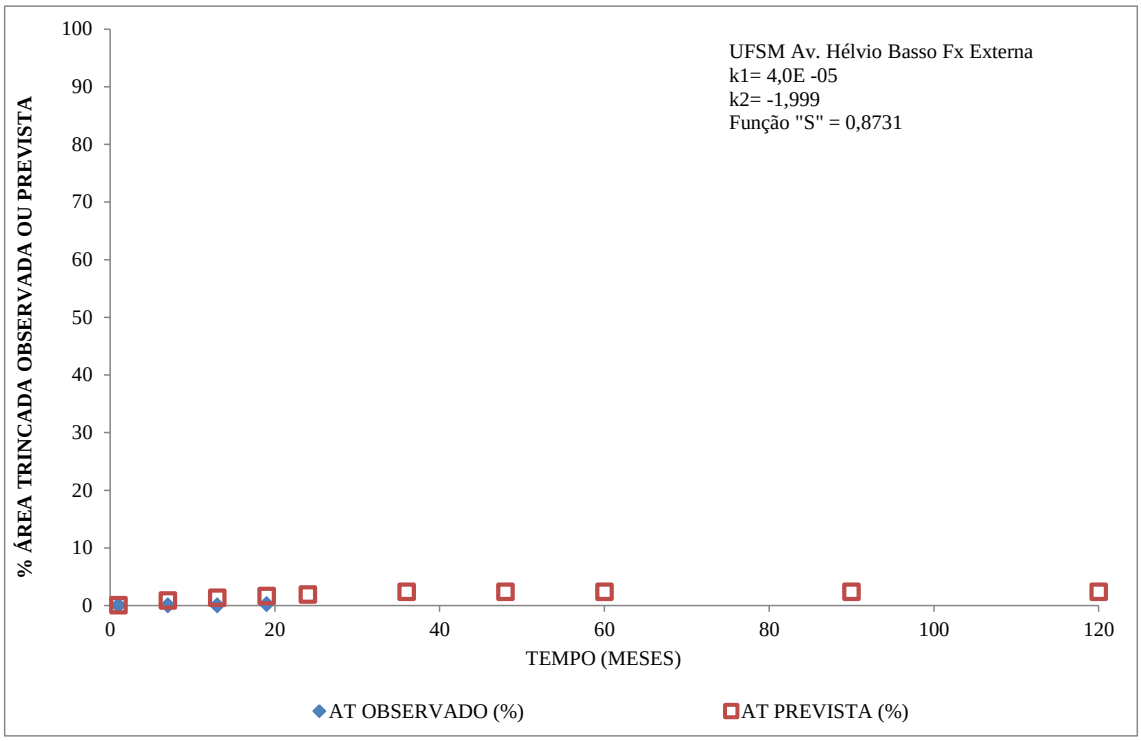


Figura 130 - Comparação da AT $_{observada}$ versus AT $_{prevista}$, com a Função de Transferência – UFSM Av. Hélvio Basso.

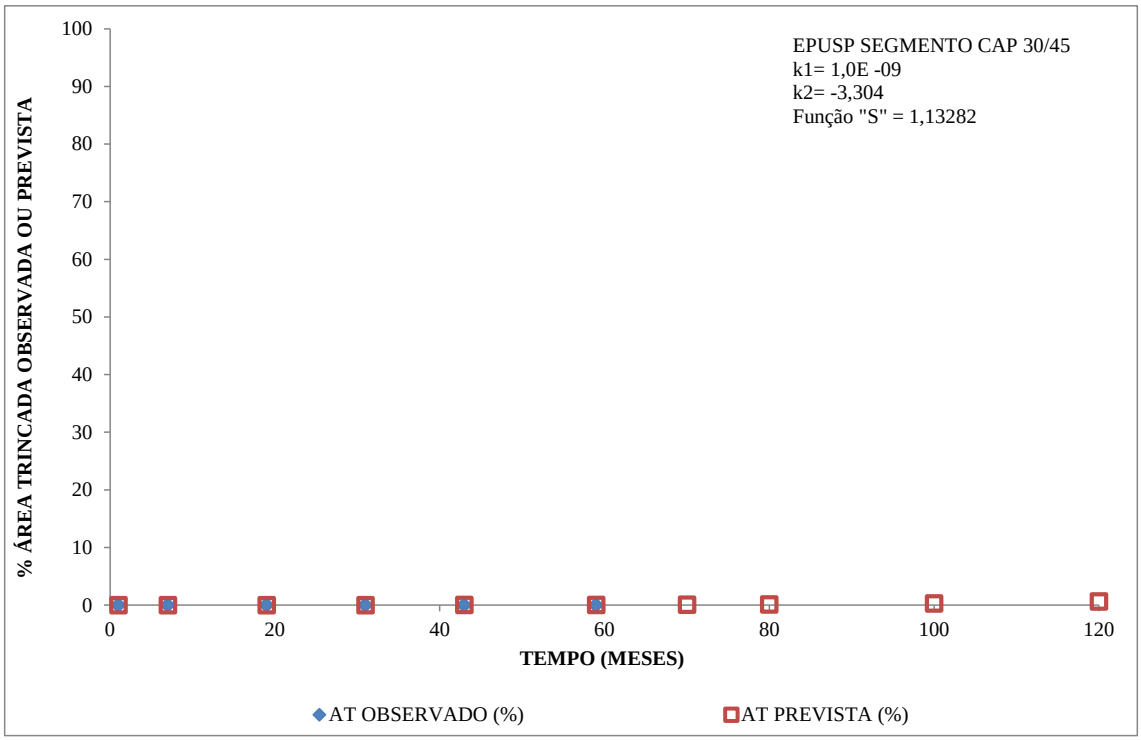


Figura 131 - Comparação da AT $_{observada}$ versus AT $_{prevista}$, com a Função de Transferência – EPUSP CAP 30/45

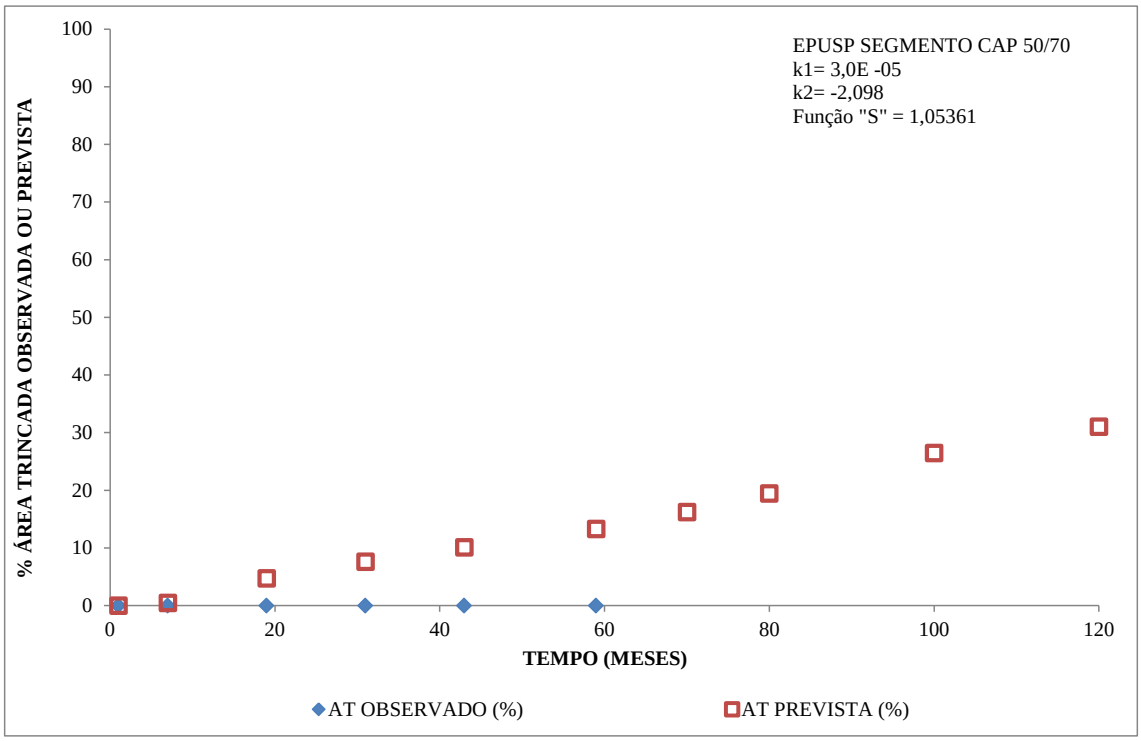


Figura 132 - Comparação da AT $_{observada}$ versus AT $_{prevista}$, com a Função de Transferência – EPUSP CAP 50/70

A Figura 133 apresenta os resultados do segmento experimental da UFC – trecho 1 DNIT localizado na BR/222 no município de Umirim entre a AT observada versus a AT prevista. Neste segmento foi realizada a retroanálise das bacias deflectométricas para determinar o valor do módulo da camada do subleito que não foi definido pela UFC, pois a reconstrução do trecho se deu com a reciclagem da base antiga e o revestimento asfáltico, conforme relatório técnico parcial 3 da UFC de 2015.

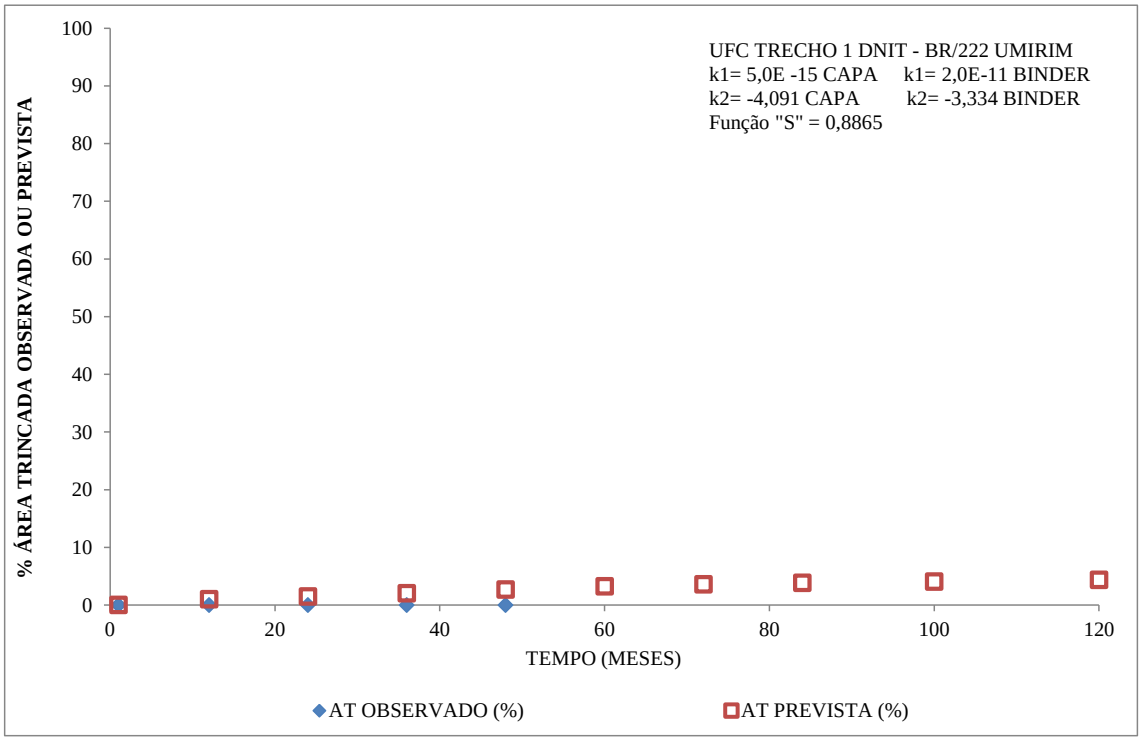


Figura 133 - Comparação da AT $_{observada}$ versus AT $_{prevista}$, com a Função de Transferência – UFC – trecho 1 DNIT BR/222

Na Figura 134 mostram-se os resultados agrupados da AT observado em campo referente aos segmentos nacionais usados na verificação da Função de Transferência definida neste estudo e os danos reduzidos dos segmentos experimentais utilizados na definição da Função de Transferência. Pode ser observado que a FT apresentou uma boa correlação em relação a AT observado e o dano reduzido. É importante ressaltar que a FT foi definida com segmentos construídos e monitorados no Projeto Fundão e checada com alguns segmentos experimentais nacionais. Esta validação é muito importante tendo em vista que contemplou também trechos novos e não só de reforço.

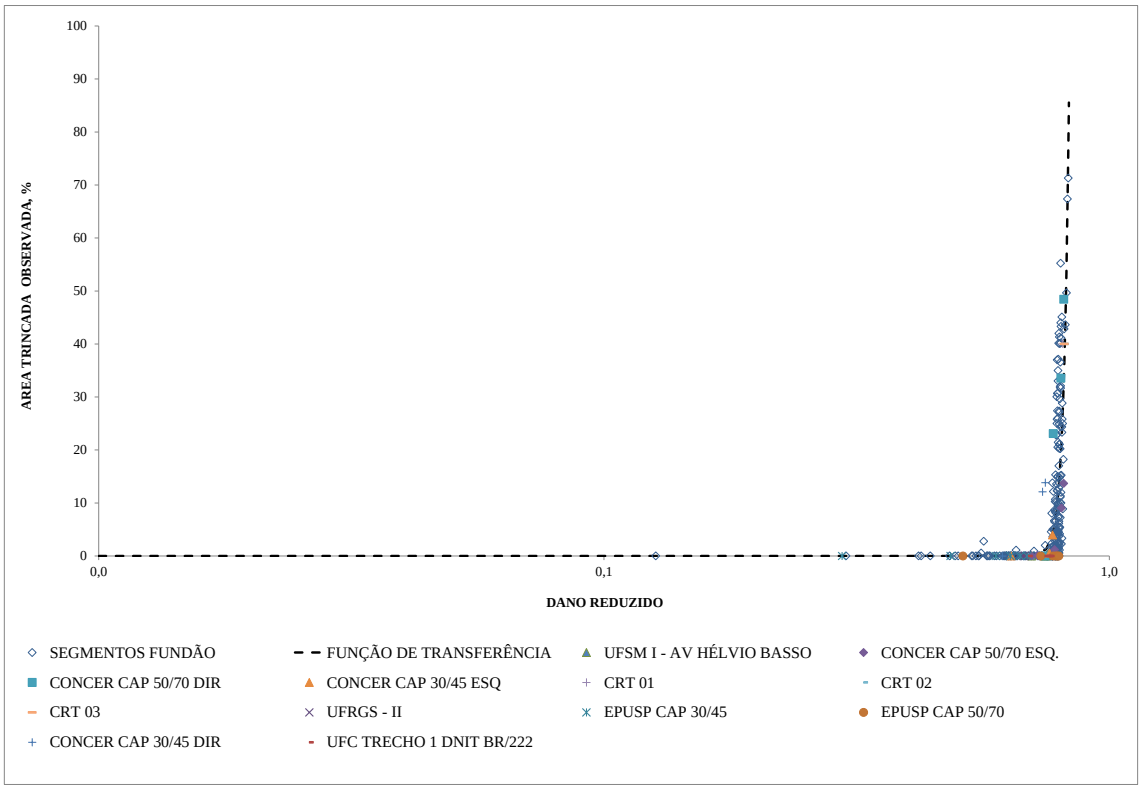


Figura 134 - AT $_{observado}$ em relação ao dano reduzido dos segmentos experimentais nacionais que validam a FT desta tese.

Os segmentos experimentais nacionais foram compatíveis com a FT definida nesta tese, visto que, em geral, os resultados da AT observada em relação a AT prevista apresentaram boa correlação, exceto os segmentos experimentais Concer CAP 50/70 em ambas as faixas de rolamento e o CAP 30/45, faixa da direita. Essa diferença deve estar relacionada a problemas durante a fase de construção e aplicação da massa asfáltica em campo. Como exemplo de problema construtivo, a mistura asfáltica CAP 50/70 foi usinada no início da manhã e aplicada geralmente a partir das 14:00 horas, o que sofreu com altas temperaturas nos caminhões. A mistura asfáltica CAP 30/45 apresentou problemas de transporte, visto que foi usinada na Usina de asfaltos da Craft Engenharia em Campo Grande, Rio de Janeiro, e teve problemas de transporte com a quebra de um caminhão na subida da serra de Petrópolis e parada dos próximos.

Após a validação da Função de Transferência com os segmentos experimentais nacionais foi definido um novo R^2, agora incorporando os resultados das AT $_{prevista}$ versus a AT $_{observada}$ dos segmentos nacionais juntamente com os segmentos experimentais do Projeto Fundão utilizados para a determinação e calibração inicial da

Função de Transferência. A Figura 135 mostra os resultados do R² obtidos com a incorporação dos segmentos nacionais. Observa-se que o R² apresentou uma melhora se comparado com o R² dos segmentos experimentais do Projeto Fundão somente. Isso mostra que a Função de Transferência apresentou boa correlação com os segmentos nacionais.

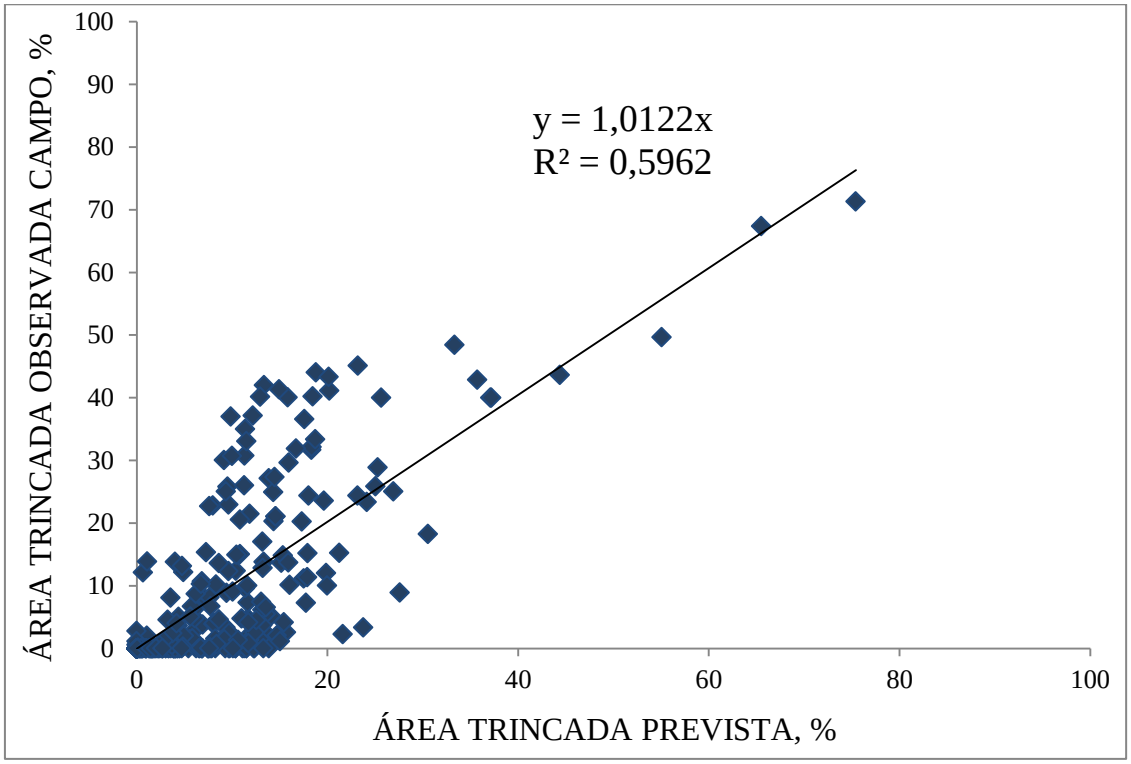


Figura 135 - Comparação da área trincada $_{observada}$ *versus área trincada* $_{prevista}$ *segmentos Projeto Fundão mais segmentos nacionais*

Definido o R² com a incorporação dos segmentos experimentais nacionais conforme mostrado na Figura 135 foi determinado um novo fator de erro com a inclusão dos segmentos nacionais. A Figura 136 apresenta o erro padrão médio em relação a diferença da AT prevista menos AT observada. O novo fator de erro contemplou os 45 segmentos experimentais utilizados para o desenvolvimento e calibração da Função de Transferência definida nesta tese mais os doze segmentos experimentais nacionais.

Observa-se que os resultados obtidos para o fator de erro referentes aos 45 segmentos experimentais usados para o desenvolvimento e calibração da Função de Transferência foram semelhantes aos obtidos com a inclusão dos segmentos nacionais. Porém, com a

inclusão dos segmentos nacionais os resultados apresentaram uma melhora, conforme mostrados na Tabela 32. Novas constantes foram geradas para calcular a função de erro incorporada ao erro da análise expresso pela equação sigmoidal, como segue:

$a = 0{,}004$

$b = 35{,}294$

$c = 139{,}740$

$d = 71{,}826$

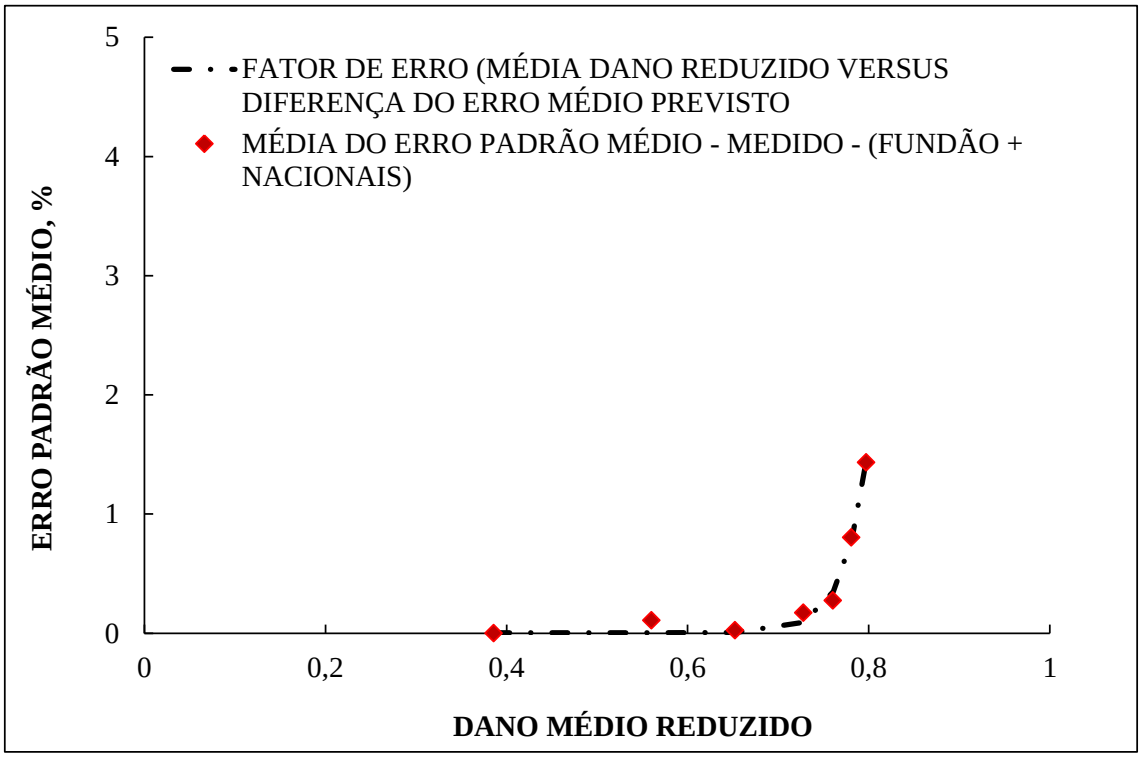


Figura 136 – Erro padrão medido versus dano médio reduzido baseado no Dano@0,800 – segmentos experimentais Projeto Fundão e Nacionais

Este procedimento comprova que a função de transferência gerada a partir de segmentos monitorados somente de restauração pode ser usada também para segmentos novos e construídos com outros tipos de estruturas de pavimento e em outros climas. Também

mostra que é possível melhorar o ajuste e o erro desta FT à medida que se incorporam novos resultados de segmentos monitorados com os mesmos procedimentos definidos no Manual de Trechos Monitorados da Rede Temática de Asfalto.

Tabela 32 - Parâmetros estatísticos para a previsão de erro – segmentos experimentais Projeto Fundão e Nacionais

Intervalo $Dano_{reduzido}$	Média $Dano_{reduzido - I}$	Número Séries	Diferença Média Erro,%	Diferença Desvio Padrão,%	Diferença Erro Médio Desvio Padrão	Diferença Média Erro Previsto,%	Fator de Erro²
< 0,5	0,3860	9	-0,01	0,004	0,0015	0,00	0,00
0,5 – 0,60	0,5602	17	-0,15	0,446	0,1082	0,00	0,11
0,60 – 0,70	0,6525	45	-0,02	0,165	0,0246	0,01	0,00
0,70 – 0,75	0,7281	25	0,16	0,861	0,1721	0,09	0,06
0,75 – 0,77	0,7607	30	1,83	1,499	0,2736	0,35	0,06
0,77 – 0,79	0,7811	94	1,72	7,793	0,8038	0,78	0,01
0,79 – 0,81	0,7973	91	-1,12	13,681	1,4342	1,45	0,00
0,81 – 0,83	0,8179	10	1,19	9,680	3,0610	3,05	0,00
Segmentos experimentais Fundão e Nacionais		**321**	**0,39**	**8,600**	**0,48**		

5.7 Validação da Função de Transferência de Trechos Experimentais Nacionais Utilizando Curvas de Fadiga do Projeto Fundão

A validação da Função de Transferência dos segmentos experimentais nacionais foi feita conforme apresentado no subitem 5.6 desta tese. Em continuidade, foi avaliado o comportamento dos segmentos experimentais nacionais com o uso de curvas de fadiga diferentes das de projeto de cada segmento, utilizando-se agora as oriundas do Projeto Fundão mais próximas das características de cada trecho, e também a curva genérica de FRANCO (2007), a fim de verificar a possibilidade do uso de curvas de fadiga diferentes do projeto para o dimensionamento de pavimentos asfálticos na fase de anteprojeto.

Uma das alternativas avaliadas foi a curva genérica de FRANCO (2007) que foi gerada a partir de um banco de dados de fadigas por compressão diametral de cargas repetidas do LABGEO à época. Essas constantes definidas correspondem a três tipos de ligantes

asfálticos: CAP 30/45; CAP 50/70 e CAP 85/100 e estão implantadas no SisPav desenvolvido pelo referido autor.

As curvas de fadiga correspondentes ao Projeto Fundão, utilizadas nos segmentos experimentais nacionais foram selecionadas de acordo com as características do projeto de cada segmento nacional, ou seja, foi selecionada uma curva de fadiga do Projeto Fundão que melhor se adequasse à composição granulométrica e tipo de ligante.

Após definida a curva de fadiga dentre as seis que foram avaliadas no Projeto Fundão, foram calculados os danos médios acumulados com os mesmos parâmetros utilizados para a validação da Função de Transferência apresentado no subitem 5.6. O que foi modificado foram as constantes K1 e K2, agora usados as da curva de fadiga do Projeto Fundão ou da curva genérica de FRANCO (2007).

De modo geral os resultados obtidos com as curvas de fadiga do Projeto Fundão e a curva genérica de FRANCO (2007) apresentaram uma boa correlação. Porém é importante mencionar que esse uso de curvas de fadiga genéricas, mas obtidas para misturas parecidas com as que geraram o modelo, poderá ser usado somente em caso de anteprojeto. Recomenda-se que o projetista utilize preferencialmente uma curva de fadiga por compressão diametral com misturas características das propriedades da região da obra nesta etapa de anteprojeto de forma que no projeto se possa confirmar os dados adotados com dosagens de misturas reais.

No caso do projeto final é extremamente importante que o projetista solicite os ensaios mecânicos dos materiais que serão implantados no pavimento a fim de ajustar o projeto se for necessário ou projetar a mistura asfáltica de forma a reproduzir o módulo de resiliência e a fadiga utilizada nos cálculos do dimensionamento. Marques (2004) mostra como é possível dosar uma mistura asfáltica para atingir determinado valor de módulo de resiliência, por exemplo, entre outros autores.

As Figura 137, Figura 138 e Figura 139 apresentam a $AT_{observada}$ em campo dos segmentos da CRT I, II e III respectivamente, comparada com a $AT_{prevista}$ gerada com a curva de fadiga de projeto, a $AT_{prevista}$ com uma das curvas de fadiga do Projeto Fundão e a curva genérica de FRANCO (2007). Na Figura 139 percebe-se que a curva de fadiga

do Projeto Fundão apresentou diferença em relação à curva de fadiga de projeto devido a diferença de composição granulométrica da curva de fadiga de projeto (Gap Graded faixa Caltrans) ser muito diferente neste caso da do Projeto Fundão (SUPERPAVE 19,1mm), mesmo sendo o ligante asfáltico do mesmo tipo: asfalto-borracha. Fica ilustrado como conhecer a curva de fadiga real da mistura é importante.

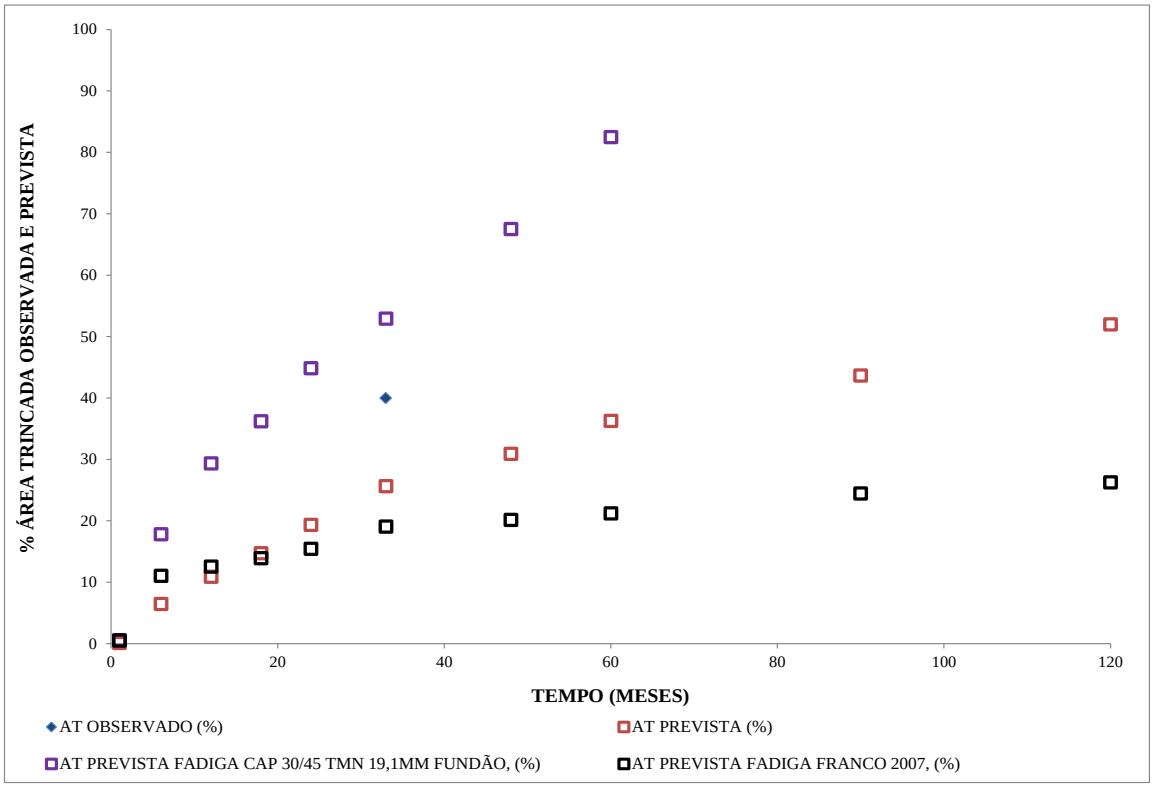


Figura 137 – Comparação da AT $_{observada}$, AT $_{prevista}$ Projeto, AT $_{prevista}$ Fadiga Fundão e AT $_{prevista}$ Genérica, com a Função de Transferência – CRT I

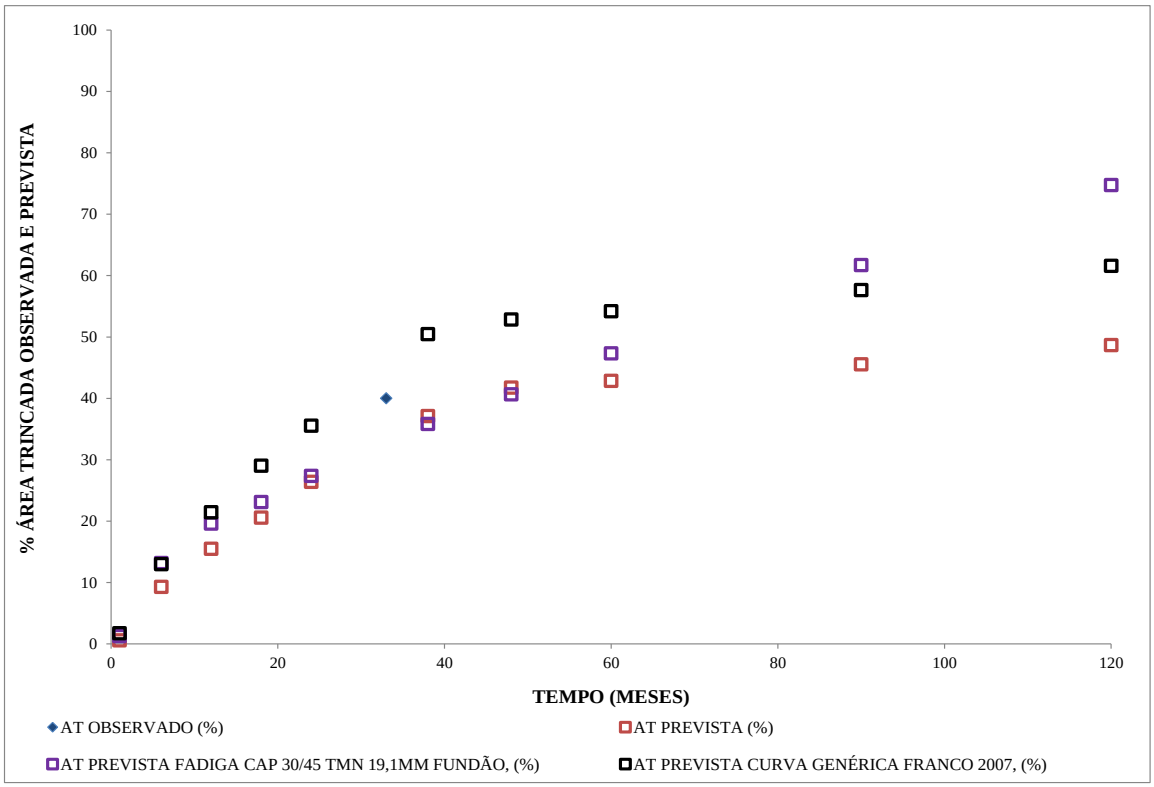


Figura 138 – Comparação da AT $_{observada}$, AT $_{prevista}$ Projeto, AT $_{prevista}$ Fadiga Fundão e AT $_{prevista}$ Genérica, com a Função de Transferência – CRT II

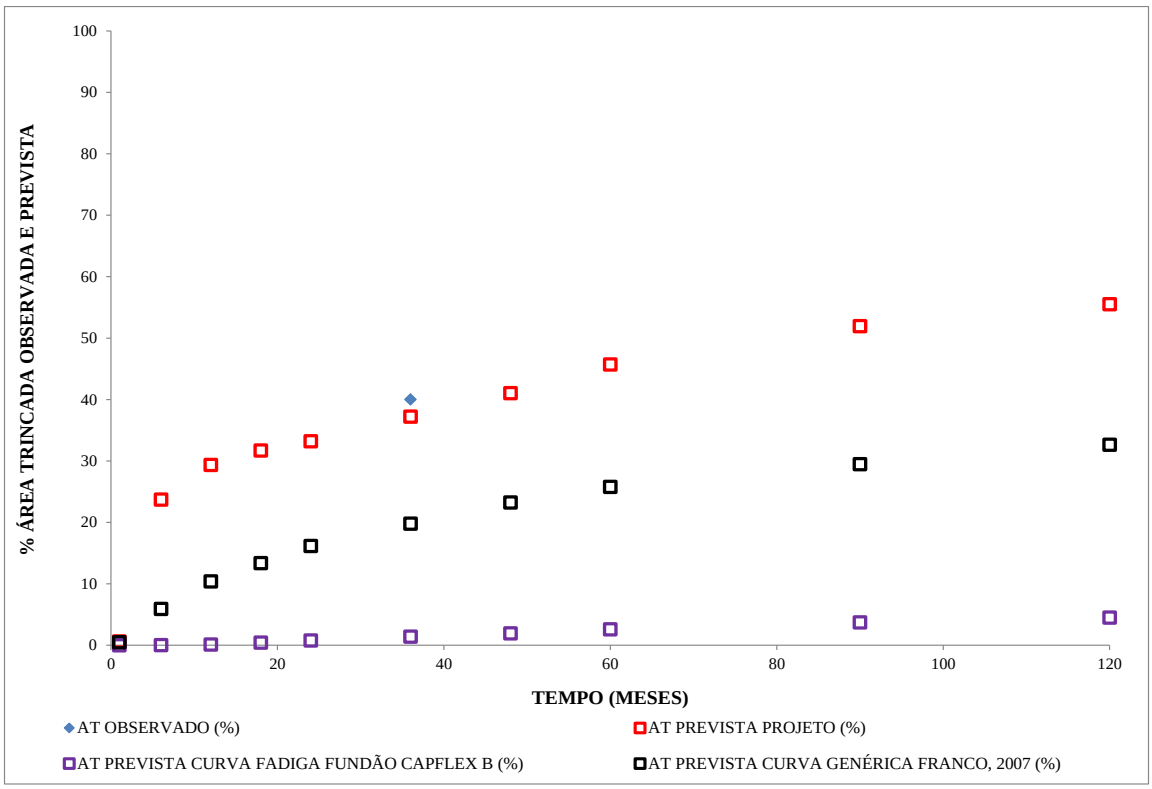


Figura 139 – Comparação da AT $_{observada}$, AT $_{prevista}$ Projeto, AT $_{prevista}$ Fadiga Fundão e AT $_{prevista}$ Genérica, com a Função de Transferência – CRT III

As Figura 140 e Figura 141 apresentam a AT $_{observada}$ em campo dos dois segmentos experimentais da CONCER CAP 30/45, aplicado nas faixas de rolamento da direita e esquerda, respectivamente. Nas figuras estão apresentados os resultados da AT $_{observada}$, AT $_{prevista}$ com base nos resultados da curva de fadiga de projeto referente a cada uma das misturas asfálticas e AT $_{prevista}$ com curvas de fadiga do Projeto Fundão referentes ao tipo de ligante e a faixa granulométrica mais próxima deste projeto.

Observa-se nos segmentos experimentais da CONCER que mesmo usando curvas de fadiga do Projeto Fundão, os resultados apresentados mostram uma boa correlação. Isto indica que é possível utilizar uma curva de fadiga com características próximas a que se pretende usar no projeto para o dimensionamento na fase de anteprojeto, confirmando depois necessariamente esta condição durante o projeto e a construção.

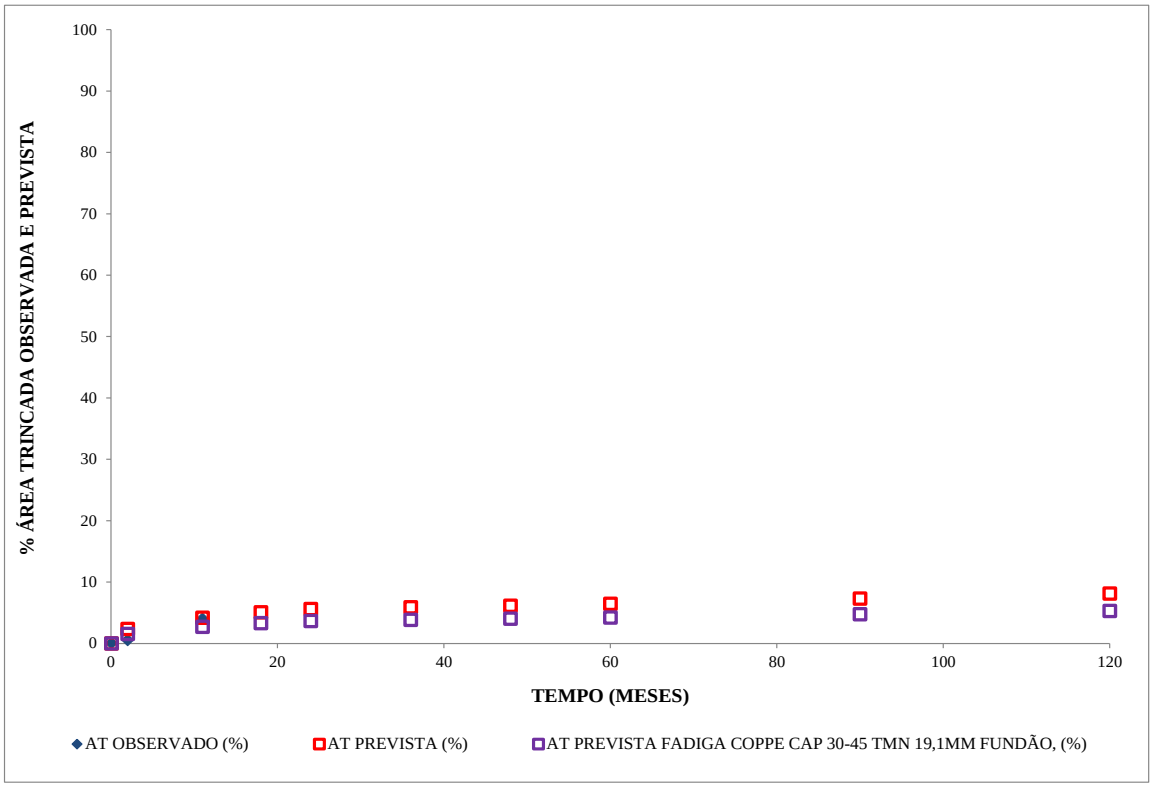


Figura 140 - Comparação da AT $_{observada}$, AT $_{prevista}$ Projeto, AT $_{prevista}$ Fadiga Fundão com a Função de Transferência CONCER CAP 30/45 – WMA – Faixa Esquerda.

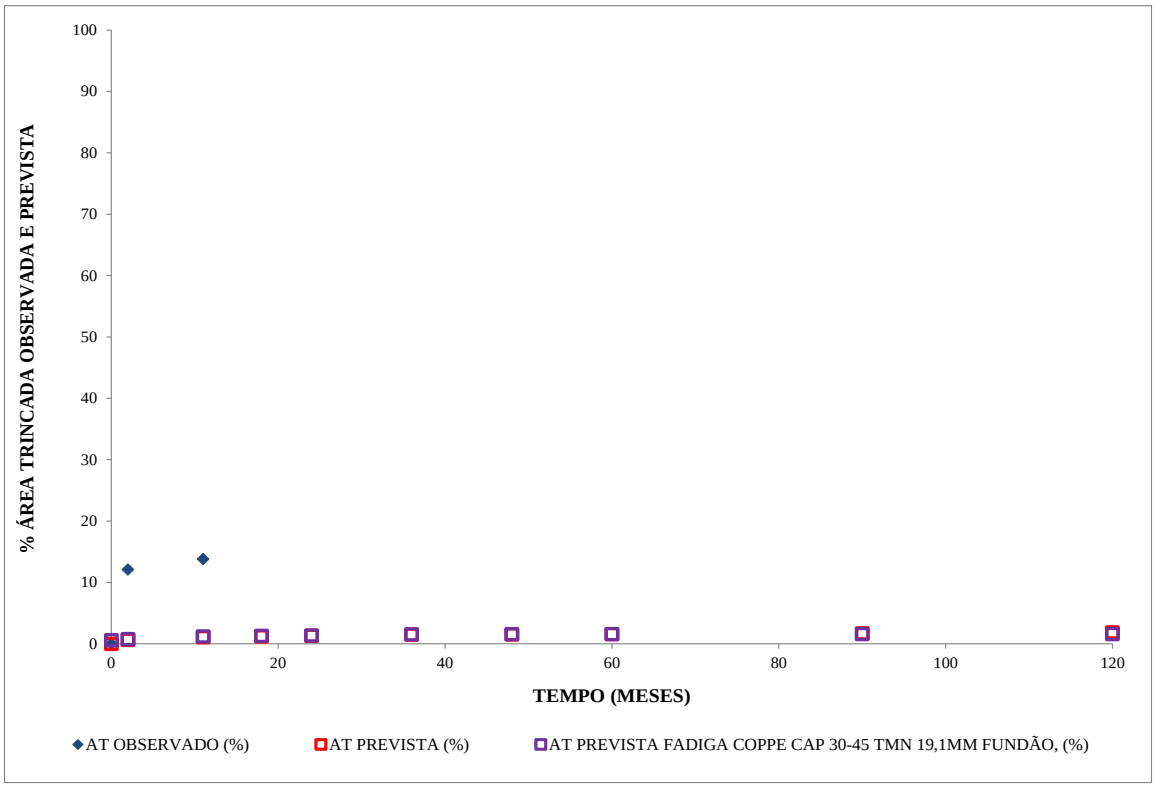


Figura 141 - Comparação da AT $_{observada}$, AT $_{prevista}$ Projeto, AT $_{prevista}$ Fadiga Fundão com a Função de Transferência CONCER CAP 30/45 – WMA – Faixa Direita

As Figura 142, Figura 143, Figura 144, Figura 145 e Figura 146 correspondem aos segmentos experimentais da UFSM, UFRGS, EPUSP CAP 30/45, EPUSP CAP 50/70 e UFC. Nestas figuras estão apresentados os resultados da AT $_{observado}$, AT $_{prevista}$ de projeto, respectivamente, AT $_{previsto}$ com base nas curvas de fadiga do Projeto Fundão e a AT $_{prevista}$ com base na curva de fadiga genérica FRANCO (2007) com a Função de Transferência definida nesta tese. Observa-se que os resultados mostrados apresentaram uma boa correlação entre a AT $_{prevista}$ com as curvas de projeto versus as curvas de fadiga do Projeto Fundão e a curva genérica.

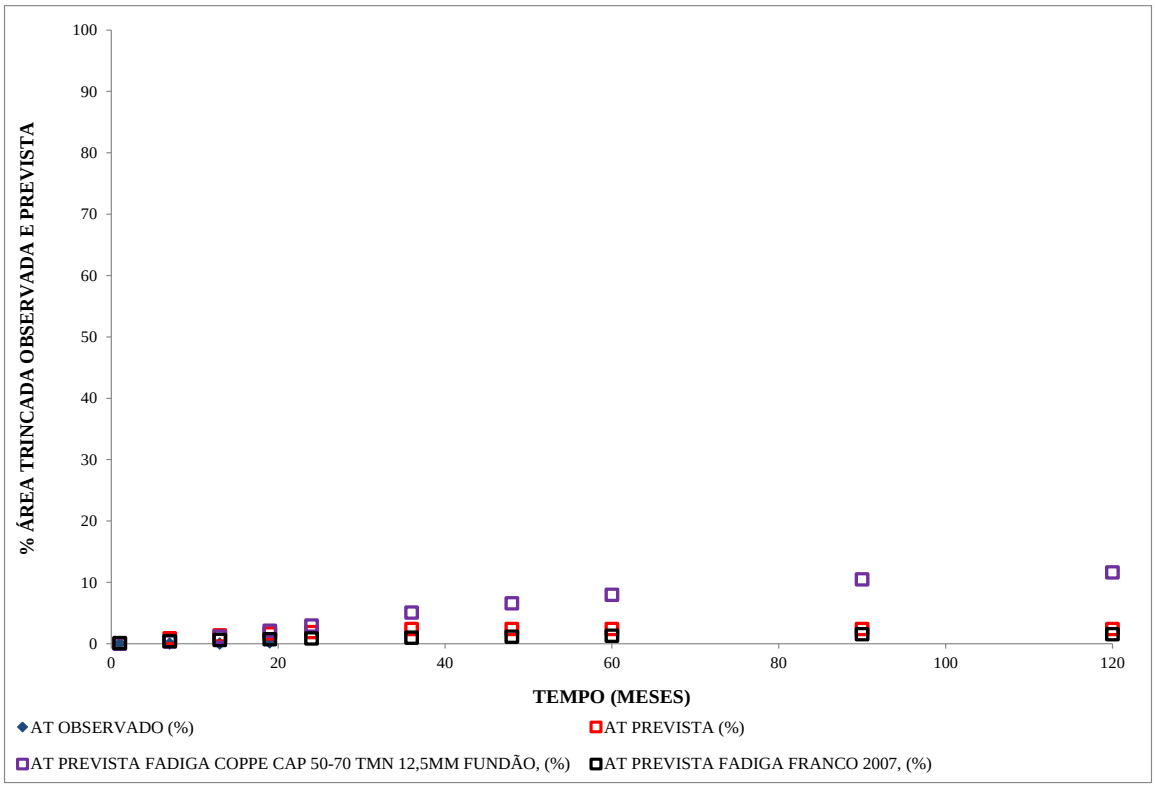


Figura 142 - Comparação da AT $_{observada}$, AT $_{prevista}$ Projeto, AT $_{prevista}$ Fadiga Fundão e AT $_{prevista}$ Genérica, com a Função de Transferência – UFSM

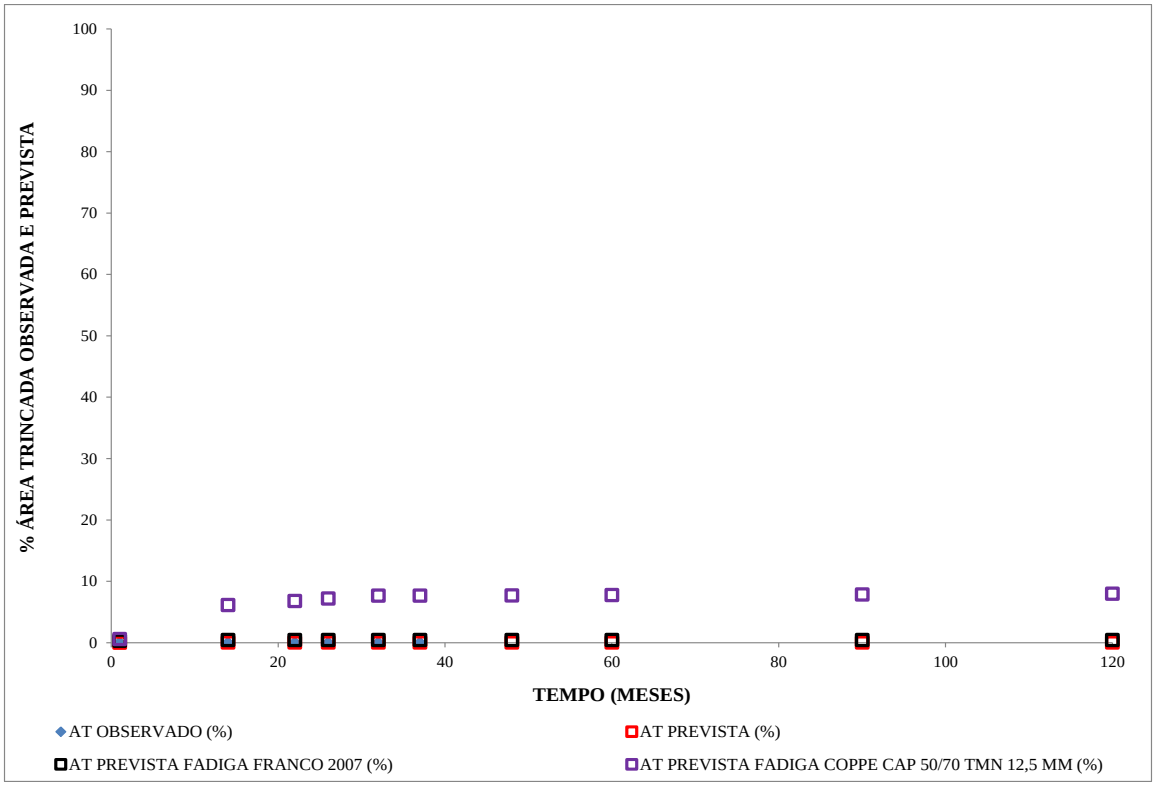


Figura 143 - Comparação da AT $_{observada}$, AT $_{prevista}$ Projeto, AT $_{prevista}$ Fadiga Fundão e AT $_{prevista}$ Genérica, com a Função de Transferência – UFRGS

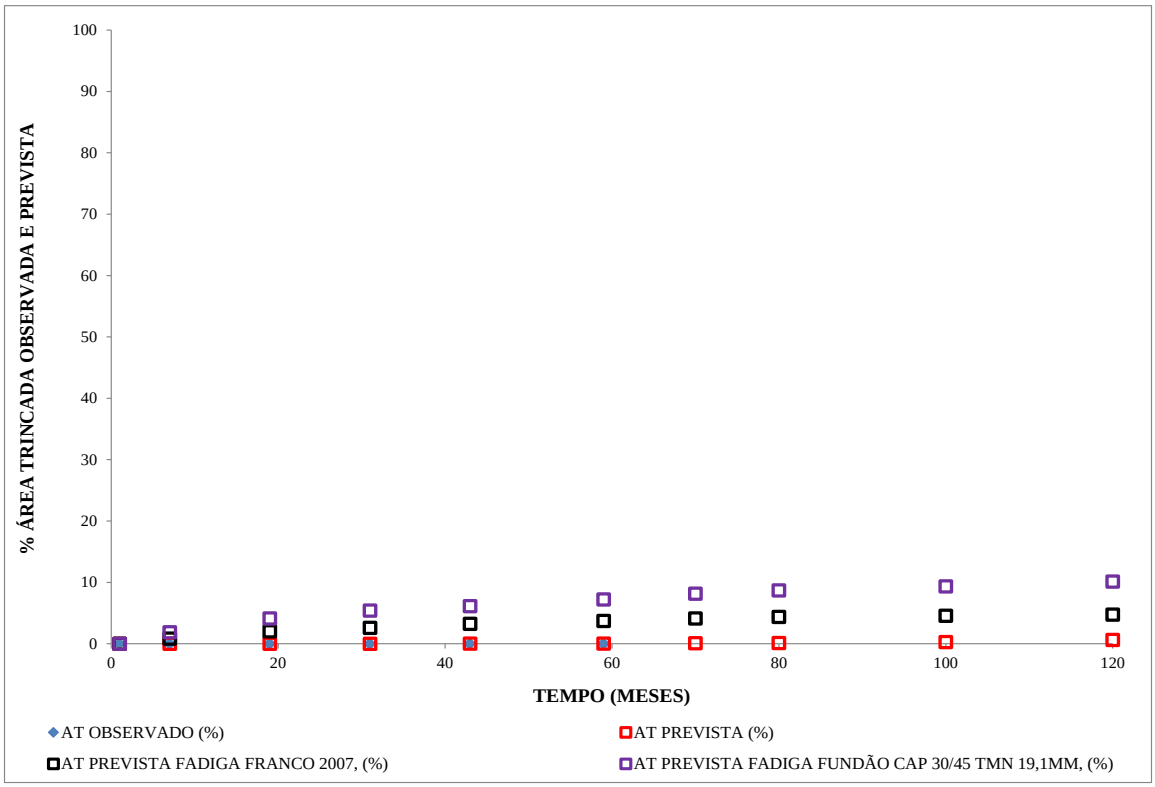


Figura 144 - Comparação da AT $_{observada}$, AT $_{prevista}$ Projeto, AT $_{prevista}$ Fadiga Fundão e AT $_{prevista}$ Genérica, com a Função de Transferência – EPUSP CAP 30/45

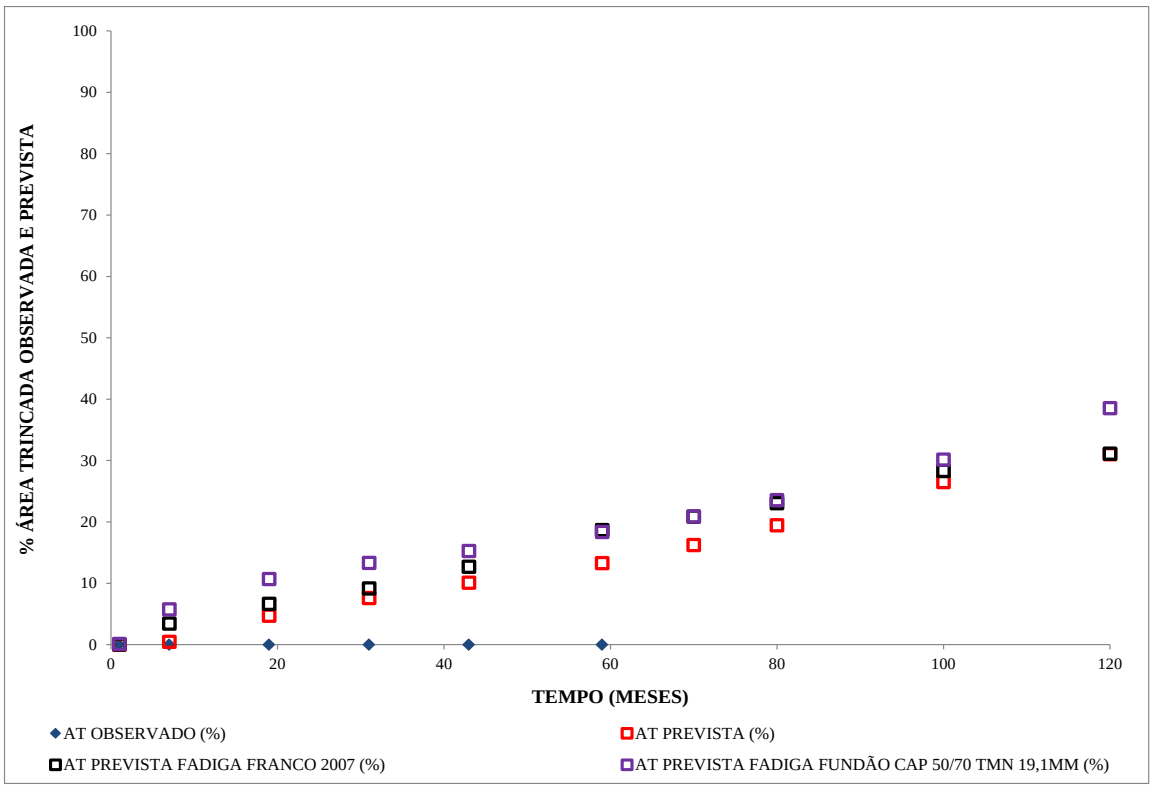


Figura 145 - Comparação da AT $_{observada}$, AT $_{prevista}$ Projeto, AT $_{prevista}$ Fadiga Fundão e AT $_{prevista}$ Genérica, com a Função de Transferência – EPUSP CAP 50/70

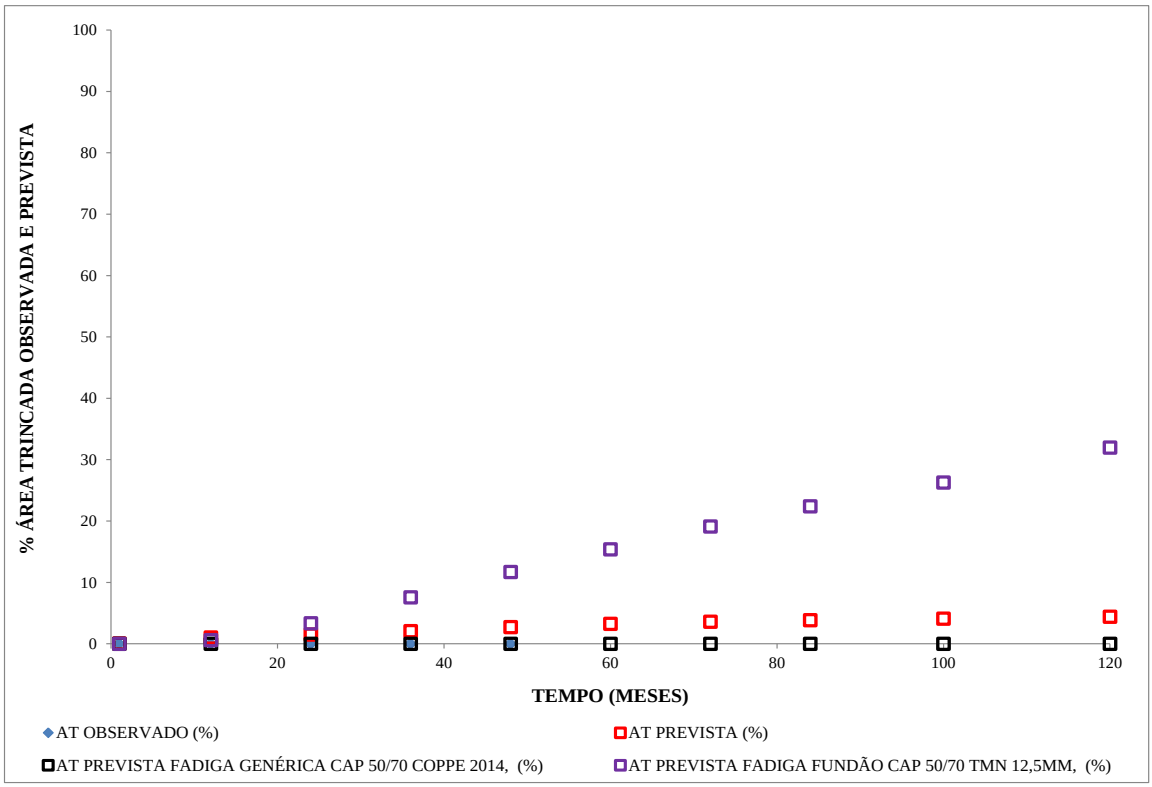


Figura 146 - Comparação da AT $_{observada}$, AT $_{prevista}$ Projeto, AT $_{prevista}$ Fadiga Fundão e AT $_{prevista}$ Genérica, com a Função de Transferência – UFC CAP 50/70

Como visto é possível definir uma Função de Transferência baseada em diferentes metodologias de ensaio. Porém é necessário o ajuste da Função de Transferência para cada tipo de ensaio sempre com acompanhamento sistemático de trechos experimentais. O uso de diferentes metodologias de ensaios das que foram utilizadas para a definição das Funções de Transferência desta tese e de NASCIMENTO (2015), não são recomendados para o dimensionamento de pavimentos asfálticos visto que as constantes geradas de fadigas que não sejam de compressão diametral de carga repetida ou tração direta com deformação controlada.

Na Tabela 33 estão apresentados os coeficientes da Função de Transferência e do *Shift Factor* "S" obtidos nesta tese baseado na análise elástica de múltiplas camadas com base nos ensaios mecânicos de módulo de resiliência e fadiga por compressão diametral. Também estão apresentados os coeficientes da Função de Transferência e do *Shift Factor "S"* obtido por NASCIMENTO (2015) baseado na análise viscoelástica de dano contínuo, com base nos ensaios de módulo dinâmico e na tração direta sob deformação

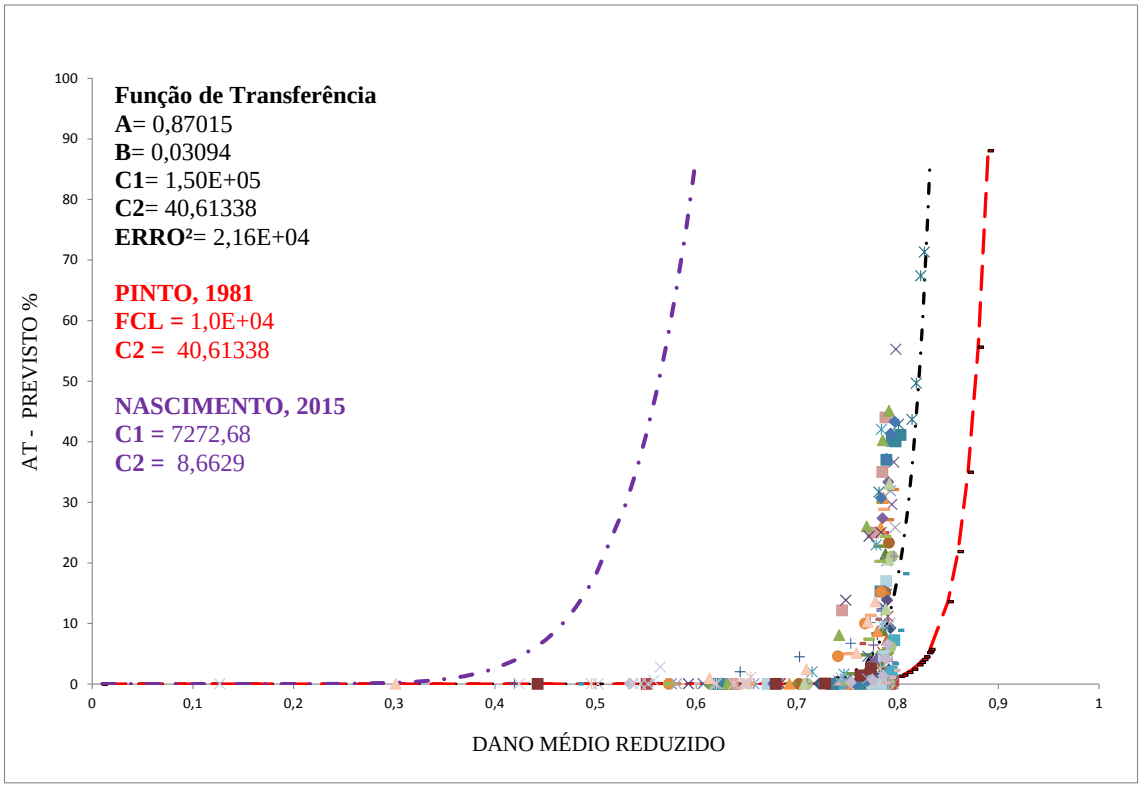
controlada das misturas asfálticas para definição da fadiga. A título ilustrativo também está apresentado o Fator Campo Laboratório – FCL definido por PINTO (1981).

Tabela 33 – Resumo dos Coeficientes da Função de Transferência desta tese, NASCIMENTO (2015) e o Fator Campo Laboratório PINTO (1981)

<table>
<tr><td colspan="2">Função de Transferência - Tese</td><td colspan="2">Função de Transferência
NASCIMENTO (2015)</td><td>Fator Campo Laboratório
PINTO, (1981)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Coeficientes Shift Factor “S”</td><td colspan="2">Coeficientes Shift Factor
“$S_{T0,35}$”</td><td rowspan="7">FCL = 10^4</td></tr>
<tr><td>A</td><td>0,8756</td><td>A</td><td>0,008274</td></tr>
<tr><td>B</td><td>0,0307</td><td>B</td><td>0,635237</td></tr>
<tr><td colspan="2">Constantes da Função de
Transferência Dano@0,800</td><td colspan="2">Constantes da Função de
Transferência Dano@0,35</td></tr>
<tr><td>C1</td><td>1,50E+05</td><td>C1</td><td>7,27E+03</td></tr>
<tr><td>C2</td><td>40,61338</td><td>C2</td><td>8,6629</td></tr>
</table>

Na figura xx para uma percepção visual, estão representadas a Função de Transferência definida nesta tese, a Função de Transferência definida por NASCIMENTO (2015) e o FCL de PINTO (1981) substituindo o C1 definido nesta tese pelo FCL = 10^4 mantendo o C2 somente como ilustrativo. A figura mostra as diferenças entre a Função de Transferência definida nesta tese e a de NASCIMENTO (2015), que mesmo utilizando procedimento de cálculo semelhante, porem baseada em metodologias de ensaios e programa de analise diferentes resultam em valores bastante diferentes. Em relação ao FCL de PINTO (1981) pode-se comentar que embora os ensaios usados tenham sido também de compressão diametral, o programa de cálculo de Tensão deformação foi outro (FEPAVE), calculado na fibra inferior da camada do revestimento asfáltico.

Figura 147 – Função de Transferência Comparada a Título Ilustrativo com a Função de Transferência de NASCIMENTO (2015) e o Fator Campo Laboratório de PINTO (1981)



6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

6.1 Conclusões

O Projeto Fundão representa para a comunidade técnico – científica nacional uma das mais importantes pesquisas desenvolvidas na atualidade no país pela sua abrangência e uso no desenvolvimento do método de dimensionamento mecanístico – empírico brasileiro, com o uso de ensaios de cargas repetidas nesta tese e também para o LVECD por NASCIMENTO (2015).

O acompanhamento sistemático de segmentos experimentais construídos e monitorados com diferentes técnicas de pavimentação, uso de ligantes comerciais e modificados, agregados alternativos, além da capacitação de alunos de graduação e de pós-graduação. Também contribuiu para o desenvolvimento do Manual de Trechos Monitorados da Rede Temática de Asfaltos para ensaios e controle tecnológico de segmentos experimentais no âmbito nacional. Isto permite usar dados de trechos de várias partes do país, num esforço cooperativo que resulta em um banco de dados consistente para os futuros ajustes nacionais ou regionais do método de dimensionamento.

A Função de Transferência obtida nesta tese foi definida a partir dos ensaios mecânicos de módulo de resiliência e fadiga por compressão diametral de misturas asfálticas. Apesar de existirem ensaios mais modernos para a determinação dos parâmetros mecânicos das misturas asfálticas como o proposto por NASCIMENTO (2015), os ensaios de compressão diametral ainda são os mais difundidos e utilizados no país. Neste momento em que é urgente se modernizar o método de dimensionamento de pavimentos asfálticos, é importante mostrar que, mesmo com estes ensaios foi possível se ajustar uma função de transferência consistente, validada com trechos nacionais.

As principais conclusões desta tese foram:

A Função de Transferência definida nesta tese foi baseada no dano médio acumulado distribuído em 110 pontos sob a carga, obtido por análise elástica de múltiplas camadas com base nos ensaios mecânicos de módulo de resiliência e fadiga por compressão

diametral de misturas asfálticas, que permite calcular a área trincada para previsão de ruptura, como critério para definir a vida útil de um pavimento com uma boa correlação.

O programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas – AEMC, usado para determinar os danos médios acumulados dos segmentos experimentais avaliados neste estudo foi modificado por Franco em 2015 para incluir os cálculos necessários a esta tese. Atualmente o dano acumulado não é calculado somente na fibra inferior da camada do revestimento e sim em toda a camada asfáltica. Essa mudança foi importante visto que permitiu simular o que acontece em toda camada do revestimento inclusive nas situações de trincas de cima para baixo. O programa permite agora gerar imagens do dano acumulado para cada um dos períodos de análise em função dos eixos x e z em relação ao dano gerado no período.

A Função de Transferência definida nesta tese foi definida utilizando 45 segmentos experimentais construídos e monitorados desde sua implantação nas principais vias da Cidade Universitária da UFRJ, Rio de Janeiro. Esses segmentos apresentam várias condições em relação à capacidade estrutural e funcional. Para a determinação da Função de Transferência (FT) foram selecionados segmentos caracterizados mecanicamente por ensaio de fadiga e de módulo de resiliência por compressão diametral, submetidos a diferentes níveis de tráfego e diferentes situações de restauração, o que é importante essa variação de condicionantes para a definição da Função de Transferência.

Houve boa concordância entre a área trincada observada e calculada usando a Função de Transferência desenvolvida nesta tese, tanto para os segmentos usados para gerar a FT quanto em geral para os segmentos de validação. O ajuste R^2 0,56 desta função foi o dobro do obtido na calibração nacional inicial do MEPDG de 2004 R^2 0,27.

Os segmentos experimentais nacionais usados para validar a Função de Transferência definida nesta tese, seguiram os dados da calibração mostrando a boa correlação da Função de Transferência proposta. Isto mostra ser possível prever o desempenho de futuros segmentos com boa confiabilidade.

Outro fator importante modificado no programa AEMC é a possibilidade de analisar o dano médio acumulado com base no dano limitado ou livre. No presente trabalho os dois critérios foram avaliados, porém o que melhor representou a condição de previsão da área trincada foi o dano limitado. Esse critério foi escolhido no momento para o método de dimensionamento mecanístico empírico nível A do SisPavBR.

Considerando que a área trincada de campo é determinada com uma variabilidade natural, pode-se concluir que a área trincada em campo e o dano médio reduzido podem ser expressos por uma única relação, como mostrado nos segmentos do Projeto Fundão e nos segmentos Nacionais.

Os segmentos experimentais do Projeto Fundão que serviram para a definição e calibração da Função de Transferência e os segmentos experimentais nacionais utilizados para a validação da Função de Transferência apresentam muitas diferenças, tais como: faixas granulométricas, tipos e características dos ligantes asfálticos, capacidade estrutural, espessuras asfálticas variadas, condições climáticas, diferentes níveis de tráfego, entre outras variáveis. No entanto, mesmo com um cenário tão desafiador para as previsões do desempenho de área trincada, pode-se concluir que as análises elásticas para o dano médio acumulado baseado nos ensaios mecânicos de compressão diametral apresentaram uma boa capacidade preditiva e pode ser usado para previsões de desempenho de fadiga de pavimentos asfálticos no âmbito nacional no Brasil, de forma inicial. Naturalmente deve-se sempre acumular dados de outros segmentos monitorados para ajustes periódicos desta FT, que é a base decisiva de todo método M- E.

A previsão de erro médio observado nos 45 segmentos experimentais do Projeto Fundão usado para a calibração da Função de Transferência é de 0,38% com um erro padrão médio de 0,54%.

O fator de erro definido com a inclusão dos segmentos experimentais nacionais apresentou uma melhora em relação ao obtido nos segmentos usados para o desenvolvimento e calibração da Função de Transferência, diminuindo o erro padrão médio para 0,48%.

O R^2 obtido com a inclusão dos segmentos nacionais na FT apresentou melhora em relação ao R^2 obtido no desenvolvimento e calibração dos segmentos experimentais do Projeto Fundão passando de $R^2 = 0,56$ para $R^2 = 0,60$. Isto que indica que a Função de Transferência teve uma boa correlação com os segmentos nacionais.

O critério para quantificar a Área Trincada de campo mostrou-se bastante efetivo para definir e usar a Função de Transferência definida nesta tese.

O projetista pode utilizar curvas de fadiga inseridas no SisPavBR ou fadiga regional de sua confiança para a fase de anteprojeto, porém recomenda-se que na fase de projeto sejam feitos os ensaios mecânicos necessários para a checagem do projeto.

Algumas conclusões adicionais são:

O dano médio acumulado calculado pelo programa AEMC passou a ser realizado em uma malha distribuída em 110 pontos, malha de 10 por 11 pontos, na região das rodas do eixo padrão. Esse procedimento foi adotado também porque verificou-se que os danos de cima para baixo também afetam a taxa de crescimento do dano. O programa atual permite calcular o dano médio acumulado em duas camadas asfálticas.

Os índices de crescimento do dano médio têm forte correlação com o nível do dano médio quando começa a surgir a área trincada. Esses índices podem ser usados individualmente com um fator de ajuste "shift factor" do dano a fim de obter uma única relação entre o dano deslocado por este fator e a área trincada observada em campo.

Foram considerados para o cálculo do shift factor duas situações: Shift factor "S" que foi definido através da divisão do dano de referência pelo valor do dano com 10% de área trincada, e o Shift factor "DELTA" que foi definido através da subtração do dano de referência pelo valor do dano com 10% de área trincada. No entanto o Shift factor "S" apresentou melhor correlação com os danos de referência e foi definido para compor o calculo da Função "S".

A partir da Função “S” foi possível calcular o dano médio reduzido para cada um dos períodos, fazendo com que os danos reduzidos obtivessem uma única relação entre os danos de deslocamento e a área trincada observada em campo.

A partir da função “s” foi adotada a equação proposta por NASCIMENTO (2015) para o calculo da porcentagem da área trincada.

O programa de retroanálise “BackSisSavBR” usado neste estudo para determinar o módulo de elasticidade das camadas do pavimento dos segmentos experimentais a quente, permitiu retroanalizar estruturas de pavimentos avaliando a condição de aderido e não aderido entre as camadas asfálticas, limitar os valores de módulo mínimo e máximo para cada uma as camadas além de gerar um fator de erro entre a bacia medida com a bacia retroanalisada.

Os dados retroanalisados gerados para cada um dos segmentos contemplados neste estudo bem como os critérios adotados na retroanálise foram reproduzidos na íntegra no AEMC par o cálculo do dano médio acumulado.

O uso de simuladores de tráfego é uma alternativa para prever o desempenho de pavimentos asfálticos, conforme mostrado nos segmentos experimentais avaliados na dissertação de FRITZEN (2005) e validado com a Função de Transferência neste estudo. O desempenho observado com o simulador de tráfego permitiu prever o desempenho do pavimento em meses para o mesmo número de tráfego comercial e a Função de Transferência mostrou uma excelente correlação com os dados da dissertação e do acompanhamento sistemático com o desempenho do pavimento com o tráfego comercial.

O armazenamento dos materiais oriundos dos segmentos experimentais implantados no Projeto Fundão foi importante para análises por novos ensaios tais como os de tração direta das misturas asfálticas que permitiu o aproveitamento dos dados de monitoramento para duas teses com enfoques diferentes quanto à caracterização dos materiais: esta e a de Nascimento (2015).

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Validação da Função de Transferência com novos segmentos experimentais e continuação dos acompanhamentos sistemáticos dos segmentos usados neste estudo.
Análise de curvas de fadiga de misturas asfálticas por compressão diametral com níveis de tensão menores que as atuais que são de10, 20, 30, 40 e 50% da RT, bem como a possibilidade de utilizar uma frequência de carga diferente, como por exemplo, uma frequência de 2 Hz, ou seja, tempo de aplicação de carga de 1 Hz e de repouso de 0,45s.

Acompanhamentos sistemático dos segmentos experimentais analisados do Projeto Fundão para a confirmação da área trincada observada em relação a área trincada prevista pela Função de Transferência nos segmentos ainda pouco trincados.

Validação da Função de Transferência de trechos experimentais antigos, que disponham das características necessárias para sua utilização: MR, curva de fadiga, área trincada, volume de tráfego, estrutura do pavimento, entre outros. Os trechos experimentais previstos são:

- Rio Orla, segmento experimental construído no ano de 1991, possui 400 metros de extensão localizado na av. Sernambetiba, no Recreio dos Bandeirantes, cidade do Rio de Janeiro;
- Rodovia Carvalho Pinto, trecho experimental construído no ano de 1991, SP/070, possui 360 metros de extensão, localizado entre as estacas 5260 a 5278. O trecho experimental contempla 8 segmentos experimentais com variadas estruturas e o ligante utilizado foi CAP 20. Os ensaios mecânicos foram realizados no laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, segundo MACÊDO, (1996);
- Avenida dos Bandeirantes, localizado na cidade de São Paulo, uma das principais vias do município, contemplou a construção e monitoramento de 10 segmentos experimentais no ano de 1992. Os segmentos experimentais apresentam variadas estruturas, tais como: restauração e reconstrução;
- Outros trechos experimentais que atendam as premissas necessárias para a validação da Função de Transferência.

Comparação da Função de Transferência definida nesta tese versus o Fator Campo Laboratório definido por PINTO, (1981).

Análise da sensibilidade da Função de Transferência para diferentes níveis de confiabilidade (50, 75, 85, 90 e 95%) proposto no SisPavBR, baseado no guia de projeto da AASHTO (NCHRP, 2004), que considera que os modelos de previsão do dano em área trincada apresentem uma distribuição probabilística Normal.

Verificar o ajuste da Função "S" limitando o tempo em 80 ou 120 meses.

Verificar o comportamento dos danos médios acumulados, aumentando a área de calculo que atualmente está limitada a 32,85 cm, com o objetivo de ajuste melhor da FT.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – AASHTO

___.1993 "*AASHTO Guide for Design of Pavement Structures"* Washington, D.C.

___.2002 "*AASHTO Guide for Design of Pavement Structures"* Washington, D.C.

___.2002 (2006) "*Resistance to Degradation of Small- Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine"* Washington, D.C.

___.2010 "*T 167 Compressive Strength of Hot Mix Asphalt Mixtures"* Washington, D.C.

___.2011 "*T320 – 07 Standard Method of Test for Determining the Permanent Shear Strain and Stiffness of Asphalt Mixtures Using the Superpave Shear Tester"* Washington, D.C.

___.2014 "*T 85 Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate"* Washington, D.C.

___.2015 "*T 304-11 Standard Method of Test for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate"* Washington, D.C.

___.2015 "*AASHTO T 342 – 11 Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt Concrete Mixtures - HMA"* Washington, D.C.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT

___.NBR 15087/12 "*Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral*" 5p.

AFNOR – ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORNALISATION – NFP 98 – 253 – 1 (1991). "*Deformation Permanente des Mélanges Hydrocarbonés*", Paris, Juillet.

AUTOVIAS (2004). *Trecho Experimental – Simulador de Tráfego (SP -330 Pista Norte – KM 291+650 a KM 292+650.* Relatório Final – Dynatest , Relatório Técnico.

ASTM – STANDART TEST METHOD FOR

___.D 4791/05 "*Flat Particules, Elongated Particules, or Flat and Elongated Particules in Coarse Aggregate***"**

___.D 2419/02 "*Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate"*

___.D 4123/82 "*Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures"*

___.D 3497/95 "*Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures"*

AZAMBUJA, D. M, (2004). "Avaliação do Trincamento em Recapeamento Asfáltico Através da Técnica de Ensaios Acelerados" *17ª Encontro de Asfalto – IBP*, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2004.

BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P., *et al.* (2008). *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros.* Rio de Janeiro – Petrobras: Abeda.

BIANCHINI, M. R., JOHNSTON, M G., PASSOS, M .C .F., (2004). "Estudo Comparativo dos Efeitos da Variação da Carga e da Pressão dos Pneus nos Pavimentos Rodoviários**"** *ENACOR* 16p. Natal – RN.

BRITO, L. A. T., GRAEFF, A. G., (2009). *Métodos de Dimensionamento de Pavimentos – Metodologia e seus Impactos nos Projetos de Pavimentos Novos e Restaurados.* Pesquisa CONCEPA – ANTT.

CARDOSO, A. P. P., (2004). "Estudo em Laboratório do Comportamento Mecânico de Misturas Betuminosas Utilizadas em Pistas Experimentais", *17ª Encontro de Asfalto – IBP*, Rio de Janeiro – RJ, Brasil.

CERATTI, J. A., (1991). *Estudo do Comportamento a Fadiga de Solos Estabilizados com Cimento Para Utilização em Pavimentos.* Tese D.Sc. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ. www.coc.ufrj.br

CERATTI, J. A., NUÑEZ, W. P., GEHLING, W. Y., *et al.* (2000). "A Full-scale Study of Rutting of thin Pavements – Transportation Research Board". *79th Annual Meeting Washington - DC.*

CERATTI, J. A. P., (2007). *Análise de Estrutura de Pavimentos da Rodovia BR – 290/RS Através de Ensaios Acelerados*. Projeto de Pesquisa CONCEPA – LAPAV. Relatório Técnico Final. Porto Alegre – RS.

COPPE / UFRJ., (2015). "Execução de Estudos e Pesquisa para Elaboração de Método de Análise Mecanístico – Empírico de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos" Relatório Técnico nº 1 – Rio de Janeiro - RJ

COUTINHO, J. C. P., (2011). *Dimensionamento de Pavimento Asfáltico; Comparação do Método do DNER com um Método Mecanístico – Empírico Aplicado a um Trecho*. Dissertação M.Sc. UFOP, Ouro Preto – MG.

CRUZ, L. L., (2005). *Estudo Comparativo do Desempenho de um Recapeamento Utilizando Asfalto Borracha em Pavimentos Flexível*. Dissertação M.Sc. UFRGS, Porto Alegre – RS.

DAER/RS (2004). *Pesquisa Asfalto Borracha – RS/122 Trecho Rincão do Cascalho – São Vendelino*. Relatório Técnico Parcial.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER – (1981) "*Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis*".

___.ES 128/83: "*Levantamento da Condição de Superfície de Segmentos Testemunha de Rodovias de Pavimentos Flexíveis ou Semirrígidos para Gerência de Pavimentos a Nível de Rede*".

___.DNER PRO 10/79 "*Procedimento: Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis – Procedimento A"* 24p.

___.DNER PRO 11/79 "*Procedimento: Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis – Procedimento B"* 24p.

___.DNER PRO 159/85 *Procedimento: "Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis e Semirrígidos"* 31p.

___.DNER PRO 269/94 *Procedimento: "Projeto de Restauração de Pavimentos Flexíveis - TECNAPAV"* 17p.".

___.ME 092/94 *Solo – "Determinação da Massa Especifica Aparente in situ com Emprego do Frasco de Areia*".

___.DNIT ES 031/06 "*Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico"* 14p.

___.DNIT 089/94: "*Avaliação da Durabilidade pelo Emprego de Soluções de Sulfato de Sódio ou de Magnésio*" 6p.

___.DNIT PRO 006/2003: "*Procedimento: Avaliação Objetiva da Superfície de Pavimentos Flexíveis e Semirrígidos"* 10p.

___.DNIT PRO 008/2003 "*Procedimento: Levantamento Visual Continuo para Avaliação da Superfície de Pavimentos Flexíveis e Semirrígidos"* 11p.

___.ME 135/10 "*Determinação do Módulo de Resiliência de Misturas Betuminosas*".

___.ME 136/94 "*Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral de Misturas Betuminosas*".

EL – BASYOUNY, M., (2004). *Calibration and Validation of Asphalt Pavement Distress Models for 2002 Design Guide*. Dissertação de Ph.D., Arizona State University, Temple – AZ.

FRANCO, F. A. C. P., (2000). *Um Sistema para Análise Mecanística de Pavimentos Asfálticos*. Dissertação de M.Sc., Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ. www.coc.ufrj.br

FRANCO, F. A. C. P., (2007). *Método de Dimensionamento Mecanístico – Empírico de Pavimentos Asfálticos.* Tese D.Sc., Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ. www.coc.ufrj.br

FRITZEN, M. A., (2005). *Avaliação de Soluções de Reforço de Pavimento Asfáltico com Simulador de Tráfego na Rodovia Rio Teresópolis*. Dissertação M.Sc. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ. www.coc.ufrj.br

FRITZEN, M. A. e MOTTA, L, M, G., (2005). "Ensaio Acelerado Envolvendo Simulador de Tráfego Móvel – HVS, na BR-116/RJ, em Pista Experimental com Revestimento de CBUQ" *XIII CILA – Congresso Ibero Latino Americano del Asfalto*, San José – Costa Rica.

FRITZEN, M. A. e MOTTA, L, M, G., (2007). "Estudos Comparativos entre Trechos Experimentais Analisados com Simulador de Tráfego Móvel e com o Tráfego Comercial" *38ª RAPv e 12ª ENACOR*. Manaus – AM.

GONÇALVES, F. J. P., (2002). *Estudo do Desempenho de Pavimentos Flexíveis a Partir de Instrumentação e Ensaios Acelerados*. Tese de D.Sc., UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

JADOUN, F. M., (2011). *Calibration of the Flexible Pavement Distress Prediction Models in the Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (MEPDG) for North Carolina*. Degree of Ph. D. Graduate Faculty of North Carolina State University. Raleigh – North Carolina. USA.

JAE., (1995). *Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional* Junta Autônoma de Estradas, Almada – Portugal.

JOHNSTON, M, G., CERATTI, J, A, P e NUÑEZ, W, P., (2015). *Comparing a Low Volume Road Pavement Performance to Accelerated Pavement Testing Results*. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board. https://www.researchgate.net/publication/281208899

KANG, M e ADAMS, T., (2007). *Local Calibration for Fatigue Cracking Models Used in the Mechanistic – Empirical Pavement Design Guide.* Transportation Research Board, Washington D.C.

LACROIX, A. T., (2013). *Performance Prediction of the NCAT Test Track Pavements Using Mechanistic Models*. Degree of Ph. D. Graduate Faculty of North Carolina State University. Raleigh – North Carolina. USA.

LCPC, (2008). "*Labouratorie Central des Ponts et Chaussés"* Paris – França. www.lcpc.fr/fr/recherches/resultats_recents.

MACÊDO, J. A. G., (1996). *Interpretação de Ensaios Deflectométricos para Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis*. Tese Dsc. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ. www.coc.ufrj.br

MARQUES, G. L, O., (2044). *Utilização do Módulo de Resiliência como Critério de Dosagem de Mistura Asfáltica: Efeito da Compactação por Impacto e Giratória*. Tese D.Sc. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ. www.coc.ufrj.br

MARTINS, A. T., (2014). *Caracterização para a Validação do Ensaio de Resistência ao Dano por Fadiga para Ligantes Asfálticos*. Dissertação M.Sc. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ. www.coc.ufrj.br

MATTOS, J. R. G., (2014). *Monitoramento e Análise do Desempenho de Pavimentos Flexíveis da Ampliação da Rodovia BR – 290/RS – A Implantação do Projeto Rede Temática de Asfalto no Rio Grande do Sul* Tese de D.Sc. UFRGS, Porto Alegre –RS

MEDINA, J. e MOTTA, L, M, G., (2015). *Mecânica dos Pavimentos*. 3ª ed. Editora Interciências, Rio de Janeiro – RJ.

MEDINA, J., (1997). *Mecânica dos Pavimentos*. 1ª ed. editora UFRJ. Rio de Janeiro – RJ.

MEDRADO, W. A., (2009). *Caracterização Geotécnica de Solos da Região Norte de Minas Gerais para Aplicação em Obras Rodoviária*. Dissertação M.Sc. Escola de Minas / UFOP, Ouro Preto – MG.

METCALF, J., (1996). "Application of Full-scale Accelerated Pavement Testing" *National Cooperative Highway Research Program – NCHRP, Synthesis of Highway Practive 253: TRB, National Research Council*, Washington – USA.

MONISMITH, C, L., EPPS, J, A., e FINN, F, N., (1985) *Improved Asphalt Mix Design.* Proc. Of Asphalt Paving Technologists, Vol., 54, San Antonio, Texas.

MONISMITH, C, L., (2004) *Evolution of Long–Lasting asphalt Pavement Design Methodology***.** Disponível: http://asphalt.org/downloads/Monismith_lecture.pdf.

MONTESTRUQUE, G. E., (2002). *Contribuição para a Elaboração de Método de Projeto de Restauração de Pavimentos Asfálticos Utilizando Geossintéticos em Sistemas Anti – Reflexão de Trincas*. Tese Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, SP, Brasil.

MORAIS, C. G., (2015). *Análise de Bacias deflectométricas Obtidas por 4 Equipamentos do Tipo Falling Weight Deflectometer (FDW).* Dissertação M.Sc. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ. www.coc.ufrj.br

MOTTA, L. M. G., (1981). *"*Observações Sobre à Pista Experimental de Santa Catarina (areia – cal – cinza volante)*". 16ª RAPv*, pp187-241, Olinda – PE.

MOTTA, L. M. G., (1991). *Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis, Critério de Confiabilidade e Ensaios de Cargas Repetidas*. Tese Dsc. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ. www.coc.ufrj.br

MOTTA, L. M. G., MACÊDO, J. A. G., MEDINA, J., *et al.* (1995). "Avaliação Estrutural de Trechos Experimentais na Rodovia Carvalho Pinto – Análise Preliminar*". 29ª RAPv*, pp282-309, Cuiabá – MT.

MOTTA, L. M. G. e LEITE. L. M., (2002). *"*Desempenho de Trechos de Pavimentos Acompanhados nos Últimos 10 anos*". 16º Encontro de Asfalto – IBP*, Rio de Janeiro – RJ.

MOTTA, L. M. G., MEDRADO, W, A., FRITZEN, M, A., *et al.* (2012). "Implantação e Avaliação de Trechos Monitorados em Estradas Vicinal em Minas Gerais" *18º RPU*, São Luis – MA.

MOTTA, L. M. G. e MEDINA, J., (2015). *Execução de Estudos e Pesquisa para Elaboração de Método de Análise Mecanística – Empírico de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos*. Relatório Parcial 1 – Ministério dos transportes – Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre – Instituto de Pesquisas Rodoviárias.

MUTHADI, N. (2007). *Local Calibration of the MEPDG for Flexible Pavement Design.* Dissertação de MS, North Caroline State University, Raleigh, North Caroline.

NAKAHARA, S. M., (2005). *Estudo do Desempenho de Reforços de Pavimentos Asfálticos em Via Urbana Sujeita à Tráfego Comercial Pesado.* Tese D.Sc. EPUSP, São Paulo – SP

NASCIMENTO, L. A. H., (2008). *Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com o Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente*. Dissertação de M.Sc. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ. www.coc.ufrj.br

NASCIMENTO, L. A. H., CHACUR, M., ROCHA, S. M. N., (2009). *Novo Desenvolvimento de Soluções Tecnológicas de Pavimentação Asfáltica*. Relatório Técnico**,** RT LPE -017/09.

NASCIMENTO, L. A. H., ROCHA, S. M. N., NASCIMENTO, C. E. H., KIM, Y. R., CHACUR, M., MARTINS, A. T., (2014). *Uso da Mecânica do Dano Contínuo na Caracterização de Misturas Asfálticas Brasileiras*. 21º Encontro de Asfaltos do IBP.

NASCIMENTO, L. A. H., (2015). *Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil*. Degree of Ph. D. Graduate Faculty of North Carolina State University. Raleigh – North Carolina. USA.

NARDI, J. V., (1998). "Estudo de Solos Estabilizados Quimicamente, em Laboratório e Pista Experimental, na Implantação do Trecho Rio Rufino / BR-282, na Rodovia SC-427 no Estado de Santa Catarina". *31ª RAPv* – São Paulo – SP.

NCHRP., (2004). *2002 Design Guide for: Design of New and Rehabilitated Pavement Structures.* Draft Final Report. NCHRP Study 1-37A. National Cooperative Highway Research Program. Washington D.C. July,

NCHRP., (2004). *Guide for Mechanistic – Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures.* Draft Final Report. NCHRP Study 37-1A. National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council. Washington D.C.

NEGRÃO, D. P., (2012). *Contribuição para Calibração de Curvas de Evolução de Afundamentos em Trilha de Roda de Revestimentos Asfálticos com Utilização de Resultados Obtidos de Simulador de Tráfego em Escala Real***.** Tese D. Sc. EPUSP. São Paulo – SP.

NOVA DUTRA., (2007). *Estudo de Desempenho de Pavimentos com Distintos Ligantes Asfálticos*. Relatório Final – Tomo I, São Paulo - SP.

NUÑEZ, W. P., (1997). *Análise Experimental de Pavimentos Rodoviários com Basaltos Alterados*. Tese D.Sc. UFRGS, Porto Alegre – RS.

CNT DE RODOVIAS (2015). *Relatório Geral – Brasil*. CNT: SEST: SENAT. Brasília – DF. http://pesquisarodovias.cnt.org.br

PEREIRA, A. S. e MOTTA, L. M. G., (2001) "Avaliação de Dois Pavimentos com Camada Intermediária de Geotêxtil no Revestimento", *33ª RAPv* – Florianópolis – SC.

PEREIRA, A. S., (2002). *Utilização de Geotêxtil em Reforço de Pavimentos Aplicados em um Trecho Experimental*. Tese M. Sc. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ. www.coc.ufrj.br

PEREIRA, D. S. BALBO, J. T., SEVERI, A. A., *et al.* (2000). "Pista Experimental Instrumentada com Whitetopping Ultradelgado", *32ª RAP$_v$* – Brasília – DF.

PINTO, S., NARDI, J. E., MARCON, A., (1977). "Misturas do Tipo Areia – Cal – Cinza Volante: Pista Experimental de Santa Catarina", *13ª RAPv* – Curitiba – PR.

PINTO, S., (1980) "*Módulos Resilientes de Concreto Asfáltico*". DNER / IPR.

PINTO, S. (1991). *Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos*. Tese D. Sc. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ. www.coc.ufrj.br

PINTO, C. de S., (2002). *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas*. 2ª Edição, Oficina de Textos, São Paulo – SP.

PINTO, S., PREUSSLER, E. S., (2002). *Pavimentação Rodoviária – Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis*. – Rio de Janeiro. Editora COPIARTE, 269p.

PREUSSLER, E. S., VALE, A. F., CANDIRAS, C. M., *et al.*, (2005). "Asphalt Cold in Place Recycling: SP – 147 Experimental Section", *2th International Symposium on Pavement Recycling* – São Paulo – SP.

REIS, C. A. R., (2007). *Desenvolvimento de Equipamento e Método para Levantamento Visual Contínuo com Vídeo – Registro de Defeitos de Pavimentos Rodoviários*. Dissertação M.Sc. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ. www.coc.ufrj.br

ROHDE, L., (2007). *Estudo de Misturas Asfálticas de Módulo Elevado para Camadas Estruturais de Pavimentos*. Tese D. Sc. UFRGS, Porto Alegre – RS.

SA, M, F, P., (1996). *Estudo da Deformação Permanente de Misturas Betuminosas Através de Ensaios Estáticos e Dinâmicos*. Dissertação M.Sc. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ. www.coc.ufrj.br

SA, M, F, P., (2003). *Influência do Tráfego na Infraestrutura Viária e Misturas Asfálticas Testadas em Simuladores de Tráfego para Corredores de Ônibus*. Tese D. Sc. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ. www.coc.ufrj.br

SANTOS, M. S., (2015). *Desenvolvimento de Modelos de Previsão de Desempenho a Partir da Implantação de Trechos Monitorados na Região de Santa Maria*. Dissertação M. Sc. UFSM, Santa Maria – RS.

SEVERO, L. E. P., RUWER, P., MORILHA, A. Jr., *et al.*, (2004) "Trecho Experimental de Asfalto Borracha na Rodovia BR-116: Monitoramento e Análise do Desempenho", *17ª Encontro de Asfalto – IBP* – Rio de Janeiro – RJ.

SHRP – A/IR - 90 - 011, (1990) "*Summary Report on Fatigue Response of Asphalt Mixtures*", Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.

SILVA, C. F. S. C. (2014). *Análise de Tensões em Pavimentos a Partir de Modelo Físico Instrumentado*. Dissertação M. Sc. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ. www.coc.ufrj.br

SILVA, P. D. E. A. (2001). *Estudo do Reforço de Concreto de Cimento Portland (WHITETOPPING) na Pista Circular Experimental do Instituto e Pesquisas Rodoviárias*. Tese D. Sc. COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ. www.coc.ufrj.br

SOARES, J. MORENO, A. M., MOTTA, L. M. G., (2009) "Aspectos Gerais de Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos de Vários Países e a Relação com um Novo Método Brasileiro*"* *Revista ABPv Pavimentação*, nº 14, Rio de Janeiro – RJ.

SOARES, J, B., OLIVEIRA, J, A., OLIVEIRA, A, H., *et al.* (2015). *Desenvolvimento de um Método de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos SDIMPA (Sistema de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos).* Relatório Técnico Parcial, UFC, Fortaleza – CE.

TONIAL, I, A., (2001). *Influência do Envelhecimento do Revestimento Asfáltico na Vida de Fadiga de Pavimentos.* Dissertação M. Sc. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ. www.coc.ufrj.br

TURNBULL, W. J. FOSTER, C.R., AHLVIN, R. G., (1962) "*Design of Flexible Airfield Pavements for Multiple Wheel Landing Gear Assemblies"* US Army Corps of Engineers Waterways – Experimental Section. USA.

UZAN, J., (1978). *JULEA – Jacob Uzan Layered Elastic Analysis Program*, USA.

VALE, A. F., (2008). *Método de Uso de Simuladores de Tráfego Linear Móvel de Pista para a Determinação de Comportamento e Previsão do Desempenho de Pavimentos Asfálticos.* Tese D.Sc. EPUSP – São Paulo – SP.

VIANNA, A. A. D., (2002). *Contribuição para o Estabelecimento de um Material – Padrão e de Metodologia para Calibração de equipamentos de Ensaios Dinâmicos.* Dissertação M.Sc. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ. www.coc.ufrj.br

VIANNA, A. A. D., MOTTA, L, M, G., DOMINGUES, R, G., (2003). *Ensaio de Compressão Axial de CBUQ – uma Nova Técnica de Medição das Deformações.* In: XVI Congresso Nacional de Ensaios e Pesquisa em Transportes. Rio de Janeiro / RJ: ANPET.

VIEIRA, C. S., (2000). "Construção de Pista Experimental com Geotêxteis Não Tecidos para Estudo de Reflexão de Trincas em Revestimentos Asfálticos", *32ª RAP$_{v,}$* pp. 861 – 871, Brasília – DF.

YODER, E. J e WITCZAK, M. W., (1975). "Principles of Pavement Design*" 2nd New York*, John Wiley & SONS, INC.

WICKBOLDT, V. S., (2005). *Ensaios Acelerados de Pavimentos para Avaliação de Desempenho de Recapeamento Asfálticos***.** Dissertação M. Sc. UFRGS, Porto Alegre – RS.

www.cnt.org.br
www.denatran.gov.br
www.pu.ufrj.br
www.standartsforhighways.co.uk
http://www.idaillinois.org/cdm/ref/collection
http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/12571/Relatorios_de_Pesquisa___RDT.html Relatório Técnico Fundação Coppetec