



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Thaís Aparecida dos Santos Lopes

**Análise do efeito da sazonalidade da temperatura e do tráfego no desempenho de pavimentos flexíveis: segmentos monitorados de Araranguá-SC**

Florianópolis  
2019

Thaís Aparecida dos Santos Lopes

**Análise do efeito da sazonalidade da temperatura e do tráfego no desempenho de pavimentos flexíveis: segmentos monitorados de Araranguá-SC**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil.  
Orientador: Prof. Dr. Glicério Trichês

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Lopes, Thais Aparecida dos Santos

Análise do efeito da sazonalidade da temperatura e do tráfego no desempenho de pavimentos flexíveis : segmentos monitorados de Araranguá-SC / Thais Aparecida dos Santos Lopes ; orientador, Glicério Trichês, 2019.

328 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Pavimentos flexíveis. 3. Segmentos monitorados. 4. Desempenho. I. Trichês, Glicério. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Thaís Aparecida dos Santos Lopes  
**Análise do efeito da sazonalidade da temperatura e do tráfego no desempenho de pavimentos flexíveis:** segmentos monitorados de Araranguá-SC

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Lélío Antônio Teixeira Brito, Dr.  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof.a Liseane Padilha Thives, Dra.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Luís Alberto Herrmann do Nascimento, Dr.  
CENPES – Petrobrás

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

---

Prof. Dra. Poliana Dias de Moraes  
Coordenadora do Programa

---

Prof. Dr. Glicério Trichês  
Orientador

Florianópolis, 2019.

Dedico este trabalho aos meus pais, José Domingos e Solange, a minha irmã, Julia, e ao meu esposo, Luiz Vinicius, que sempre estiveram ao meu lado.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo dom da vida, pelas oportunidades que me foram dadas e por ter me guiado e abençoado nesta caminhada.

Aos meus pais, José Domingos e Solange, e a minha irmã, Julia, pelo amor incondicional, por todo apoio e incentivo durante esses anos e por não medirem esforços para que eu pudesse realizar os meus estudos.

Ao meu esposo, Luiz Vinicius, pelo amor e companheirismo, pela paciência nos períodos de ausência e por sempre me incentivar a ir em busca dos meus sonhos.

Ao meu orientador, Prof. Glicério Trichês, pela oportunidade, por todo ensinamento compartilhado, pela confiança, pela amizade e pelo incentivo. Obrigada por todo tempo dedicado e por me ajudar a solucionar os obstáculos encontrados no decorrer da pesquisa.

Ao Dr. Luís Alberto Nascimento, pela disponibilidade e pelo suporte e auxílio com as análises no *software* LVECD.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pelos ensinamentos e por todo aprendizado.

Aos meus colegas e amigos do Laboratório de Pavimentação, pelo incentivo, pela parceria e pela colaboração prestada no decorrer da pesquisa.

À Rede Temática de Tecnologia em Asfalto/PETROBRAS, pelos investimentos realizados no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pela concessão da bolsa de mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pelo apoio dado a realização do presente trabalho – Código de Financiamento 001.

Enfim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento desta dissertação.

Muito obrigada!

## RESUMO

O método mais utilizado para o dimensionamento de pavimentos flexíveis brasileiros apresenta embasamento essencialmente empírico. Esse método possui restrições, como a ausência de caracterização das condições climáticas regionais, a impossibilidade de inclusão de novos materiais e a falta de compatibilidade entre tensões e deformações com o tráfego previsto no período de projeto. Neste cenário, a Petrobrás, em parceria com universidades brasileiras, criou o projeto Rede Temática de Tecnologia em Asfalto. Um dos objetivos do projeto é o desenvolvimento de um banco de dados em nível nacional sobre o desempenho de segmentos monitorados construídos em rodovias brasileiras para dar suporte ao desenvolvimento do novo método Brasileiro de dimensionamento de pavimentos flexíveis. Esta pesquisa tem como objetivo principal avaliar o desempenho funcional e estrutural de três segmentos monitorados construídos em Santa Catarina, na rodovia BR-101/SC, em Araranguá. O monitoramento do desempenho dos segmentos foi realizado periodicamente desde a abertura ao tráfego em março de 2014, sendo possível analisar sua evolução ao longo do tempo. A partir dos levantamentos em campo foi verificado que o segmento monitorado composto por mistura asfáltica convencional sobre mistura modificada por borracha apresentou menor afundamento de trilha de roda, irregularidade longitudinal, porcentagem de área trincada e deflexão máxima do que os segmentos com apenas mistura convencional no revestimento. A combinação utilizada mostrou-se promissora notadamente no retardamento do trincamento por fadiga. Os dados dos levantamentos de campo foram comparados aos resultados de estimativa de vida útil obtidos a partir de dois procedimentos: ensaio de flexão a 4 pontos com análise no *software* Viscoroute e análise com emprego do *software* LVECD e função de transferência obtida por Nascimento (2015). As análises a partir do LVECD foram capazes de prever estimativa de vida útil para diferentes porcentagens de área trincada, enquanto que o método a partir do Viscoroute apresentou fator de calibração variando de 0,4 a 12,4 para 1%, 10% e 20% de área trincada. O efeito da sazonalidade da temperatura no desempenho do pavimento apresentou confronto de resultados. Com a inclusão da temperatura regional, a estimativa de vida útil no Viscoroute foi cerca de 85% a 90% menor do que a prevista com temperatura constante de 20°C. Porém, no LVECD, a estimativa de vida útil aumentou entre 50 a 90% com a inclusão da sazonalidade.

**Palavras-chave:** Pavimentos Flexíveis. Segmentos monitorados. Desempenho.

## ABSTRACT

The method widely used for Brazilian flexible pavements design has an empirical basis essence. Such method has restrictions as the lack of regional climatic conditions characterization, the impossibility of including new materials and the lack of compatibility between stresses and strains with the design traffic. In this scenario, Petrobrás, in partnership with Brazilian universities, created a research network named *Rede Temática de Tecnologia em Asfalto*. One of the project objectives is the development of a nationwide database on the performance of monitored segments built on Brazilian highways in order to give a support to the development of the new Brazilian flexible pavement design method. The present study has as main objective to evaluate the functional and structural performance of three monitored segments constructed in Santa Catarina, insert on BR-101 /SC highway, in Araranguá. Segment performance monitoring has been carried out periodically since its opening to traffic in March 2014, being possible to analyze its evolution over time. From the field surveys it was observed that the monitored segment composed of conventional asphalt mix above rubber modified mixture presented less rutting in the wheel track, longitudinal roughness, percentage of cracked area and maximum deflection than segments with only conventional mixture. The combination used was shown to be promising specially to delay the appearance of fatigue cracks. The data from the field surveys were compared to the results of life estimation obtained from two procedures: 4-point flexion test with Viscoroute analysis and LVECD software analysis with transfer function obtained by Nascimento (2015). The method from LVECD was able to estimate the service life for different percentages of cracked area, while the method from the Viscoroute showed a calibration factor ranging between 0.4 and 12.4 for 1%, 10% and 20% of cracked area. The effect of seasonal temperature on pavement performance presented different results. It was observed that with the inclusion of the regional temperature the estimated service life through Viscoroute was about 85% to 90% lower than the estimated with a constant temperature of 20°C. However, using LVECD, the estimated service life considering the inclusion of seasonality was increased between 50% and 90%.

**Keywords:** Flexible Pavements. Monitored road segments. Performance.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma de um método mecanístico-empírico.....	31
Figura 2 – Evolução dos métodos de dimensionamento de pavimentos.....	32
Figura 3 – Fluxograma da análise do desempenho do pavimento incorporado no LVECD.....	34
Figura 4 – Malha de pontos considerada para o cálculo do dano médio ( $N/N_f$ ).....	36
Figura 5 – Esquema de localização das trincas em campo.....	36
Figura 6 – Comparação entre área trincada observada e prevista.....	38
Figura 7 – Solicitações de tráfego e clima no pavimento.....	40
Figura 8 – Camadas asfálticas deformadas durante a passagem de uma carga.....	41
Figura 9 – Sinal da deformação longitudinal e transversal na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico.....	42
Figura 10 – Possíveis acessos de água no pavimento.....	43
Figura 11 – Temperatura x profundidade, a cada 2 horas (24/09/1978).....	45
Figura 12 – Mudança de temperatura em função da profundidade e do tempo em Michigan.....	45
Figura 13 – Perfil de temperatura em diferentes horários do dia.....	46
Figura 14 – Estrutura dos trechos monitorados.....	47
Figura 15 – Temperatura medida no pavimento 1 e temperatura do ar.....	48
Figura 16 – Relação entre deflexão máxima e temperatura do pavimento.....	48
Figura 17 – Comparação da evolução da área trincada em relação aos modelos de desempenho.....	51
Figura 18 – Valores máximos (trilha externa) dos dois trechos monitorados (BR-290/RS).....	52
Figura 19 – Evolução da irregularidade longitudinal dos trechos monitorados da BR-448/RS.....	53
Figura 20 – Defasagem entre tensão e deformação.....	57
Figura 21 – Representação do módulo complexo.....	59
Figura 22 – Esquematização do modelo generalizado de Maxwell.....	60
Figura 23 – Modelo reológico de Huet-Sayegh.....	61
Figura 24 – Estágios do processo de fadiga.....	63
Figura 25 – Esquema dos mecanismos de aparecimento das trincas <i>top-down</i> .....	64
Figura 26 – Variação da curva de fadiga com a temperatura do ensaio de fadiga à flexão em 4 pontos.....	69

Figura 27 – Variação da vida de fadiga com a temperatura do ensaio de fadiga à flexão em 2 pontos. ....	69
Figura 28 – Distribuição de temperatura para diferentes intervalos de média. ....	75
Figura 29 – Esquema de cálculo da vida útil do pavimento. ....	76
Figura 30 – Distribuição de tráfego típica em áreas urbanas. ....	77
Figura 31 – Estimativa de vida útil para cada estrutura. ....	78
Figura 32 – Estruturas de pavimento modeladas. ....	79
Figura 33 – Efeito do intervalo de temperatura na estimativa de vida útil do pavimento. ....	81
Figura 34 – Relação entre desempenho à fadiga e temperatura do revestimento asfáltico, com modelos desenvolvidos por Rossato (2015). ....	82
Figura 35 – Relação entre desempenho à fadiga e temperatura do revestimento asfáltico, com modelo de Franco (2007). ....	83
Figura 36 – Consumo de desempenho à fadiga para a mistura CALAB 50/70. ....	84
Figura 37 – Dados de temperatura do ar (°C) em uma cidade do nordeste e do sul do Brasil. ....	85
Figura 38 – Dano médio em função do tráfego com variação de temperatura. ....	86
Figura 39 – Levantamentos em 2017: (a) Levantamento deflectométrico e (b) Perfilômetro a Laser. ....	99
Figura 40 – Levantamentos em 2018: (a) pintura e (b) medição das trincas, (c) afundamento de trilha de roda, (d) mancha de areia e (e) Pêndulo Britânico. ....	102
Figura 41 – Levantamento de defeitos na superfície em 2018. ....	105
Figura 42 – Esquema utilizado para ajustar os dados do levantamento de 2015 (Segmento 04). ....	107
Figura 43 – Curva característica de dano das misturas asfálticas de Araranguá. ....	108
Figura 44 – Esquema da configuração de carregamento utilizada na simulação numérica. ...	110
Figura 45 – Fluxograma resumido da etapa 5. ....	113
Figura 46 – Média horária de temperatura do ar nos meses de janeiro (2008-2017). ....	114
Figura 47 – Volume horário médio de tráfego em janeiro de 2017. ....	115
Figura 48 – Esquema de revestimento asfáltico dividido em subcamadas com as profundidades de cálculo de temperatura. ....	117
Figura 49 – Malha de pontos definidas para cálculo do dano médio na seção transversal embaixo da carga. ....	124
Figura 50 – Localização dos segmentos monitorados na rodovia BR-101/SC. ....	127
Figura 51 – Esquema de localização dos segmentos monitorados de Araranguá. ....	129

Figura 52 – Estrutura do pavimento nos segmentos monitorados de Araranguá. ....	129
Figura 53 – Curvas de fadiga à 4 pontos para as misturas asfálticas utilizadas em Araranguá. .....	131
Figura 54 – Afundamento de trilha de roda na faixa esquerda do Segmento 05.....	133
Figura 55 – Afundamento de trilha de roda na faixa direita do Segmento 05.....	133
Figura 56 – Afundamento de trilha de roda na faixa esquerda do Segmento 03.....	134
Figura 57 – Afundamento de trilha de roda na faixa direita do Segmento 03.....	134
Figura 58 – Afundamento de trilha de roda na faixa esquerda do Segmento 04.....	135
Figura 59 – Afundamento de trilha de roda na faixa direita do Segmento 04.....	135
Figura 60 – Representatividade de ATR faixa esquerda. ....	137
Figura 61 – Representatividade de ATR faixa direita. ....	137
Figura 62 – IRI médio e desvio padrão. ....	138
Figura 63 – Deflexões máximas segmento 05.....	140
Figura 64 – Deflexões máximas segmento 03.....	140
Figura 65 – Deflexões máximas segmento 04.....	141
Figura 66 – Raio de curvatura no Segmento 05. ....	142
Figura 67 – Raio de curvatura no Segmento 03. ....	142
Figura 68 – Raio de curvatura no Segmento 04. ....	143
Figura 69 – Defeitos superficiais nos segmentos monitorados. ....	144
Figura 70 – Afundamento de trilha de roda na faixa direita do Segmento 05.....	146
Figura 71 – Afundamento de trilha de roda na faixa direita do Segmento 03.....	146
Figura 72 – Afundamento de trilha de roda na faixa direita do Segmento 04.....	147
Figura 73 – Representatividade de ATR faixa direita. ....	148
Figura 74 – Evolução de ATR médio em função do tráfego.....	150
Figura 75 – Bombeamento de finos observado no levantamento de 2018.....	151
Figura 76 – Afundamento de trilha de roda nos segmento 05 em 2018.....	151
Figura 77 – Afundamento de trilha de roda nos segmento 03 em 2018.....	152
Figura 78 – Afundamento de trilha de roda nos segmento 04 em 2018.....	152
Figura 79 – Evolução da porcentagem de pontos com ATR acima de 12 mm em função do tempo. ....	153
Figura 80 – Evolução de IRI em função do tráfego ( $N_{USACE}$ ). ....	155
Figura 81 – Trincas do tipo FC-3 no segmento 04 em novembro de 2018.....	157

Figura 82 – Evolução da porcentagem de área trincada em relação à área da faixa direita em função do tráfego.....	158
Figura 83 – Trincamento no segmento 05 em novembro de 2018.....	159
Figura 84 – Trincamento no segmento 03 em novembro de 2018.....	159
Figura 85 – Trincamento no segmento 04 em novembro de 2018.....	159
Figura 86 – Evolução de porcentagem de área trincada na trilha de roda em função do tráfego atuante.....	160
Figura 87 – Evolução de VRD médio em função do tráfego. ....	162
Figura 88 – Evolução de altura de mancha de areia (HS) em função do tráfego.....	163
Figura 89 – Evolução de IFI em função do tráfego.....	164
Figura 90 – Evolução da deflexão média nos segmentos monitorados em função do tráfego. ....	165
Figura 91 – Evolução de porcentagem de área trincada através do método de medição de área e mapeamento por células em função do tráfego. ....	168
Figura 92 – Contorno de dano para os segmentos de Araranguá com 36 meses. ....	170
Figura 93 – Furo para extração de corpo de prova com evidência do mecanismo de trincamento.....	171
Figura 94 – Porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD para o segmento 05.....	172
Figura 95 – Porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD para o segmento 03.....	173
Figura 96 – Porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD para o segmento 04.....	173
Figura 97 – Comparação entre porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD. ....	175
Figura 98 – Linha de tendência para porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD com 50% de confiabilidade para o Segmento 05.....	176
Figura 99 – Linha de tendência para porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD com 50% de confiabilidade para o Segmento 03.....	176
Figura 100 – Linha de tendência para porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD com 50% de confiabilidade para o Segmento 04.....	177
Figura 101 – Número de solicitações de tráfego em campo e previsto pelo LVECD para dada porcentagem de área trincada. ....	178

Figura 102 – Número de solicitações de tráfego em campo e previsto pelo LVECD para 1%, 10% e 20% de área trincada. ....	179
Figura 103 – Linha de tendência para porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD com 85% de confiabilidade para o Segmento 05. ....	180
Figura 104 – Linha de tendência para porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD com 85% de confiabilidade para o Segmento 03. ....	180
Figura 105 – Linha de tendência para porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD com 85% de confiabilidade para o Segmento 04. ....	181
Figura 106 – Número de solicitações de tráfego em campo e previsto pelo LVECD com 85% de confiabilidade para dada porcentagem de área trincada. ....	182
Figura 107 – Número de solicitações de tráfego em campo e previsto pelo LVECD com 85% de confiabilidade para 1%, 10% e 20% de área trincada. ....	183
Figura 108 – Correlação entre $N_{\text{medido}}$ (estimado pela contagem) e $N_{\text{previsto}}$ (pelo LVECD) válida para porcentagem de área trincada entre 0 e 20%. ....	183
Figura 109 – Esquema do trincamento se iniciando: na camada inferior (1) e na camada superior (2). ....	185
Figura 110 – N de campo, N previsto no LVECD e no ensaio de flexão 4 pontos e análise no Viscoroute para 1%, 10% e 20% de área trincada. ....	188
Figura 111 – N de campo, N previsto no LVECD e no ensaio de flexão 4 pontos e análise no Viscoroute para 1%, 10% e 20% de área trincada no segmento 03. ....	190
Figura 112 – Porcentagem de área trincada medida e prevista para a camada superior (CAP 50/70) do segmento 03. ....	193
Figura 113 – Porcentagem de área trincada medida e prevista para a camada inferior (asfalto-borracha) do segmento 03. ....	193
Figura 114 – Linha de tendência para porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD com 85% de confiabilidade para a mistura convencional (CAP 50/70) do Segmento 03. ....	194
Figura 115 – Linha de tendência para porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD com 85% de confiabilidade para a mistura modificada (BMP) do Segmento 03. ...	195
Figura 116 – N de campo, previsto no LVECD e no ensaio de flexão 4 pontos/Viscoroute para 1%, 10% e 20% de área trincada nas misturas do segmento 03. ....	197
Figura 117 – Média horária de temperatura do ar em cada mês (2008 a 2017). ....	199
Figura 118 – Volume horário médio de tráfego em 2017. ....	199

Figura 119 – Distribuição horária de tráfego nos segmentos monitorados. ....	200
Figura 120 – Gradiente de temperatura ao longo do dia no revestimento do segmento 05 nos meses de fevereiro e julho. ....	209
Figura 121 – Deformação específica de tração no período das 06h – 13h. ....	214
Figura 122 – Deformação específica de tração no período das 13h – 20h. ....	214
Figura 123 – Deformação específica de tração no período das 20h – 06h. ....	215
Figura 124 – Variação do $N_f$ admissível ao longo do ano no segmento 05. ....	216
Figura 125 – Variação do $N_f$ admissível ao longo do ano na mistura convencional do segmento 03. ....	217
Figura 126 – Variação do $N_f$ admissível ao longo do ano na mistura modificada do segmento 03. ....	217
Figura 127 – Variação do $N_f$ admissível ao longo do ano no segmento 04. ....	218
Figura 128 – Resumo do procedimento de cálculo do dano. ....	220
Figura 129 – Dano acumulado com sazonalidade de temperatura no período de projeto. ....	221
Figura 130 – Dano acumulado com sazonalidade de temperatura nos 12 meses iniciais. ....	222
Figura 131 – Dano acumulado no período de projeto com temperatura de 20°C. ....	223
Figura 132 – Estimativa de vida útil a partir do dano acumulado. ....	224
Figura 133 – Porcentagem de área trincada medida <i>versus</i> dano acumulado com variação de temperatura e com temperatura constante (20°C) em cada segmento. ....	229
Figura 134 – Relação entre porcentagem de área trincada e dano acumulado com variação de temperatura e com temperatura constante. ....	229
Figura 135 – Dano médio acumulado no período de projeto para os três segmentos monitorados. ....	235
Figura 136 – Porcentagem de área trincada na trilha de roda <i>versus</i> dano médio acumulado em escala semi-log. ....	236
Figura 137 – Relação entre o fator de ajuste (F) e o tempo em meses para atingir 5 de dano médio acumulado ( $T_5$ ). ....	237
Figura 138 – Relação entre porcentagem de área trincada na trilha de roda e dano médio acumulado ajustado. ....	238
Figura 139 – Comparação entre porcentagem de área trincada medida e prevista através do modelo de dano médio acumulado ajustado. ....	239
Figura 140 – Contorno de dano para os segmentos de Araranguá com 36 meses considerando a sazonalidade de temperatura. ....	241

Figura 141 – Linha de tendência para porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD com 85% de confiabilidade para o segmento 05, considerando a sazonalidade de temperatura.....	243
Figura 142 – Linha de tendência para porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD com 85% de confiabilidade para o segmento 03, considerando a sazonalidade de temperatura.....	243
Figura 143 – Linha de tendência para porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD com 85% de confiabilidade para o segmento 04, considerando a sazonalidade de temperatura.....	244
Figura 144 – Número de solicitações de tráfego em campo e previsto pelo LVECD com 20°C e com sazonalidade de temperatura regional.....	245

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Exemplo de planilha de dados do levantamento de 2015 (Segmento 04).....	106
Quadro 2 – Coeficientes de regressão da curva característica de dano das misturas asfálticas de Araranguá.....	108
Quadro 3 – Resumo das combinações analisadas. ....	120
Quadro 4 – Deformação específica de tração ( $\times 10^{-6}$ ), $N_{ruptura}$ e porcentagem de área trincada equivalente.....	185
Quadro 5 – Fator de calibração necessário para o Segmento 05.....	186
Quadro 6 – Fator de calibração necessário para o Segmento 04.....	187
Quadro 7 – Fator de calibração necessário para o Segmento 03.....	190
Quadro 8 – Fator de calibração necessário para a mistura asfáltica convencional do segmento 03.....	196
Quadro 9 – Fator de calibração necessário para a mistura asfáltica modificada do segmento 03.....	196
Quadro 10 – Deformação específica no segmento 05 em cada ponto da malha nos meses de janeiro a abril ( $\times 10^{-6}$ mm/mm). ....	231
Quadro 11 – Deformação específica no segmento 05 em cada ponto da malha nos meses de maio a agosto ( $\times 10^{-6}$ mm/mm). ....	232
Quadro 12 – Deformação específica no segmento 05 em cada ponto da malha nos meses de setembro a dezembro ( $\times 10^{-6}$ mm/mm). ....	233

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fator campo/laboratório obtido por Luz (2017). .....	73
Tabela 2 – Levantamentos realizados em Araranguá. ....	98
Tabela 3 – Parâmetros das camadas elásticas da estrutura do pavimento. ....	107
Tabela 4 – Parâmetros reológicos do modelo de Huet-Sayegh para as misturas asfálticas de Araranguá. ....	109
Tabela 5 – Informações da estação meteorológica automática de Araranguá. ....	113
Tabela 6 – Espessura das subcamadas dos segmentos monitorados. ....	117
Tabela 7 – Modelos de fadiga das misturas dos segmentos de Araranguá. ....	119
Tabela 8 – Tráfego anual de projeto e tráfego considerado por dia. ....	120
Tabela 9 – Profundidade (cm) de cada ponto da malha na direção vertical para cada segmento monitorado. ....	124
Tabela 10 – $N_{8,2tf}$ anual e acumulado pelo método do USACE e da AASHTO. ....	128
Tabela 11 – Resultados do ensaio de deformação permanente. ....	130
Tabela 12 – Modelo de fadiga das misturas utilizadas nos segmentos monitorados. ....	131
Tabela 13 – Média e desvio padrão de ATR (mm) em 2017. ....	136
Tabela 14 – Valores de IRI médio (m/km) e desvio padrão. ....	139
Tabela 15 – Deflexões máximas médias e desvio padrão (x 0,01 mm). ....	141
Tabela 16 – Módulos de resiliência obtidos por retroanálise das bacias de deflexão medidas em 2017. ....	143
Tabela 17 – Porcentagem de área trincada em relação à área total da faixa direita e em relação à área da trilha de roda. ....	145
Tabela 18 – Média e desvio padrão de ATR (mm) em 2018. ....	147
Tabela 19 – Valores médios e desvio padrão de microtextura, macrotextura e IFI. ....	149
Tabela 20 – Evolução de ATR (mm) médio. ....	150
Tabela 21 – Evolução da porcentagem de pontos com ATR acima de 12 mm (%). ....	153
Tabela 22 – Evolução de IRI (m/km) médio. ....	154
Tabela 23 – Evolução de área trincada por tipo de trinca (m <sup>2</sup> ). ....	156
Tabela 24 – Evolução de porcentagem de área trincada em relação à área da faixa direita. ....	157
Tabela 25 – Evolução de porcentagem de área trincada em relação à área da trilha de roda. ....	160
Tabela 26 – Evolução de VRD médio. ....	162
Tabela 27 – Evolução de HS médio (mm). ....	163

Tabela 28 – Evolução de deflexão média (0,01 mm).....	165
Tabela 29 – Evolução dos módulos de resiliência obtidos por retroanálise das bacias de deflexão medidas em 2014, 2016 e 2017. ....	166
Tabela 30 – Evolução da porcentagem de área trincada em medição de área e mapeamento por células. ....	168
Tabela 31 – Previsão de porcentagem de área trincada com LVECD (%). ....	171
Tabela 32 – Número de solicitações de tráfego em campo e previsto pelo LVECD para 1%, 10% e 20% área trincada. ....	177
Tabela 33 – Número de solicitações de tráfego em campo e previsto pelo LVECD para 1%, 10% e 20% área trincada com 85% de confiabilidade. ....	181
Tabela 34 – Modelo de fadiga das misturas asfálticas utilizadas em Araranguá. ....	184
Tabela 35 – Previsão de porcentagem de área trincada com LVECD para as camadas asfálticas do segmento 03 (%). ....	191
Tabela 36 – N de campo e previsto no LVECD para 1%, 10% e 20% área trincada para as camadas do segmento 03. ....	195
Tabela 37 – Distribuição do volume de tráfego nos períodos analisados. ....	201
Tabela 38 – Distribuição do tráfego diário em cada período do dia analisado. ....	202
Tabela 39 – Temperatura média do ar e velocidade média do vento nos três períodos do dia para cada mês.....	203
Tabela 40 – Média da amplitude de variação de temperatura e radiação solar durante o dia em cada mês. ....	204
Tabela 41 – Propriedades físicas das misturas asfálticas encontradas na literatura. ....	205
Tabela 42 – Gradiente de temperatura (°C) no revestimento do Segmento 05. ....	206
Tabela 43 – Gradiente de temperatura (°C) no revestimento do Segmento 03. ....	207
Tabela 44 – Gradiente de temperatura (°C) no revestimento do Segmento 04. ....	208
Tabela 45 – Deformação específica de tração no segmento 05 com sazonalidade de temperatura ( $\times 10^{-6}$ mm/mm).....	211
Tabela 46 – Deformação específica de tração no segmento 03 com sazonalidade de temperatura ( $\times 10^{-6}$ mm/mm).....	211
Tabela 47 – Deformação específica de tração no segmento 04 com sazonalidade de temperatura ( $\times 10^{-6}$ mm/mm).....	212
Tabela 48 – Deformação específica de tração com temperatura constante. ....	213

Tabela 49 – Porcentagem de área trincada medida na trilha de roda e dano acumulado com temperatura constante e temperatura sazonal. ....	228
Tabela 50 – Porcentagem de área trincada na trilha de roda e dano médio acumulado até cada levantamento.....	235
Tabela 51 – Fator de ajuste (F) multiplicativo para que 10% de área trincada corresponda a dano médio acumulado igual a 5. ....	237
Tabela 52 – Dano médio acumulado ajustado ( $N/N_f$ méd. ajust.) com o fator de ajuste (F). ....	238
Tabela 53 – Previsão de porcentagem de área trincada com LVECD considerando a sazonalidade da temperatura (%). ....	242
Tabela 54 – Número de solicitações de tráfego em campo e previsto pelo LVECD para 1%, 10% e 20% área trincada com 85% de confiabilidade. ....	245

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO – *American Association of State Highway Officials*  
AFNOR – *Association Française de Normalisation*  
ASTM – *American Society for Testing and Materials*  
ATR – Afundamento na Trilha de Roda  
BMP – Borracha moída de pneu  
CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo  
CNT – Confederação Nacional do Transporte  
COPPETEC – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia  
DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem  
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes  
ETD – *Estimated Texture Depth*  
FWD – *Falling Weight Deflectometer*  
GN – *Grip Number*  
HS – Altura de Areia  
IFI – *International Friction Index*  
IRI – *International Roughness Index*  
LCPC – *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*  
LVECD – *Layered Viscoelastic pavement analysis for Critical Distresses*  
MPD – *Mean Profile Depth*  
SNV – Sistema Nacional de Viação  
UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro  
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina  
USACE – *United States Army Corps of Engineers*  
VECD – *Viscoelastic Continuum Damage*  
VRD – Valor de Resistência à Derrapagem

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>25</b>
1.1	OBJETIVOS.....	27
1.1.1	<b>Objetivo geral .....</b>	<b>27</b>
1.1.2	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>28</b>
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	28
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>30</b>
2.1	PAVIMENTOS FLEXÍVEIS .....	30
2.1.1	<b>Dimensionamento .....</b>	<b>30</b>
2.1.2	<b>Mecanismos de degradação .....</b>	<b>39</b>
2.1.2.1	Ação do tráfego .....	41
2.1.2.2	Ação das condições climáticas .....	43
2.1.3	<b>Avaliação de desempenho .....</b>	<b>49</b>
2.1.3.1	Avaliação funcional.....	50
2.1.3.2	Avaliação estrutural.....	55
2.2	COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS .....	56
2.2.1	<b>Comportamento reológico .....</b>	<b>56</b>
2.2.2	<b>Fadiga .....</b>	<b>62</b>
2.2.2.1	Ensaio de resistência à fadiga .....	64
2.2.2.2	Caracterização do comportamento à fadiga .....	65
2.2.2.3	Influência da temperatura na resistência à fadiga .....	67
2.2.2.4	Fator campo/laboratório .....	70
2.3	TEMPERATURA NO REVESTIMENTO .....	74
2.3.1	<b>Influência no desempenho .....</b>	<b>74</b>
2.3.2	<b>Modelos de previsão de temperatura em revestimentos.....</b>	<b>86</b>
2.4	RESUMO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	95
<b>3</b>	<b>MÉTODO DA PESQUISA .....</b>	<b>97</b>

3.1	ETAPA 1 – INFORMAÇÕES GERAIS DOS SEGMENTOS MONITORADOS ...	97
3.2	ETAPA 2 – AVALIAÇÃO PERIÓDICA DO PAVIMENTO.....	97
<b>3.2.1</b>	<b>Levantamento realizado em 2017 .....</b>	<b>99</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Levantamento realizado em 2018 .....</b>	<b>101</b>
3.3	ETAPA 3 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DO DESEMPENHO DO PAVIMENTO	103
3.4	ETAPA 4 – COMPARAÇÃO DE ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL: LVECD E FLEXÃO 4 PONTOS.....	104
3.5	ETAPA 5 – AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA SAZONALIDADE DA TEMPERATURA NO ACÚMULO DE DANO.....	111
<b>3.5.1</b>	<b>Variação da temperatura do ar e do tráfego durante o dia.....</b>	<b>113</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Cálculo da temperatura do revestimento.....</b>	<b>116</b>
<b>3.5.3</b>	<b>Influência da temperatura na deformação de tração no revestimento .....</b>	<b>118</b>
<b>3.5.4</b>	<b>Variação da estimativa de vida útil ao longo do ano em função da variação de temperatura.....</b>	<b>118</b>
<b>3.5.5</b>	<b>Estimativa de dano acumulado no período de projeto .....</b>	<b>119</b>
<b>3.5.6</b>	<b>Estimativa de vida útil para dano acumulado igual a 1.....</b>	<b>120</b>
<b>3.5.7</b>	<b>Relação entre o dano acumulado e o trincamento em campo .....</b>	<b>123</b>
3.6	ETAPA 6 – RELAÇÃO ENTRE PORCENTAGEM DE ÁREA TRINCADA E DANO MÉDIO ACUMULADO .....	123
3.7	ETAPA 7 – ANÁLISE CONSIDERANDO SAZONALIDADE DE TEMPERATURA NO LVECD .....	125
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>127</b>
4.1	ETAPA 1 – INFORMAÇÕES GERAIS DOS SEGMENTOS MONITORADOS .	127
4.2	ETAPA 2 – AVALIAÇÃO PERIÓDICA DO PAVIMENTO.....	132
<b>4.2.1</b>	<b>Levantamentos realizados em 2017.....</b>	<b>132</b>
4.2.1.1	Afundamento de trilha de roda.....	132
4.2.1.2	Irregularidade longitudinal.....	138
4.2.1.3	Deflexões.....	139

<b>4.2.2</b>	<b>Levantamento realizado em 2018 .....</b>	<b>144</b>
4.2.2.1	Avaliação dos defeitos superficiais .....	144
4.2.2.2	Afundamento de trilha de roda .....	146
4.2.2.3	Microtextura e Macrotextura .....	148
4.3	<b>ETAPA 3 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DO DESEMPENHO DO PAVIMENTO</b>	<b>149</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Evolução do afundamento de trilha de roda.....</b>	<b>149</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Evolução da irregularidade longitudinal .....</b>	<b>154</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Evolução da porcentagem de área trincada.....</b>	<b>155</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Evolução de microtextura e macrotextura.....</b>	<b>161</b>
<b>4.3.5</b>	<b>Evolução de deflexão .....</b>	<b>164</b>
4.4	<b>ETAPA 4 – COMPARAÇÃO DE ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL: LVECD E FLEXÃO 4 PONTOS.....</b>	<b>167</b>
<b>4.4.1</b>	<b>Ajuste dos levantamentos para o método de mapeamento por células .....</b>	<b>167</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Estimativa de vida útil .....</b>	<b>169</b>
4.4.2.1	Procedimento utilizando o LVECD .....	169
4.4.2.2	Procedimento utilizando flexão a 4 pontos e Viscoroute .....	184
<b>4.4.3</b>	<b>Comparação entre os métodos de estimativa de vida útil.....</b>	<b>186</b>
4.4.3.1	Segmentos 05 e 04.....	186
4.4.3.2	Segmento 03 .....	189
4.5	<b>ETAPA 5 – AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA SAZONALIDADE DA TEMPERATURA NO ACÚMULO DE DANO.....</b>	<b>198</b>
<b>4.5.1</b>	<b>Variação da temperatura do ar e do tráfego durante o dia.....</b>	<b>198</b>
<b>4.5.2</b>	<b>Cálculo da temperatura do revestimento .....</b>	<b>202</b>
<b>4.5.3</b>	<b>Influência da temperatura na deformação de tração no revestimento .....</b>	<b>210</b>
<b>4.5.4</b>	<b>Variação da estimativa de vida útil ao longo do ano em função da temperatura</b>	<b>216</b>
<b>4.5.5</b>	<b>Estimativa de dano acumulado no período de projeto .....</b>	<b>219</b>
<b>4.5.6</b>	<b>Estimativa de vida útil para dano acumulado igual a 1.....</b>	<b>223</b>

<b>4.5.7</b>	<b>Relação entre o dano acumulado e o trincamento em campo .....</b>	<b>227</b>
4.6	ETAPA 6 – RELAÇÃO ENTRE PORCENTAGEM DE ÁREA TRINCADA E DANO MÉDIO ACUMULADO .....	230
4.7	ETAPA 7 – ANÁLISE CONSIDERANDO SAZONALIDADE DE TEMPERATURA NO LVECD .....	240
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>247</b>
5.1	CONCLUSÕES .....	247
5.2	SUGESTÕES .....	255
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>257</b>
	<b>APÊNDICE A – Dados do levantamento de 2017 .....</b>	<b>269</b>
	<b>APÊNDICE B – Dados do levantamento de 2018 .....</b>	<b>276</b>
	<b>APÊNDICE C – Temperatura média do ar e desvio padrão .....</b>	<b>296</b>
	<b>APÊNDICE D – Volume horário médio e o desvio padrão .....</b>	<b>298</b>
	<b>APÊNDICE E – <math>N_f</math> calculado para cada segmento monitorado .....</b>	<b>300</b>
	<b>APÊNDICE F – Dano acumulado .....</b>	<b>303</b>
	<b>APÊNDICE G – Estimativa de vida útil em cada combinação .....</b>	<b>307</b>
	<b>APÊNDICE H – Distribuição de deformação no revestimento .....</b>	<b>320</b>
	<b>APÊNDICE I – Dano médio acumulado no revestimento .....</b>	<b>327</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Historicamente, o modal rodoviário possui predomínio no transporte de cargas e passageiros se comparado aos demais meios de transporte brasileiros. Segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2018), mais de 60% das cargas e 90% dos passageiros são transportados por meio do sistema rodoviário, o que evidencia sua significativa contribuição para o desenvolvimento socioeconômico do País.

Apesar da importância no transporte de cargas e passageiros, a malha rodoviária do País apresenta carência em termos de infraestrutura, relacionada com a quantidade e a qualidade de rodovias pavimentadas. De acordo com dados de 2017 do Sistema Nacional de Viação (SNV) apenas 12,4% das rodovias brasileiras são pavimentadas (CNT, 2018). Em 2018, a Pesquisa CNT de Rodovias (CNT, 2018) avaliou 107.161 km de rodovias federais e estaduais pavimentadas do País, correspondendo a 50,2% da extensão total pavimentada. Nessa pesquisa, verificou-se que 50,9% da extensão avaliada apresentou algum tipo de deficiência no pavimento. Assim, verifica-se que além da baixa porcentagem de rodovias pavimentadas, grande parte destas se encontra em condições críticas.

Diversos fatores são responsáveis pelo desempenho comprometido dos pavimentos brasileiros, dos quais pode-se citar a falta de investimentos no setor, o aumento crescente do volume do tráfego de veículos pesados, o excesso de cargas transportadas aliado à ineficiente fiscalização destas, e o método de dimensionamento de pavimentos, que apresenta restrições relevantes às condições atuais da atuação do tráfego e conhecimento dos materiais (BOCK, 2016).

O método brasileiro de dimensionamento de pavimentos flexíveis é empírico, baseado em experiências realizadas nos Estados Unidos nas décadas de 1950 e 1960, revisado em 1981. A falta de caracterização das condições climáticas, a impossibilidade de inclusão de novos materiais no projeto de dimensionamento, a ausência de caracterização detalhada do tráfego e a falta de verificação de compatibilidade entre tensões e deformações com o tráfego previsto no período de projeto são algumas das restrições que o método atual apresenta (SANTIAGO E SOARES, 2015).

Em virtude das limitações que os métodos puramente empíricos possuem, há uma tendência para se avançar para métodos cujos princípios são empírico-mecanísticos. Nestes

métodos mais racionais, se busca analisar a estrutura de acordo com as tensões e deformações que ocorrem no pavimento aliado ao efeito da repetição do carregamento. No entanto, diversos fatores não são abordados nestas teorias, como as propriedades dos materiais que variam com as condições ambientais e com a frequência de carregamento e o efeito da deterioração acumulada causada pela passagem do tráfego com intensidade, distribuição e velocidade variável. Assim, certo grau de empirismo ainda se faz presente para que os resultados de laboratório possam ser empregados com confiabilidade para previsão de desempenho em campo. Tal relação é obtida através dos fatores campo/laboratório ou funções de transferência.

A obtenção de fatores campo/laboratório, que compreendam as diferentes condições regionais, é uma das dificuldades encontradas para a implantação de métodos mecanístico-empírico. Para determinar estes fatores, a condição do pavimento em campo deve ser avaliada sistematicamente, partindo de configurações de estrutura, materiais, tráfego e condições climáticas bem conhecidas.

Neste contexto, a Petrobrás implementou a partir de 2006 o projeto denominado de Rede Temática de Tecnologia em Asfalto, que conta com a participação de diversas universidades brasileiras. A primeira etapa do projeto, que compreendeu o período de 2006 a 2009, teve como objetivo principal a melhoria da infraestrutura laboratorial das universidades parceiras, através da construção, reforma e/ou ampliação da área física e aquisição de novos equipamentos para ensaios. A partir de 2009, iniciou-se a segunda etapa do projeto, que teve como principal finalidade a construção e o monitoramento periódico de segmentos experimentais construídos em rodovias brasileiras de diferentes regiões do País. Durante a construção dos segmentos, foram realizados ensaios de caracterização dos materiais utilizados, controle do processo executivo e ensaios de avaliação estrutural e funcional do pavimento executado. Após a execução, vêm sendo realizado, de forma sistemática e temporal, o levantamento do desempenho funcional e estrutural destes segmentos.

Os resultados de ensaios e das avaliações funcionais e estruturais deram origem a um banco de dados nacional referente à caracterização e ao comportamento de materiais e ao desempenho de diferentes estruturas de pavimentos asfálticos, inseridos em várias condições climáticas e solicitações de tráfego, que servirão de subsídios para o desenvolvimento do novo método brasileiro de dimensionamento de pavimentos flexíveis.

Em Santa Catarina, sete segmentos monitorados foram executados entre 2011 e 2012, os quais continuam sendo monitorados sistematicamente. Destes sete segmentos, três foram executados na rodovia BR-101/SC, no contorno de Araranguá, que possui elevado volume de tráfego.

Nesta pesquisa, foi dada continuidade do monitoramento e a análise do desempenho dos segmentos monitorados de Araranguá, avaliando a condição funcional e a capacidade estrutural. Além disso, foi avaliada a influência da sazonalidade da temperatura e do tráfego diário na estimativa do desempenho à fadiga do revestimento para as seguintes combinações:

- Combinação 1: temperatura no revestimento adotada como sendo constante (20°C), curva de fadiga obtida com temperatura de 20°C e volume de tráfego constante ao longo do dia;
- Combinação 2: temperatura no revestimento estimada com variação sazonal da região, curva de fadiga de 20°C e volume de tráfego constante ao longo do dia;
- Combinação 3: temperatura no revestimento com sazonalidade, curva de fadiga de 20°C e distribuição do volume de tráfego ao longo do dia conforme dados da região;
- Combinação 4: temperatura no revestimento com sazonalidade, curva de fadiga obtida com 15°C (correspondendo a temperatura baixa da região) e 20°C (correspondendo as normas de ensaio) e distribuição do volume de tráfego ao longo do dia.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa é estimar e avaliar o desempenho funcional e estrutural dos segmentos monitorados de Araranguá considerando a influência da sazonalidade da temperatura e do tráfego diário da região.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral do trabalho, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Analisar a evolução da condição funcional e estrutural do pavimento através de levantamentos periódicos;
- Comparar os resultados de estimativa de vida útil a partir do *software* LVECD e do ensaio de fadiga a 4 pontos e análise no *software* Viscoroute com o trincamento medido em campo;
- Avaliar a influência da sazonalidade da temperatura do revestimento e do tráfego diário na previsão da evolução do dano por fadiga;
- Analisar a relação entre porcentagem de área trincada em campo e dano médio acumulado calculado considerando a sazonalidade da temperatura.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação está dividida em 5 capítulos que abordam os conteúdos descritos a seguir.

**Capítulo 1 – Introdução:** Descreve de maneira sucinta a importância e o tema da pesquisa e os objetivos, gerais e específicos, a serem alcançados.

**Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica:** Aborda assuntos e conceitos da literatura pertinentes ao tema da pesquisa, como o dimensionamento de pavimentos flexíveis, os mecanismos de degradação, a avaliação funcional e estrutural de pavimentos, o comportamento reológico e mecânico de misturas asfálticas e a influência da temperatura no pavimento.

**Capítulo 3 – Método da Pesquisa:** Descreve o método utilizado na pesquisa para atingir os objetivos propostos.

**Capítulo 4 – Apresentação e Discussão dos Resultados:** Apresenta e expõe a análise dos resultados obtidos através dos métodos definidos para a pesquisa.

**Capítulo 5 – Conclusões:** Apresenta as conclusões da pesquisa e aborda sugestões para pesquisas futuras de modo a dar continuidade no tema de estudo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

#### 2.1.1 Dimensionamento

Dimensionar o pavimento consiste em especificar as características dos materiais e calcular as espessuras das camadas necessárias para que o mesmo apresente condições satisfatórias com relação às solicitações atuantes. Deste modo, dimensiona-se de forma que o pavimento não apresente ruptura, deformações ou desgaste excessivos durante a vida de projeto (BOCK, 2016). Segundo Medina e Motta (2015), o dimensionamento de pavimentos é complexo devido à variação das características físicas dos materiais, a difícil previsão do carregamento que atuará na estrutura ao longo da vida útil e a ação dos fatores climáticos no comportamento dos materiais.

No Brasil, o método de dimensionamento de pavimentos flexíveis mais utilizado é o método empírico do DNER (atual DNIT), elaborado pelo Engenheiro Murillo Lopes de Souza em 1966 e revisado em 1981. Tal método tem como base as curvas de dimensionamento desenvolvidas pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE) durante a Segunda Guerra Mundial e os resultados da pista experimental da AASHO (atual *American Association of State Highway and Transportation Officials* – AASHTO) (MEDINA E MOTTA, 2015; SANTIAGO E SOARES, 2015).

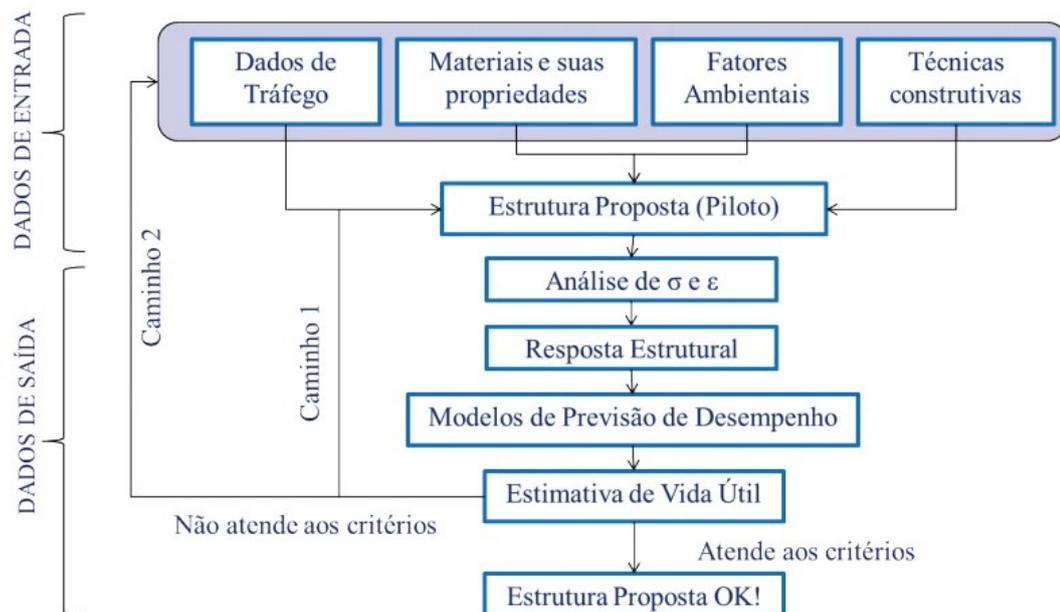
Neste método, o que se determina é a espessura total do pavimento necessária para proteger o subleito quanto à ruptura ao cisalhamento ou ao acúmulo de deformações plásticas excessivas. Entretanto, o método não considera as deformações permanentes que ocorrem nas camadas e a fadiga que ocorre no revestimento asfáltico. Além disso, por estar associado a uma série de especificações de características de materiais e coeficientes estruturais correspondentes a eles, não permite que sejam incorporadas no dimensionamento as melhorias obtidas através de novos métodos de avaliação da qualidade do solo (como o comportamento resiliente), novos materiais de revestimento (como as misturas asfálticas modificadas) e novas técnicas de dosagem (SOARES *et al.*, 2009).

Os métodos empíricos são desenvolvidos com base em regras criadas a partir de experiências realizadas em uma determinada configuração de carga, tipos de materiais e

condições específicas de clima, que podem não ser equivalentes à região do projeto em questão. Dessa forma, a grande limitação dos métodos puramente empíricos é de não poderem ser generalizados de forma confiável para outras condições diferentes daquelas para as quais foram criados (FRANCO, 2007). Soares *et al.* (2009) ressaltam que os métodos de dimensionamento em vigor no País necessitam de modificações, visto que em diversos países já se adota o método mecanístico-empírico desde os anos 1990 e a utilização de um método mais adequado de dimensionamento favorecerá a uma gestão mais eficaz dos recursos escassos do setor.

Os métodos de dimensionamento mecanístico-empírico consideram o pavimento como uma estrutura multicamadas, de forma a se obter a resposta de tensões e deformações que ocorrem neste sistema. A resposta estrutural obtida é utilizada em equações de desempenho para prever a deterioração do pavimento durante o projeto. Sendo assim, a parte empírica do método se dá com a calibração dos modelos de desempenho a partir de observações do comportamento real (SOARES *et al.*, 2009). A Figura 1 apresenta um fluxograma deste processo de dimensionamento a partir de um método mecanístico-empírico. É possível observar que o processo é cíclico, ou seja, caso a estimativa de vida útil não seja atendida, uma nova estrutura deve ser definida e um novo processo de análise é realizado.

Figura 1 – Fluxograma de um método mecanístico-empírico.

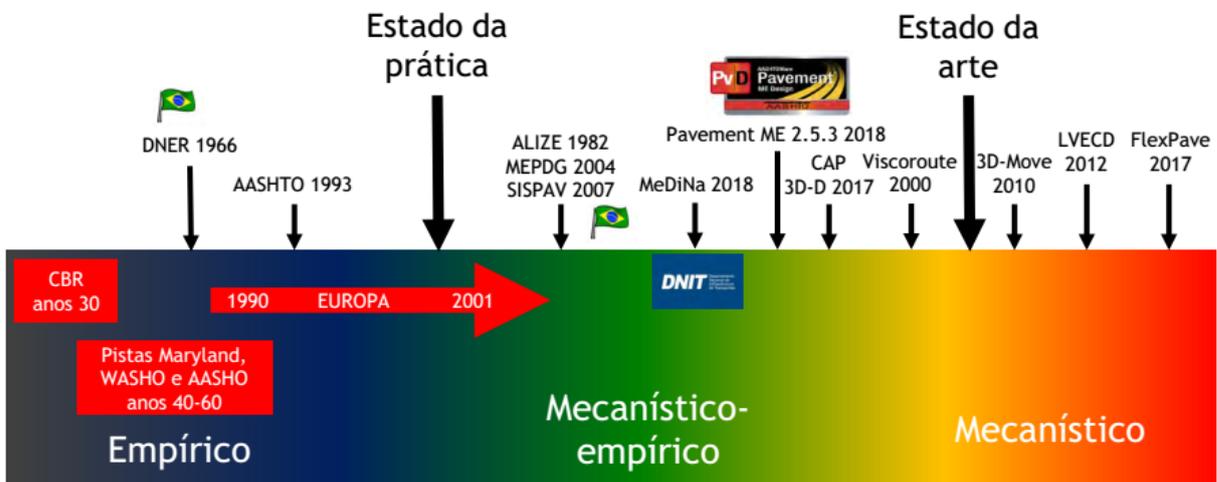


Fonte: Santiago e Soares (2015).

Segundo Medina e Motta (2015), uma mudança perceptível ao se implantar um método mecanístico-empírico é o fato de que apenas o aumento da espessura das camadas do pavimento não necessariamente levaria a melhor solução para todas as solicitações de tráfego, como é observado nos métodos empíricos. Dessa forma, otimizar recursos, compatibilizar e testar várias combinações de materiais para reduzir custos e considerar novos materiais no projeto são algumas das possibilidades trazidas com este novo enfoque.

Nota-se que há uma tendência de evolução nos projetos de pavimentos. Os métodos de dimensionamento passam a deixar gradualmente a metodologia totalmente empírica, seguindo para métodos mecanístico-empíricos, que utilizam modelos de desempenho empíricos. Por fim, passa-se para o dimensionamento totalmente mecanístico, que é realizado através de procedimentos sofisticados de cálculo dos esforços e modelos de desempenho mecanicistas (NASCIMENTO, 2018). A Figura 2 apresenta resumidamente essa evolução, apontando o estado da prática e o estado da arte atual no que diz respeito ao dimensionamento de pavimentos.

Figura 2 – Evolução dos métodos de dimensionamento de pavimentos.



Fonte: Nascimento (2018).

No Brasil, o estado da prática atual se encontra na migração dos métodos empíricos para os métodos empírico-mecanístico. Esta migração têm como base a experiência internacional e pesquisas nacionais, como Motta (1991), que apresentou um catálogo com diferentes estruturas e os respectivos cálculos de tensões e deformações, e Franco (2007), que

incorporou diversos elementos componentes de um método mecanístico-empírico em uma única plataforma computacional denominada SisPav (SANTIAGO E SOARES, 2015; KERN, 2017). Mais recente, em 2018, foi lançado o programa MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional de pavimentos), que realiza a verificação e o dimensionamento de estruturas de pavimentos mecanístico-empírico, através de análise de camadas elásticas de múltiplas camadas.

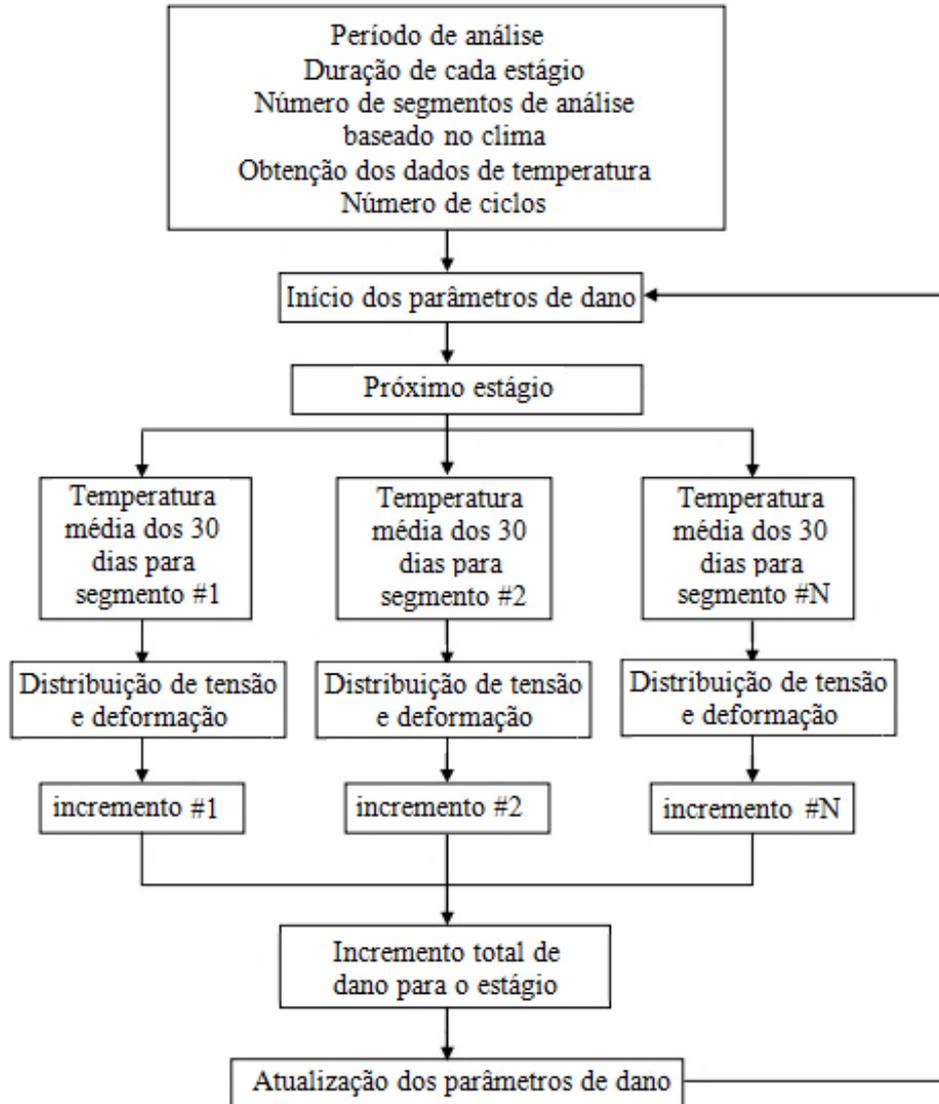
De acordo com Nascimento (2014 *apud* BOCK, 2016), nos Estados Unidos, o estado da arte já se encontra em análise de pavimentos através de modelos de desempenho mecanicistas. Estes modelos são incorporados em programas computacionais que consideram parâmetros viscoelásticos, como o LVECD (*Layered ViscoElastic Pavement analysis for Critical Distresses*). Este programa foi desenvolvido na Carolina do Norte por Eslaminia *et al.* (2012) e incorpora o modelo S-VECD para simulações de desempenho a fadiga, o qual será detalhado na seção 2.2.3. As análises viscoelásticas são realizadas tridimensionalmente com cargas em movimento, através de elementos finitos, e a transformada rápida de Fourier é conduzida para reduzir a demanda computacional. O programa gera uma malha de 1000 elementos (100 x 10) na seção transversal do revestimento para a determinação da resposta mecânica e do cálculo de dano ao longo da vida útil do pavimento (WANG *et al.*, 2016).

Apesar de ser uma ferramenta sofisticada para análise de desempenho, o método de elementos finitos tem um custo computacional elevado quando se analisa a viscoelasticidade e a não linearidade das camadas do pavimento. Dessa forma, Eslaminia *et al.* (2012) incorporaram simplificações na análise do programa de forma a reduzir a demanda computacional. Um dos procedimentos utilizados para melhorar a eficiência foi dividir a vida útil do pavimento em períodos menores, chamados de estágios. Dependendo do nível desejado de precisão, a duração de um estágio pode variar de duas semanas a alguns meses.

Cada estágio é dividido em segmentos de análise, que representam um curto período do dia. Considera-se que a temperatura é constante em cada segmento de análise, sendo definida como a temperatura média do período analisado. A duração e o número de segmentos de análise são determinados com base na variação horária de temperatura e tráfego. Além disso, considera-se que o nível de tráfego e a frequência de carregamento são constantes em cada segmento de análise. Vale ressaltar que o programa parte da premissa de que a temperatura é cíclica a cada ano, logo, a resposta do pavimento é calculada para um ano

representativo e repetida para os anos subsequentes (BAEK, 2010; LACROIX, 2013; ESLAMINIA *et al.*, 2012; NASCIMENTO, 2015). A Figura 3 apresenta um fluxograma desse processo segmentado de análise utilizado no LVECD, considerando a duração de um estágio igual a 30 dias.

Figura 3 – Fluxograma da análise do desempenho do pavimento incorporado no LVECD.



Fonte: Adaptado de Baek (2010) e Eslaminia *et al.* (2012).

Segundo Eslaminia e Guddati (2015), esta aproximação parte do princípio de que o dano por fadiga ou deformação permanente não varia significativamente dentro de um estágio

da vida útil. Além disso, utilizando esta aproximação, o efeito de milhões de ciclos de tráfego no pavimento pode ser simulado através de algumas centenas de análises de tensão independentes, obtidas para diferentes temperaturas e níveis de dano.

O procedimento de cálculo de dano é realizado para cada elemento da malha de elementos finitos, em cada segmento de análise. Ao final de cada estágio, o estado de dano da mistura é atualizado para iniciar o cálculo do dano do estágio seguinte. Durante as simulações, o dano é acumulado através da hipótese de Miner (Equação (1)). Para quantificar os resultados, a porcentagem de área de dano é utilizada como índice de desempenho no LVECD. O índice representa o número de pontos na mistura asfáltica que atingiu a ruptura ( $N/N_f = 1$ ) em relação ao número total de pontos da malha (WANG *et al.*, 2016). No final da análise, o programa plota os contornos da área de dano para mostrar o estado do dano por fadiga do pavimento e os locais onde as trincas podem aparecer no período de projeto.

$$D = \sum_{i=1}^M \frac{N_i}{N_{fi}} \quad (1)$$

Onde:

$D$  = dano;

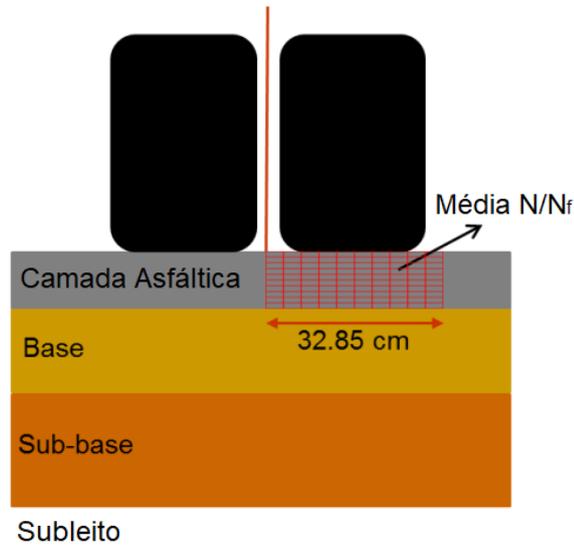
$M$  = número total de períodos;

$N_i$  = número de passagens de tráfego para o período  $i$ ;

$N_{fi}$  = número de repetições de carga necessários para atingir a ruptura, para as condições do período  $i$ .

Com o objetivo de prever a porcentagem de área trincada no pavimento a partir das simulações no LVECD, Nascimento (2015) propôs uma função de transferência. A função é baseada no dano médio, o qual é calculado para uma malha de 110 pontos. Conta-se com 10 pontos distribuídos horizontalmente do centro da carga até uma distância de 32,85 cm e 11 pontos distribuídos verticalmente na camada de revestimento asfáltico, conforme apresenta a Figura 4.

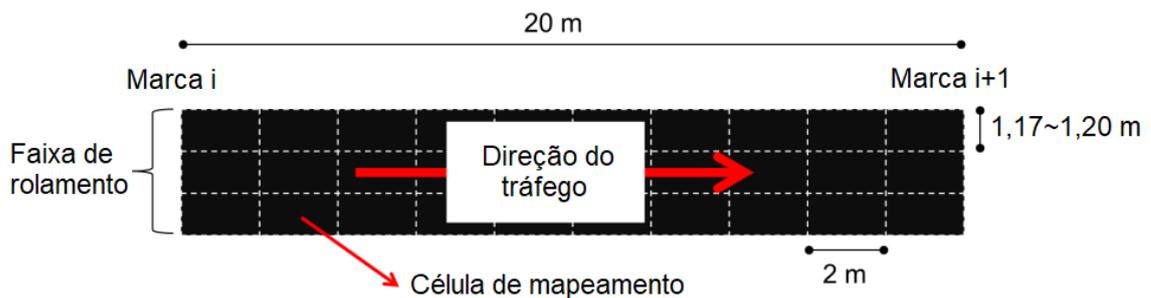
Figura 4 – Malha de pontos considerada para o cálculo do dano médio ( $N/N_f$ ).



Fonte: Adaptado de Nascimento (2015).

O dano médio obtido nas simulações foi comparado com a porcentagem de área trincada observada em campo nas 27 seções do Projeto Fundão, no Rio de Janeiro. A avaliação do pavimento foi realizada por inspeção visual, na qual duas pessoas caminhavam no pavimento para identificar e localizar os defeitos. Foi utilizado um mapeamento de células com dimensões e disposições mostradas na Figura 5, representando 30 células a cada 20 metros.

Figura 5 – Esquema de localização das trincas em campo.



Fonte: Adaptado de Nascimento (2015).

Na avaliação, quando uma célula apresenta alguma trinca, a célula é considerada trincada como um todo, ou seja, não se avalia a área abrangida pelo defeito. A porcentagem

de área trincada em campo foi definida como sendo a relação entre a quantidade de células trincadas e o número de células do segmento monitorado. Esta técnica de mapeamento por células foi utilizada por Nascimento (2015) devido à grande extensão do trecho monitorado no Projeto Fundão, de aproximadamente 11 km. O método de avaliação é considerado rápido e prático, o que reduz o tempo de fechamento da rodovia ao tráfego para que seja realizada a avaliação.

A partir dos resultados das simulações computacionais e do desempenho em campo, Nascimento (2015) observou que quanto maior é a taxa de crescimento do dano médio, maior é o dano médio no ponto onde a seção do pavimento começa a trincar em campo. Além disso, observou que as curvas de porcentagem de área trincada versus dano médio apresentaram aproximadamente mesmo formato para diferentes seções de pavimento. Dessa forma, propôs um fator de deslocamento horizontal nas curvas, de forma a obter apenas uma única relação de porcentagem de área trincada e dano médio ajustado (dano reduzido –  $N/N_f red_s$ ). O fator de deslocamento do dano ( $S_{T0,35}$ ) definido por Nascimento (2015) corresponde ao tempo simulado no *software* LVECD, em meses, para que o dano médio seja igual a 0,35 ( $T_{0,35}$ ). As Equações definidas para fator de deslocamento, dano reduzido e porcentagem de área trincada prevista estão apresentadas nas Equações (2), (3) e (4), respectivamente.

$$S_{T0,35} = A \times T_{0,35} + B \quad (2)$$

$$N/N_f red_s = N/N_f \times S_{T0,35} \quad (3)$$

$$CA = C_1 \times (N/N_f red_s)^{C_2} \quad (4)$$

Onde:

$A$  e  $B$  = coeficientes de ajuste a partir de calibração de campo;

$N/N_f$  = dano médio;

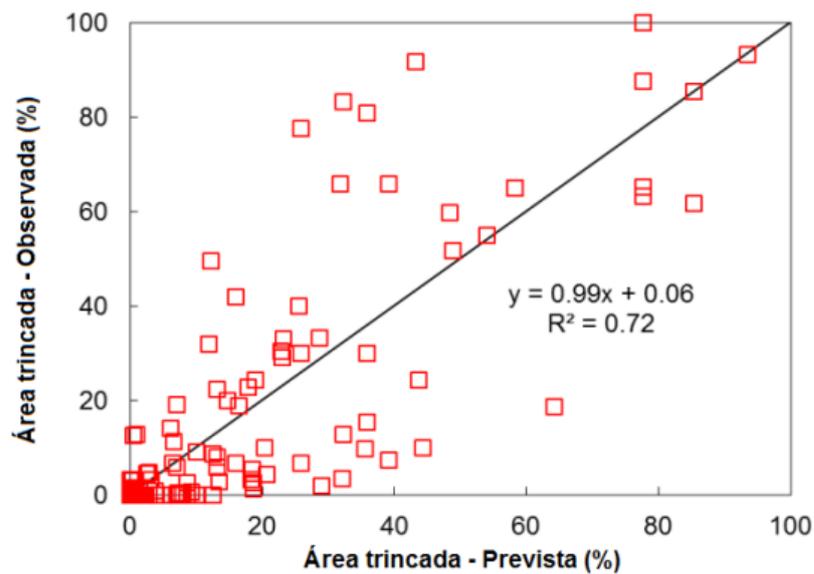
$N/N_f red_s$  = dano médio reduzido;

$CA$  = porcentagem de área trincada prevista;

$C_1$  e  $C_2$  = coeficientes de ajuste a partir de calibração de campo.

Nascimento (2015) calibrou a função de transferência com resultados observados em 44 trechos experimentais no Brasil, sendo 27 segmentos monitorados do projeto Fundão, e outros 17 segmentos monitorados localizados nos estados do Rio Grande do Sul, São Paulo e Santa Catarina. A Figura 6 apresenta a relação entre a porcentagem de área trincada prevista através da função de transferência e a observada em campo nos 44 trechos experimentais.

Figura 6 – Comparação entre área trincada observada e prevista.



Fonte: Adaptado de Nascimento (2015).

Para a regressão linear obtida com os resultados de porcentagem de área trincada previstos e medidos em campo, observa-se que o valor de  $R^2$  foi de 0,72. Segundo Pierce e McGovern (2014), modelos de previsão de desempenho com valor de  $R^2$  acima de 0,65 já são considerados como tendo boa capacidade de previsão.

De acordo com Nascimento (2015), grandes diferenças entre área trincada observada e área trincada prevista não estão necessariamente relacionadas a grandes erros de previsão do ponto de vista prático. Se um pavimento que exibe 40% de área trincada e a simulação apresenta 20% de área prevista, por exemplo, a diferença de tráfego entre estes níveis de dano pode ser pequena, pois a partir do momento que o pavimento começa a trincar, as trincas crescem rapidamente. Portanto, o dano previsto deve ser relacionado não apenas com a área trincada observada, mas também com o tráfego para atingir o nível de trincamento.

Wang *et al.* (2016) avaliaram e compararam os resultados obtidos com os programas LVECD e Pavement ME Desing com dados observados em campo em 33 seções de pavimento localizadas nos Estados Unidos, no Canadá e na Coréia do Sul. O Pavement ME Design é um programa de análise de desempenho de pavimentos que utiliza a teoria de camadas elásticas para calcular as tensões e deformações do pavimento e aplica as respostas em modelos empíricos, sendo um método mecanístico-empírico. Ao comparar os resultados obtidos nas simulações com os observados em campo, os autores concluíram que, apesar dos dois programas apresentarem resultados razoáveis, o LVECD apresenta melhor ajuste com as medições de campo, principalmente por aplicar modelos fundamentais na análise.

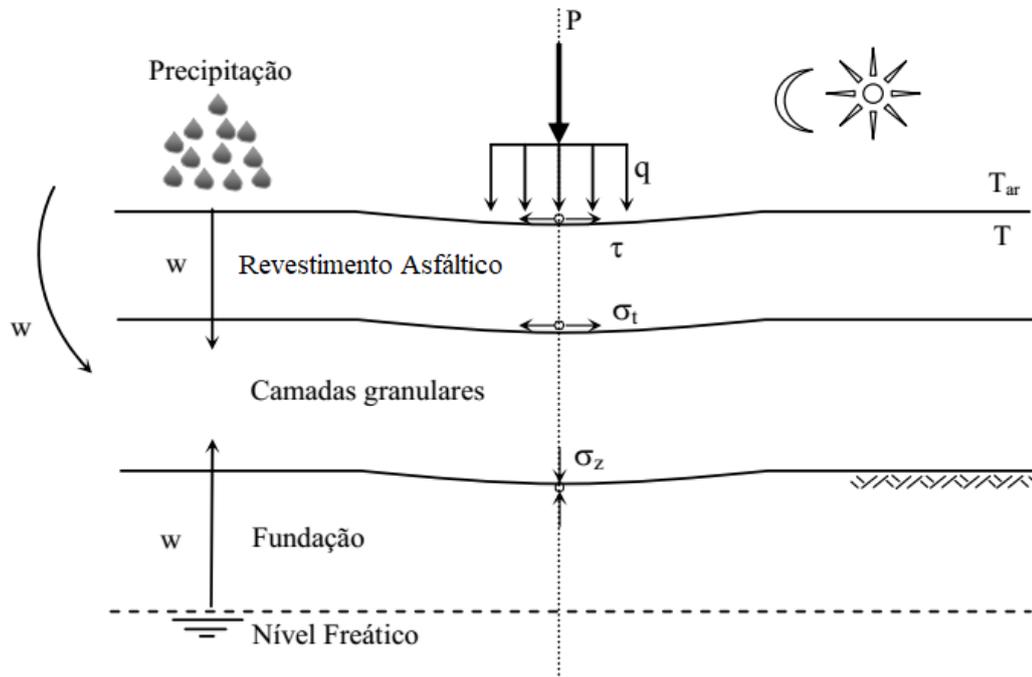
Através da evolução dos métodos de dimensionamento para a análise mecanística pode-se melhorar a confiabilidade dos projetos desenvolvidos, caracterizando-se a evolução dos danos nos materiais, considerando-se de forma mais apropriada o efeito das ações climáticas e das diversas cargas de tráfego que são impostas no pavimento (BOCK, 2016).

### **2.1.2 Mecanismos de degradação**

Segundo DNIT (BRASIL, 2006), o pavimento é dimensionado para durar determinado períodos de tempo, chamados de ciclos de vida. Ao longo desses períodos, o pavimento sai de uma condição dita como ótima e vai decrescendo até alcançar uma condição ruim, sendo esse decréscimo denominado de deterioração do pavimento. A partir do início da utilização da via, as deteriorações começam a ocorrer, a princípio de maneira imperceptível e evoluindo com o tempo, afetando o desempenho do pavimento. Segundo Bernucci *et al.* (2008), de maneira geral, os pavimentos são estruturas que não apresentam ruptura súbita, mas sofrem deterioração funcional e estrutural acumulada a partir de sua abertura ao tráfego.

Os principais mecanismos que interferem na degradação do pavimento são gerados pela ação do tráfego e das condições climáticas (temperatura e umidade). A passagem do tráfego gera tensões nas camadas do pavimento que levam a degradação estrutural, enquanto que as variações de temperatura e umidade causam oxidação do ligante asfáltico e alterações nas propriedades dos materiais das camadas subjacentes (BOCK, 2016). Na Figura 7 é apresentado um esquema no qual estão expostas as principais ações, solicitações e respostas que ocorrem no pavimento.

Figura 7 – Solicitações de tráfego e clima no pavimento.



#### Legenda

Ação dos veículos

$P$  - carga

$q$  - pressão

$\sigma_t$  - tensão de tração

$\sigma_z$  - tensão de compressão

$\tau$  - força tangencial na superfície do pavimento

Ação dos agentes atmosféricos

$T_{ar}$  - temperatura do ar

$T$  - temperatura dos materiais

$w$  - água nas camadas granulares e fundação

Fonte: Adaptado de Branco *et al.* (2005 *apud* FONTES, 2009).

Conforme Figura 7, com a passagem do tráfego, tensões de tração são geradas no revestimento asfáltico devido à flexão imposta na camada. A ação repetitiva destas tensões é responsável por ocasionar as trincas por fadiga no revestimento, que podem ser de baixo para cima ou de cima para baixo. Além das tensões de tração, o carregamento aplicado na estrutura induz esforços de compressão nas camadas, podendo causar as deformações permanentes, originando o afundamento nas trilhas de rodas.

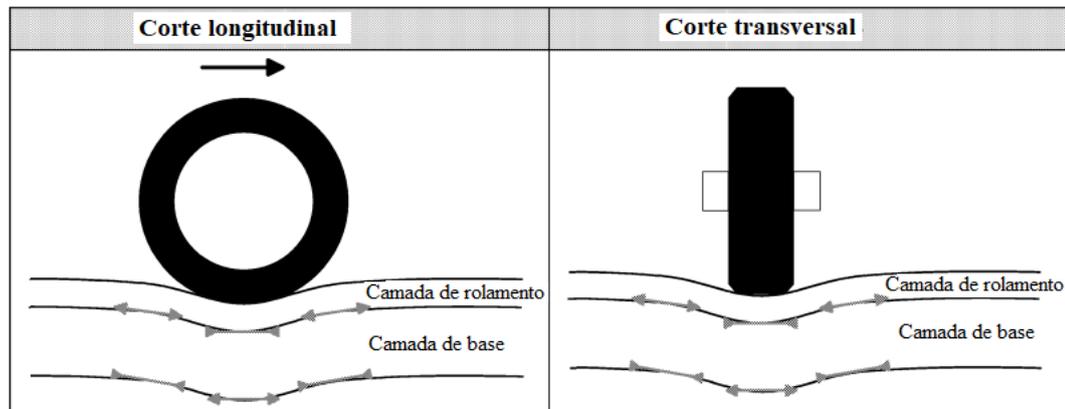
A variação de temperatura altera principalmente o comportamento da camada asfáltica, pois o ligante asfáltico é um material viscoelástico e sofre alteração em seu

comportamento com a temperatura. A ação conjunta do carregamento e da temperatura pode acarretar ainda, o aparecimento de deformações permanentes por fluência e deformações plásticas na estrutura. Além disso, a variação térmica pode ainda gerar as trincas térmicas, que ocorrem principalmente quando o pavimento é exposto a temperaturas muito baixas ou significativas amplitudes de temperatura.

### 2.1.2.1 Ação do tráfego

Durante a passagem do veículo sobre a estrutura do pavimento, são gerados esforços de tração e compressão. Na Figura 8 é apresentado um esquema da deformação que ocorre nas camadas asfálticas durante a passagem da carga. Na parte esquerda da figura, é apresentado um corte no sentido longitudinal e na direita, no sentido transversal do pavimento.

Figura 8 – Camadas asfálticas deformadas durante a passagem de uma carga.



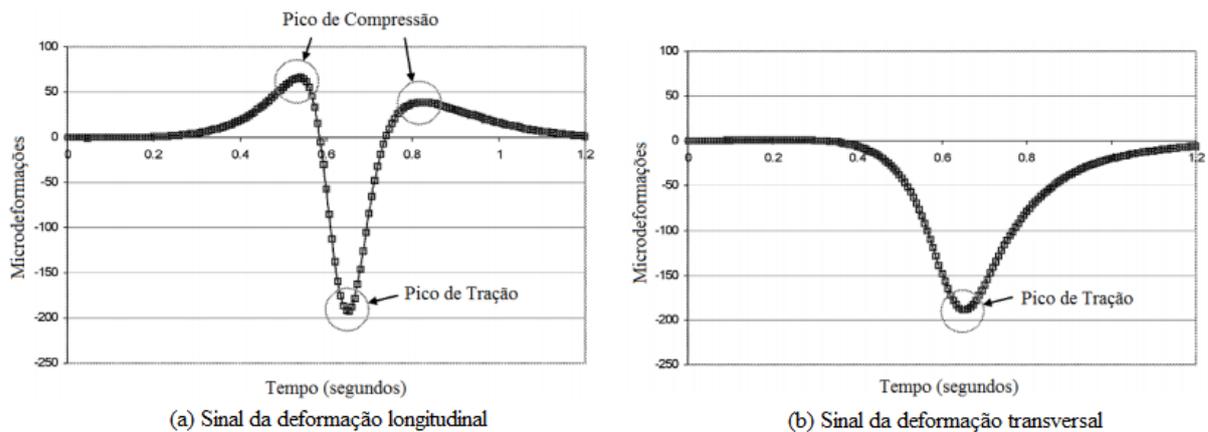
Fonte: Adaptado de Perret (2003).

No sentido longitudinal, os materiais sofrem alternância entre compressão e tração durante a passagem do veículo. Assim, embaixo da carga, na camada de rolamento, nota-se que ocorre tração-compressão-tração e na fibra inferior da camada de base ocorre compressão-tração-compressão. Com o deslocamento do veículo, estes esforços se alteram ponto a ponto. No corte transversal, no entanto, não há alternância de deformação com a passagem do veículo, ou seja, os materiais estão somente sofrendo tração ou compressão. O

tipo de deformação depende do ponto de medição, tanto lateralmente (posição em relação ao centro da carga) quanto verticalmente (profundidade das camadas) (PERRET, 2003).

Perret (2003) analisou as deformações na fibra inferior da camada de concreto asfáltico durante a passagem de um veículo. Na Figura 9 é apresentado um exemplo de tipos de sinais de deformação que ocorrem na fibra inferior da camada asfáltica na temperatura de 30°C. Com a passagem do tráfego, nota-se que a deformação longitudinal gerada apresenta alternância de sinal com picos de compressão e tração, enquanto que a deformação transversal apresenta apenas pico de tração. Em pavimentos com camada de revestimento pouco espessa, a tendência é que as deformações de tração nos picos de alternância de sinal sejam maiores na face inferior da camada.

Figura 9 – Sinal da deformação longitudinal e transversal na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico.



Fonte: Adaptado de Perret (2003).

A velocidade de aplicação de carga ou a frequência de carregamento, aliada à ação da temperatura, afetam a resistência à fadiga e a resistência à deformação permanente das misturas asfálticas. Baixas velocidades de carregamento e elevadas temperaturas aumentam o risco de aparecimento de deformações permanentes, enquanto que elevadas velocidades e temperaturas medianas favorecem ao trincamento por fadiga do revestimento (BOCK, 2016).

Nos últimos anos, a maior quantidade de veículos pesados nas rodovias e o aumento da capacidade de carga operada por eles, têm comprometido ainda mais o desempenho dos pavimentos asfálticos brasileiros. Além disso, a circulação de veículos com excesso de carga e

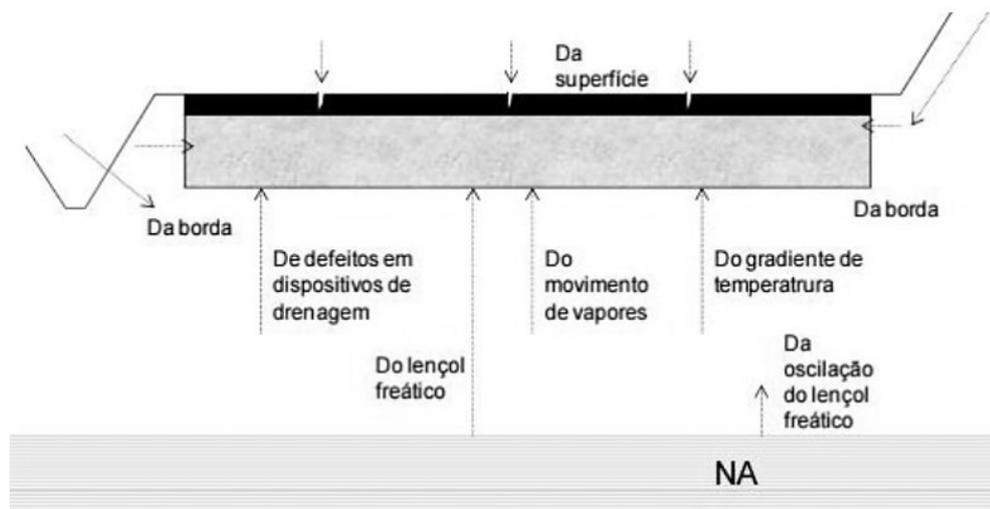
a fiscalização deficiente, pelo escasso número de balanças em operação nas rodovias, também colaboram para o aparecimento precoce dos defeitos (BOCK, 2012).

### 2.1.2.2 Ação das condições climáticas

Os pavimentos não estão sujeitos apenas às solicitações das cargas de tráfego. O meio físico no qual estão inseridos também interfere no desempenho e na duração da vida útil da estrutura. A temperatura e a umidade são variáveis que podem afetar significativamente as propriedades dos materiais presentes nas camadas do pavimento e no subleito, influenciando diretamente na capacidade de suporte da estrutura (FRANCO, 2007).

A água pode penetrar no pavimento de diversas formas e influenciar a umidade nas camadas, tais como: infiltração de água da chuva através de trincas presentes no revestimento ou pelos bordos da pista sem revestimento, variação do nível do lençol freático, ou por meio de transferência de umidade entre as camadas devido às variações de temperatura (SILVA, 2009). A Figura 10 apresenta um esquema com os possíveis acessos de água no pavimento.

Figura 10 – Possíveis acessos de água no pavimento.



Fonte: Silva (2009).

Os efeitos causados pela umidade podem alterar diretamente o comportamento mecânico da estrutura do pavimento, pois os materiais que não são estabilizados quimicamente com cimento ou asfalto, como os materiais granulares e solos finos, são

sensíveis a esta variação (FRANCO, 2007). Dessa forma, o aumento da umidade nas camadas inferiores do pavimento provoca uma variação no comportamento resiliente destes materiais. No revestimento asfáltico, a ação da água colabora no efeito da intemperização da mistura asfáltica (MEDINA E MOTTA, 2015).

Segundo Kim (2009), a temperatura atua na estrutura do pavimento através de dois efeitos mecânicos principais: a mudança da rigidez do material asfáltico e o desenvolvimento de tensões e deformações durante as mudanças de temperatura. A mistura asfáltica, por ser um material com comportamento viscoelástico, possui comportamento mecânico distinto de acordo com a temperatura em que se encontra. Além disso, as mudanças de temperatura geram efeito de dilatação ou contração térmica na mistura asfáltica, podendo levar a trincamento térmico.

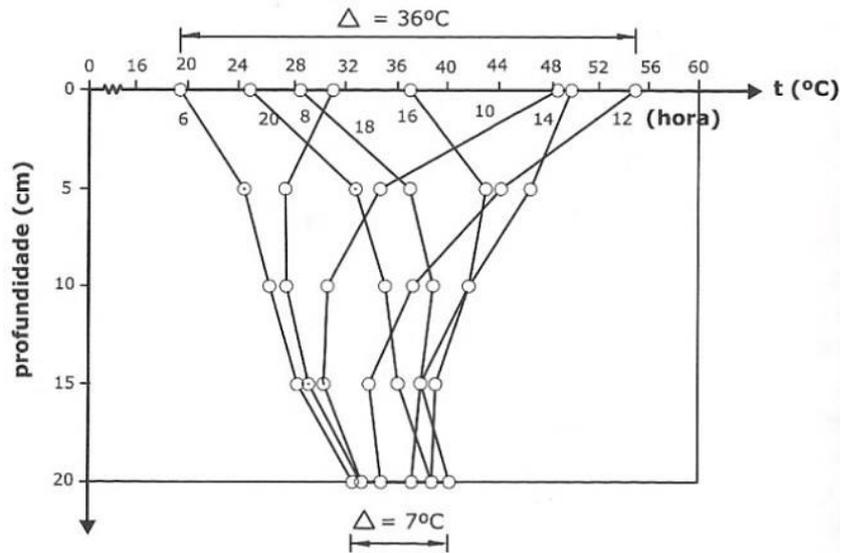
As misturas asfálticas, de maneira geral, tem baixa condutividade térmica e, por serem corpos negros, apresentam elevada absorção da radiação solar na superfície. A baixa condutividade térmica faz com que o calor recebido não seja transmitido na mesma proporção, criando altas tensões térmicas no material. Tal característica, aliada à alta absorção solar induz o desenvolvimento de elevados gradientes térmicos, com temperatura decrescente com a profundidade. Com o entardecer ou precipitação na superfície, ocorre a inversão destes gradientes térmicos. Assim, conhecer a variação diária e sazonal de temperatura do pavimento permite que sejam avaliadas as mudanças nas propriedades físicas e mecânicas dos materiais ao longo do ano (MOTTA, 1979).

Nas camadas superiores do pavimento, a temperatura varia constantemente devido a diversos fatores, incluindo a temperatura ambiente, a radiação solar, a velocidade do vento e a refletância da superfície do pavimento (DIEFENDERFER *et al.*, 2006). A temperatura da superfície do revestimento responde quase instantaneamente às variações de temperatura da atmosfera. No entanto, quanto maior a profundidade considerada, maior o tempo gasto para atingir a temperatura máxima (ou mínima) em relação à superfície e menores são as variações térmicas diárias. Tal fato pode ser observado nos resultados das medições realizadas por Motta (1979) no painel experimental instalado na COPPE, apresentado na Figura 11.

Nota-se que na superfície, a variação de temperatura foi de 36°C em um dia. Com o aumento da profundidade a variação diminui, chegando a 7°C a 20 cm de profundidade.

Assim, quanto maior a profundidade, menor a influência das variações rápidas de insolação e temperatura do ar (MOTTA, 1979).

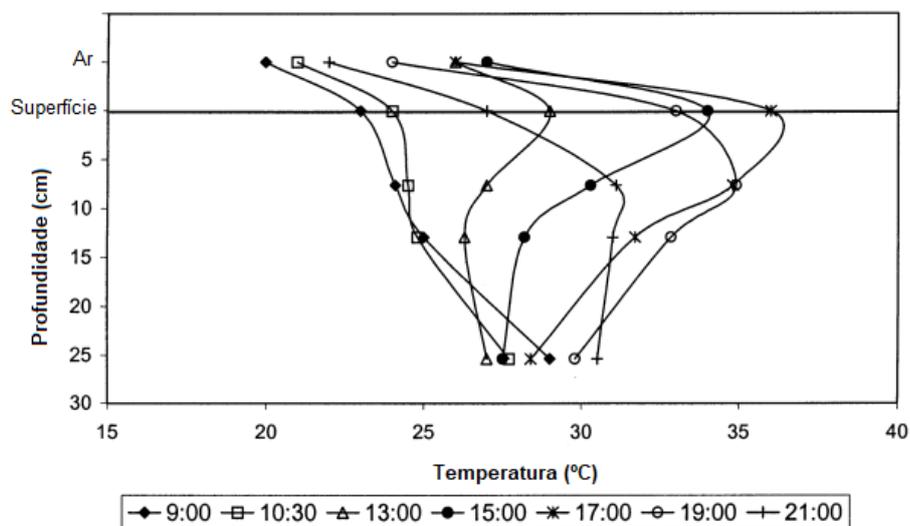
Figura 11 – Temperatura x profundidade, a cada 2 horas (24/09/1978).



Fonte: Motta (1979 *apud* MEDINA E MOTTA, 2015).

A Figura 12 apresenta o gradiente de temperatura registrado por Park *et al.* (2001) no dia 30 de julho de 1998 em um trecho experimental em Michigan.

Figura 12 – Mudança de temperatura em função da profundidade e do tempo em Michigan.



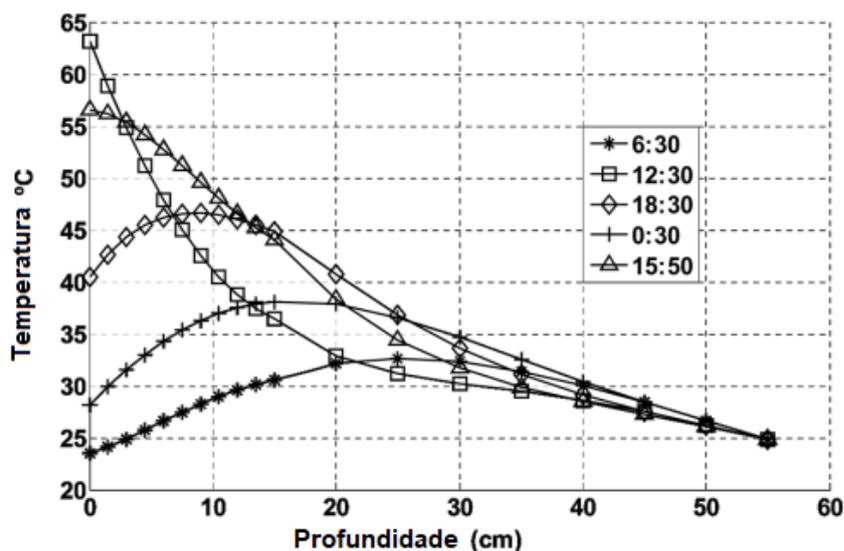
Fonte: Adaptado de Park *et al.* (2001).

Pode-se observar que a variação de temperatura na superfície é significativamente maior do que a 25 cm de profundidade. Além disso, observa-se que o gradiente de temperatura no pavimento apresenta comportamento distinto de acordo com o período do dia. No período das 13h às 17h, a temperatura na superfície é maior do que nas outras profundidades do pavimento. No entanto, no período das 21h às 10h30min ocorre o inverso, a superfície apresenta temperatura menor do que as outras profundidades.

Verifica-se que a temperatura no pavimento asfáltico varia em função da profundidade e do tempo. Abaixo de uma certa profundidade, a temperatura sofre pouca alteração com o tempo. Porém, mais próximo da superfície, a variação é maior devido à absorção da radiação solar que ocorre durante o dia e à radiação do calor armazenado para a atmosfera durante a noite. A amplitude de variação de temperatura apresentada em um determinado dia depende da quantidade de nuvens, da velocidade do vento e da época do ano (que influencia o ângulo dos raios solares) (DRUMM E MEIER, 2003).

Chong *et al.* (2009) desenvolveram um modelo analítico para descrever a transferência de calor no pavimento e estimar o perfil de temperatura no pavimento, considerando uma estrutura unidimensional com duas camadas. A Figura 13 mostra o perfil de temperatura em diferentes horários do dia. É possível observar que em profundidades menores ocorre maior variação de temperatura ao longo do dia.

Figura 13 – Perfil de temperatura em diferentes horários do dia.



Fonte: Adaptado de Chong *et al.* (2009).

Zheng *et al.* (2017) avaliaram o efeito da variação da temperatura do pavimento nas deflexões medidas em três trechos experimentais com pavimento semirrígido na província de Henan, na China. A estrutura dos trechos monitorados está apresentada na Figura 14.

Figura 14 – Estrutura dos trechos monitorados.

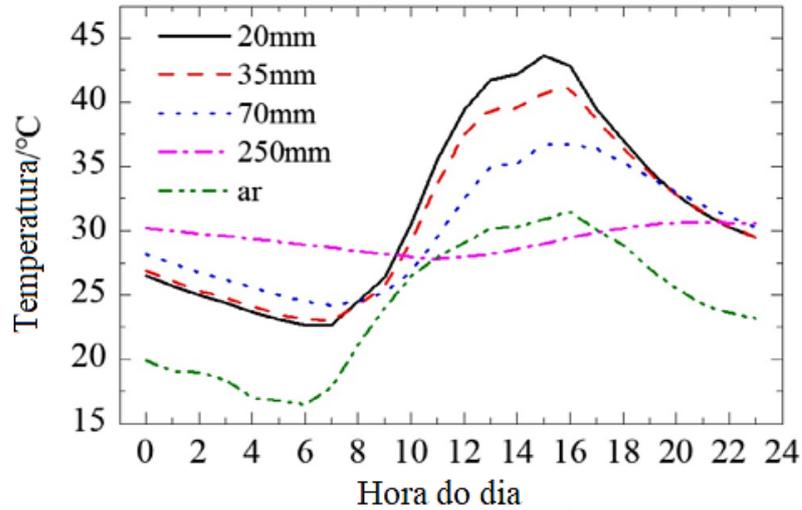
	<b>Pavimento 1</b>		<b>Pavimento 2</b>		<b>Pavimento 3</b>	
<b>Camada asfáltica</b>	AC-16F	30 mm	Modificada AK13	40 mm	Modificada AK13	40 mm
	AC-10C	40 mm	AC20	50 mm	AC20	90 mm
			AC25	60 mm	AC25	120 mm
	Macadame estabilizado com 6% de cimento	140 mm	Macadame estabilizado com 5% de cimento	300 mm	Macadame estabilizado com 5% de cimento	340 mm
<b>Base</b>	Macadame estabilizado com 5% de cimento	140 mm	Macadame estabilizado com 3% de cimento	200 mm	Macadame estabilizado com 3% de cimento	200 mm
	Macadame estabilizado com 4% de cimento	160 mm				

Fonte: Adaptado de Zheng *et al.* (2017).

Foi medida a temperatura no pavimento em diferentes profundidades (20, 35, 70 e 250 mm) durante um dia inteiro em cada estação do ano. Os dados foram coletados para cada hora do dia. A Figura 15 apresenta a relação entre a temperatura medida no pavimento 1 e a temperatura do ar ao longo do dia.

Pode-se observar que, para o pavimento analisado, a amplitude das flutuações de temperatura foi gradualmente reduzida com o aumento da profundidade, até se estabilizar próximo a 25 cm. Além disso, nota-se que a temperatura medida a 2 cm de profundidade foi maior do que nas outras profundidades no período das 9h às 18h. Porém, entre 00h e 07h o comportamento foi inverso, sendo a menor temperatura registrada a 2 cm de profundidade.

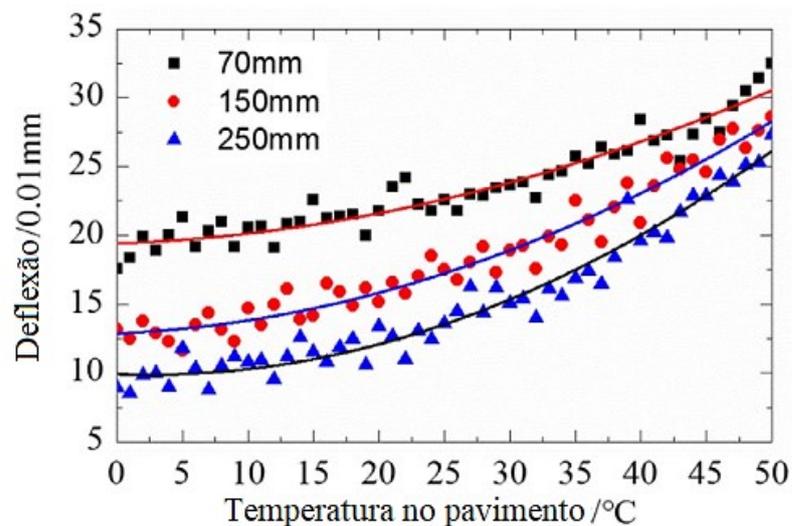
Figura 15 – Temperatura medida no pavimento 1 e temperatura do ar.



Fonte: Adaptado de Zheng *et al.* (2017).

Para verificar a influência da temperatura na deflexão do pavimento, foram feitos levantamentos com o equipamento Dynatest 8000 FWD ao longo de um dia com intervalos de uma hora, durante diferentes períodos do ano. A partir dos dados coletados, foi verificada a relação entre a deflexão máxima e a temperatura do pavimento para cada trecho experimental, conforme apresentado na Figura 16. As espessuras indicadas na legenda se referem às camadas de revestimento asfáltico de cada trecho.

Figura 16 – Relação entre deflexão máxima e temperatura do pavimento.



Fonte: Adaptado de Zheng *et al.* (2017).

Observa-se que quanto maior a temperatura do pavimento maior a deflexão máxima medida em campo, nos três trechos experimentais analisados. Assim, Zheng *et al.* (2017) ressaltam a importância de se considerar a temperatura do pavimento para analisar a deflexão máxima, pois este parâmetro é afetado significativamente pela temperatura.

Além da alteração na viscosidade do ligante, que influencia na rigidez da mistura asfálticas, as solicitações climáticas também ocasionam a oxidação do ligante asfáltico. Durante a vida de serviço, a oxidação ocorre como um resultado de fatores ambientais, como temperatura, umidade e oxigênio disponível na atmosfera. Dessa forma, a taxa de oxidação diminui com a profundidade do pavimento, gerando gradiente de viscosidade na camada asfáltica. A oxidação do ligante aumenta a rigidez e a viscosidade do concreto asfáltico, fazendo com que o material perca a sua ductilidade e se torne mais frágil com o tempo. Assim, com a atuação das cargas de tráfego, o concreto asfáltico oxidado se torna mais propenso a apresentar dano por fadiga (ABU AL-RUB *et al.*, 2013).

### **2.1.3 Avaliação de desempenho**

Segundo Vitorello (2008), a avaliação de pavimentos é um dos principais componentes de um sistema de gerência de pavimentos, pois é possível analisar se o pavimento necessita de alguma intervenção e se está atendendo as especificações de projeto. Além disso, por meio do conhecimento da condição do pavimento é possível prever seu desempenho, traçar estratégias de conservação, elaborar programas em nível de rede e estimar custos.

A avaliação de pavimentos compreende um conjunto de atividades realizadas com o objetivo principal de conhecer o estado atual do pavimento, sendo executada através de procedimentos padronizados de medições e observações a fim de quantificar seu estado funcional e estrutural (FONTES, 2009). A avaliação funcional está relacionada ao conforto e a segurança no rolamento devido à condição de superfície encontrada no pavimento, sendo diretamente ligada à qualidade operacional da via (MEDINA E MOTTA, 2015). A avaliação da condição estrutural está associada à capacidade de suporte de carga, se relacionando diretamente com o projeto e o dimensionamento do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Do ponto de vista do usuário, os defeitos e irregularidades da superfície do pavimento são os problemas mais percebidos, visto que afetam diretamente o conforto ao rolamento. Além do desconforto aos usuários, os veículos também sofrem as consequências destes defeitos superficiais, acarretando maiores custos operacionais com a manutenção, maior consumo de combustível devido à frenagem e aceleração, maior desgaste dos pneus e maior tempo de viagem (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Contudo, segundo Luz (2017), as avaliações funcionais e estruturais tem igual importância e se complementam, pois problemas funcionais que se manifestam na superfície podem surgir devido à ocorrência de alguma deficiência estrutural do pavimento.

#### 2.1.3.1 Avaliação funcional

Para a análise das condições funcionais do pavimento é necessário que sejam coletadas informações quanto aos defeitos superficiais, afundamento na trilha de roda, irregularidade longitudinal e aderência pneu-pavimento.

A avaliação objetiva do estado da superfície do pavimento é feita através do inventário de defeitos, no qual se avalia a condição da superfície a partir da quantificação e mensuração dos defeitos encontrados no trecho analisado. Em cada área a ser avaliada é registrada a presença de qualquer defeito no pavimento, seguindo a norma DNIT 005/2003 – TER (BRASIL, 2003a).

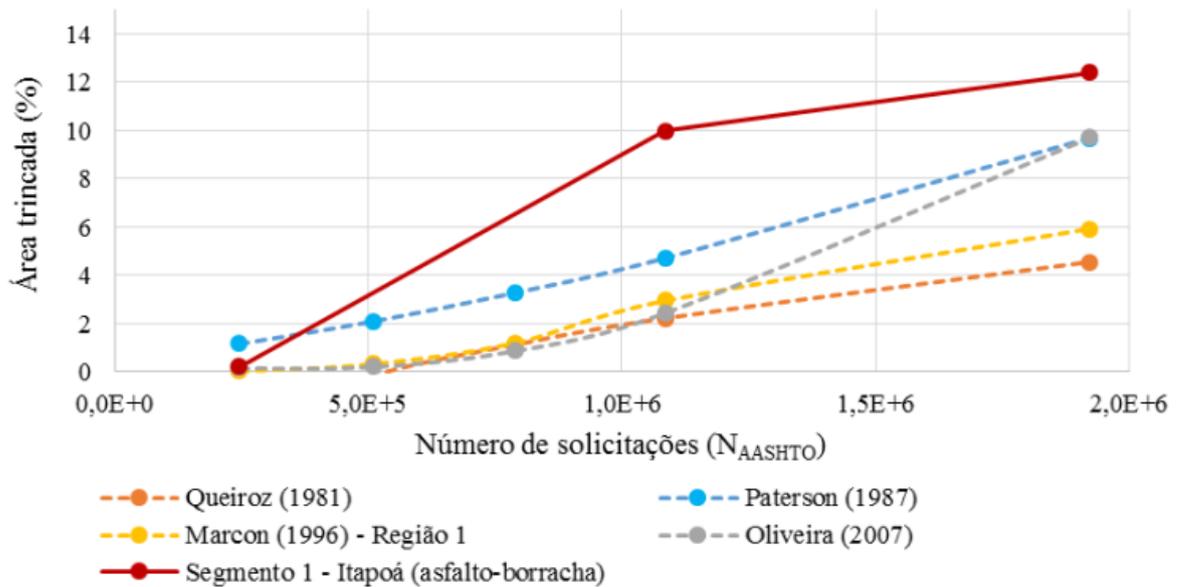
Com o inventário de defeitos superficiais é possível encontrar a porcentagem de área trincada no trecho. De acordo com Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (BRASIL, 2006), a porcentagem de área trincada por fadiga pode ser considerada como um indicativo de comprometimento estrutural, sendo tomado como parâmetro valores de trincamento maiores do que 20%.

Pérez (2016) analisou a evolução da porcentagem de área trincada do segmento monitorado da rodovia SC-416, no município de Itapoá, comparando com modelos de previsão, conforme apresentado na Figura 17.

Nota-se que o segmento monitorado teve processo de trincamento acelerado em relação a todos os modelos de previsão de desempenho adotados. Alguns dos fatores apontados por Pérez (2016) como possíveis causas da evolução rápida deste defeito foram: a

frota de caminhões carregados que se dirigem ao Porto de Itapoá, a entrada de água nas trincas abertas e a presença de uma empresa de terraplenagem que explora uma jazida de solo desde 2014 na região (não prevista no estudo de tráfego).

Figura 17 – Comparação da evolução da área trincada em relação aos modelos de desempenho.



Fonte: Pérez (2016).

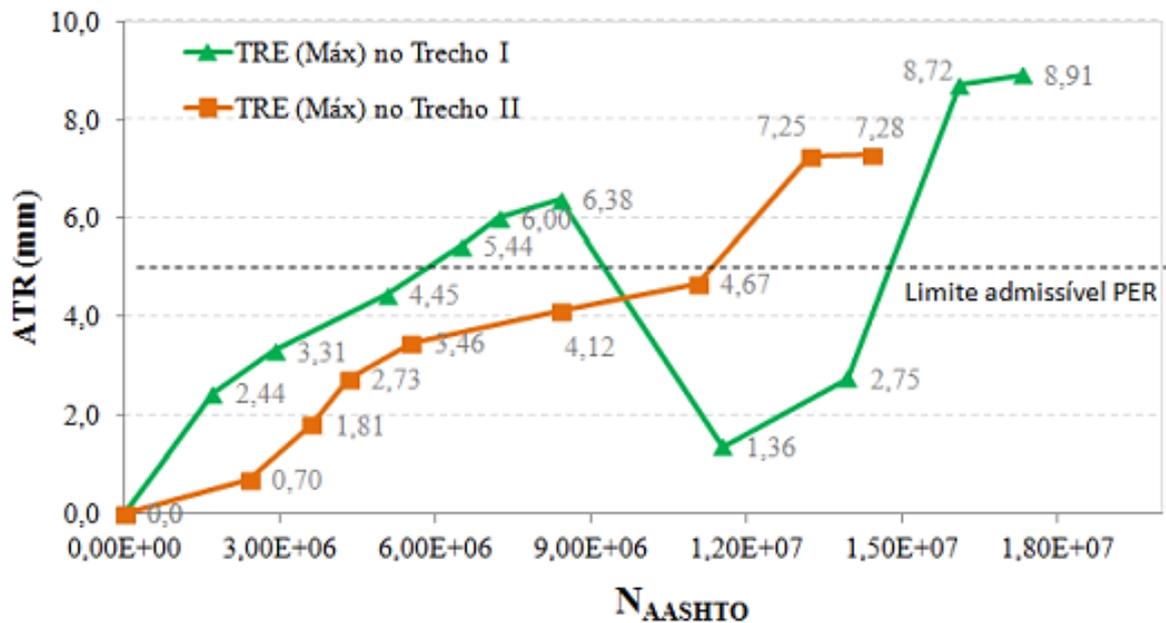
O afundamento na trilha de roda (ATR) é a deformação permanente caracterizada por uma depressão longitudinal na superfície do pavimento localizada na trilha de passagem dos pneus dos veículos. As medidas das flechas são tomadas no sulco formado nas trilhas de roda interna (TRI) e externa (TRE), sendo medida em milímetros e devendo corresponder ao ponto de máxima depressão (BRASIL, 2003b).

De acordo com DNIT (BRASIL, 2006), em condições de pavimentos com pouca declividade na seção transversal e com profundidade nas trilhas de rodas de 13 mm, pode ocorrer o armazenamento de água suficiente para criar uma situação de hidroplanagem. Além disso, afundamento nas trilhas de rodas acima de 12 mm pode indicar comprometimento estrutural do pavimento.

A Figura 18 mostra a evolução do afundamento na trilha de rodas de dois trechos da rodovia BR-290/RS avaliados por Kern (2017). Observa-se que o limite admissível determinado pelo Programa de Exploração de Rodovias (PER) foi de 5 mm. O PER especifica

as condições que devem ser seguidas pela Concessionária ao longo do prazo da Concessão, incluindo parâmetros de desempenho com limites admissíveis. Ressalta-se que este valor limite não é pontual, mas sim uma média que varia conforme os contratos.

Figura 18 – Valores máximos (trilha externa) dos dois trechos monitorados (BR-290/RS).



Fonte: Kern (2017).

Nota-se, na Figura 18, que há uma redução no afundamento do Trecho I próximo ao tráfego de  $9,0 \times 10^6$ . Isto se deve à aplicação de microrevestimento asfáltico, o que diminuiu o afundamento neste ponto. No entanto, verifica-se que houve aumento gradativo, alcançando valores superiores aos medidos antes da aplicação do microrevestimento. Além disso, pode-se observar que o Trecho I apresenta taxa crescimento de ATR maior do que a do Trecho II, até mesmo após a intervenção. Kern (2017) aponta que tal diferença de comportamento pode estar associada aos materiais utilizados na construção dos dois trechos, sendo que no Trecho I os solos moles foram substituídos por areia e no Trecho II por blocos de rochas, o que levou a uma evolução mais lenta de deformações.

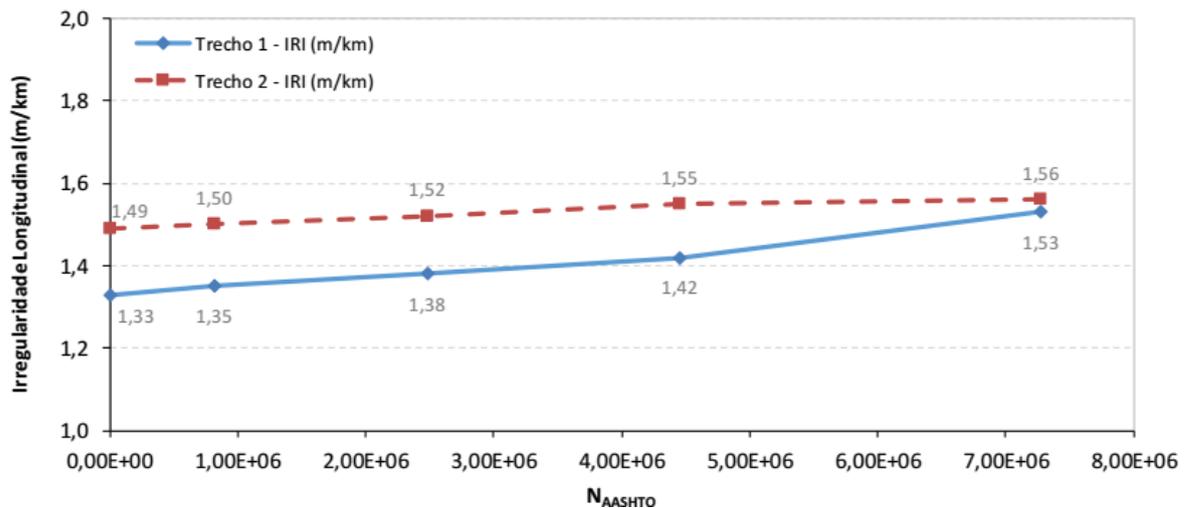
A irregularidade longitudinal do pavimento, segundo a norma DNER – PRO 164/94 (BRASIL, 1994), é definida como o conjunto de desvios da superfície da rodovia em relação a um plano de referência, que afeta a dinâmica dos veículos, a qualidade de rolamento e as

cargas dinâmicas sobre a via. A escala utilizada internacionalmente para medidas de irregularidade é o *International Roughness Index*, também conhecido por IRI, cuja unidade de medida é m/km (BARELLA, 2008).

Bock (2016) avaliou a evolução da irregularidade longitudinal de dois trechos da BR-448/RS. Os trechos experimentais apresentam estrutura constituída de 5 cm de concreto asfáltico polimérico, 14 cm de concreto asfáltico convencional, 19 cm de base de brita graduada e 21 cm de sub-base de macadame seco. A diferença entre os dois trechos está nas soluções de projeto adotadas na camada de reforço do subleito. No Trecho 1 foram instalados geodrenos para melhorar a capacidade de carga do terreno de fundação de aterro. No Trecho 2, foi realizada a remoção e substituição dos solos compressíveis por solo arenoso, formando colchão drenante antecedendo a execução do aterro. Na Figura 19 apresenta-se a evolução da irregularidade nos dois trechos em função do tráfego atuante na rodovia no período monitorado.

Pode-se observar que o Trecho 1 apresentou irregularidade inicial menor do que o Trecho 2. Porém, nota-se que a taxa de evolução do Trecho 1 é maior do que a taxa do trecho 2, o que faz com que haja uma aproximação dos valores com tráfego em torno de  $7,00 \times 10^6$ . Tal diferença de desempenho pode estar associada à solução adotada no subleito, de forma que possíveis evoluções dos recalques possam estar afetando a estrutura do Trecho 1.

Figura 19 – Evolução da irregularidade longitudinal dos trechos monitorados da BR-448/RS.



Fonte: Bock (2016).

Bock (2016) salienta que o Programa de Exploração da Rodovia (PER) estabelece como limite admissível de irregularidade inicial de 2,5 m/km. Pode-se observar que até o último levantamento os valores de irregularidade estão bem abaixo do limite, indicando bom processo construtivo.

Os desvios da superfície influenciam os custos operacionais dos veículos e das viagens, afetando a segurança, o conforto e a velocidade de operação. A dinâmica dos veículos em movimento alterada pela irregularidade longitudinal leva ao aumento do desgaste do veículo e acelera o processo de degradação do pavimento (BRASIL, 2006).

Fernandes Júnior e Barbosa (2000) analisaram o impacto da irregularidade longitudinal do pavimento sobre as cargas dinâmicas dos veículos através do programa computacional *TruckSim*. Os autores verificaram que, devido à irregularidade do pavimento, ocorrem picos de sobrecarga e alívio durante todo perfil. O aumento da carga aplicada pelos veículos intensifica o processo de deterioração do pavimento. Deste modo, Fernandes Júnior e Barbosa (2000) ressaltam a importância de se manter o pavimento em boas condições de rolamento de forma a reduzir os efeitos deletérios das cargas dinâmicas.

A condição da superfície com relação à aderência pneu-pavimento é um dos parâmetros utilizados para avaliar a segurança da via. A interação entre o pneu do veículo e a superfície da camada de rolamento do pavimento deve ser garantida de forma a manter o veículo em sua trajetória mesmo em condições adversas. Tal interação depende diretamente da qualidade da textura da área de contato entre o pneu e o pavimento, que pode ser definida por meio de duas escalas de textura: a microtextura e a macrotextura (MATTOS, 2014).

As propriedades de microtextura e macrotextura variam durante a vida útil do pavimento, bem como a influência destas na resistência à derrapagem. Logo após a compactação da camada de revestimento, a macrotextura é a componente principal do atrito no pavimento. Gradualmente, com a ação do tráfego e das condições climáticas, a camada de ligante asfáltico que recobre os agregados da superfície é removida, fazendo com que a microtextura contribua como componente adicional no atrito. Após esta fase, a microtextura e a macrotextura tendem a se tornar gradativamente menores até atingir uma condição de equilíbrio. Tal redução ocorre devido à abrasão das arestas vivas dos agregados causada pela passagem dos pneus, pela presença de detritos na rodovia e por fatores ambientais, como oxidação e ciclos de gelo/desgelo (VILLANI, 2015).

### 2.1.3.2 Avaliação estrutural

Segundo Bernucci *et al.* (2008), a avaliação estrutural está associada ao conceito de capacidade de carga, se relacionando diretamente com o projeto do pavimento e seu dimensionamento. Os defeitos estruturais são, especialmente, resultados da repetição do carregamento e são vinculados às deformações elásticas ou recuperáveis e plásticas ou permanentes.

As deformações plásticas permanecem mesmo após cessar o efeito da atuação da carga, sendo consideradas de caráter residual. Estas deformações são acumulativas ao longo da vida do pavimento, resultando em defeitos como afundamento nas trilhas de rodas. As deflexões recuperáveis são consideradas como um indicativo do comportamento elástico da estrutura, pois deixam de existir alguns momentos após a retirada da carga (BERNUCCI *et al.*, 2008; BRASIL, 2006).

As deformações elásticas estão relacionadas com o surgimento da maioria dos trincamentos ao longo da vida do pavimento, podendo levar à fadiga do revestimento. A avaliação das deformações elásticas é feita através de equipamentos próprios denominados de deflectômetros, pois medem a deflexão, ou seja, os deslocamentos verticais do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2008; BRASIL, 2006).

De acordo com o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (BRASIL, 2006), quanto maior for o valor de deflexão recuperável, maior é o comprometimento estrutural das camadas do pavimento e/ou subleito. Além disso, um raio de curvatura baixo indica que há um severo arqueamento da bacia de deformações, denotando condição estrutural crítica.

Através da interpretação das bacias de deformação é possível ainda inferir os módulos de elasticidade das camadas do pavimento e do subleito, cujo procedimento é conhecido por retroanálise. Conhecendo-se a carga externa aplicada para qual a bacia deflectométrica foi gerada, as características básicas dos materiais presentes nas camadas e as espessuras das camadas, é possível estimar os módulos de elasticidade dos materiais das camadas que compõem a estrutura do pavimento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Medina e Motta (2015) ressaltam que a retroanálise é o procedimento inverso ao dimensionamento de um pavimento novo, pois se tem as deformações resultantes de um

carregamento conhecido e deseja-se conhecer os módulos que conduziram àquelas deformações elásticas.

Para calcular os módulos a partir da bacia deflectométrica, diversos *softwares* podem ser utilizados. Tais programas possibilitam a estimativa dos módulos das camadas do pavimento a partir de métodos iterativos, que visam minimizar o erro absoluto ou erro quadrático e obter o melhor ajuste entre a bacia deflectométrica medida em campo e a calculada pelo programa.

Dentre os programas computacionais utilizados para este fim pode-se citar o ELSYM5, EVERCALC, FEPAVE2, JULEA, BAKFAA, KENLAYER, BISAR e BackSisPavBR (LUZ, 2017). Além destes, juntamente com o programa MeDiNa, foi lançado o BackMeDiNa em 2018, que realiza retroanálise dos módulos a partir das bacias deflectométricas obtidas com o equipamento do tipo FWD.

## 2.2 COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

### 2.2.1 Comportamento reológico

De maneira geral, a reologia pode ser compreendida como o estudo da deformabilidade de materiais devido a um carregamento, levando em consideração o tempo de aplicação da carga. Para misturas asfálticas, além do tempo de aplicação do carregamento, também deve ser levada em consideração a temperatura, pois os materiais betuminosos variam de consistência significativamente dependendo da temperatura em que se encontram. Dessa forma, a finalidade do estudo do comportamento reológico de materiais betuminosos é encontrar a relação entre deformação, tensão, tempo de aplicação de carga e temperatura (PINTO, 1991).

As propriedades reológicas dos ligantes asfálticos são parâmetros importantes para a predição do desempenho da mistura asfáltica no pavimento, pois ligantes que se deformam e fluem facilmente podem fazer com que o pavimento seja mais propenso a apresentar deformação permanente, enquanto que ligantes com elevada rigidez podem ser mais susceptíveis a fadiga (YUSOFF, 2012).

O ligante asfáltico e, conseqüentemente, a mistura asfáltica, são materiais viscoelásticos, pois podem apresentar características viscosas e elásticas. Em elevadas

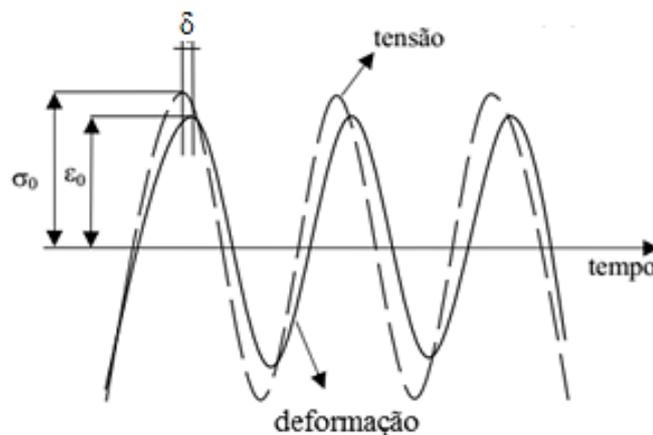
temperaturas, o ligante asfáltico se comporta como um fluido viscoso e em baixas temperaturas, como um sólido quase elástico. Porém, em campo, as misturas asfálticas estão submetidas a temperaturas intermediárias, onde o comportamento é viscoelástico (SHRP, 1994 *apud* FONTES, 2009).

Além da temperatura, o tempo de carregamento também influencia o comportamento da mistura asfáltica devido às características herdadas do ligante. Quando a carga é aplicada rapidamente, o concreto asfáltico apresenta comportamento quase elástico, enquanto que em condições de carregamento lento, o comportamento é predominantemente viscoso. Entre os dois extremos, o comportamento é viscoelástico (MOMM, 1998).

O módulo complexo é um parâmetro de rigidez através do qual se torna possível contabilizar os efeitos da temperatura e da frequência de carregamento aplicada, sendo considerado o comportamento viscoelástico da mistura através da análise das componentes elástica e viscosa (MARCON, 2016).

O módulo complexo ( $E^*$ ) é a razão entre a amplitude de tensão sinusoidal de pulsação aplicada a um material e a amplitude de deformação sinusoidal de resposta ao carregamento. Quando uma tensão é aplicada nas misturas asfálticas, devido às características viscoelásticas, a deformação em resposta ao carregamento é defasada por certo intervalo de tempo, conforme pode ser visto na Figura 20, criando um ângulo de fase ( $\delta$ ) (FONTES, 2009).

Figura 20 – Defasagem entre tensão e deformação.



Fonte: Adaptado de Fontes (2009).

Através da matemática complexa, pode-se expressar a tensão aplicada, a deformação resultante e o módulo complexo, conforme apresentado nas Equações (5), (6) e (7), respectivamente.

$$\sigma^* = \sigma_0 e^{i\omega t} \quad (5)$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 e^{i(\omega t - \delta)} \quad (6)$$

$$\frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = E^*(i\omega) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} e^{i\delta} = |E^*| e^{i\delta} \quad (7)$$

Sendo:

$\sigma^*$  e  $\varepsilon^*$  = valores complexos da tensão e da deformação, no tempo  $t$ ;

$\sigma_0$  e  $\varepsilon_0$  = valores de amplitude da tensão aplicada e da deformação, no tempo  $t$ ;

$\omega$  = velocidade angular ( $2\pi f$ , onde  $f$  é a frequência do carregamento);

$i$  = número imaginário;

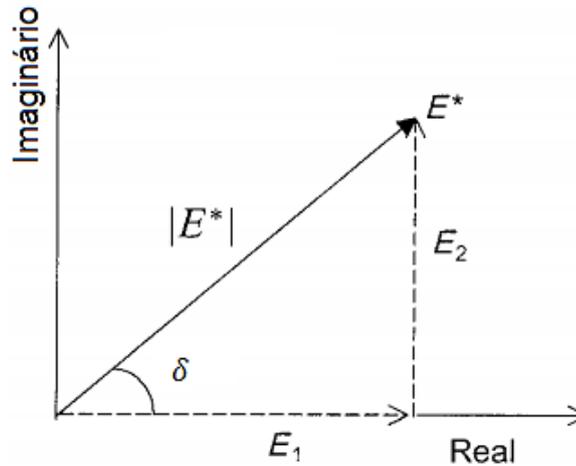
$\delta$  = ângulo de fase;

$E^*$  = módulo complexo ou de rigidez.

A parcela real do módulo complexo é denominada módulo de armazenamento ou módulo elástico ( $E_1$ ), e a parcela imaginária é chamada de módulo de perda ou módulo viscoso ( $E_2$ ), conforme pode ser visto na Figura 21. Assim, o módulo complexo pode ser expresso na Equação (8) (OTTO, 2009; MARCON, 2016).

$$E^*(i\omega) = E_1 + iE_2 \quad (8)$$

Figura 21 – Representação do módulo complexo.



Fonte: Adaptado de Kim (2009).

Os materiais puramente elásticos não apresentam defasagem entre a tensão aplicada e a deformação obtida, dessa forma, possuem ângulo de fase  $\delta$  igual a  $0^\circ$ . Materiais completamente viscosos têm a deformação totalmente defasada, correspondendo a um ângulo de fase igual a  $90^\circ$ . No entanto, materiais viscoelásticos podem apresentar ângulo de fase dentro desta faixa de variação ( $0^\circ$  a  $90^\circ$ ) (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Segundo Hou (2009), devido à dependência da temperatura e do tempo de carregamento apresentada pelas misturas asfálticas, para conhecer seu comportamento é necessário que sejam realizados ensaios de rigidez em diversas frequências de carregamento e temperatura. No entanto, por limitações de tempo de ensaio e capacidade dos equipamentos, esta é uma tarefa sempre difícil de executar. Dessa forma, utiliza-se do princípio da superposição tempo-temperatura para reduzir o tempo de ensaio.

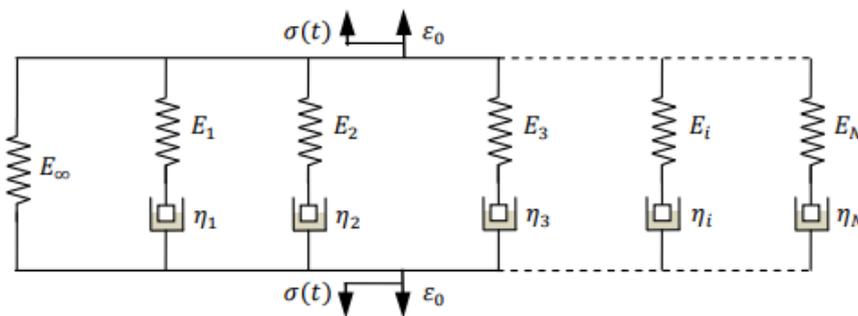
De acordo com este princípio, a mesma rigidez pode ser obtida em baixas temperaturas com tempo de ensaio longo ou em altas temperaturas com tempo curto. Assim, pode ser feita a superposição através do deslocamento horizontal dos valores de módulos em diferentes temperaturas para uma temperatura de referência (HOU, 2009). Deste modo, torna-se possível encontrar a rigidez da mistura asfáltica em diferentes temperaturas e frequência de carregamento.

Diversos modelos físico-matemáticos foram desenvolvidos para representar e descrever o comportamento complexo dos materiais viscoelásticos. Tais modelos são

geralmente compostos por arranjos de molas e amortecedores, representando a parcela elástica e viscosa, respectivamente (MELO, 2014). Para este estudo, o modelo generalizado de Maxwell e o modelo de Huet-Sayegh são os mais relevantes, pois são os modelos utilizados para descrever fisicamente o comportamento das misturas asfálticas nos programas computacionais utilizados na pesquisa.

O modelo generalizado de Maxwell, ou Wiechert, é composto pela soma de modelos elementares de Maxwell, em paralelo, adicionando uma mola, também em paralelo, conforme pode ser visto na Figura 22 (KIM, 2009).

Figura 22 – Esquemática do modelo generalizado de Maxwell.



Fonte: Silva (2009).

Para descrever o módulo de relaxação, a representação em uma série de Prony é dada pela Equação (9).

$$E(t) = E_{\infty} + \sum_{i=1}^n E_i e^{-\frac{t}{\rho_i}} \quad (9)$$

Sendo:

$E(t)$  = módulo de relaxação;

$E_{\infty}$  = rigidez do elemento elástico em paralelo;

$E_i$  = rigidez do elemento elástico  $i$ ;

$t$  = tempo de carregamento;

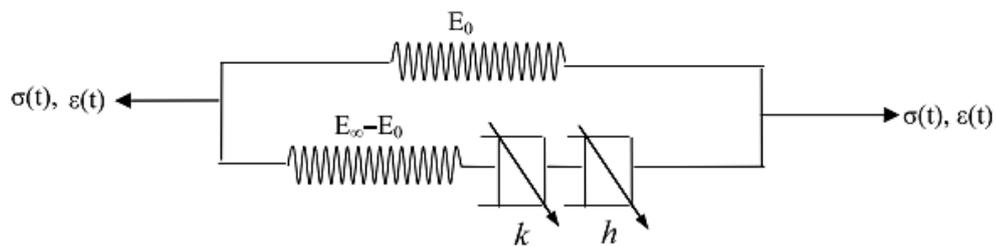
$\rho_i$  = tempo de relaxação associado a cada modelo elementar  $i$ ;

$n$  = número de modelos elementares.

A popularidade da representação em série de Prony é atribuída principalmente à sua capacidade de descrever uma ampla gama de respostas viscoelásticas e à eficiência computacional relativamente simples e robusta associada às suas funções de base exponencial (PARK *et al.*, 1996 *apud* KIM, 2009). Este modelo é utilizado para descrever fisicamente o comportamento da mistura asfáltica na teoria do dano contínuo viscoelástico, sendo utilizado para obter o módulo de relaxação da mistura. Este módulo é incorporado nas análises da teoria S-VECD e no *software* LVECD (NASCIMENTO, 2015).

O modelo de Huet-Sayegh é formado por dois ramos paralelos, sendo o primeiro composto por uma mola em série com dois amortecedores parabólicos e o segundo ramo constituído de uma mola, conforme representado na Figura 23. Segundo Xu e Solaimanian (2009), o modelo de Huet-Sayegh pode descrever corretamente o módulo dinâmico das misturas asfálticas para uma vasta gama de frequências utilizando menor número de parâmetros, se comparado aos outros modelos.

Figura 23 – Modelo reológico de Huet-Sayegh.



Fonte: Adaptado de Xu e Solaimanian (2009).

O módulo complexo através do modelo de Huet-Sayegh é dado pela Equação (10).

$$E^*(i\omega\tau(\theta)) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau(\theta))^{-k} + (i\omega\tau(\theta))^{-h}} \quad (10)$$

$$\tau(\theta) = e^{A_1 + A_2\theta + A_3\theta^2} \quad (11)$$

Sendo:

$E^*$  = módulo complexo;

$E_{\infty}$  = módulo complexo infinito (quando  $\omega\tau$  tende ao  $\infty$ , para elevadas frequências e baixas temperaturas);

$E_0$  = módulo estático;

$i$  = número imaginário ( $i^2 = -1$ );

$\tau$  = tempo de relaxação dos amortecedores, que é um parâmetro em função do tempo e varia em função da temperatura ( $\theta$ );

$\omega$  = frequência angular da sollicitação ( $2\pi f$ , onde  $f$  é a frequência do carregamento);

$k, h$  = parâmetros dos elementos parabólicos, situados no intervalo  $0 < k < h < 1$ ;

$\delta$  = constante adimensional, função da natureza do ligante asfáltico e da granulometria da mistura asfáltica;

$A_0, A_1, A_2$  = parâmetros escalares.

As constantes utilizadas no modelo de Huet-Sayegh podem ser determinadas graficamente por meio dos dados experimentais plotados no plano Cole-Cole e no espaço de Black. Os parâmetros reológicos do modelo também podem ser ajustados utilizando o *software* Viscoanalyse, desenvolvido pelo *Laboratoire Central de Ponts e Chaussées* (LCPC) para este propósito (QUINTERO, 2011).

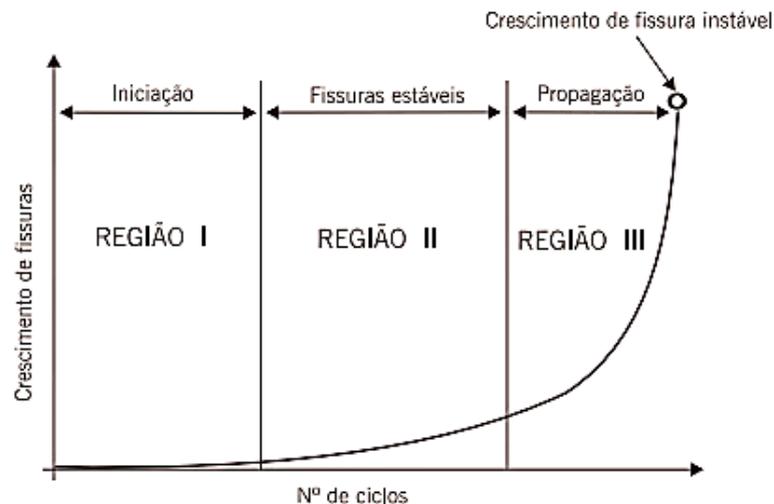
O modelo reológico de Huet-Sayegh é utilizado no *software* Viscoroute para descrever o comportamento da mistura asfáltica considerando a velocidade do carregamento e a temperatura da mistura na modelação (MELO, 2014).

### 2.2.2 Fadiga

O mecanismo de formação de trincas por fadiga é bastante complexo, sendo função das propriedades do ligante, das características da mistura asfáltica e da estrutura do pavimento (MARTINS, 2014; FONTES, 2009). A fadiga é um processo progressivo, que se inicia com microfissuração e pode levar ao rompimento do material. Tal fenômeno ocorre devido às cargas cíclicas aplicadas através do tráfego que, juntamente com ações térmicas, produzem fissuras para valores de tensão bem abaixo dos valores de tensão para ruptura (BERNUCCI *et al.*, 2008). Assim, o processo de trincamento por fadiga pode ser dividido em três estágios principais, conforme pode ser visto na Figura 24, sendo:

- Região I: mudanças microestruturais e as microfissuras se iniciam;
- Região II: início das microfissuras, geradas a partir da junção das microfissuras;
- Região III: crescimento rápido das microfissuras, levando ao colapso total do material.

Figura 24 – Estágios do processo de fadiga.

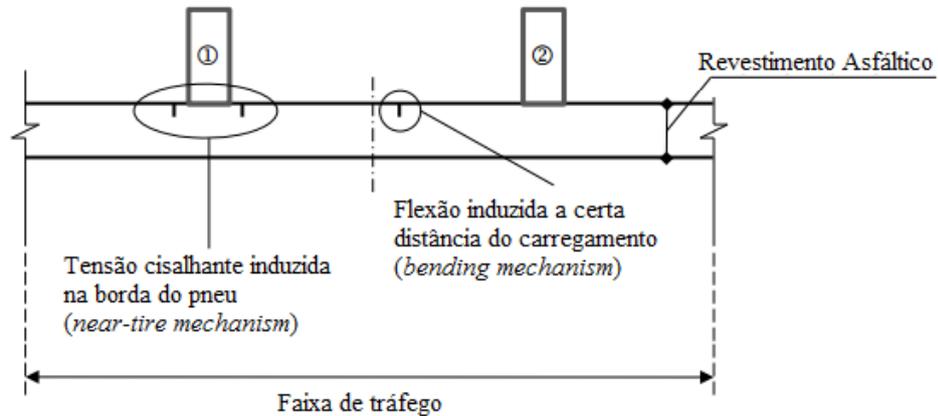


Fonte: Bernucci *et al.* (2008).

As trincas por fadiga nos revestimentos asfálticos podem ser classificadas de acordo com o mecanismo de trincamento e a região onde se iniciam as microfissuras, podendo ser do tipo *bottom-up cracking* ou do tipo *top-down cracking* (HOU, 2009). As trincas *bottom-up* se iniciam na fibra inferior da camada de revestimento devido à tensão de tração induzida nesta região e, à medida que o carregamento continua atuando no pavimento, se propagam para cima até a superfície da camada. As trincas *top-down* se iniciam na superfície do pavimento e se propagam para baixo, adentrando na camada de revestimento asfáltico (GU *et al.*, 2018).

Diversas pesquisas têm sido realizadas com o intuito de identificar o mecanismo que leva ao aparecimento e à propagação das trincas *top-down*. Segundo Roque *et al.* (2010) dois mecanismos principais devem ser considerados na previsão do surgimento deste tipo de trinca, conforme apresenta o esquema da Figura 25.

Figura 25 – Esquema dos mecanismos de aparecimento das trincas *top-down*.



Fonte: Adaptado de Roque *et al.* (2010).

O primeiro mecanismo é associado à tensão cisalhante induzida na superfície no contato da borda do pneu, denominado *near-tire mechanism*, que seria responsável pelo aparecimento deste tipo de trinca em pavimentos com camada espessa de revestimento. O segundo mecanismo está associado à tensão de flexão induzida na superfície do pavimento distante do pneu, chamado de *bending mechanism*, cujo aparecimento tem sido relacionado às camadas de revestimento asfáltico de espessura fina a média. Os dois mecanismos que levam às trincas se tornam mais críticos com o processo de envelhecimento do ligante asfáltico na superfície e podem ser influenciados também pelo gradiente térmico e pela presença de zonas deterioradas (ROQUE *et al.*, 2010).

Pacheco (2014) verificou através de análises com elementos finitos que as maiores tensões cisalhantes não ocorrem no topo do revestimento, mas sim a cerca de 2 a 4 cm abaixo da superfície. Além disso, destacou que as maiores tensões cisalhantes são geradas quando há gradiente térmico negativo na camada, ou seja, temperatura crescente com a profundidade.

#### 2.2.2.1 Ensaio de resistência à fadiga

Atualmente, diversos tipos de ensaios laboratoriais são utilizados para o estudo do comportamento à fadiga das misturas asfálticas, como: flexão simples, flexão alternada 3 pontos, flexão alternada 4 pontos, compressão diametral, entre outros. No Brasil, o ensaio

mais realizado é por compressão diametral de corpo de prova cilíndrico à tensão controlada (BERNUCCI *et al.*, 2008).

A facilidade de execução, tanto para moldagem quanto para o sistema de carregamento, fez com que fosse o ensaio mais usual no País (MEDINA E MOTTA, 2015). Porém, Tayebali *et al.* (1994) apontam que um dos principais problemas relacionados com o ensaio de compressão diametral em corpos de prova cilíndricos é o acúmulo de deformações que ocorrem durante o ensaio, fazendo com que a vida de fadiga seja subestimada.

Apesar de permitirem uma boa investigação da vida de fadiga dos materiais, os ensaios laboratoriais demandam tempo. Se não houver uma programação, tal fato que pode inviabilizar sua utilização no desenvolvimento de um projeto. Sendo assim, a obtenção de modelos laboratoriais eficazes permitem que a caracterização das misturas asfálticas quanto à fadiga seja realizada de maneira otimizada (DE MELLO, 2008).

#### 2.2.2.2 Caracterização do comportamento à fadiga

Segundo Zeiada (2012), existem duas abordagens principais de modelos utilizados para caracterizar o comportamento a fadiga de misturas asfálticas: a fenomenológica e a mecanística. A abordagem fenomenológica é simples, porém a evolução do dano no processo de fadiga não é considerada. Já a análise mecanística, apesar de ser mais complexa, é baseada em propriedades dos materiais através de relação de tensão e deformação.

Na abordagem fenomenológica os resultados do ensaio de fadiga são interpretados de forma a relacionar a tensão ou a deformação aplicada com a resistência à fadiga. Os primeiros modelos de fadiga aplicados em misturas asfálticas levavam em consideração relações similares às desenvolvidas por Whöler para metais e relacionam o número de ciclos com a amplitude da deformação inicial imposta no material, de acordo com a Equação (12) (SCHÜTZ, 1996 *apud* DE MELLO, 2008).

$$N_f = k_1 \left( \frac{1}{\varepsilon_0} \right)^{k_2} \quad (12)$$

Sendo:

$N_f$  = vida de fadiga correspondente a um critério de ruptura

$\varepsilon_0$  = deformação inicial

$k_1, k_2$  = coeficientes determinados experimentalmente

A Equação (12) pode ser utilizada para ensaios a deformação controlada ou a tensão controlada, neste caso substituindo a deformação inicial por tensão. Geralmente, o critério de ruptura utilizado em ensaios de tensão controlada é a ruptura total da amostra enquanto que em ensaios de deformação controlada o critério utilizado normalmente é a redução de 50% da rigidez inicial da mistura (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Além dos modelos fenomenológicos, há diversos outros desenvolvidos a partir da abordagem mecanicista, como os modelos que utilizam o conceito de energia dissipada, da mecânica da fratura e do dano contínuo (ZEIADA, 2012).

Segundo Nascimento (2015), a teoria do dano contínuo viscoelástico (*Viscoelastic Continuum Damage – VECD*) tem sido utilizada com sucesso para caracterizar misturas asfálticas nos Estados Unidos. Esta abordagem leva em consideração propriedades intrínsecas dos materiais para caracterizar o comportamento à fadiga das misturas em uma vasta gama de condições através de um programa experimental simplificado.

A teoria VECD utiliza a série de Prony obtida a partir do modelo de Maxwell generalizado, apresentada na Equação (9), para descrever o comportamento da mistura asfáltica e se baseia em três princípios fundamentais: (i) Teoria do trabalho potencial de Schapery, (ii) Princípio da correspondência elástico-viscoelástico e (iii) Superposição tempo-temperatura com dano. Uma revisão completa a respeito destes conceitos pode ser obtida em Kim e Little (1990).

De acordo com Kim *et al.* (2017), uma das propriedades mais importantes determinadas através do método VECD é a curva característica do dano, na qual a queda de rigidez do material (C) é relacionada com o acúmulo do dano (S). Tal relação independe das condições de ensaio utilizadas, sendo considerada uma propriedade do material.

Com isso, tem-se a grande vantagem do modelo: se para diferentes condições de carregamento tem-se a mesma curva característica de dano, então é possível realizar a análise inversa e, a partir da curva característica do material, encontrar sua resposta em diferentes condições daquelas utilizadas para gerá-la (MARTINS, 2014). A única condição que deve ser obedecida é de que a temperatura de ensaio e a taxa de carregamento sejam combinadas de

forma a permitir que apenas o comportamento elástico e viscoelástico prevaleçam, evitando o efeito viscoplástico (KIM, 2009).

Segundo Nascimento (2015), o modelo VECD, que é baseado no ensaio de carregamento monotônico de tração direta sob deformação controlada, apresentou algumas desvantagens práticas. Para o ensaio ser realizado com deformação constante medida no atuador, o pico de carga necessário é próximo da capacidade de carga do equipamento *Asphalt Material Performance Tester* (AMPT). Deste modo, o equipamento precisa impor elevada tensão no início do ensaio e, para manter a deformação constante, reduzir a uma tensão significativamente baixa no final do ensaio, o que exige um atuador de carga com elevado nível de sofisticação.

Buscando um modelo que pudesse ser caracterizado por meio de um ensaio cíclico, de maneira rápida e simples, Underwood *et al.* (2010) propuseram um novo modelo simplificado, denominado *Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model* (S-VECD). Neste novo modelo, para simplificação, os autores consideraram que apenas a condição de carregamento de tração acumularia o dano por fadiga (NASCIMENTO, 2015).

Kim *et al.* (2017) ressaltam duas vantagens do uso do S-VECD. A primeira é que a curva característica do dano independe da temperatura, amplitude de tensão/deformação, frequência de carregamento e modo de carregamento. Isto permite que o ensaio seja realizado apenas com três ou quatro amplitudes de deformação em uma única temperatura e depois ser extrapolado para outras temperaturas, carregamentos e frequências. A segunda vantagem apontada é que o S-VECD se baseia na relação constitutiva do material, o que permite que o mesmo seja incorporado em um modelo de previsão de desempenho de pavimentos mecanicista.

O *software* LVECD, desenvolvido por Eslaminia *et al.* (2012), incorpora o modelo S-VECD para simulações de desempenho do pavimento. Análises tridimensionais são realizadas considerando a solicitação de cargas móveis e variações de temperatura com o tempo e com a profundidade da camada para, então, prever tensão, deformação e desempenho à fadiga no pavimento (KIM *et al.*, 2017).

### 2.2.2.3 Influência da temperatura na resistência à fadiga

A temperatura influencia significativamente o comportamento mecânico das misturas asfálticas. Consequentemente, a temperatura utilizada durante o ensaio, na abordagem fenomenológica, afeta a vida de fadiga obtida para a mistura asfáltica. No caso da abordagem S-VECD, conforme apresentado anteriormente, apesar de influenciar no comportamento do material, a temperatura utilizada durante o ensaio não altera a curva característica do dano obtida para a mistura asfáltica.

De maneira geral, sabe-se que ocorre redução na rigidez da mistura com o aumento da temperatura. No entanto, tal relação pode ser influenciada pelo modo de carregamento adotado no ensaio, podendo aumentar ou diminuir a vida de fadiga da mistura.

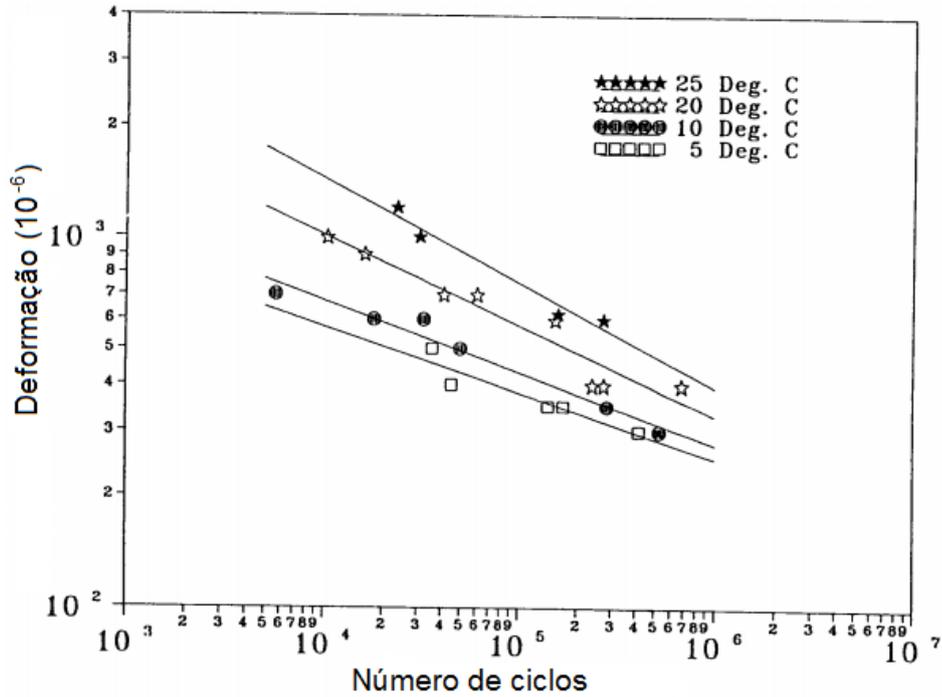
De acordo com Momm (1998), para ensaios à deformação controlada, observa-se que o aumento da temperatura leva a um aumento da vida de fadiga. Tal fato está relacionado ao menor aquecimento interno da amostra, pois a tensão diminui no decorrer do ensaio. Em ensaios à tensão controlada, como a deformação cresce ao longo do ensaio, há um maior aquecimento interno na amostra. Neste caso, o aumento da temperatura de ensaio leva à redução da vida de fadiga.

Tayebali *et al.* (1994) verificaram a influência da temperatura na fadiga em ensaios a flexão 4 pontos com temperaturas de 5°C, 10°C, 20°C e 25°C. Os ensaios foram realizados com deformação controlada e frequência de carregamento de 10 Hz. Na Figura 26, pode-se observar que, para uma mesma deformação, o aumento na temperatura de ensaio leva a uma vida de fadiga maior.

Entretanto, Domec (2005) e Quintero (2016) verificaram que a resistência à fadiga não é sempre crescente com o aumento da temperatura. A Figura 27 apresenta as curvas de fadiga obtidas por Domec (2005) para mistura asfáltica com ligante 50/70 através do ensaio de flexão dois pontos sob deformação controlada, na frequência de 40 Hz, nas temperaturas de 0°C, 10°C, 20°C e 30°C.

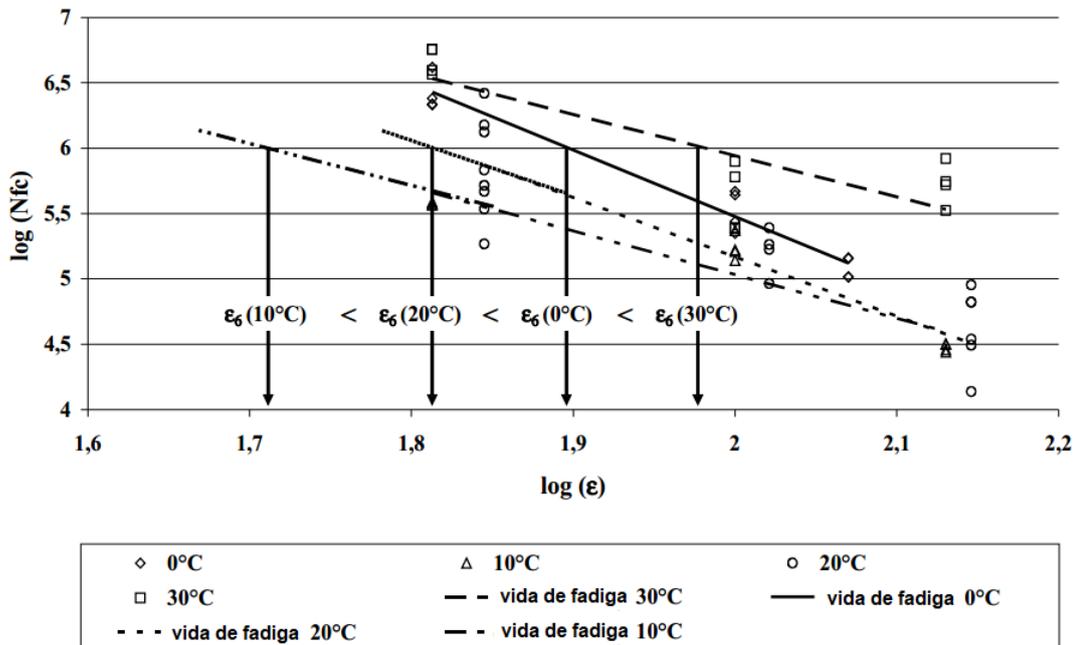
Quando a temperatura aumenta de 0°C para 10°C, nota-se que a deformação para um milhão de ciclos ( $\epsilon_6$ ) diminui. Porém, quando a temperatura aumenta de 10°C para 20°C, a deformação para um milhão de ciclos aumenta.

Figura 26 – Variação da curva de fadiga com a temperatura do ensaio de fadiga à flexão em 4 pontos.



Fonte: Tayebali *et al.* (1994).

Figura 27 – Variação da vida de fadiga com a temperatura do ensaio de fadiga à flexão em 2 pontos.



Fonte: Domec (2005).

#### 2.2.2.4 Fator campo/laboratório

O que se pretende a partir dos modelos de vida de fadiga é prever quando a mistura asfáltica atingirá a ruptura por fadiga em campo. Porém, as condições existentes nos ensaios laboratoriais são bem distintas das condições de campo, sendo necessário o uso de fator campo/laboratório para aproximar a previsão de fadiga da realidade (DE MELLO, 2008).

Em serviço, as misturas asfálticas são submetidas a condições diferentes das consideradas em ensaios de laboratório, como, por exemplo, a ocorrência de variação de temperatura, envelhecimento do ligante asfáltico, a distribuição transversal do tráfego, a forma de compactação, o intervalo entre os carregamentos complexos e a presença do fenômeno de recuperação de trincas (PINTO, 1991; PROWELL, 2010).

A configuração de carregamento encontrada nas rodovias é de notável variabilidade, sendo um trabalho complexo a modelagem do tráfego na qual o pavimento será exposto. A solicitação do tráfego no pavimento possui variação tanto com relação ao tipo de eixos, às distâncias entre os eixos, às dimensões dos pneus, e às cargas transportadas, quanto com relação à frequência de carregamento, que está vinculada à velocidade dos veículos na via e distância entre os eixos. Além destes fatores, ocorrem os deslocamentos laterais aleatórios das cargas em função da largura da faixa de rolamento, dificultando ainda mais a simulação no laboratório do carregamento aplicado em campo (ROSSATO, 2015).

Nos ensaios de fadiga, onde são empregados carregamentos de tensão ou deformação controlada, a carga é aplicada repetidamente (a uma frequência constante) na amostra, no mesmo local, sendo necessário um fator para contabilizar tais diferenças (AL-QADI E NASSAR, 2003).

Segundo Al-Qadi e Nassar (2003), o método de ensaio em laboratório normalmente é feito de maneira contínua, enquanto que no pavimento, as cargas são aplicadas discretamente. Devido a essa diferença de carregamento, no laboratório a mistura asfáltica não consegue recuperar o dano sofrido entre uma carga e outra, como ocorre no campo através do processo conhecido como “*healing*”. Durante este processo, ocorre um fechamento parcial das fissuras, após a remoção da carga, devido às forças atômicas entre as partículas do material.

Com relação às amostras, a homogeneidade adquirida em laboratório não reflete as condições de campo, pois há variação nos processos de usinagem do material, na qualidade

dos materiais de fornecedores distintos, segregação da mistura entre usinagem e espalhamento, compactação variável, levando a um material heterogêneo em campo (GRANICH, 2015).

Além disso, segundo Tayebali *et al.* (1994), dependendo do tipo de ensaio utilizado, para amostras de material idêntico, o número de aplicações de carga para a fadiga do material é diferente. Pinto (1991) compara os ensaios de flexão e compressão diametral e conclui que a vida de fadiga na compressão diametral é inferior à vida de fadiga obtida no ensaio de flexão, mostrando-se mais conservador do que o ensaio de flexão.

Deste modo, todos estes fatores de divergência entre laboratório e campo citados, em conjunto, contribuem para as diferenças encontradas nos resultados obtidos em laboratório e em campo, no que se refere à previsão da vida de fadiga da mistura asfáltica. Como consequência, se faz necessário o uso de um fator de correção nos resultados de laboratório a fim de prever o comportamento em campo. Esta correlação é feita por meio do fator campo laboratório ou função de transferência.

A vida de fadiga do pavimento é definida como o número de aplicações de carga que o revestimento asfáltico pode suportar até que um determinado dano em número de trincas ocorra. De acordo com o projeto, o nível de trincamento aceitável pode variar entre 10% e 45%. Sendo assim, o fator campo/laboratório também varia em função do nível de trincas aceitáveis no projeto (GRANICH, 2015). Al-Qadi e Nassar (2003) reforçam que, enquanto no laboratório o comportamento pode ser determinado de forma mecanicista utilizando medição de deformações, em campo, o comportamento é determinado através da medição de trincas aparentes na superfície, que é uma análise muito subjetiva e leva a variações no fator campo/laboratório.

De acordo com Abojaradeh (2003), são encontrados na literatura valores que variam de 3 até  $10^3$  para o fator campo/laboratório, dependendo da espessura da camada de revestimento asfáltico, propriedades da mistura, volume de tráfego, condições climáticas, critério de fadiga e tipo de ensaio utilizado. O modelo de vida de fadiga obtido em laboratório é ajustado para definir a propagação de trincas em campo, através da Equação (13).

$$N_{f(fadiga)} = \beta_{f(fadiga)}(N_{f(laboratório)}) \quad (13)$$

Sendo:

$N_{f(fadiga)}$  = número de aplicações de carga para uma área específica ou severidade de trincas por fadiga;

$\beta_{f(fadiga)}$  = fator campo/laboratório para trincas por fadiga relacionando a curva de fadiga de laboratório com a área ou severidade de trincas ao longo da rodovia;

$N_{f(laboratório)}$  = número de ciclos de carga para a ruptura no laboratório.

Dessa forma, com base em levantamentos obtidos em trechos experimentais, os modelos laboratoriais podem ser calibrados, a partir do fator campo/laboratório, Finn *et al.* (1986) encontraram fator de 13,4 para área trincada menor ou igual a 10% e 18,4 para área trincada maior do que 45%. O procedimento da calibração do modelo foi feito em duas etapas: escolha de uma série de curvas de fadiga obtidas em laboratório para calibração dos coeficientes do modelo e ajuste das curvas através de um fator campo/laboratório a fim de correlacionar a fadiga obtida em laboratório com diferentes níveis de trincas obtidas em observações de campo, em 19 seções da pista experimental da AASHTO.

Pinto (1991) analisou seis misturas asfálticas em ensaios de fadiga à tensão controlada e propôs uma lei de previsão de vida de fadiga. Os ensaios foram realizados por compressão diametral, a 25°C, com uma análise de 82 pontos. A calibração do modelo foi feita a partir de observações do comportamento em campo de trechos da rodovia BR-101, no Rio de Janeiro. Para os trechos analisados, o fator campo/laboratório encontrado foi da ordem de grandeza de  $10^2$  a  $10^4$  para levar o pavimento a valores próximos a 20% de área trincada. Pinto (1991) ressalta que o fator varia em função do tipo de ensaio utilizado e dos parâmetros adotados (tensão, deformação e densidade de energia).

Prowell (2010) verificou o fator campo/laboratório para quatro seções experimentais da NCAT (*National Center for Asphalt Technology*). A temperatura e a deformação causada pela passagem dos veículos foram medidas e utilizadas para o cálculo do dano a cada hora. A vida de fadiga em laboratório foi estimada a partir do ensaio de flexão alternada em 4 pontos com temperatura de ensaio de 20°C e frequência de 10 Hz. O dano foi acumulado através da hipótese de Miner. Para 20% de área trincada, os valores encontrados para fator campo/laboratório variaram de 4,2 a 75,8.

Luz (2017) analisou o desempenho de três segmentos monitorados na rodovia BR-101/SC e estimou o fator campo/laboratório para o momento em que o pavimento atingisse 1%, 10% e 20% de área trincada na região da trilha de roda. Destes segmentos, dois foram construídos com revestimento em camada singular de mistura asfáltica convencional e um segmento com revestimento em camadas integradas, sendo a camada inferior de mistura modificada com asfalto-borracha e a superior com mistura convencional.

A análise do desempenho foi realizada tendo como base os dados de levantamentos feitos desde o ano de abertura ao tráfego até o terceiro ano de utilização do trecho. Os ensaios para determinar a vida de fadiga das misturas foram conduzidos sob deformação controlada em flexão 4 pontos, frequência de carregamento de 10 Hz e temperatura de 15 °C e 20 °C, com amostras extraídas em campo e moldados em laboratório.

Para os dois segmentos que possuíam revestimento em camada singular, o fator campo/laboratório obtido por Luz (2017) foi de 2, 3 e 4, para 1%, 10% e 20% de área trincada, respectivamente. Para o segmento construído com revestimento em camadas integradas, o fator campo/laboratório obtido para atingir 1% de área trincada foi igual a 2 para a camada inferior e 1 para a superior, conforme pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 – Fator campo/laboratório obtido por Luz (2017).

Segmento	Mistura	Área trincada	Fator campo/lab.
05 e 04	Convencional	1%	2
		10%	3
		20%	4
03	Convencional	1%	1
	Asfalto-borracha	1%	2

Fonte: Elaborada pela autora com dados de Luz (2017).

Dessa forma, fica evidente que a calibração dos modelos por fator campo/laboratório depende significativamente da forma e da região que foi obtido, ressaltando a importância da verificação do procedimento no qual os fatores foram gerados para a correta utilização dos mesmos em modelos de previsão de trincas.

Nascimento (2015) desenvolveu uma função de transferência relacionando dano por fadiga e porcentagem de área trincada. Conforme apresentado na seção 2.1.1, a função de

transferência foi desenvolvida a partir de dados de 27 segmentos experimentais no Rio de Janeiro e validada com os segmentos monitorados da Rede Temática de Tecnologia em Asfalto. O modelo S-VECD foi utilizado para caracterização das misturas asfálticas e o *software* LVECD utilizado para realizar o cálculo estrutural do pavimento, a partir de uma análise viscoelástica. O  $R^2$  encontrado para porcentagem de área trincada observada em campo e área trincada prevista pela função de transferência foi de 0,72 (conforme Figura 6), sendo considerada uma boa capacidade de previsão para modelos de previsão desempenho.

Fritzen (2016) também desenvolveu uma função de transferência baseado no conceito de dano, porém utilizando resultados de ensaio de fadiga por compressão diametral. As análises computacionais foram realizadas no programa AEMC (Análise Elástica de Múltiplas Camadas). A função foi desenvolvida a partir de dados dos segmentos monitorados da Rede Temática de Tecnologia em Asfalto. O  $R^2$  encontrado entre porcentagem de área trincada observada em campo e porcentagem de área trincada prevista pela função de transferência foi de 0,56, sendo o dobro do encontrado no método americano MEPDG de 2004 ( $R^2 = 0,27$ ).

## 2.3 TEMPERATURA NO REVESTIMENTO

### 2.3.1 Influência no desempenho

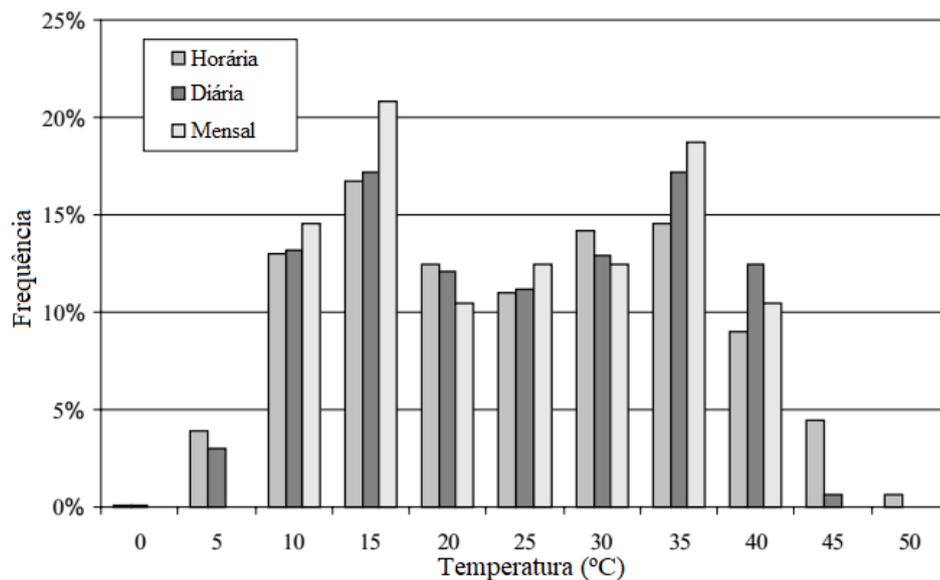
A rigidez da camada de concreto asfáltico é diretamente afetada com a mudança de temperatura, o que altera o estado de tensões do pavimento. As camadas subjacentes geralmente exibem comportamento mecânico que depende do estado de tensões atuantes devido ao peso próprio e carregamento externo. Conseqüentemente, a capacidade estrutural do pavimento como um todo é afetada com a mudança na temperatura (ZUO *et al.*, 2007).

Os métodos de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos flexíveis se baseiam na premissa de que a vida útil do pavimento é inversamente proporcional à magnitude das deformações induzidas pelo tráfego no revestimento. Como estas deformações variam com a rigidez da camada de revestimento asfáltico, logo, variam com as mudanças de temperatura. A relação entre a temperatura e a rigidez da mistura asfáltica é uma função não linear. Dessa forma, a vida útil do pavimento que é consumida durante solicitações de tráfego em temperaturas acima da média não é compensada pelo carregamento em temperaturas

abaixo da média. Portanto, quando a temperatura média é utilizada para determinar a rigidez da mistura asfáltica, a vida útil do pavimento é superestimada, pois não está sendo considerado o efeito dos picos de temperatura (ZUO *et al.*, 2002).

Nesta perspectiva, Zuo *et al.* (2002) avaliaram o efeito do uso da temperatura média na estimativa de vida útil de pavimentos instrumentados no Tenessi, Estados Unidos. Baseado em quatro anos de coleta de dados de temperatura nos trechos instrumentados, foi observada a média de temperatura do pavimento em diferentes intervalos (média horária, diária e mensal) através do histograma apresentado na Figura 28.

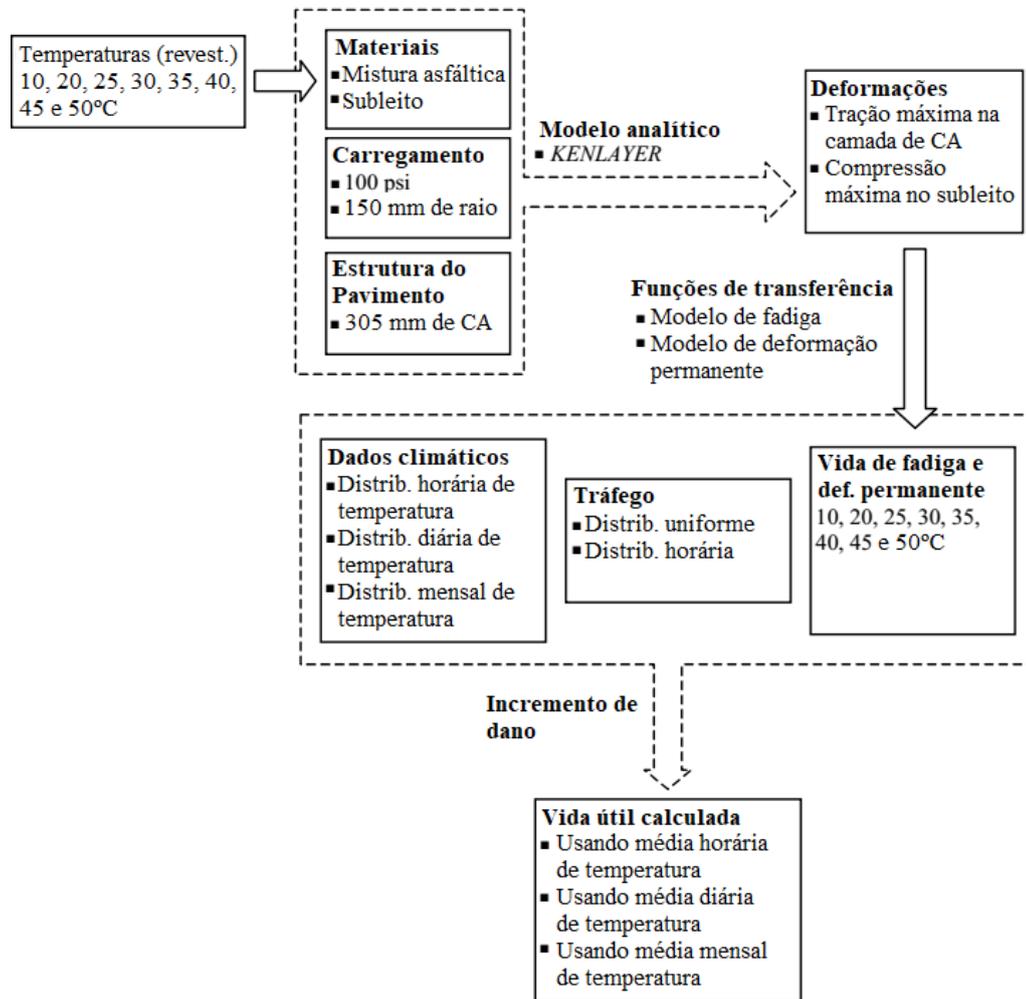
Figura 28 – Distribuição de temperatura para diferentes intervalos de média.



Fonte: Adaptado de Zuo *et al.* (2002).

Nota-se que a largura do histograma muda com a mudança do intervalo de média. Para a média horária, os dados descrevem temperatura de até 50°C. Na média diária, os dados não excedem 45°C, enquanto que a média mensal não passa de 40°C. Com o objetivo de averiguar a influência desta distribuição de frequência de temperaturas na vida útil do pavimento, Zuo *et al.* (2002) utilizaram o procedimento apresentado no esquema da Figura 29.

Figura 29 – Esquema de cálculo da vida útil do pavimento.



Fonte: Adaptado de Zuo *et al.* (2002).

Primeiramente, foi calculado o módulo dinâmico da mistura asfáltica para as temperaturas de 10°C, 20°C, 25°C, 30°C, 35°C, 40°C, 45°C e 50°C através da relação proposta pelo guia da AASHTO de 1993 apresentado na Equação (14).

$$\log(E_{AC}) = 6,451235 - 0,000164671T^{1,92544} \quad (14)$$

Onde:

$E_{AC}$  = módulo dinâmico do concreto asfáltico;

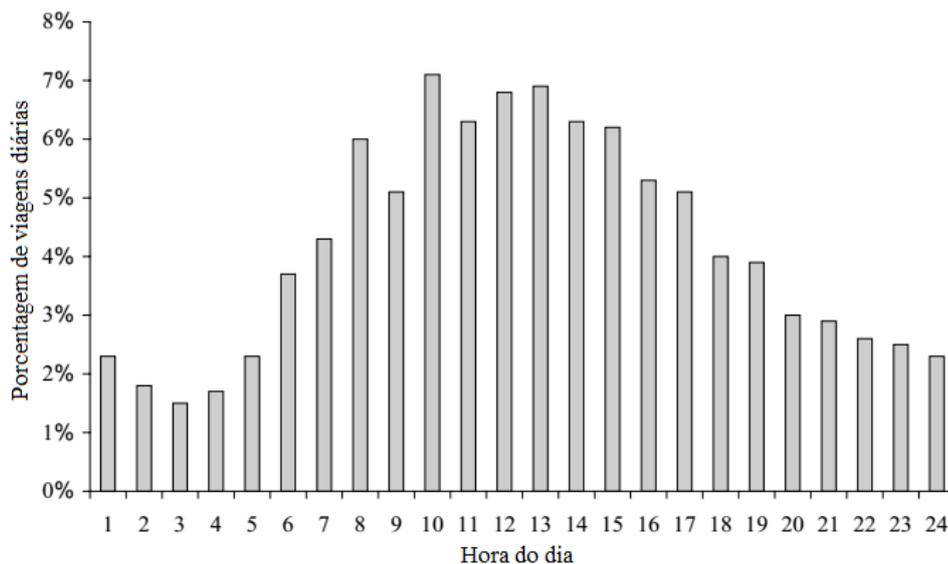
$T$  = temperatura do concreto asfáltico em Fahrenheit.

Para a estrutura do pavimento, foram adotados quatro pavimentos compostos por camada de concreto asfáltico de 305 mm e subleito com módulo resiliente diferente em cada estrutura, sendo composto por solo classificado como: duro ou rijo, médio, mole e muito mole. Foi escolhido este tipo de estrutura para reduzir o número de variáveis dependentes que poderiam afetar a estimativa de vida útil do pavimento.

Foi calculada a tensão de tração máxima na fibra inferior da camada de concreto asfáltico e a compressão máxima no topo da camada do subleito, para cada estrutura, utilizando o programa computacional KENLAYER. As funções de transferência utilizadas para a fadiga e para a deformação permanente foram propostas pelo Instituto do Asfalto (1982), no qual o modelo de fadiga está calibrado prever 45% de área trincada na trilha de rodas. O dano foi acumulado com a hipótese de Miner (Equação (1)).

Visando considerar a distribuição de tráfego horária, Zuo *et al.* (2002) utilizaram a distribuição típica em áreas urbanas reportada pelo *Federal Highway Administration*, mostrada na Figura 30. Pode-se observar que o maior volume de tráfego ocorre próximo ao meio do dia, onde as temperaturas são mais elevadas e o dano incremental pela passagem dos veículos é maior. Sendo assim, segundo Zuo *et al.* (2002), ignorar a interação entre a distribuição do volume de tráfego e a temperatura do pavimento pode levar a uma previsão de vida útil superestimada.

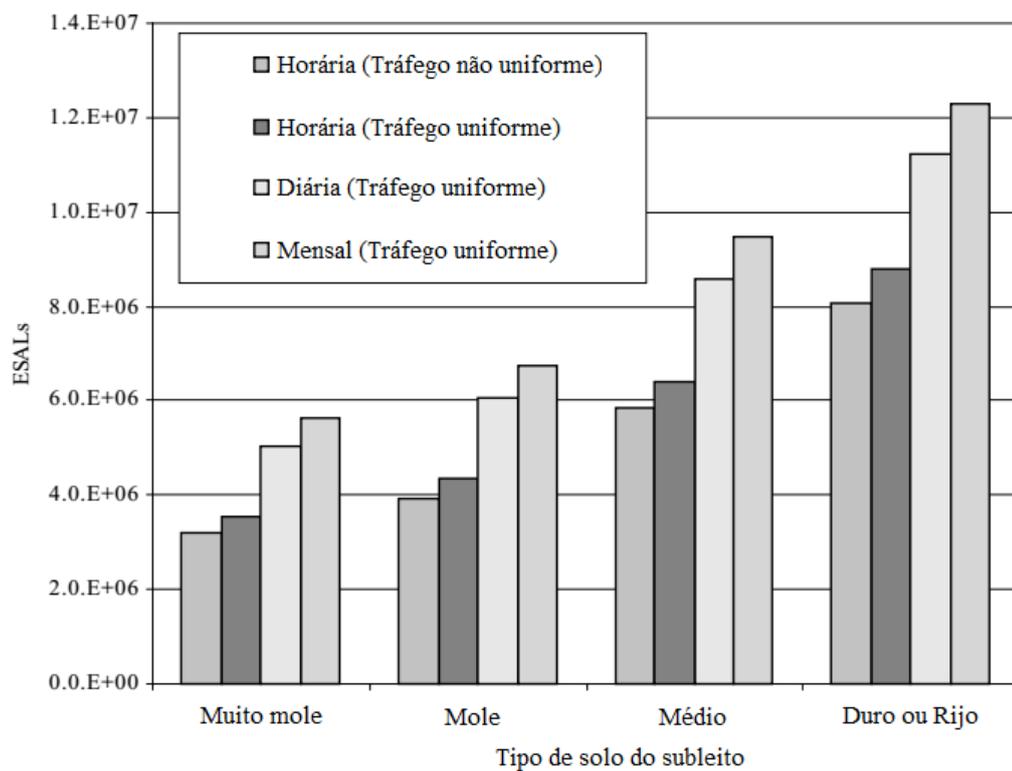
Figura 30 – Distribuição de tráfego típica em áreas urbanas.



Fonte: Adaptado de Zuo *et al.* (2002).

Utilizando os dados de temperatura no centro da camada de concreto asfáltico levantados por quatro anos nos trechos monitorados foi possível calcular o incremento de dano na estrutura. Dessa forma, para cada uma das quatro estruturas definidas, foi calculado o dano incremental para 48 médias mensal de temperatura, 1461 médias diárias de temperatura e 35064 médias horárias de temperatura. A Figura 31 mostra os resultados obtidos para a estimativa de vida útil de cada estrutura analisada nas configurações adotadas para a distribuição de tráfego e média de temperatura.

Figura 31 – Estimativa de vida útil para cada estrutura.



Fonte: Adaptado de Zuo *et al.* (2002).

Observa-se que a estimativa de vida útil aumenta com o aumento do intervalo da média de temperatura. Com a média mensal de temperatura do pavimento e distribuição de tráfego uniforme, a estimativa de vida útil é em torno de 50% maior do que a estimativa calculada com média horária e tráfego não uniforme. Para as seções de pavimento analisadas, a diferença entre a estimativa de vida útil com distribuição de tráfego uniforme e não uniforme foi apenas de 10%.

Segundo Zuo *et al.* (2002), os picos de temperatura no pavimento não coincidem exatamente com os picos de volume de tráfego na região, o que faz com que a diferença seja pequena. Em regiões onde os picos de temperatura e tráfego coincidem mais, a forma considerada no dimensionamento para a distribuição do tráfego pode levar a uma diferença maior. Assim, os autores ressaltam que se deve ponderar entre o custo de se obter e utilizar maior qualidade de dados e os benefícios de um cálculo de estimativa de vida útil mais realístico.

Zuo *et al.* (2007) monitoraram a variação da temperatura e da umidade em trechos instrumentados no Tenessi, Estados Unidos. O efeito combinado destas variações foi avaliado na previsão da vida útil para três estruturas típicas de pavimento flexível da região. Para cada combinação de temperatura do pavimento e umidade na camada de base e subleito, foi calculada a deformação crítica através do *software* ABAQUS 6.2-1, que utiliza a técnica de elementos finitos.

A deformação foi inserida no modelo de fadiga desenvolvido pelo Instituto do Asfalto, que corresponde ao número de solicitações para 45% de trincamento por fadiga na trilha de roda. O fator de dano e a probabilidade de ocorrência para diferentes condições ambientais foram combinadas utilizando a hipótese do dano acumulado de Miner, de forma a obter a estimativa de vida útil do pavimento.

Para modelar o efeito da temperatura no programa computacional, a camada de revestimento asfáltico foi dividida em quatro ou seis subcamadas, dependendo da espessura, de forma a obter subcamadas de 5 cm. A Figura 32 apresenta as três estruturas modeladas e o número de subcamadas que cada camada foi dividida.

Figura 32 – Estruturas de pavimento modeladas.

	Concreto Asfáltico		Base	
	Espessura (mm)	Número de subcamadas no modelo	Espessura (mm)	Número de subcamadas no modelo
Pavimento 1	200	4	150	3
Pavimento 2	200	4	250	5
Pavimento 3	300	6	250	5

Fonte: Adaptado de Zuo *et al.* (2007).

Diferentes temperaturas e, conseqüentemente, módulo de rigidez, foram atribuídos a cada subcamada na modelação. O modelo utilizado para calcular o módulo dinâmico em cada temperatura foi o mesmo utilizado por Zuo *et al.* (2002) apresentado na Equação (14).

Na camada de base e subleito, foram atribuídos diferentes módulos de acordo com a umidade em cada subcamada. Para o módulo da camada de base foi utilizado o modelo proposto por Rada e Witzak (1981) e para o subleito foi utilizado o modelo de Uzan (1992) com a consideração da umidade de Drumm *et al.* (1997).

Com os dados obtidos através da instrumentação dos trechos monitorados, foram definidos 47 perfis de temperatura no revestimento asfáltico, duas condições de umidade da camada de base e duas condições de umidade do subleito. Dessa forma, foi feita a modelação de 188 combinações de temperatura/umidade para cada um dos três pavimentos, totalizando 564 simulações.

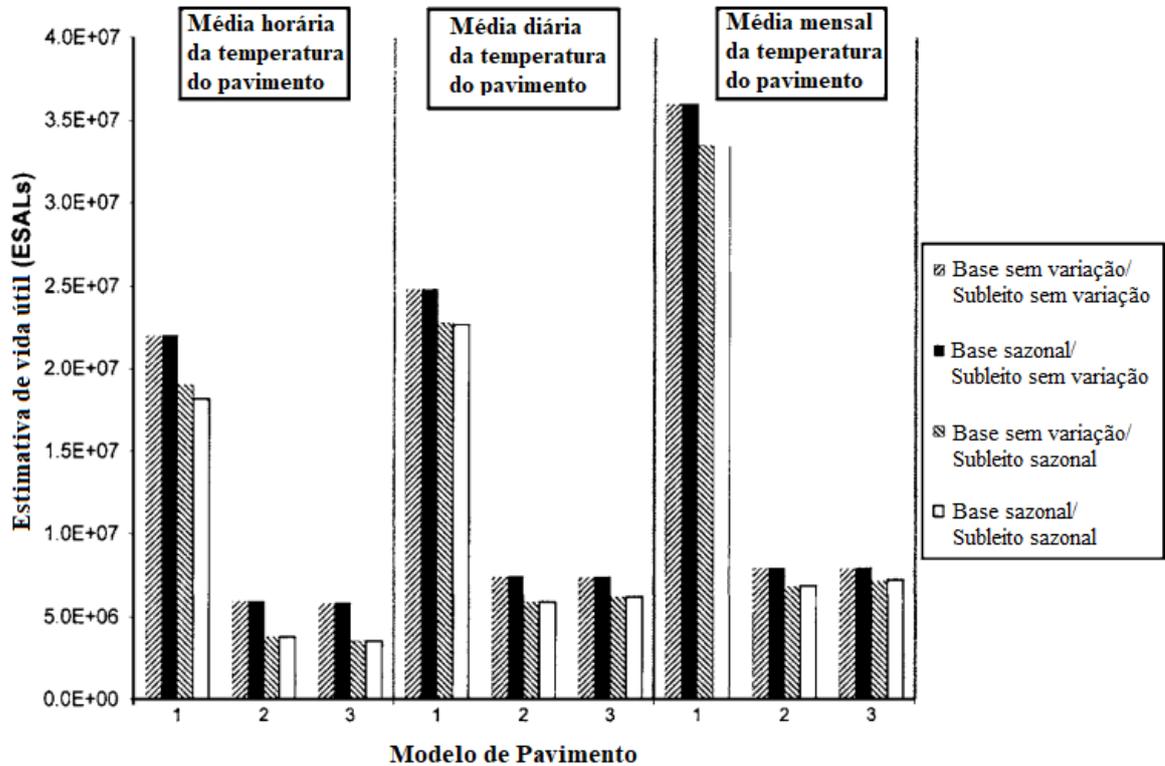
A partir dos resultados das simulações, Zuo *et al.* (2007) apontaram que a deformação crítica de tração na fibra inferior da camada de concreto asfáltico e de compressão no topo do subleito aumentam com o aumento da temperatura. Tal efeito é mais evidente em temperaturas elevadas, sendo menor a variação da deformação crítica em temperaturas mais baixas (próximas a 10°C). Além disso, o perfil de temperatura no revestimento se mostrou menos significativo nas estruturas do pavimento 2 e 3, indicando menor influência da variação de temperatura em pavimentos com camada de base mais espessas.

Zuo *et al.* (2007) também avaliaram o efeito do intervalo em que a temperatura é caracterizada na estimativa de vida útil do pavimento. A Figura 33 mostra que ocorre redução na vida útil com o intervalo menor de caracterização da temperatura, independente da espessura do pavimento e das condições de umidade. Dessa forma, métodos de dimensionamento de pavimentos que utilizam apenas a média mensal de temperatura estariam negligenciando o dano que ocorre durante curtos períodos de elevadas temperaturas, levando a um subdimensionamento do pavimento.

Além disso, nota-se que a variação da umidade do subleito reduz a vida útil do pavimento, enquanto que a variação na camada de base teve pouco efeito sobre a estimativa de vida útil. Os autores ressaltam que apenas a umidade da última subcamada da base sofreu

alteração de umidade nas simulações, dessa forma, o efeito na vida útil pode ser maior em pavimentos que apresentam maior variação do nível do lençol freático.

Figura 33 – Efeito do intervalo de temperatura na estimativa de vida útil do pavimento.



Fonte: Adaptado de Zuo *et al.* (2007).

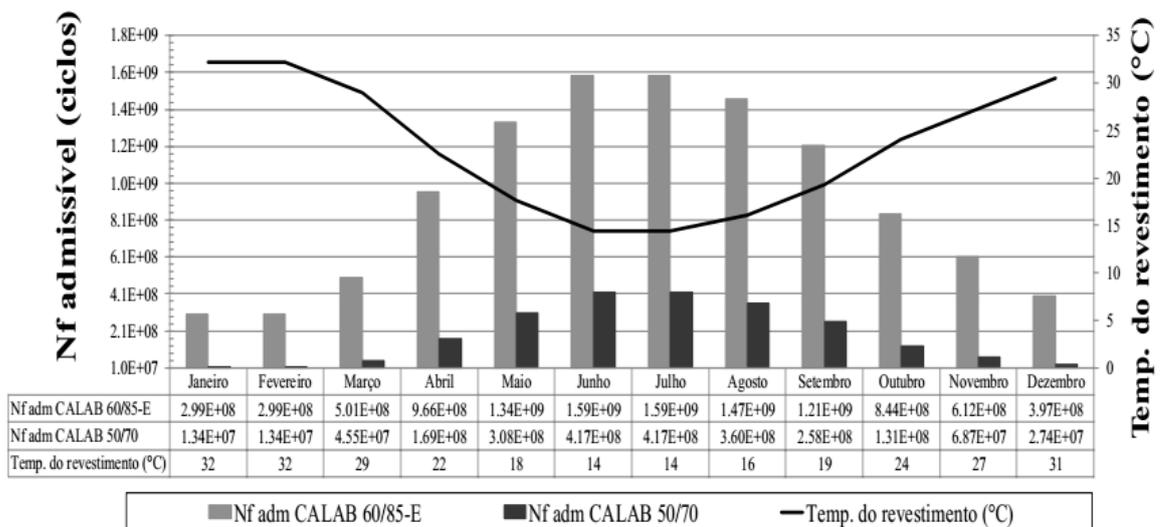
Pode-se observar ainda que a estimativa de vida útil para o pavimento 2 e para o pavimento 3 foram similar, inclusive nas condições em que a camada de base e o subleito estavam úmidos. Tal fato indica que o aumento na espessura da camada de concreto asfáltico no pavimento 3 ocasionou pouco benefício para a vida útil da estrutura.

Rossato (2015) analisou a influência da temperatura no desempenho a fadiga de mistura asfáltica convencional (CAP 50/70) e modificada por polímero (CAP 60/85-E), utilizadas em trecho monitorado. Foram utilizados dados históricos de temperatura média do ar na cidade de Santa Maria, no Rio Grande do Sul. A partir da temperatura média mensal do ar, foi calculada a temperatura do revestimento no centro da camada utilizando modelo de conversão de temperatura proposto por Motta e Medina (1989) para revestimento asfáltico

com 0,06 m de espessura. Relacionou-se, então, cada temperatura do pavimento com módulo de resiliência correspondente.

Utilizando o programa computacional AEMC/SisPavBR (FRANCO, 2007), foi determinada a deformação de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico para cada mês do ano. As estruturas foram mantidas constantes, sendo alterado apenas o módulo de resiliência da camada de revestimento asfáltico de uma simulação para outra. A deformação foi inserida no modelo de fadiga desenvolvido no trabalho com fator de calibração de  $10^5$  e o modelo calibrado proposto por Franco (2007). O modelo de fadiga proposto por Rossato (2015) foi determinado através de ensaio de fadiga a tração indireta com tensão controlada. Nas Figuras 34 e 35 são apresentados os resultados com os modelos de fadiga desenvolvidos na pesquisa e com o modelo proposto por Franco (2007), respectivamente.

Figura 34 – Relação entre desempenho à fadiga e temperatura do revestimento asfáltico, com modelos desenvolvidos por Rossato (2015).

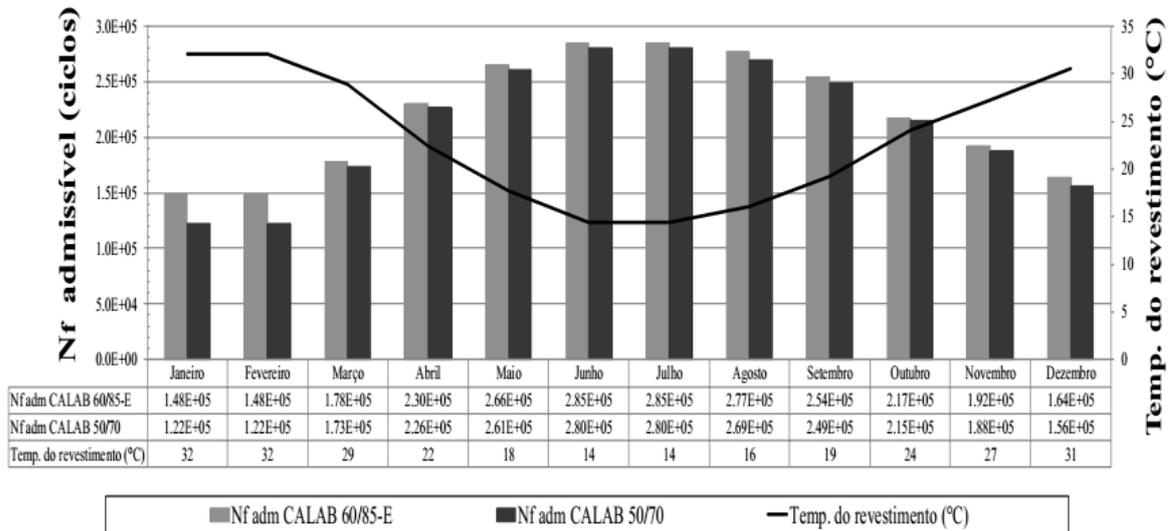


Fonte: Rossato (2015).

Pode-se observar que nos meses de verão, o desempenho à fadiga é menor do que nos meses de inverno. Além disso, o modelo proposto por Franco (2007) se mostrou mais conservador, chegando a valores máximos da ordem de grandeza de  $10^5$  enquanto que na análise com modelos de fadiga desenvolvidos por Rossato (2015) os valores ficaram entre  $10^7$

e  $10^9$ . Pode-se notar ainda que a mistura asfáltica modificada por polímero apresentou maior estimativa de vida útil em todas as análises.

Figura 35 – Relação entre desempenho à fadiga e temperatura do revestimento asfáltico, com modelo de Franco (2007).



Fonte: Rossato (2015).

A influência da temperatura também foi analisada quanto ao dano produzido no pavimento através da hipótese de Miner. Para isto, o tráfego previsto foi dividido por mês de modo a encontrar o tráfego mensal, sendo igual a  $4,62 \times 10^5$ . Dessa forma, foi obtido o consumo de resistência à fadiga (CRF) para cada mês. A Figura 36 apresenta os resultados obtidos para a mistura convencional.

Segundo Rossato (2015), o modelo de fadiga proposto em sua pesquisa se mostrou mais condizente com a realidade de campo, visto que o trecho monitorado ainda apresenta boas condições. Sendo assim, o autor ressalta que os modelos de desempenho à fadiga são restritivos e dependentes das peculiaridades de cada trecho monitorado em que foram desenvolvidos.

Figura 36 – Consumo de desempenho à fadiga para a mistura CALAB 50/70.

Mês	N Prev. Mensal	N adm. CALAB	CRF CALAB	N adm. Franco	CRF Franco
Janeiro	4,62E+05	1,34E+07	3,4%	1,22E+05	378%
Fevereiro	4,62E+05	1,34E+07	3,4%	1,22E+05	378%
Março	4,62E+05	4,55E+07	1,0%	1,73E+05	267%
Abril	4,62E+05	1,69E+08	0,3%	2,26E+05	204%
Mai	4,62E+05	3,08E+08	0,1%	2,61E+05	177%
Junho	4,62E+05	4,17E+08	0,1%	2,80E+05	165%
Julho	4,62E+05	4,17E+08	0,1%	2,80E+05	165%
Agosto	4,62E+05	3,60E+08	0,1%	2,69E+05	171%
Setembro	4,62E+05	2,58E+08	0,2%	2,49E+05	185%
Outubro	4,62E+05	1,31E+08	0,4%	2,15E+05	215%
Novembro	4,62E+05	6,87E+07	0,7%	1,88E+05	245%
Dezembro	4,62E+05	2,74E+07	1,7%	1,56E+05	295%
∑ CRF			12%		2846%

Fonte: Adaptado de Rossato (2015).

Santiago *et al.* (2018) avaliaram a evolução do dano por fadiga variando a temperatura no pavimento a partir de dados de temperatura de uma cidade no Sul (Curitiba) e outra no Nordeste (Fortaleza) do Brasil. Para determinar a temperatura no revestimento, a camada foi dividida em três subpartes nas quais a temperatura foi calculada em seu centro. A temperatura em cada subcamada do revestimento foi estimada a partir do modelo apresentado na Equação (15).

$$T(x) = T_{sup} + (T_{sup} - T_{ar})[1 - e^{(0,06855x - 0,002633x^2)}] \quad (15)$$

Onde:

$T(x)$  = temperatura na profundidade “x” do revestimento;

$T_{sup}$  = temperatura da superfície do revestimento;

$T_{ar}$  = temperatura do ar próxima ao pavimento.

As análises foram divididas em meses e em turnos durante o dia, sendo manhã, tarde e noite. Em cada mês do ano foram consideradas as temperaturas médias nos períodos de 00h

– 08h, 08h – 16h e 16h – 00h. Na Figura 37 estão apresentados os dados de temperatura do ar que foram utilizados para demonstrar a variação do dano com a variação de temperatura.

Figura 37 – Dados de temperatura do ar (°C) em uma cidade do nordeste e do sul do Brasil.

Cidade do Nordeste do país												
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
00:00 as 08:00h	23,6	22,6	22,5	22,6	21,9	21,5	21,2	21,4	22,4	22,8	22,9	23,3
08:00 as 16:00h	33,8	32,3	31,4	31,1	31,2	31,6	33	34,8	35,8	35,9	35,6	35,5
16:00 as 24:00h	27,5	26,7	26,1	26	26	26	25,9	26,8	27,5	27,8	28,1	28,1
Cidade do Sul do país												
00:00 as 08:00h	16,4	16,3	15,4	12,8	10,2	8,4	8,1	9,2	10,8	12,5	14	15,4
08:00 as 16:00h	20,4	20,6	19,6	17,2	14,5	13,1	12,9	14,1	15	16,5	18,2	19,3
16:00 as 24:00h	26,6	26,7	25,7	23,1	21,1	19,6	19,4	20,9	21,3	22,6	24,5	25,4

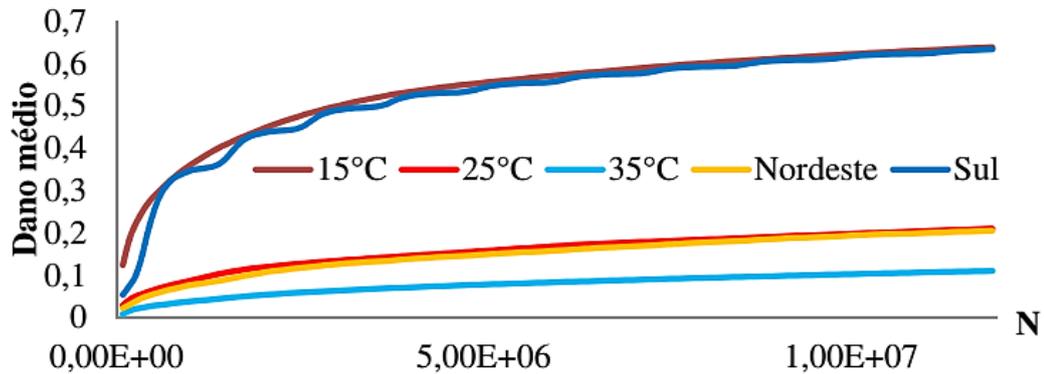
Fonte: Santiago *et al.* (2018).

A análise estrutural elástica-linear foi realizada no programa de elementos finitos CAP 3D-D. As deformações máximas foram determinadas em 240 pontos de Gauss, contidos em 60 elementos, sendo 30 logo abaixo da carga. Em cada subperíodo de análise foi considerada a temperatura no revestimento alterando o módulo dinâmico a partir da curva mestra. O dano médio foi determinado aplicando a lei de Miner nos 240 pontos, sendo calculada a média para cada subperíodo de análise. A curva de fadiga utilizada para determinar o dano foi obtida a partir do ensaio de tração direta, com aplicação do modelo S-VECD.

Foi analisada uma estrutura composta por 4 camadas, sendo: 5,1 cm de revestimento em mistura asfáltica com CAP 65/90, 38 cm de base com rigidez de 443MPa, 24 cm de sub-base com rigidez de 166 MPa e 49 cm de subleito com 160 MPa. Nas simulações numéricas foi considerado tráfego com velocidade de 60 km/h. Adotou-se o tráfego inicial no primeiro ano de  $1,04 \times 10^6$  com taxa de crescimento de 3%.

Na Figura 38 são apresentados os resultados de dano médio em função do tráfego com variação de temperatura para cidade da região Nordeste e Sul. São apresentados também os resultados obtidos com temperatura constante de 15°C, 25°C e 35°C.

Figura 38 – Dano médio em função do tráfego com variação de temperatura.



Fonte: Santiago *et al.* (2018).

Nota-se que o dano médio obtido para a região Nordeste foi diferente do dano para a região Sul, sendo menor o dano para a cidade do Nordeste. Para as condições analisadas, quanto menor a temperatura, maior o dano médio obtido ao longo do tempo. Além disso, observa-se que na análise da região Sul ocorreram oscilações ao longo do tempo. De acordo com Santiago *et al.* (2018) esta mesma variação foi encontrada no MEPDG e LVECD e ocorre devido às altas amplitudes térmicas ao longo do ano, ao comportamento do CAP 65/90 (elevada vida de fadiga e sensibilidade à temperatura) e ao fato do revestimento ser delgado, tornando-o mais sensível ao dano.

Santiago *et al.* (2018) ressaltam a importância de se incluir a variação de temperatura regional nas análises, pois o dano provocado em uma mistura aplicada no Nordeste ou no Sul do País é significativamente diferente. Ainda, segundo os autores, a consideração da temperatura local leva a resultados de dano por fadiga mais precisos do que fixá-la em um único valor nacional, sendo recomendado que se leve em consideração este fator em um método de dimensionamento.

### 2.3.2 Modelos de previsão de temperatura em revestimentos

A temperatura no pavimento pode ser obtida através de medições em campo por meio da instrumentação da rodovia. Apesar do método de instrumentação permitir a obtenção do perfil de temperaturas real em qualquer momento desejado, tal procedimento pode não ser viável devido aos custos associados para instalação e manutenção dos sensores e coleta de

dados do sistema. O desenvolvimento de equações de previsão de temperatura fornece uma alternativa mais econômica e rápida para obter o perfil de temperaturas do pavimento (ASEFZADEH *et al.*, 2017). Dessa forma, diversas pesquisas foram realizadas com o intuito de desenvolver modelos de previsão da temperatura.

Os modelos podem ser divididos em duas categorias de acordo com a abordagem utilizada para sua obtenção, sendo analíticos ou estatísticos. A abordagem analítica é baseada em teorias de transferência de calor e propriedades térmicas dos materiais. A abordagem estatística utiliza modelos de regressão para obter a relação entre temperatura do pavimento medida e dados climáticos (LI *et al.*, 2018).

Barber (1957) realizou um dos primeiros estudos de avaliação de temperatura no pavimento. A partir da abordagem analítica, desenvolveu um modelo de previsão de temperaturas máximas do revestimento tendo como base equações de transferência de calor e dados meteorológicos. A Equação (16) apresenta o modelo de Barber.

$$T = T_m + T_v \cdot \left\{ \frac{H \cdot e^{-xC}}{\sqrt{(H+C)^2 + C^2}} \right\} \cdot \text{sen} \left[ 0,262 \cdot t - xC - \text{arctg} \left( \frac{C}{H+C} \right) \right] \quad (16)$$

Sendo:

$T$  = temperatura do pavimento à profundidade  $x$ , em °C;

$T_m$  = temperatura média efetiva do ar junto à superfície, em °C;

$T_v$  = amplitude ou variação máxima da temperatura do ar em relação à média, em °C;

$t$  = tempo a partir do início de um ciclo, em horas;

$x$  = profundidade, em m;

$H = h/k$ ;

$h$  = coeficiente de transmissão térmica, em J/(m<sup>2</sup>.h.°C);

$k$  = condutividade térmica, em J/(m.h.°C);

$C = \sqrt{\frac{0,131}{a}}$ ;

$a$  = difusividade térmica,  $a = k/(c \cdot w)$ ;

$c$  = capacidade calorífica específica, em J/(kg.°C);

$w$  = massa específica ou densidade, em kg/m<sup>3</sup>.

O coeficiente de transmissão térmica ( $h$ ) é obtido através da Equação (17).

$$h = 6,35 + 2,11 \cdot v^{3/4} \quad (17)$$

Sendo:

$h$  = coeficiente de transmissão térmica, em kcal/m<sup>2</sup>.h.°C;

$v$  = velocidade do vento, em km/h.

A temperatura do ar em contato com a superfície difere da temperatura do ar medida segundo as normas meteorológicas (um metro acima do solo e na sombra) devido à radiação solar incidente (MOTTA, 1979). Assim, a temperatura média efetiva do ar na superfície ( $T_m$ ) é dada pela Equação (18), na qual considera-se o efeito da radiação solar sobre a superfície.

$$T_m = T_A + R \quad (18)$$

Sendo:

$T_A$  = temperatura média do ar determinada de forma padronizada segundo as normas meteorológicas;

$R = p \cdot b \cdot l/h$ , contribuição média da radiação solar na temperatura efetiva do ar;

$p$  = coeficiente de perda por reirradiação, aproximadamente igual a 2/3;

$b$  = coeficiente de absorção superficial da radiação solar;

$l$  = radiação solar, em J/m<sup>2</sup>.h;

$h$  = coeficiente de transmissão térmica, em J/(m<sup>2</sup>.h.°C).

A amplitude máxima de temperatura do ar em relação à média ( $T_v$ ) é calculada pela Equação (19).

$$T_v = 0,5T_R + 3R \quad (19)$$

Sendo:

$T_R$  = amplitude da variação senoidal de temperatura do ar com o tempo, em °C;

$R$  = contribuição média da radiação solar na temperatura efetiva do ar.

Witczak (1996 *apud* AYRES e WITCZAK, 1998) desenvolveu um modelo para estimar a temperatura no revestimento asfáltico tendo como base a média mensal da temperatura do ar. A Equação (20) apresenta o modelo proposto, o qual relaciona a temperatura média mensal do ar com a temperatura média estimada do pavimento em qualquer profundidade desejada. A Equação (21) proporciona o desvio padrão desta temperatura média do pavimento calculada, que pode ser utilizada em uma distribuição normal para definir a distribuição de frequência das temperaturas do pavimento em determinado mês.

$$MMPT = MMAT \cdot \left(1 + \frac{1}{z + 4}\right) - \frac{34}{z + 4} + 6 \quad (20)$$

$$SD_{MMPT} = \frac{3,896 - 0,03908 \cdot z}{1 - 0,03982 \cdot z - 0,412422 \cdot \log(MMPT) + 0,0417 \cdot \log(MMPT)} \quad (21)$$

Sendo:

$MMPT$  = temperatura média mensal do pavimento na profundidade  $z$ , em °F;

$MMAT$  = temperatura média mensal do ar, em °F;

$SD_{MMPT}$  = desvio padrão da temperatura do pavimento, em °F;

$z$  = profundidade da camada asfáltica do pavimento onde se quer conhecer a temperatura, em polegadas.

De acordo com Ayres e Witczak (1998) pode ser inserida no modelo a média mensal de temperatura do ar, com respectivos desvios padrão, para cada mês do ano ou valores médios históricos durante o período de análise desejado. Apesar de ser um modelo simplificado para estimar a distribuição de temperatura no pavimento, o modelo de Witczak (1996) apresentou previsões com adequada precisão em comparação com modelos mais teóricos desenvolvidos pelo FHWA (AYRES e WITCZAK, 1998).

Segundo Franco (2007) os modelos de Witczak (1996) foram incorporados em programas como o PAVE (FRANCO, 2000), o AYMA (AYRES, 1997) e o guia de projeto da AASHTO (NCHRP, 2004). Os programas subdividem os períodos de análise em subestações e calculam a temperatura no interior do pavimento em cada uma delas. Em cada uma das subestações ou sub-períodos da análise é aplicado o tráfego proporcional previsto.

Ramadhan e Wahhab (1997) desenvolveram modelos de previsão de temperatura para pavimentos flexíveis e rígidos a partir de dados de temperatura do ar e do pavimento coletados em dois trechos experimentais localizados na cidade de Dhahran, na Arábia Saudita. No trecho de pavimento flexível, as temperaturas foram coletadas através de termopares instalados nas profundidades de 2, 4, 8 e 16 cm e na base da camada de revestimento, a 25 cm de profundidade. A temperatura foi medida manualmente em seis horários por dia, cinco dias na semana, durante dois anos.

A partir dos dados de temperatura, utilizando regressão linear, Ramadhan e Wahhab (1997) propuseram o modelo apresentado na Equação (22) para estimar a máxima temperatura do pavimento a 2 cm de profundidade. Segundo os autores o modelo pode ser utilizado para dimensionamento e análise do pavimento na região da Arábia Saudita oriental.

$$PAV = 1,692 * (AR) + 12,670 \quad (22)$$

Onde:

$PAV$  = Temperatura do pavimento a 2 cm de profundidade, °C;

$AR$  = Temperatura do ar, °C.

Park *et al.* (2001) desenvolveram um modelo estatístico de previsão de temperatura no pavimento em função da profundidade. Os dados de temperatura foram coletados em três seções de teste em Michigan. O modelo foi desenvolvido com o objetivo de prever a temperatura no pavimento a qualquer horário do dia para ajustar as propriedades das camadas obtidas com retroanálise a partir do FWD. O modelo é apresentado na Equação (23).

$$T_z = T_{surf} + (-0,3451z - 0,0432z^2 + 0,00196z^3) \cdot \sin(-6,3252t + 5,0967) \quad (23)$$

Onde:

$T_z$  = Temperatura do pavimento na profundidade  $z$ , °C;

$T_{surf}$  = Temperatura na superfície do pavimento, °C;

$z$  = profundidade na qual a temperatura será determinada, cm;

$\sin$  = função seno, radianos;

$t$  = momento em que a temperatura na superfície foi medida, em fração do dia ( $0 < t < 1$ );

Diefenderfer *et al.* (2006) desenvolveram modelos de previsão da temperatura máxima e mínima do pavimento a partir de dados coletados em uma pista experimental localizada em Virginia, nos Estados Unidos. A temperatura do pavimento foi continuamente monitorada através de termopares, instalados em diversas profundidades, variando de 0,038 a 1,12 m. Para que o modelo pudesse ser utilizado em outras localidades, os autores consideraram na análise a radiação solar do local, que pode ser determinada a partir da latitude e do dia do ano. Os modelos para previsão de temperatura máxima e mínima estão apresentados nas Equações (24) e (25), respectivamente.

$$T_{p\ max} = 2,78752 + 0,6861T_{a\ max} + 5,6736 \times 10^{-4}R_s - 27,8739P_d \quad (24)$$

$$T_{p\ min} = -1,2097 + 0,6754T_{a\ min} + 3,7642 \times 10^{-4}R_s + 7,2043P_d \quad (25)$$

Onde:

$T_{p\ max}$  = temperatura máxima do pavimento prevista (°C);

$T_{a\ max}$  = temperatura máxima diária do ambiente (°C);

$R_s$  = radiação solar diária calculada (kJ/m<sup>2</sup> dia);

$P_d$  = profundidade (m);

$T_{p\ min}$  = temperatura mínima do pavimento prevista (°C);

$T_{a\ min}$  = temperatura mínima diária do ambiente (°C).

Wang *et al.* (2014) desenvolveram um modelo numérico empírico para analisar a variação e distribuição de temperatura do pavimento considerando fatores naturais como temperatura do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade, coletados na cidade de Xian, na China. Os autores ressaltaram que as variações diárias de temperatura do pavimento são significativas e devem ser consideradas no dimensionamento do pavimento.

Asefzadeh *et al.* (2017) desenvolveram modelos empírico estatístico para previsão de temperatura do pavimento baseados em dois anos de coleta de dados em um trecho experimental localizado na cidade de Edmonton, no Canadá. A temperatura do pavimento foi coletada a 2, 9, 17 e 25 cm de profundidade, na camada de revestimento asfáltico. Os dados de clima foram coletados de uma estação meteorológica localizada a 700 m do trecho experimental. Foram desenvolvidos modelos para a estação quente (abril a setembro) e para a estação fria (outubro a março) da região, apresentados nas Equações (26) e (27), respectivamente.

$$T_{\text{média diária}} = 3,9832 + 1,1288(T_{ar}) + 2,68 \times 10^{-5}(SR) \quad (26)$$

$$T_{\text{média diária}} = -1,7853 + 0,6510(T_{ar}) + 3,37 \times 10^{-4}(SR) + 2,0326 \times D \quad (27)$$

Onde:

$T_{\text{média diária}}$  = temperatura média diária do revestimento asfáltico (°C);

$T_{ar}$  = temperatura do ar (°C);

$SR$  = radiação solar diária (kJ/m<sup>2</sup>);

$D$  = profundidade (m).

Além destes modelos, Asefzadeh *et al.* (2017) desenvolveram modelos de previsão de temperatura máxima e mínima diária do pavimento. De acordo com os autores, os modelos podem ser utilizados para prever a temperatura do pavimento em rodovias localizadas na mesma latitude e condições climáticas similares às da região do estudo.

As primeiras medições de temperatura em revestimento asfáltico no Brasil foram realizadas em 1965, no Rio de Janeiro. Medina e Farah (1965 *apud* MOTTA, 1991)

acompanharam as variações de temperatura utilizando termômetro de superfície e furo com óleo, onde chegaram a medir até 65°C na superfície do revestimento.

Previtera Filho (1974) determinou um perfil de temperaturas no revestimento para estipular parâmetros relativos à curva de tensão-deformação do concreto asfáltico. A partir dos parâmetros, utilizando o programa FEPAVE, foi observada a influência da temperatura no comportamento do pavimento. Com base em dados climáticos das cidades do Rio de Janeiro e Santos, o autor concluiu que a deflexão no centro de aplicação da carga chega a ser três vezes maior no verão se comparada à obtida no inverno, enfatizando a influência da temperatura no comportamento da camada.

Motta (1979) realizou medições de temperatura durante um ano em um painel experimental instalado na COPPE, instrumentado com termopares de cobre ligados a um registrador automático. Foram realizadas medições em várias profundidades, limitadas pela espessura do revestimento asfáltico de 20 cm. Dessa forma, foram obtidos dados sobre os perfis de temperatura do revestimento asfáltico para diferentes estações do ano e condições meteorológicas do local.

Segundo Medina e Motta (2015), a partir dos dados do painel experimental, Régis M. Rodrigues desenvolveu a Equação (28) para determinar a temperatura do pavimento.

$$T(x) = T_{sup} + (T_{sup} - T_{ar})[1 - e^{(0,06855x - 0,002633x^2)}] \quad (28)$$

Onde:

$T(x)$  = temperatura na profundidade x do revestimento;

$T_{sup}$  = temperatura da superfície do pavimento;

$T_{ar}$  = temperatura do ar próxima ao pavimento.

Outras medições de temperatura foram realizadas durante a Pesquisa de Avaliação Estrutural de Pavimentos (PAEP) do IPR/DNER. Em diversos estados brasileiros, foram feitas medições de temperatura a uma profundidade correspondente à metade da camada de revestimento asfáltico (MOTTA, 1991).

Os dados obtidos por Ricci *et al.* (1983) durante a PAEP foram agrupados por Motta e Medina (1989) de forma a caracterizar a temperatura no pavimento por região, tipo e espessura do revestimento. Dessa forma, foram obtidas correlações entre a temperatura do ar e do revestimento para as regiões sul, sudeste e nordeste. As Equações (29) e (30) apresentam as correlações para a região sul para temperatura no concreto asfáltico na profundidade de 3 a 4 cm em camadas de até 6 cm de espessura e para concreto asfáltico na profundidade entre 5 e 7 cm em camadas com espessura entre 8 e 11,5 cm, respectivamente.

$$T_{rev} = -6,51 + 1,61T_{ar} \quad (29)$$

$$T_{rev} = -1,18 + 1,45T_{ar} \quad (30)$$

Onde:

$T_{rev}$  = temperatura medida no revestimento;

$T_{ar}$  = temperatura do ar.

Gonçalves *et al.* (2002) realizaram medições de temperatura com termômetro digital nas profundidades de 30, 50 e 900 mm na camada de revestimento asfáltico das pistas experimentais instaladas na Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos – UFRGS/DAER-RS. A partir das leituras de temperatura, os autores obtiveram relações entre a temperatura do ar e do revestimento a 5 cm e a 9 cm de profundidade, conforme apresentado nas Equações (31) e (32), respectivamente.

$$T_{pav}(5 \text{ cm}) = 1,0469T_{ar} + 4,9618 \quad (31)$$

$$T_{pav}(9 \text{ cm}) = 0,9898T_{ar} + 4,0849 \quad (32)$$

Onde:

$T_{pav}$  = temperatura medida no revestimento (°C);

$T_{ar}$  = temperatura do ar (°C).

Kilpp *et al.* (2004) desenvolveram modelos para a previsão de temperatura de pavimentos flexíveis a partir do monitoramento da temperatura do ar, da superfície do pavimento e a 2 e a 5 cm de profundidade nas cidades de Ijuí e Sobradinho, no Rio Grande do Sul. Com os dados obtidos nas duas cidades, os autores propuseram modelos genéricos para previsão de temperatura máxima e mínima na superfície, a 2 e a 5 cm de profundidade em regiões com clima subtropical.

## 2.4 RESUMO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os métodos empíricos de dimensionamento de pavimentos flexíveis têm sido substituídos, gradativamente, por métodos mais racionais. No Brasil, busca-se a transição para métodos empírico-mecanísticos, cujo comportamento obtido em laboratório através de ensaios de tensão e deformação é relacionado com modelo desempenho empírico. No entanto, em alguns países já se busca a transição para métodos mecanísticos, como os Estados Unidos com o uso do *software* LVECD.

No dimensionamento, se busca detalhar uma estrutura que seja capaz de durar o período de projeto sem que o pavimento apresente defeitos em níveis acima dos limites estabelecidos. Porém, em serviço, as misturas asfálticas são submetidas a condições diferentes das consideradas em laboratório, sendo necessário o uso de fator campo/laboratório para prever o desempenho do pavimento em campo a partir de resultados laboratoriais.

Neste sentido, as avaliações periódicas em campo são de grande importância, pois permitem analisar o desempenho do pavimento para as condições em que a estrutura está exposta, como as características climáticas e o tráfego da região.

A avaliação funcional, que está relacionada com conforto e segurança ao rolamento, pode ser realizada através de levantamento de defeitos superficiais, afundamento de trilha de roda, irregularidade longitudinal, microtextura e macrotextura. A avaliação estrutural, relacionada à capacidade de suporte de carga, pode ser realizada através de levantamento de deflexões. Quanto maior a deflexão máxima, maior é o comprometimento estrutural das camadas do pavimento.

Ao longo da vida útil, o pavimento sofre deteriorações relacionadas, principalmente, às solicitações do tráfego e às condições climáticas, que alteram seu desempenho. As misturas asfálticas sofrem um processo progressivo de trincamento por fadiga devido à ação repetida das cargas de tráfego, que pode ser agravado com a temperatura do pavimento.

Por se tratarem de materiais viscoelásticos, as misturas asfálticas apresentam comportamento mecânico distinto de acordo com a temperatura e a frequência de carregamento ao qual são impostas. Em elevadas temperaturas, o ligante asfáltico se comporta como um fluido viscoso e em baixas temperaturas, como um sólido quase elástico. Portanto, de maneira geral, quanto maior a temperatura, menor a rigidez da mistura asfáltica.

Em campo, as misturas asfálticas sofrem variação de temperatura ao longo do dia e sazonalmente no ano. Durante o dia, devido à baixa condutividade térmica e elevada absorção da radiação solar na superfície do revestimento, são gerados gradientes térmicos na mistura asfáltica com temperatura decrescente com a profundidade. No entanto, com o entardecer, ocorre a radiação do calor armazenado para a atmosfera, levando a inversão destes gradientes térmicos. Assim, a temperatura no revestimento varia em função da radiação solar, da profundidade e do tempo.

Neste contexto, pesquisas têm apresentado que a estimativa de dano por fadiga altera-se significativamente de acordo com a temperatura adotada para o revestimento no período de projeto. O uso de temperatura média mensal no dimensionamento de pavimentos flexíveis não considera o dano que ocorre em curtos períodos com temperatura elevada. Dessa forma, a consideração da temperatura regional nas análises tende a levar a resultados de dimensionamento mais precisos.

### **3 MÉTODO DA PESQUISA**

O método da pesquisa se divide em 7 etapas, as quais são descritas detalhadamente nas subseções seguintes.

#### **3.1 ETAPA 1 – INFORMAÇÕES GERAIS DOS SEGMENTOS MONITORADOS**

Os segmentos monitorados analisados no presente trabalho estão localizados no município de Araranguá, em Santa Catarina. Nesta etapa, são apresentadas as informações gerais como: a localização, o clima, o tipo de estrutura, os materiais empregados, as características das misturas asfálticas utilizadas e o método de dimensionamento. Estes dados e informações foram obtidas de: Trichês (2014), Melo (2014), Marcon (2016), Santos (2016) e Luz (2017).

#### **3.2 ETAPA 2 – AVALIAÇÃO PERIÓDICA DO PAVIMENTO**

A Tabela 2 apresenta a descrição de todos os levantamentos realizados nos segmentos monitorados desde a abertura ao tráfego em março de 2014. O primeiro levantamento foi analisado por Santos (2016) e os levantamentos realizados até julho de 2017 foram analisados por Luz (2017). Dessa forma, nesta etapa, serão analisados os dados dos últimos dois levantamentos, conduzidos em dezembro de 2017 e novembro de 2018.

Inicialmente, foram construídos três segmentos monitorados na rodovia BR-101/SC, denominados segmentos 01, 02 e 03. No entanto, entre dezembro de 2014 e janeiro de 2015, foi aplicada uma camada de microrevestimento nos segmentos 01 e 02, sendo necessária a adoção de outros dois segmentos para serem monitorados na rodovia, denominados segmentos 04 e 05. Assim, após 2014 apenas os segmentos 03, 04 e 05 passaram a fazer parte dos levantamentos periódicos.

Tabela 2 – Levantamentos realizados em Araranguá.

Período	Tempo	Seg.	Levantamentos realizados	Conduzido por
Março/ 2014	Dias antes da abertura	01, 02 e 03	Defeitos superficiais	COPPETEC/ UFRJ
			Deflexões (FWD)	
			IRI (Perfilômetro a laser)	
			ATR (Perfilômetro a laser)	
			Microtextura (Pêndulo Britânico e <i>GripTester</i> )	
			Macrotextura (Mancha de areia)	
Março/ 2015	13 meses	03, 04 e 05	Defeitos superficiais	Lab. Pav. UFSC
			ATR (Barra metálica)	
		03	Microtextura (Pêndulo Britânico)	
			Macrotextura (Mancha de areia)	
Maio/ 2016	27 meses	03, 04 e 05	Defeitos superficiais	Petrobrás Distribuidora (BR)
			Deflexões (FWD)	
			Microtextura ( <i>GripTester</i> )	
			Macrotextura (Perfilômetro a laser)	
			IRI (Perfilômetro a laser)	
			ATR (Perfilômetro a laser)	
Julho/ 2017	41 meses	03, 04 e 05	Defeitos superficiais	Lab. Pav. UFSC
			ATR (Barra metálica)	
			Microtextura (Pêndulo Britânico)	
			Macrotextura (Mancha de areia)	
Dezembro/ 2017	46 meses	03, 04 e 05	ATR (Perfilômetro a laser)	Stratura Asfaltos
			IRI (Perfilômetro a laser)	
			Deflexões (FWD)	
Novembro/ 2018	57 meses	03, 04 e 05	Defeitos superficiais	Lab. Pav. UFSC
			ATR (Barra metálica)	
			Microtextura (Pêndulo Britânico)	
			Macrotextura (Mancha de areia)	

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

### 3.2.1 Levantamento realizado em 2017

Em dezembro de 2017, foi realizada a avaliação estrutural e funcional dos segmentos monitorados. A empresa Stratura Asfaltos foi responsável pelo levantamento em campo. Foram conduzidos os levantamentos de deflexão, afundamento de trilha de roda e irregularidade longitudinal. Os dados coletados estão apresentados no Apêndice A. Os procedimentos foram realizados conforme as diretrizes das normas listadas a seguir:

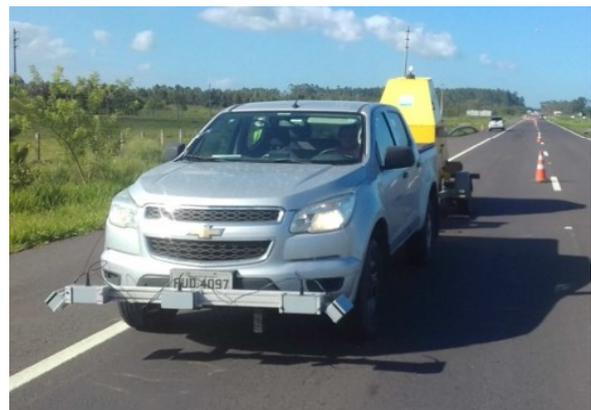
- **Levantamento deflectométrico:** DNER-PRO 273/96 (BRASIL, 1996) – Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo “*Falling Weight Deflectometer (FWD)*”;
- **Irregularidade Longitudinal:** ASTM E 950/E 950M (2009) – *Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference.*

A Figura 39 mostra os equipamentos utilizados nos levantamentos realizados em dezembro de 2017. A irregularidade longitudinal e o afundamento de trilha de roda foram medidos através do perfilômetro inercial a laser. Os dados foram gerados para cada 20 m de extensão.

Figura 39 – Levantamentos em 2017: (a) Levantamento deflectométrico e (b) Perfilômetro a Laser.



(a)



(b)

Fonte: GSE (2018).

O afundamento de trilha de roda foi medido na trilha de roda externa e interna de cada faixa de rolamento. A partir destes dados, foi calculado o afundamento médio de cada segmento monitorado. Além disso, os dados foram separados em categorias de afundamento, em porcentagem representativa, divididos em:  $ATR < 2 \text{ mm}$ ;  $2 \text{ mm} \leq ATR < 4 \text{ mm}$ ;  $4 \text{ mm} \leq ATR < 7 \text{ mm}$ ;  $7 \text{ mm} \leq ATR < 12 \text{ mm}$ ;  $12 \text{ mm} \leq ATR < 20 \text{ mm}$ .

O valor de irregularidade longitudinal foi obtido para cada faixa de rolamento dos segmentos monitorados. Com estes dados, foi calculado o valor de IRI médio de cada faixa, para todos os segmentos monitorados.

O levantamento das deflexões recuperáveis foi feito por meio do deflectômetro de impacto FWD. Primeiramente, os dados de campo passaram pelo procedimento estatístico de eliminação de valores espúrios conforme especificado na norma DNER 011/79 – PRO (BRASIL, 1979b). Após isso, as deflexões medidas foram utilizadas na análise das deflexões máximas, no cálculo de raio de curvatura e estimativa dos módulos de resiliência das camadas através do procedimento de retroanálise.

As deflexões máximas ( $d_0$ ) foram comparadas com a deflexão admissível, calculada através da Equação (33) (MEDINA E MOTTA, 2015).

$$\log D_{adm} = 3,479 - 0,289 \cdot \log N \quad (33)$$

Sendo:

$D_{adm}$  = deflexão máxima admissível (0,01 mm), para espessura de revestimento  $\geq 10 \text{ cm}$ ;

$N$  = número de solicitações de eixo padrão de 8,2 tf, durante a vida de projeto (calculado pelo método do USACE).

O procedimento de retroanálise foi realizado através do *software* BackMeDiNa 1.1, o qual calcula os módulos de resiliência das camadas e a bacia de deformação de maneira iterativa, de modo a buscar a bacia de deformação mais próxima da bacia medida em campo.

### 3.2.2 Levantamento realizado em 2018

Em novembro de 2018, o Laboratório de Pavimentação da UFSC conduziu o levantamento nos segmentos de Araranguá. Foi realizado o inventário de defeitos de superfície, o levantamento de afundamento de trilha de roda, bem como a avaliação da microtextura e da macrotextura. Os dados coletados estão apresentados no Apêndice B.

Os procedimentos ocorreram conforme especificado nas normas listadas a seguir:

- **Inventário de defeitos:** DNIT 006/2003 (BRASIL, 2003c) – Avaliação objetiva de pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Procedimentos;
- **Afundamento de trilha de roda:** ASTM E 1703/E 1703M (2015) – *Standard Test Method for Measuring Rut-Depth of Pavement Surfaces Using a Straightedge*;
- **Microtextura:** ASTM E 303 (2013) – *Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester*;
- **Macrotextura:** ASTM E 965 (2015) – *Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique*.

A Figura 40 apresenta os levantamentos sendo realizados em campo.

O levantamento de defeitos superficiais foi realizado apenas na faixa direita. Foram registrados e medidos todos os defeitos observados em toda a extensão dos segmentos monitorados. Com estes dados, foi possível calcular a porcentagem de área trincada em relação à área total da faixa direita e em relação à área da região da trilha de roda.

O afundamento de trilha de roda foi medido na trilha externa da faixa direita em cada estaca, ou seja, a cada 20 m. Assim, para cada segmento, foi calculado o afundamento médio e o desvio padrão. Os valores de afundamento foram classificados em 5 categorias de acordo com a profundidade medida. Dessa forma, foi calculada a porcentagem representativa de afundamento nas categorias:  $ATR < 2 \text{ mm}$ ;  $2 \text{ mm} \leq ATR < 4 \text{ mm}$ ;  $4 \text{ mm} \leq ATR < 7 \text{ mm}$ ;  $7 \text{ mm} \leq ATR < 12 \text{ mm}$ ;  $12 \text{ mm} \leq ATR < 20 \text{ mm}$ .

Figura 40 – Levantamentos em 2018: (a) pintura e (b) medição das trincas, (c) afundamento de trilha de roda, (d) mancha de areia e (e) Pêndulo Britânico.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Como os três segmentos monitorados apresentam a mesma mistura asfáltica na superfície, os ensaios de microtextura e de macrotextura foram realizados apenas no segmento 03. Além disso, devido ao elevado trincamento observado nos segmentos 05 e 04, o ensaio de mancha de areia poderia ficar comprometido nestes segmentos, pois a amostra poderia entrar nas fissuras do revestimento.

Os ensaios de mancha de areia e Pêndulo Britânico foram realizados na trilha de roda externa da faixa direita a cada 20 m. Com os dados medidos em campo, foi calculado o valor médio de altura de mancha de areia (HS), valor médio de Resistência a Derrapagem (VRD) e o Índice Internacional de Atrito (IFI).

### 3.3 ETAPA 3 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DO DESEMPENHO DO PAVIMENTO

A finalidade desta etapa é a avaliação das condições do pavimento dos segmentos monitorados ao longo do tempo e do tráfego acumulado. Neste sentido, foram utilizados os dados dos levantamentos já realizados nos segmentos desde o ano de abertura ao tráfego.

A evolução do desempenho foi analisada em função do tráfego acumulado nos segmentos monitorados, utilizando os dados dos levantamentos realizados até o ano de 2018. Foram analisados os dados relativos à porcentagem de área trincada, Irregularidade Longitudinal, afundamento de trilha de roda, deflexão e condições de microtextura e macrotextura.

Para avaliar a microtextura, foram utilizados dois procedimentos distintos, o Pêndulo Britânico e o GripTester, conforme apresentado na Tabela 2. Dessa forma, para analisar a evolução da microtextura ao longo do tempo de serviço, as medidas feitas com o GripTester foram convertidas para VRD (Valor de Resistência à Derrapagem) através da Equação (34) (DPTI, 2014).

$$GN = 0,01 \cdot VRD \quad (34)$$

Sendo:

$GN = Grip\ Number$ ;

$VRD = Valor\ de\ Resistência\ à\ Derrapagem$ .

A avaliação da macrotextura também foi realizada através de dois procedimentos. Foi utilizado o Perfilômetro a Laser e o ensaio de Mancha de Areia, conforme Tabela 2. Para analisar a evolução deste parâmetro ao longo do tempo, foi necessário utilizar a correlação apresentada na Equação (35) (ASTM E 1845, 2015).

$$ETD = 0,2 + 0,8 MPD \quad (35)$$

Sendo:

*ETD* = Profundidade de textura do pavimento, em mm;

*MPD* = Profundidade média do perfil, em mm.

Os resultados obtidos através do Perfilômetro a Laser (*MPD*) foram convertidos em *ETD*, que corresponde a uma estimativa da altura média de mancha de areia (*HS*).

#### 3.4 ETAPA 4 – COMPARAÇÃO DE ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL: LVECD E FLEXÃO 4 PONTOS

Nesta etapa, buscou-se comparar os resultados do procedimento de estimativa de vida útil a partir do ensaio de fadiga a 4 pontos com os resultados do procedimento mecanístico embasado na teoria do dano contínuo viscoelástico, desenvolvido na Universidade da Carolina do Norte. Dessa forma, verificou-se quão próximos estes procedimentos estão daquilo que se observa em campo em termos de porcentagem de área trincada. Para isto, foram utilizados os resultados do ensaio de fadiga em flexão alternada 4 pontos com análise viscoelástica da estrutura no *software* Viscoroute e os resultados obtidos através do *software* LVECD e a função de transferência de Nascimento (2015).

Todas as análises foram realizadas com temperatura constante de 20°C. Entretanto, sabe-se que em campo ocorrem variações sazonais, diárias e horárias de temperatura do pavimento. Mesmo sendo possível detalhar tais variações no LVECD, optou-se por adotar a temperatura de 20°C constante para efeitos de comparação com os resultados de fadiga a 4 pontos cuja curva de fadiga foi obtida para temperatura de 20°C.

Com relação aos dados de medições em campo, o método utilizado para o levantamento de defeitos nos segmentos de Araranguá foi diferente do procedimento adotado por Nascimento (2015) no desenvolvimento da função de transferência. Conforme apresentado na Figura 5, o procedimento adotado por Nascimento (2015) para o levantamento de porcentagem de área trincada foi a partir do mapeamento por células de 1,2 x 2,0 metros. Neste método, não se avalia a área do defeito, mas sim a porcentagem de células que apresentam algum tipo de trincamento em relação à quantidade total de células do segmento monitorado.

Nos levantamentos dos defeitos dos segmentos de Araranguá, foi realizado o cadastramento dos defeitos encontrados na faixa de rolamento da direita (mais solicitada). Inicialmente, foram marcados com tinta todos os trincamentos encontrados em toda a sua extensão. Posteriormente, foi medida a área afetada pelo trincamento, de tal forma que a trinca ficasse inserida dentro de um retângulo, separando-as em área de trincas isoladas, área com trincas tipo FC-2 e área com trincas FC-3. Para o caso de trincas isoladas tipo FC-1, foi considerada uma largura de 0,20 m para o cálculo da área. Na Figura 41 é apresentado o procedimento realizado para o levantamento dos defeitos na superfície.

Figura 41 – Levantamento de defeitos na superfície em 2018.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Assim, neste procedimento de levantamento, a área trincada calculada é diferente da área trincada calculada no procedimento adotado por Nascimento (2015), através de células.

No método de mapeamento por células, apenas uma pequena trinca na célula já levaria a considerar 100% de trincamento da célula, cuja área corresponde a 2,4 m<sup>2</sup> (1,20 m x 2 m), considerando faixa com 3,60 m de largura. Desta forma, para poder utilizar os levantamentos de área trincada realizados nos segmentos monitorados na comparação dos métodos de estimativa de vida útil foi necessário, primeiramente, converter o levantamento de área em levantamento contemplando o mapeamento por células.

No Quadro 1 pode-se observar um modelo de planilha de dados dos levantamentos nos segmentos de Araranguá. O Quadro apresenta os dados obtidos em um trecho de 20 metros no segmento 04 referente ao levantamento realizado em 2015. Foram anotadas as seguintes informações: a localização do trincamento, o tipo de trinca, as medidas e o posicionamento na direção transversal, sendo trilha de roda externa (E) ou interna (I).

Quadro 1 – Exemplo de planilha de dados do levantamento de 2015 (Segmento 04).

Estaca/Marco	FC - 1	FC-2	FC-3	Medida	Área (m <sup>2</sup> )	Trilha de roda
413+290,2	x			0,2x0,8 m	0,16	I
413+291	x			0,2x0,8 m	0,16	I
413+297	x			0,4x1,0 m	0,40	E
413+298	x			0,4x1,0 m	0,40	E
413+299	x			0,4x1,0 m	0,40	E

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Para ajustar os dados dos levantamentos para o método de mapeamento por células, os segmentos monitorados foram divididos em células de 2 m de comprimento por 1,20 m de largura, conforme ilustrado na Figura 5. A Figura 42 apresenta um esquema do mapeamento realizado a partir dos dados do levantamento de 2015, para a mesma extensão do segmento 04 correspondente aos dados do Quadro 1. Na figura, as células preenchidas representam células com algum tipo de trincamento.

Considerou-se que os trincamentos com comprimento maior do que 1,0 m já estariam atingindo as células centrais do trecho. O mesmo procedimento foi feito para todos os levantamentos de defeitos de superfície realizados em Araranguá, em todo o comprimento dos segmentos monitorados.

Figura 42 – Esquema utilizado para ajustar os dados do levantamento de 2015 (Segmento 04).

	km 413+300								km 413+280			
	18	16	14	12	10	8	6	4	2	18		
INTERNA					} }							
EXTERNA	} }	} }										

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Nas simulações computacionais realizadas no LVECD e no Viscoroute, foram adotados os mesmos módulos e coeficiente de Poisson para as camadas de base, sub-base e subleito. Melo (2014) estimou os módulos para estas camadas através de retroanálise das bacias de deformação no ano de abertura ao tráfego. A retroanálise foi conduzida utilizando o *software* BAKFAA - FAA Backcalculation. Na Tabela 3 estão apresentados os parâmetros obtidos por Melo (2014) e adotados nesta pesquisa.

Tabela 3 – Parâmetros das camadas elásticas da estrutura do pavimento.

Parâmetros	Camada		
	Base	Sub-base	Subleito
E (MPa)	260	210	180
$\nu$	0,35	0,35	0,35

Fonte: Adaptado de Melo (2014).

Para caracterizar a camada de revestimento asfáltico, foram adotados parâmetros diferentes, visto que cada método leva em consideração diferentes teorias. No LVECD, a mistura asfáltica é caracterizada a partir da curva característica do dano, a qual se baseia do modelo de Wiechert (Maxwell generalizado). No Viscoroute, são utilizados os parâmetros reológicos do modelo de Huet-Sayegh, obtidos a partir de ensaio de módulo complexo.

A caracterização das misturas asfálticas quanto à curva característica do dano foi realizada por Nascimento (2015). As misturas de campo foram reproduzidas em laboratório e a curva característica de dano foi determinada através do ensaio cíclico de tração direta. Na Equação (36) é apresentada a relação entre queda de rigidez do material (C) e acúmulo de dano (S), onde  $C_{10}$ ,  $C_{11}$  e  $C_{12}$  são constantes de regressão. No

Quadro 2 são apresentados os coeficientes de regressão das curvas característica de dano das misturas asfálticas dos segmentos de Araranguá.

$$C_1(S_1) = C_{10} - C_{11}(S_1)^{C_{12}} \quad (36)$$

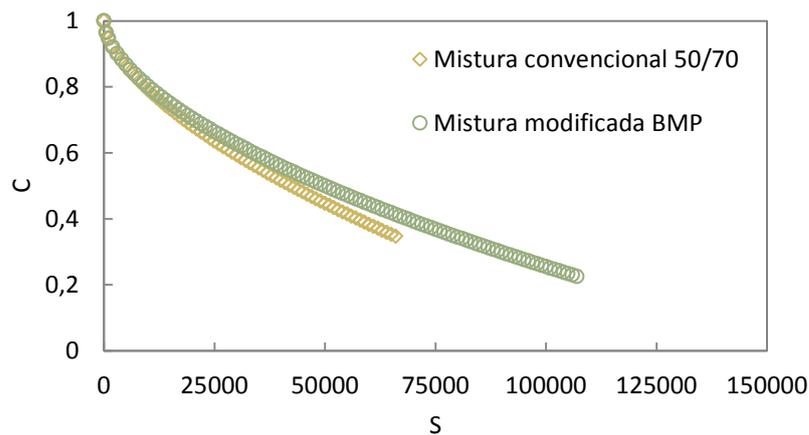
Quadro 2 – Coeficientes de regressão da curva característica de dano das misturas asfálticas de Araranguá.

Misturas asfálticas	C vs. S		
	$C_{10}$	$C_{11}$	$C_{12}$
CAP 50/70	1,0	0,000829	0,601
BMP	1,0	0,001005	0,574

Fonte: Adaptado de Nascimento (2015).

Na Figura 43 são apresentadas as curvas características de dano das misturas asfálticas dos segmentos monitorados, sendo mistura convencional com CAP 50/70 e mistura asfáltica modificada por borracha moída de pneus (BMP). Pode-se observar que a queda de rigidez da mistura asfáltica modificada é mais lenta do que a mistura convencional, indicando melhor comportamento à fadiga.

Figura 43 – Curva característica de dano das misturas asfálticas de Araranguá.



Fonte: Adaptado de Nascimento (2015).

Os ensaios de módulo complexo e a caracterização no modelo de Huet-Sayegh foram realizados por Trichês (2014) e Marcon (2016) para a mistura asfáltica convencional (CAP 50/70) e modificada por borracha (BMP), respectivamente. Com os resultados dos ensaios de módulo complexo, os parâmetros do modelo de Huet-Sayegh foram ajustados com o *software* Viscoanalyse. Na Tabela 4 são apresentados os valores encontrados para cada mistura, sendo estes utilizados nas simulações numéricas com o Viscoroute.

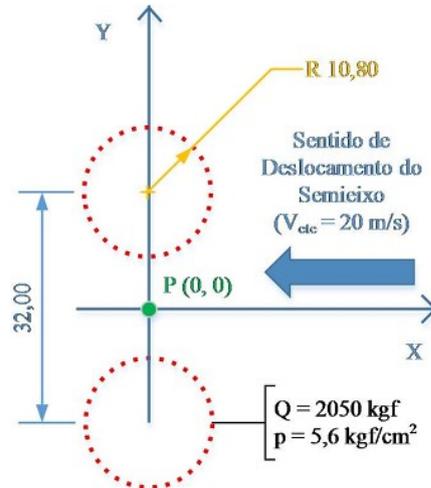
Tabela 4 – Parâmetros reológicos do modelo de Huet-Sayegh para as misturas asfálticas de Araranguá.

Parâmetros viscoelásticos	Mistura Asfáltica	
	CAP 50/70 <sup>(1)</sup>	BMP <sup>(2)</sup>
$E_{\infty}$ (MPa)	29238,2	49323,0
$\nu$	0,30	0,27
$E_0$ (MPa)	76,5434	7,7079
k	0,24856	0,10543
h	0,68540	0,47881
$\delta$	2,70810	2,47254
A0	5,89107	0,49379
A1	-0,436450	-0,416128
A2	0,002040	0,002202

Fonte: Elaborada pela autora (2019) com dados de Trichês (2014) <sup>(1)</sup> e Marcon (2016) <sup>(2)</sup>.

O carregamento considerado na simulação numérica no Viscoroute foi de um semieixo do eixo padrão de 8,2 toneladas. Na Figura 44 é apresentado um esquema da configuração do carregamento, sendo a carga por roda de 2050 kgf, distância entre rodas de 32 cm e pressão de enchimento dos pneus de 5,6 kgf/cm<sup>2</sup>. Foi considerada velocidade constante de 20 m/s (72 km/h). Segundo Chabot *et al.* (2010), a velocidade de 72 km/h equivale aproximadamente a frequência de 10 Hz utilizada nos ensaios de fadiga.

Figura 44 – Esquema da configuração de carregamento utilizada na simulação numérica.



Fonte: Melo (2014).

O método de estimativa de vida útil baseado no dano contínuo viscoelástico permite que seja encontrada, por meio do *software* LVECD e da função de transferência de Nascimento (2015), a relação entre porcentagem de área trincada prevista e o tráfego atuante. No entanto, o método utilizado a partir do ensaio de fadiga a 4 pontos tem como resposta o número de solicitações para atingir a ruptura, calculado a partir do comportamento da mistura asfáltica em ensaio laboratorial e da deformação de tração obtida em simulações computacionais. Como os métodos apresentam respostas distintas, buscou-se compará-los através do fator de calibração necessário para coincidir com os valores medidos em campo.

Para o método que utiliza o programa LVECD, o fator de calibração, denominado de “fator campo/LVECD”, foi determinado dividindo o tráfego atuante em campo pelo tráfego previsto para atingir a mesma porcentagem de área trincada. O fator foi estimado para 1%, 10% e 20% de área trincada, em cada segmento.

O fator de calibração para o método de estimativa a partir dos resultados de fadiga a 4 pontos, denominado de “fator campo/4PViscoroute”, foi calculado dividindo o tráfego atuante em campo pelo número de solicitações para a ruptura ( $N_{ruptura}$ ) da mistura asfáltica utilizada no segmento monitorado. Desta forma, os valores de tráfego para atingir 1%, 10% e 20% de área trincada em campo foram divididos pelo mesmo  $N_{ruptura}$  para cada segmento.

Além de analisar a vida útil da estrutura como um todo foi verificado a estimativa de vida útil em cada uma das camadas do revestimento do segmento 03. Esse segmento possui

revestimento composto por duas misturas asfálticas distintas, sendo mistura convencional com CAP 50/70 na parte superior e mistura modificada por borracha moída de pneus na parte inferior. O procedimento de análise foi similar ao realizado para os segmentos monitorados como um todo. Foi determinado o fator de calibração em cada método e comparado com os resultados de área trincada obtidos em campo.

### 3.5 ETAPA 5 – AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA SAZONALIDADE DA TEMPERATURA NO ACÚMULO DE DANO

Nesta etapa avaliou-se o efeito da sazonalidade da temperatura no desempenho à fadiga dos segmentos monitorados de Araranguá. O procedimento para considerar a temperatura na análise da estrutura foi similar ao adotado no programa LVECD.

Apesar de ter como base os dados horários de temperatura, o programa divide os dados climáticos em períodos visando capturar as mudanças de temperatura. A análise da resposta do pavimento é realizada para um ano representativo e repetida para os anos subsequentes. Conforme descrito anteriormente, o ano representativo é dividido em estágios, que podem durar de duas semanas e alguns meses, dependendo da precisão necessária. Cada estágio é dividido em períodos menores que representam um curto período do dia, chamados de segmentos de análise, que são determinados com base na variação horária de temperatura e tráfego, podendo ser definidos como manhã, tarde e noite, por exemplo (BAEK, 2010; ESLAMINIA *et al.*, 2012; LACROIX, 2013; NASCIMENTO, 2015; ESLAMINIA e GUDDATI, 2015).

Sendo assim, primeiramente, foi determinada a duração e o número de estágios no ano e segmentos de análise durante o dia. Neste trabalho, os segmentos de análise foram denominados de “intervalos de análise”, buscando evitar o conflito com o nome dado aos trechos analisados (segmentos monitorados). Foi considerado que cada mês do ano representa um estágio. Os intervalos de análise durante o dia foram determinados com base na distribuição horária de temperatura e de tráfego.

Com os intervalos de análise de temperatura determinados, foi calculada a temperatura média do ar e estimada a temperatura no revestimento. Então, foram realizadas simulações computacionais destas estruturas com variação de temperatura ao longo do ano e de estruturas com temperatura constante. A deformação específica de tração em cada

simulação foi determinada e utilizada nos modelos de fadiga das misturas asfálticas para estimar o número de solicitações de tráfego para a ruptura. Com a distribuição de tráfego e o número de solicitações para a ruptura, foi realizado o acúmulo de dano ao longo do período de projeto.

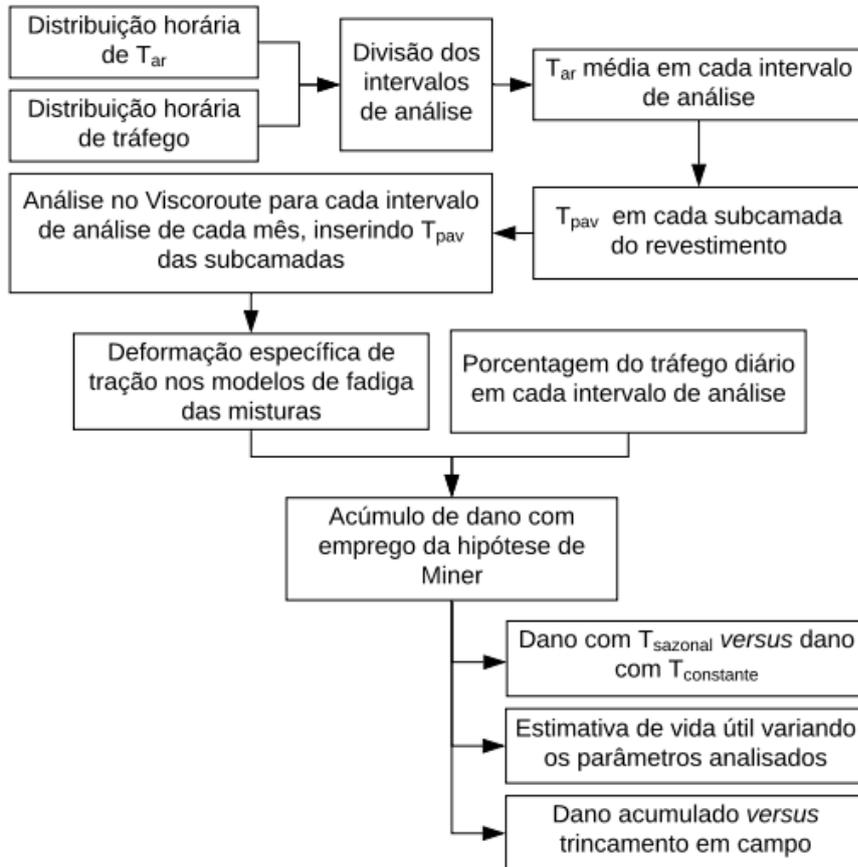
Dessa forma, o dano acumulado considerando a sazonalidade da temperatura pôde ser comparado ao dano acumulado obtido com apenas uma temperatura (20°C), de modo a verificar a influência deste parâmetro na análise do desempenho das misturas e se é válido fazer este refinamento nesta análise.

Além disso, foi analisada a influência da variação da temperatura, da distribuição do tráfego e da curva de fadiga adotada no acúmulo de dano. Para isso, a estimativa de vida útil para dano acumulado igual a 1 foi verificada em 4 combinações. Os parâmetros adotados de temperatura, tráfego e curva de fadiga foram alterados em cada combinação.

Por fim, comparou-se o dano acumulado com a porcentagem de área trincada medida em campo em cada levantamento. Para isto, o dano acumulado foi calculado até o mês em que cada levantamento de campo foi realizado, para cada segmento monitorado. Assim, verificou-se a correlação entre área trincada medida e dano acumulado calculado para a condição de sazonalidade de temperatura e para temperatura constante.

A Figura 45 apresenta um fluxograma resumido desta etapa, a qual é detalhada nas subseções seguintes.

Figura 45 – Fluxograma resumido da etapa 5.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

### 3.5.1 Variação da temperatura do ar e do tráfego durante o dia

Para determinar os intervalos de análise de temperatura foi necessária a obtenção dos dados históricos de temperatura do ar da região. O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) possui uma estação meteorológica automática em Araranguá, fundada no dia 28 de setembro de 2008 (INMET, 2018). Na Tabela 5 são apresentadas informações quanto à localização da estação meteorológica automática de Araranguá.

Tabela 5 – Informações da estação meteorológica automática de Araranguá.

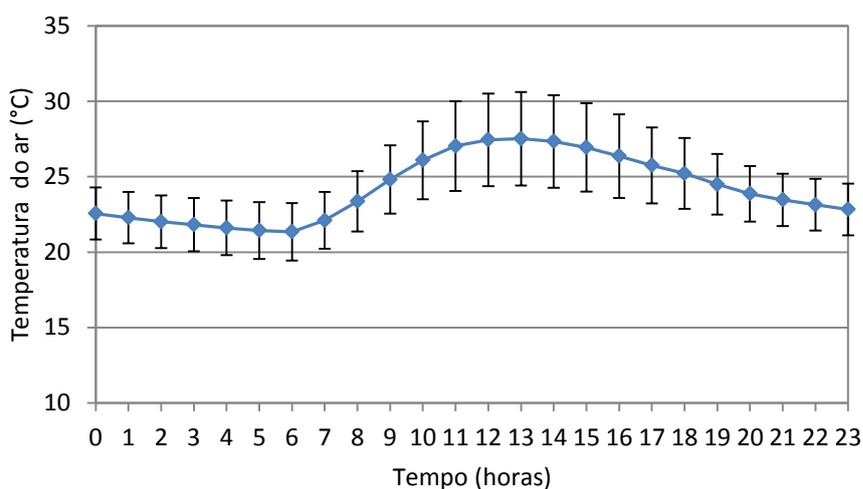
Altitude	12 m
Latitude	28°57'S
Longitude	49°29'W

Fonte: Elaborada pela autora (2019) com dados de INMET (2018).

Com os dados de temperatura do ar obtidos através do banco de dados do INMET, foi calculada a média horária de temperatura do ar para cada mês do ano. Para isso, os dados brutos de temperatura horária foram, primeiramente, separados por mês. Todos os meses de janeiro, por exemplo, desde a abertura da estação meteorológica em 2008 até 2017, foram agrupados para serem analisados em conjunto, sendo o mesmo procedimento realizado para todos os doze meses do ano.

Posteriormente, foi calculada a temperatura média do ar e o desvio padrão para cada hora do dia (horário de Brasília), de forma a caracterizar um dia típico de temperatura para cada mês. A Figura 46 apresenta a média horária de temperatura e o desvio padrão para todos os meses de janeiro analisados.

Figura 46 – Média horária de temperatura do ar nos meses de janeiro (2008-2017).



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

O mesmo procedimento foi realizado para todos os meses do ano. A média horária de temperatura do ar e o desvio padrão para todos os meses estão dispostos no Apêndice C. Com os dados de todos os meses, foi verificado o comportamento da temperatura do ar ao longo do dia na região analisada.

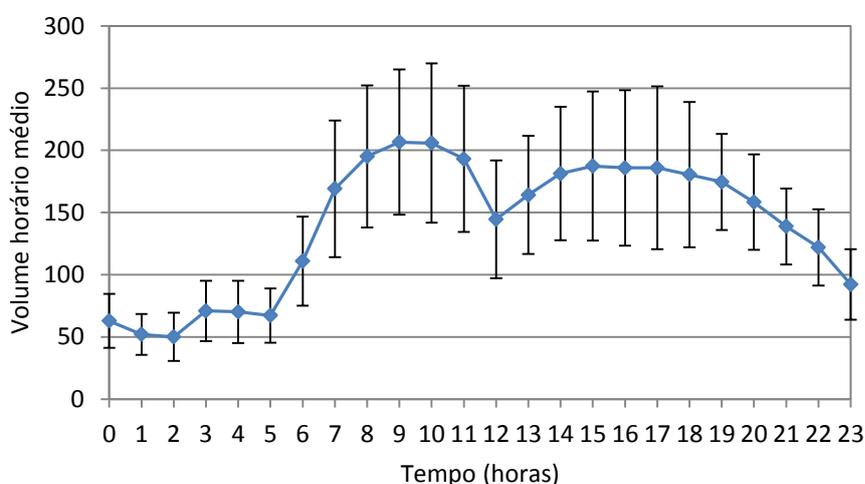
Para definir os intervalos de análise, os dados de variação horária de temperatura do ar foram comparados com os dados de tráfego da região. O Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT), realizado pelo DNIT, possui posto de contagem contínua de tráfego na

rodovia BR-101/SC, localizada no km 339, no município de Tubarão, próximo aos segmentos monitorados. Desde julho de 2014, início da operação de contagem no local, até novembro de 2017, o posto de contagem coletou dados horários de volume de tráfego nos dois sentidos da rodovia, separados por categorias (PNCT, 2018).

Utilizando os dados horários de contagem de tráfego de dezembro de 2016 a novembro de 2017, foi possível verificar a distribuição horária para cada mês. Os dados utilizados na análise foram coletados pelo PNCT no sentido Sul/Norte da rodovia, onde estão localizados os segmentos monitorados. Foram utilizados dados de contagem horária de ônibus e caminhões, sendo excluídos do somatório os veículos de passeio, motos e outros.

Como os dados de contagem são disponibilizados por dia, inicialmente, eles foram agrupados mês a mês. Foi calculado, então, o volume horário médio de tráfego dentro de cada mês. A Figura 47 apresenta o volume horário médio de tráfego e o desvio padrão do mês de janeiro de 2017.

Figura 47 – Volume horário médio de tráfego em janeiro de 2017.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

O banco de dados de contagem de tráfego não possui dados para o mês de dezembro de 2017. Dessa forma, o cálculo da distribuição horária mensal foi realizado para os meses de dezembro de 2016 a novembro de 2017. O volume horário médio e o desvio padrão de cada

mês analisado estão dispostos no Apêndice D. Ao se comparar as distribuições horárias de temperatura e tráfego, foi determinado o número e a duração dos intervalos de análise.

Para considerar a distribuição do tráfego em cada intervalo de análise, foi verificada a variação de tráfego horária que ocorreu nos segmentos monitorados no ano de 2017 com os dados do PNCT. Foi calculada a média anual de tráfego em cada hora do dia e a porcentagem que este volume representa do total diário. Com isso, estimou-se a porcentagem do tráfego diário que ocorreu em cada período do dia adotado nos intervalos de análise.

### **3.5.2 Cálculo da temperatura do revestimento**

Apesar do grande número de modelos encontrados na literatura para estimar a temperatura no revestimento, nesta pesquisa, o modelo adotado para estimar a temperatura no pavimento foi o desenvolvido por Barber (1957), apresentado na Equação (16). Tal modelo foi escolhido devido à necessidade de obter a temperatura em diferentes profundidades do pavimento, uma vez que diversos modelos apresentam a limitação de prever a temperatura apenas para uma profundidade específica.

Outro motivo que levou a escolha do modelo foi o fato de utilizar dados meteorológicos como dados de entrada, visto que não se tem base de dados de medidas de temperatura da superfície do revestimento para os segmentos monitorados da pesquisa. Além disso, o modelo é capaz de prever a inversão do gradiente de temperatura que ocorre no pavimento durante o dia e a noite. Durante o dia, a temperatura do pavimento diminui com o aumento da profundidade e à noite, ocorre o inverso, conforme apresentado na seção 2.1.2.2.

Para encontrar a temperatura no pavimento, primeiramente, foi calculada a temperatura média do ar em cada intervalo de análise, para cada mês do ano. Portanto, foi calculada a média da temperatura do ar que ocorreu durante os intervalos de análise dentro de cada mês, ou seja, em cada estágio.

Como a temperatura no revestimento asfáltico varia com a profundidade, a camada foi dividida em subcamadas de forma a considerar o gradiente de temperatura. Adotou-se subcamadas com espessuras próximas a 2 cm. A Tabela 6 apresenta a espessura das subcamadas consideradas em cada segmento monitorado. Para o segmento 03, as subcamadas foram divididas de modo independente na mistura asfáltica com CAP 50/70 (11,4 cm) e na

mistura modificada por borracha (5,6 cm). Dessa forma, todas as subcamadas possuem apenas um tipo de mistura asfáltica.

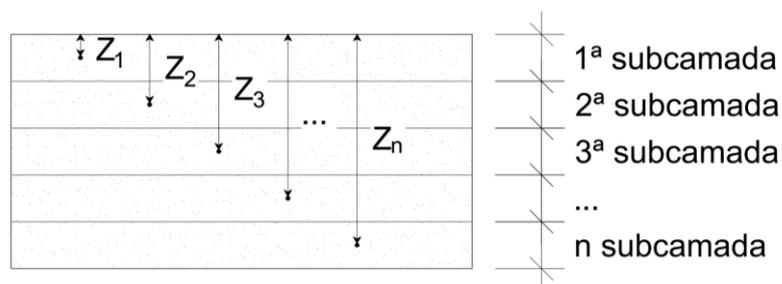
Tabela 6 – Espessura das subcamadas dos segmentos monitorados.

	Espessura da camada (cm)	Espessura das subcamadas (cm)								
		1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	8 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>
S05	16,30	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	2,04	-
S03	17,00	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,87	1,87	1,87
S04	15,30	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	-

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

A temperatura foi calculada com a profundidade do centro de cada subcamada, sendo considerada constante dentro da mesma. A Figura 48 apresenta um esquema da camada de revestimento asfáltico dividida em subcamadas e a profundidade considerada no cálculo da temperatura ( $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  e  $Z_n$ ).

Figura 48 – Esquema de revestimento asfáltico dividido em subcamadas com as profundidades de cálculo de temperatura.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Deste modo, a temperatura do pavimento foi calculada no centro de cada subcamada do revestimento asfáltico em cada intervalo de análise (período do dia) adotado em cada estágio (mês do ano). O mesmo procedimento foi realizado para todos os segmentos monitorados estudados (Segmento 03, 04 e 05).

### 3.5.3 Influência da temperatura na deformação de tração no revestimento

Para verificar a influência da temperatura na deformação do revestimento, foi utilizado o *software* Viscoroute 2.0, que leva em consideração as características viscoelásticas da mistura asfáltica por meio de parâmetros reológicos do modelo de Huet-Sayegh. Nas simulações, o *software* considera o módulo da mistura asfáltica de acordo com a temperatura determinada nos dados de entrada da simulação. Dessa forma, cada subcamada do revestimento asfáltico foi lançada na estrutura da simulação computacional com a respectiva temperatura calculada para o centro da mesma.

Para cada configuração de temperatura, foi determinada a deformação específica de tração na camada de revestimento. Nos segmentos 05 e 04, foi verificada a deformação na fibra inferior da camada asfáltica. No segmento 03, por ter o revestimento constituído de duas misturas asfálticas distintas, foi verificada a deformação na fibra inferior da camada de mistura convencional e da camada de mistura modificada, visando verificar a deformação nos dois materiais.

Foi realizada também a simulação numérica do pavimento com apenas uma temperatura. Para isso, foi modelada a estrutura dos segmentos monitorados no programa Viscoroute, com os mesmos parâmetros adotados na análise anterior, no entanto, a temperatura da camada de revestimento asfáltico foi considerada constante. Como os ensaios de fadiga foram realizados em temperatura de 15°C e 20°C para a mistura convencional e 20°C para a mistura modificada, foram adotados estes valores na análise computacional. Foi determinada a deformação específica de tração na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico, nos mesmos pontos determinados para a análise com sazonalidade.

### 3.5.4 Variação da estimativa de vida útil ao longo do ano em função da variação de temperatura

As deformações obtidas com o Viscoroute foram aplicadas nos modelos de fadiga definidos em laboratório. Os ensaios foram realizados por Trichês (2014) e Marcon (2016). Os modelos de fadiga utilizados estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Modelos de fadiga das misturas dos segmentos de Araranguá.

Mistura asfáltica	Temperatura	Equação de fadiga	R <sup>2</sup>
Convencional <sup>(1)</sup>	15°C	$N = 9,726 \cdot 10^{14} \cdot \varepsilon^{-4,742}$	0,969
	20°C	$N = 4,074 \cdot 10^{13} \cdot \varepsilon^{-4,076}$	0,948
Modificada – BMP <sup>(2)</sup>	20°C	$N = 1,265 \cdot 10^{17} \cdot \varepsilon^{-5,004}$	0,878

Fonte: Elaborada pela autora (2019) com dados de Trichês (2014) <sup>(1)</sup> e Marcon (2016) <sup>(2)</sup>.

Como foram desenvolvidas curvas de fadiga apenas para as temperaturas de ensaio de 15°C e 20°C, não foi possível utilizar modelos obtidos com temperatura correspondente a cada temperatura calculada no revestimento. No entanto, como o objetivo desta etapa é verificar a influência da sazonalidade da temperatura, foram utilizados os modelos disponíveis a fim de comparar os resultados considerando a sazonalidade com os resultados obtidos com apenas uma temperatura na análise.

### 3.5.5 Estimativa de dano acumulado no período de projeto

Para calcular o dano acumulado, foi estimado, primeiramente, o tráfego atuante em cada intervalo de análise. O volume de tráfego anual obtido por Luz (2017) foi dividido pelo número de dias do ano, a fim de encontrar uma estimativa para o volume de tráfego para cada dia. A Tabela 8 apresenta o tráfego por dia encontrado para cada ano.

Vale ressaltar que no ano de 2014 foram considerados apenas 106 dias, pois o tráfego deste ano começou a ser computado por Luz (2017) a partir da abertura ao tráfego que ocorreu em março de 2014. Além disso, os anos de 2016 e 2020 foram considerados como tendo 366 dias, pois são anos bissextos. Nos demais anos foram adotados 365 dias.

Para estimar o tráfego atuante em cada intervalo de análise, foi adotada a porcentagem de volume de tráfego calculada conforme apresentado na seção 3.6.1. Assim, o volume de tráfego diário foi distribuído em cada intervalo de análise de acordo com a porcentagem passante em cada período do dia.

Com o volume de tráfego e o número de repetições para atingir a ruptura referente a cada período do dia adotado, foi possível estimar o dano acumulado na estrutura a partir da hipótese de Miner, conforme apresentado na Equação (1). O procedimento para o acúmulo do

dano com apenas uma temperatura no revestimento foi igual ao realizado para o acúmulo do dano com sazonalidade de temperatura.

Tabela 8 – Tráfego anual de projeto e tráfego considerado por dia.

Ano	N <sub>USACE</sub>	
	Anual <sup>(1)</sup>	Tráfego por dia
2014	7,19x10 <sup>6</sup>	2,35x10 <sup>4</sup>
2015	7,64x10 <sup>6</sup>	2,09x10 <sup>4</sup>
2016	7,12x10 <sup>6</sup>	1,95x10 <sup>4</sup>
2017	7,83x10 <sup>6</sup>	2,15x10 <sup>4</sup>
2018	7,98x10 <sup>6</sup>	2,19x10 <sup>4</sup>
2019	8,14x10 <sup>6</sup>	2,23x10 <sup>4</sup>
2020	8,33x10 <sup>6</sup>	2,28x10 <sup>4</sup>
2021	8,47x10 <sup>6</sup>	2,32x10 <sup>4</sup>
2022	8,64x10 <sup>6</sup>	2,37x10 <sup>4</sup>
2023	8,81x10 <sup>6</sup>	2,41x10 <sup>4</sup>

Fonte: Elaborada pela autora (2019) com dados de Luz (2017)<sup>(1)</sup>.

### 3.5.6 Estimativa de vida útil para dano acumulado igual a 1

Com o objetivo de comparar a influência dos parâmetros adotados, foram realizadas 4 combinações de acúmulo de dano e analisada a estimativa de vida útil do pavimento. Os parâmetros variados foram: a distribuição horária de tráfego, a temperatura no pavimento e a curva de fadiga adotada. O Quadro 3 apresenta um resumo das combinações adotadas.

Quadro 3 – Resumo das combinações analisadas.

Combinações	Curva de Fadiga		Tráfego		Temperatura	
	15°C	20°C	Constante	Dist. horária	Constante	Sazonalidade
1		x	x		x	
2		x	x			x
3		x		x		x
4	x	x		x		x

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Na primeira combinação simulada (Combinação 1), buscou-se caracterizar os parâmetros adotados no procedimento realizado convencionalmente. A temperatura no pavimento foi adotada como sendo constante durante todo o período de projeto, sendo adotada temperatura de 20°C e a curva de fadiga obtida em ensaio realizado à 20°C. O tráfego foi adotado sem distribuição horária, logo, considerou-se que o volume de tráfego na rodovia é constante ao longo do dia.

Na Combinação 2, a temperatura no pavimento foi analisada com variação sazonal. Portanto, foram adotados os períodos do dia determinados conforme apresentado na seção 3.6.1, nos quais foram calculadas as temperaturas das subcamadas do revestimento asfáltico, para cada mês do ano. Estas temperaturas foram adotadas no *software* Viscoroute de modo a determinar a deformação específica de tração na fibra inferior da camada asfáltica. A curva de fadiga utilizada foi a curva obtida em ensaio realizado à 20°C e o tráfego adotado sem distribuição horária, conforme na Combinação 1.

Na Combinação 3, adotou-se a distribuição horária de tráfego correspondente a cada período de análise. Dessa forma, foram consideradas as variações no volume de tráfego que ocorrem ao longo do dia na rodovia analisada. Além disso, considerou-se a sazonalidade da temperatura no pavimento e curva de fadiga de 20°C, conforme na Combinação 2.

Para a mistura convencional, além da curva de fadiga determinada a partir de ensaio realizado a 20°C, tem-se a curva de fadiga obtida a 15°C, conforme apresentado na Tabela 7. Assim, na Combinação 4 buscou-se utilizar a curva de fadiga de 15°C para os períodos do dia que apresentassem temperatura no pavimento abaixo de 20°C, de forma a refinar a análise. Para os períodos do dia com temperatura no pavimento acima de 20°C, utilizou-se a curva de fadiga de 20°C. A temperatura no revestimento e a distribuição do tráfego foram adotados conforme na Combinação 3.

As simulações numéricas para as combinações seguiram os mesmos procedimentos descritos na seção 3.5.3. Deste modo, a análise da estrutura foi feita no *software* Viscoroute, variando apenas a temperatura da camada de revestimento asfáltico. A deformação específica de tração encontrada foi utilizada na curva de fadiga para encontrar o número de solicitações para ruptura ( $N_f$ ) em cada combinação.

A fim de encontrar o número de solicitações do eixo padrão que levaria à ruptura considerando o  $N_f$  e a porcentagem de tráfego adotada em cada combinação, foi utilizada a

hipótese de Miner (Equação (1)). Na Equação (37) está apresentada a equação de Miner considerando as condições analisadas nesta etapa.

$$D = \sum_{i=1}^M \frac{p_i N}{N_{fi}} \quad (37)$$

Onde:

$D$  = dano acumulado;

$M$  = número total de diferentes intervalos de temperatura;

$p_i$  = porcentagem de passagens de tráfego que ocorrem quando o pavimento está na temperatura  $i$ ;

$N$  = número total de passagens de tráfego;

$N_{fi}$  = número de repetições de carga necessário para atingir a ruptura, nas condições de temperatura  $i$ .

Igualando o dano acumulado a 1 e deixando a Equação (37) em função do número de passagens de tráfego no período tem-se a Equação (38).

$$N = \frac{1}{\sum_{i=1}^M \frac{p_i}{N_{fi}}} \quad (38)$$

Onde:

$N$  = número total de passagens de tráfego (para dano acumulado = 1);

Assim, para cada uma das 4 combinações, foi encontrado o número de solicitações do eixo padrão ( $N_{USACE}$ ) que levaria ao dano acumulado igual a 1, o que indica a ruptura do pavimento de acordo com a hipótese de Miner. Dessa forma, foi verificada a influência da alteração de cada parâmetro na estimativa de vida útil do pavimento.

### 3.5.7 Relação entre o dano acumulado e o trincamento em campo

Com o objetivo de verificar o trincamento que o dano acumulado calculado representa em campo, o dano foi comparado com a porcentagem de área trincada. Através dos levantamentos realizados nos segmentos monitorados, foi possível estimar graficamente o comportamento de porcentagem de área trincada na trilha de roda *versus* o dano acumulado calculado até o período de cada levantamento, para cada segmento monitorado. A partir dos pontos traçados, foi encontrada a linha de tendência que melhor se ajustou aos pontos.

### 3.6 ETAPA 6 – RELAÇÃO ENTRE PORCENTAGEM DE ÁREA TRINCADA E DANO MÉDIO ACUMULADO

Nesta etapa, buscou-se relacionar de forma mais detalhada os resultados obtidos a partir do ensaio de flexão a 4 pontos e análise no Viscoroute com a porcentagem de área trincada medida em campo. Para isso, foi utilizado o conceito de dano acumulado da hipótese de Miner, conforme apresentado na Equação (1). O procedimento utilizado foi similar ao adotado por Nascimento (2015), no qual é obtido o dano médio para uma malha de pontos na seção transversal embaixo do ponto de aplicação da carga.

Para definir os pontos em que seria calculada a deformação de tração, a espessura da camada de revestimento asfáltico de cada segmento monitorado foi dividida na direção vertical e horizontal. Na direção vertical, a camada foi dividida em 8 ou 9 pontos de acordo com o número de subcamadas definido para cada segmento no cálculo da temperatura do revestimento (Tabela 6). Na Tabela 9 estão apresentadas as profundidades de cada ponto na direção vertical em cada segmento monitorado.

Na direção horizontal, em todos os segmentos monitorados, foram definidos 4 pontos distribuídos igualmente entre o ponto central de aplicação da carga até a distância de 29,45 cm. O programa Viscoroute calcula pontos espaçados a uma distância de 9,8 cm na direção horizontal, logo os pontos foram distribuídos com esse espaçamento na malha.

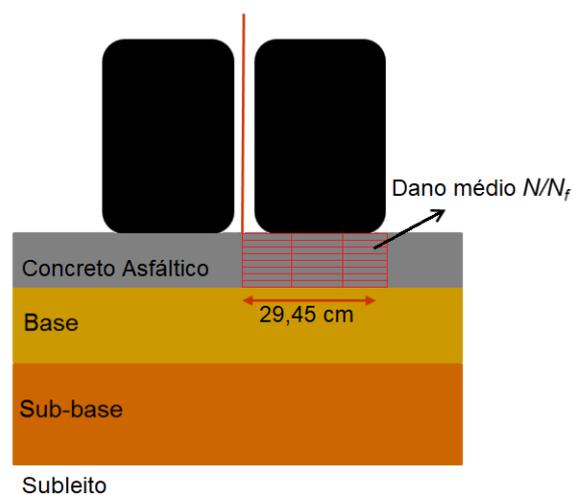
Tabela 9 – Profundidade (cm) de cada ponto da malha na direção vertical para cada segmento monitorado.

S05	S03	S04
2,04	1,90	1,91
4,08	3,80	3,83
6,11	5,70	5,74
8,15	7,60	7,65
10,19	9,50	9,56
12,23	11,40	11,48
14,26	13,27	13,39
16,30	15,13	15,30
-	17,00	-

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Na Figura 49 é apresentado um esquema da distribuição dos pontos na seção transversal embaixo da carga. Dessa forma, foi definida uma malha de 32 pontos para os segmentos 05 e 04 e de 36 pontos para o segmento 03.

Figura 49 – Malha de pontos definidas para cálculo do dano médio na seção transversal embaixo da carga.



Fonte: Adaptado de Nascimento (2015).

Inicialmente, foi determinada a deformação específica de tração em cada ponto da malha com o uso do programa Viscoroute. Nas simulações realizadas foram utilizados os parâmetros elásticos da Tabela 3 para as camadas de base, sub-base e subleito e os parâmetros reológicos da Tabela 4 para a camada de revestimento asfáltico. O carregamento adotado foi de um semieixo do eixo padrão de 8,2 tf com configuração conforme ilustrado na Figura 44.

Para as análises no Viscoroute, considerou-se a sazonalidade de temperatura no revestimento da região de Araranguá calculadas na Etapa 5. Dessa forma, as simulações foram realizadas para os mesmos intervalos de análise e temperaturas no revestimento determinados na etapa anterior.

A partir dos modelos de fadiga de cada mistura asfáltica, foi estimado o número de solicitações de tráfego para a ruptura ( $N_f$ ) em cada um destes pontos. Utilizando a hipótese de Miner, foi encontrado o dano ( $N/N_f$ ) em cada ponto, dividindo o número de solicitações de tráfego no intervalo de análise pelo  $N_f$  de cada ponto da malha. Para encontrar o número de solicitações de tráfego em cada intervalo de análise, considerou-se a mesma distribuição horária de tráfego da região de Araranguá determinada na Etapa 5.

Com o dano em cada ponto da malha, foi calculado o dano médio da seção transversal em cada intervalo de análise de cada mês. Assim, o dano foi acumulado no período de projeto, para cada segmento monitorado.

A porcentagem de área trincada na trilha de roda obtida em cada levantamento de campo através do método de medição de área foi comparada com o dano médio acumulado calculado para o mesmo período. Com isso, buscou-se determinar a relação que melhor se ajustasse aos dados de porcentagem de área trincada medida em campo e ao dano médio acumulado calculado.

### 3.7 ETAPA 7 – ANÁLISE CONSIDERANDO SAZONALIDADE DE TEMPERATURA NO LVECD

Nesta etapa, buscou-se analisar a influência da sazonalidade da temperatura na estimativa de vida útil dos segmentos monitorados com o uso do *software* LVECD. Na etapa 4, a vida útil foi estimada através do mesmo *software*, no entanto, utilizou-se temperatura constante de 20°C nas análises para que os resultados pudessem ser comparados com os obtidos através do ensaio de fadiga 4 pontos, realizado a 20°C.

Sabe-se que a temperatura da região na qual o pavimento está inserido influencia o módulo de rigidez da mistura asfáltica e, conseqüentemente, a sua estimativa de vida útil. Neste contexto, os segmentos monitorados foram novamente analisados no *software* LVECD, porém, nesta etapa, levou-se em consideração a sazonalidade de temperatura da região dos segmentos monitorados.

Para considerar a temperatura regional, o *software* LVECD necessita de uma base de dados horária de temperatura no revestimento, em diferentes profundidades. Para isto, foi adotado o modelo desenvolvido por Barber (1957), (Equação 16), que estima a temperatura do revestimento através de dados meteorológicos e propriedades da mistura asfáltica. Para o cálculo, utilizou-se os dados disponibilizados pelo INMET, que possui uma estação meteorológica automática na região (INMET, 2018). Os dados horários de temperatura em diferentes profundidades foram estimados para o período de um ano. Dessa forma, a mesma base de dados de temperatura foi repetida para os anos seguintes da análise, adotando-se que não houve variação de temperatura de um ano para o outro.

Nas simulações computacionais realizadas no LVECD, foram adotados os mesmos parâmetros utilizados na Etapa 4. Os módulos e coeficiente de Poisson apresentados na Tabela 3 foram utilizados para as camadas de base, sub-base e subleito. Foi utilizada a caracterização das misturas asfálticas realizada por Nascimento (2015), cujos coeficientes de regressão das curvas característica de dano foram apresentados no Quadro 2.

Com os resultados obtidos através do LVECD, foi estimada a porcentagem de área trincada utilizando a função de transferência proposta por Nascimento (2015). Estimou-se a área trincada para os meses em que foram realizados os levantamentos em campo. Dessa forma, foi obtida a evolução de porcentagem de área trincada prevista pelo LVECD considerando a sazonalidade da temperatura em função do número de solicitações de tráfego atuante.

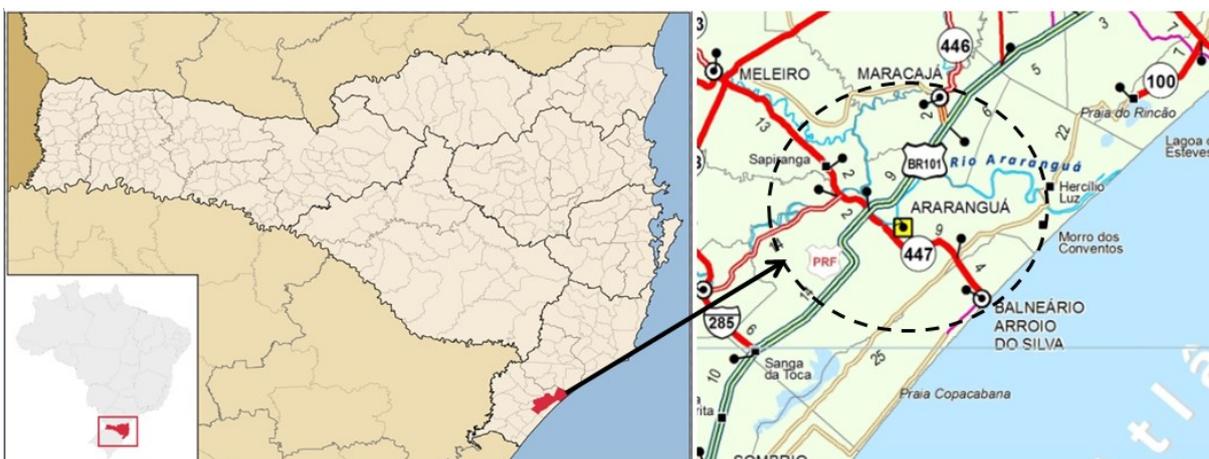
Para comparar os resultados considerando a sazonalidade de temperatura com os resultados obtidos com 20°C, foi calculado o número de solicitações de tráfego para 1%, 10% e 20% de área trincada, similar ao procedimento adotado na Etapa 4. Dessa forma, verificou-se a influência da sazonalidade de temperatura na estimativa de vida útil com o *software* LVECD.

## 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 ETAPA 1 – INFORMAÇÕES GERAIS DOS SEGMENTOS MONITORADOS

No município de Araranguá, no sul do Estado de Santa Catarina, foram construídos os segmentos monitorados, localizados na rodovia federal BR-101/SC, conforme apresentado na Figura 50. Os segmentos monitorados, que fazem parte de obras cujo objetivo foi ampliar a capacidade e modernizar a rodovia, foram executados entre outubro e dezembro de 2012 e em março de 2013.

Figura 50 – Localização dos segmentos monitorados na rodovia BR-101/SC.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

A abertura ao tráfego ocorreu apenas em março de 2014 e, por este motivo, Santos (2016) realizou a atualização do tráfego estimado. Foi utilizado o mesmo período de projeto de 10 anos e a mesma taxa de crescimento de 3,8% que foram adotados na estimativa de tráfego do projeto original. Santos (2016) obteve o número  $N_{8,2tf}$  igual a  $1,67 \times 10^8$  pelo método da USACE e  $3,32 \times 10^7$  pelo método da AASHTO.

O VDMA utilizado na atualização feita por Santos (2016) teve como base as informações obtidas no projeto de duplicação da rodovia, cujas pesquisas de campo foram realizadas em 1998. No entanto, a economia brasileira enfrentou um período de recessão a partir de 2014, que influenciou a taxa de crescimento de tráfego e não foi contabilizado no tráfego atualizado, superestimando o VDMA (LUZ, 2017).

Em 2017, Luz (2017) atualizou o número de tráfego dos segmentos monitorados de Araranguá com base nos dados de contagens de tráfego do Plano Nacional de Contagem de Tráfego realizadas no km 339 e dados de pesagem feitas no km 418 da rodovia BR-101/SC, próximos aos segmentos monitorados. A Tabela 10 apresenta o  $N_{8,2tf}$  atualizado para o período de projeto calculado pelo método do USACE e pelo método da AASHTO.

Tabela 10 –  $N_{8,2tf}$  anual e acumulado pelo método do USACE e da AASHTO.

Ano	Meses de atuação do tráfego	$N_{USACE}$		$N_{AASHTO}$	
		Anual	Acumulado	Anual	Acumulado
2014	10	$7,19 \times 10^6$	$7,19 \times 10^6$	$2,14 \times 10^6$	$2,14 \times 10^6$
2015	22	$7,64 \times 10^6$	$1,48 \times 10^7$	$2,27 \times 10^6$	$4,41 \times 10^6$
2016	34	$7,12 \times 10^6$	$2,20 \times 10^7$	$2,11 \times 10^6$	$6,52 \times 10^6$
2017	46	$7,83 \times 10^6$	$2,98 \times 10^7$	$2,28 \times 10^6$	$8,80 \times 10^6$
2018	58	$7,98 \times 10^6$	$3,78 \times 10^7$	$2,33 \times 10^6$	$1,11 \times 10^7$
2019	70	$8,14 \times 10^6$	$4,59 \times 10^7$	$2,37 \times 10^6$	$1,35 \times 10^7$
2020	82	$8,33 \times 10^6$	$5,42 \times 10^7$	$2,43 \times 10^6$	$1,59 \times 10^7$
2021	94	$8,47 \times 10^6$	$6,27 \times 10^7$	$2,47 \times 10^6$	$1,84 \times 10^7$
2022	106	$8,64 \times 10^6$	$7,13 \times 10^7$	$2,52 \times 10^6$	$2,09 \times 10^7$
2023	118	$8,81 \times 10^6$	<b><math>8,02 \times 10^7</math></b>	$2,57 \times 10^6$	<b><math>2,35 \times 10^7</math></b>

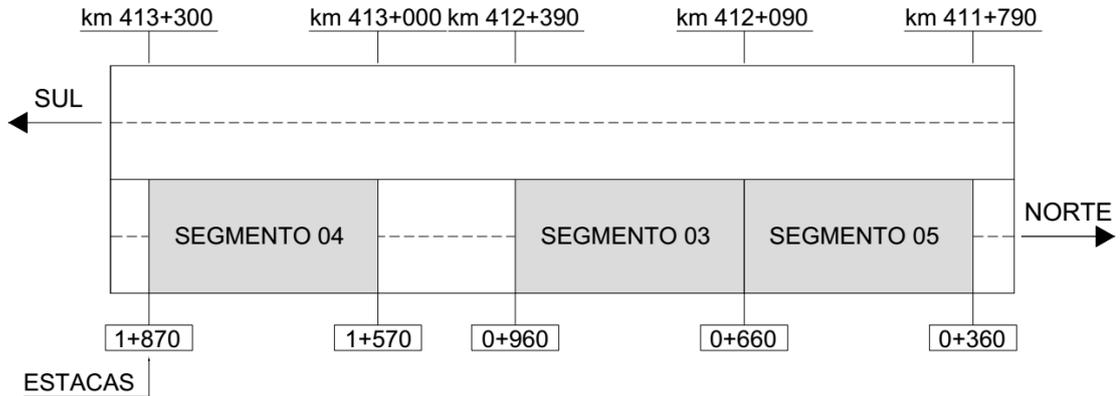
Fonte: Adaptado de Luz (2017).

Comparando o tráfego acumulado para o período de projeto obtido por Luz (2017) com o obtido por Santos (2016), é possível observar que ocorreu uma redução próxima a 50%, no método da USACE, e 30%, pelo método da AASHTO.

Os segmentos foram executados no lote 29 da rodovia, entre os km 411,7 e 413,3, conforme ilustra o esquema da Figura 51.

No dimensionamento do pavimento empregou-se o Método da Resiliência – TECNAPAV de 1994. Conforme relatado por Santos (2016), não houve qualquer influência no dimensionamento e execução dos segmentos monitorados por parte da Rede Temática de Tecnologia do Asfalto.

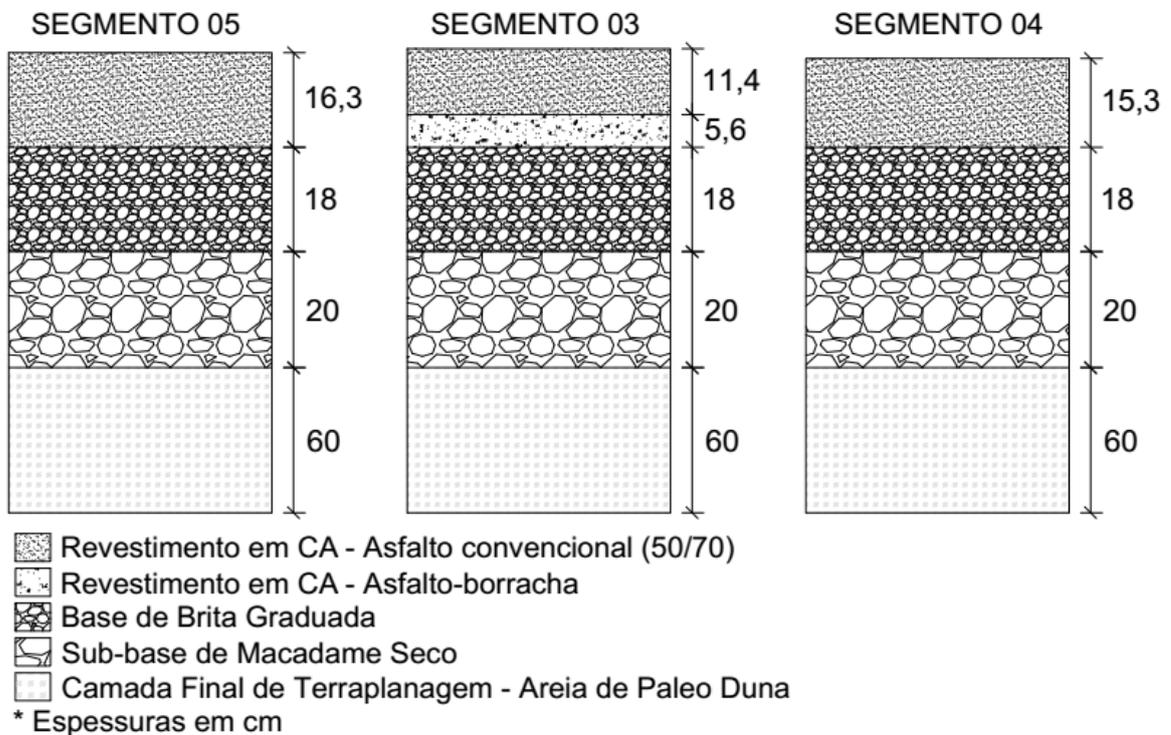
Figura 51 – Esquema de localização dos segmentos monitorados de Araranguá.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Na Figura 52 são apresentadas as estruturas dos três segmentos monitorados indicando os materiais constituintes utilizados e as espessuras das camadas.

Figura 52 – Estrutura do pavimento nos segmentos monitorados de Araranguá.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Em todos os segmentos, o reforço do subleito foi feito em areia de paleo duna com 60 cm de espessura. A sub-base foi executada em macadame seco com 20 cm e base, em brita graduada, com 18 cm de espessura. A diferença entre os segmentos monitorados se dá na camada de revestimento, onde foram utilizados dois tipos de misturas asfálticas: convencional e modificada por borracha moída de pneu (BMP).

Os segmentos 04 e 05 possuem revestimento em mistura asfáltica convencional com ligante CAP 50/70 e granulometria Faixa B do DNIT. O segmento 03 possui a camada inferior do revestimento executada com mistura asfáltica modificada por borracha (ECOFLEX B) e a camada superior executada com mistura convencional, idêntica à utilizada nos outros dois segmentos. A faixa granulométrica utilizada para a mistura asfáltica modificada foi a mesma da faixa empregada na mistura convencional (LUZ, 2017).

O comportamento das misturas asfálticas com relação à deformação permanente foi avaliado através do simulador de tráfego francês *Orniéreur*. A Tabela 11 apresenta os resultados encontrados por Melo (2014) e Trichês (2014), para amostras moldadas em laboratório e extraídas em campo, respectivamente.

Tabela 11 – Resultados do ensaio de deformação permanente.

Mistura asfáltica	Origem	Deformação permanente 30.000 ciclos (%)
Modificada – BMP	Laboratório <sup>(1)</sup>	5,78
	Campo <sup>(1)</sup>	2,91
Convencional	Laboratório <sup>(2)</sup>	9,50
	Campo <sup>(1)</sup> 1ª camada	3,60
	Campo <sup>(1)</sup> 3ª camada	6,40

Fonte: Elaborada pela autora (2019) com dados de Trichês (2014) <sup>(1)</sup> e Melo (2014) <sup>(2)</sup>.

É possível observar que a mistura convencional moldada em laboratório apresentou desempenho inferior, com porcentagem de deformação de 9,50%, chegando muito próximo ao limite de 10% especificado pela norma francesa AFNOR NF P 98-253-1 (AFNOR, 1991) para média intensidade de tráfego. Além disso, as misturas modificadas por borracha moída de pneu apresentaram melhor desempenho em relação às misturas convencionais, tanto para amostras moldadas em laboratório, quanto para amostras extraídas de campo.

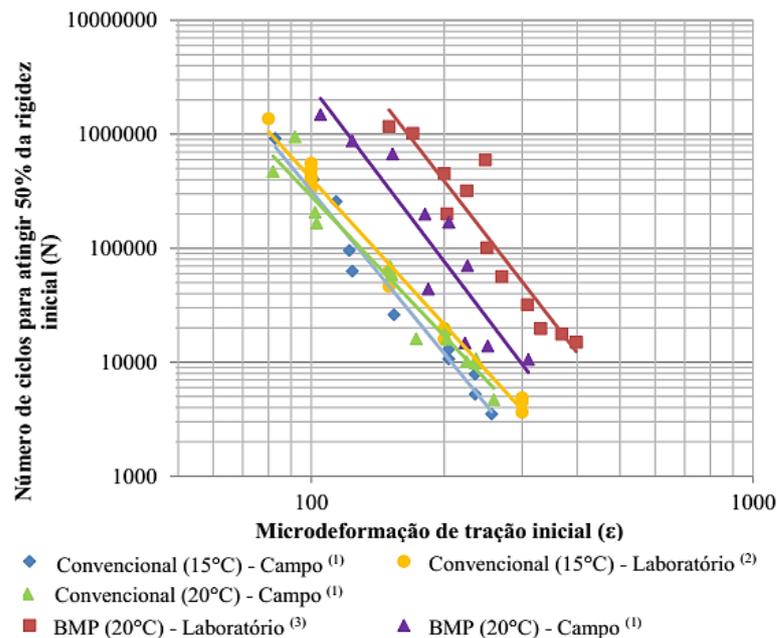
O comportamento à fadiga das misturas asfálticas empregadas foi avaliado por meio do ensaio de fadiga flexão alternada a 4 pontos, conduzido sob deformação controlada, frequência de carregamento de 10 Hz e temperatura de ensaio de 15°C e 20°C. A Tabela 12 apresenta os modelos de fadiga e o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) das misturas obtidos por Trichês (2014), com corpos de prova extraídos em campo, e Melo (2014) e Marcon (2016), a partir de corpos de prova moldados em laboratório. A Figura 53 apresenta as curvas de fadiga das misturas asfálticas.

Tabela 12 – Modelo de fadiga das misturas utilizadas nos segmentos monitorados.

Mistura asfáltica	Origem	Equação de fadiga	$R^2$
Convencional (15°C)	Campo <sup>(1)</sup>	$N = 9,726 \cdot 10^{14} \cdot \varepsilon^{-4,742}$	0,969
	Laboratório <sup>(2)</sup>	$N = 1,317 \cdot 10^{14} \cdot \varepsilon^{-4,254}$	0,988
Convencional (20°C)	Campo <sup>(1)</sup>	$N = 4,074 \cdot 10^{13} \cdot \varepsilon^{-4,076}$	0,948
Modificada – BMP (20°C)	Laboratório <sup>(3)</sup>	$N = 1,265 \cdot 10^{17} \cdot \varepsilon^{-5,004}$	0,878
	Campo <sup>(1)</sup>	$N = 4,490 \cdot 10^{16} \cdot \varepsilon^{-5,114}$	0,845

Fonte: Elaborada pela autora (2019) com dados de Trichês (2014) <sup>(1)</sup>, Melo (2014) <sup>(2)</sup> e Marcon (2016) <sup>(3)</sup>.

Figura 53 – Curvas de fadiga à 4 pontos para as misturas asfálticas utilizadas em Araranguá.



Fonte: Adaptado de Luz (2017) com dados de Trichês (2014) <sup>(1)</sup>, Melo (2014) <sup>(2)</sup> e Marcon (2016) <sup>(3)</sup>.

É possível observar que os ensaios realizados com amostras moldadas em laboratório apresentaram maior resistência à fadiga do que as amostras extraídas de campo. Além disso, a mistura modificada por BMP apresentou melhor desempenho se comparada à mistura convencional.

## 4.2 ETAPA 2 – AVALIAÇÃO PERIÓDICA DO PAVIMENTO

Desde a abertura ao tráfego em março de 2014 foram realizados levantamentos periódicos nos segmentos monitorados, conforme apresentado na Tabela 2. O primeiro levantamento, realizado em 2014, foi analisado por Santos (2016) e os levantamentos de 2015 até julho de 2017 foram analisados por Luz (2017). Sendo assim, nesta etapa, foram analisados os dados dos levantamentos realizados em dezembro de 2017 e novembro de 2018.

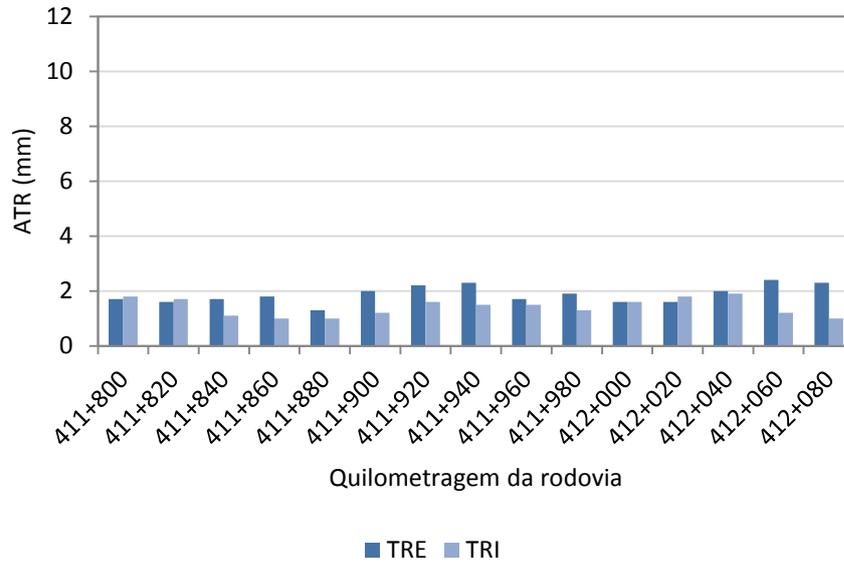
### 4.2.1 Levantamento realizados em 2017

Em dezembro de 2017, 46 meses após a abertura ao tráfego, foi realizado o levantamento de afundamento na trilha de roda, irregularidade longitudinal e deflexão. No período até o levantamento, estima-se que tenha atuado na estrutura um tráfego de  $2,98 \times 10^7$  (USACE).

#### 4.2.1.1 Afundamento de trilha de roda

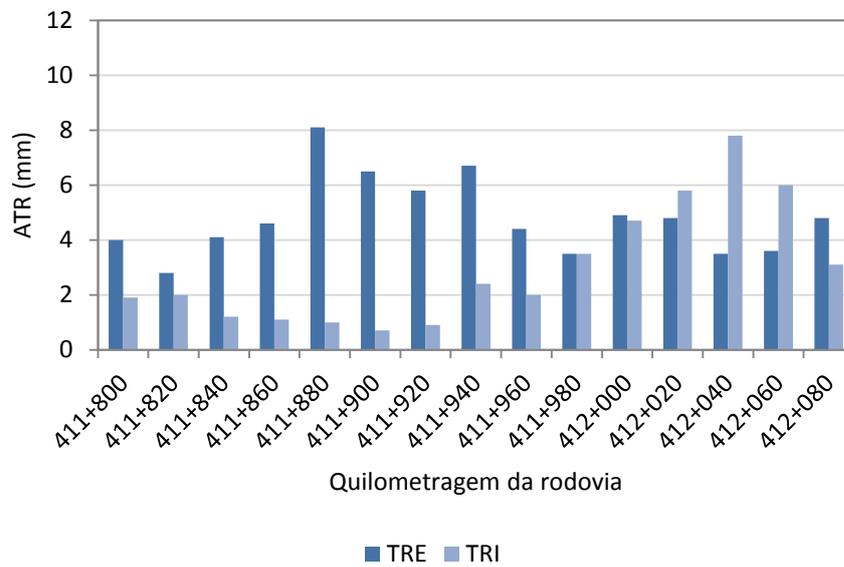
Foi realizado o levantamento da trilha de roda externa (TRE) e interna (TRI) para cada faixa de rolamento dos segmentos monitorados. As medidas obtidas para afundamento de trilha de roda (ATR) para a faixa da esquerda e da direita dos segmentos 05, 03 e 04 são apresentadas nas Figuras 54, 55, 56, 57, 58 e 59, respectivamente.

Figura 54 – Afundamento de trilha de roda na faixa esquerda do Segmento 05.



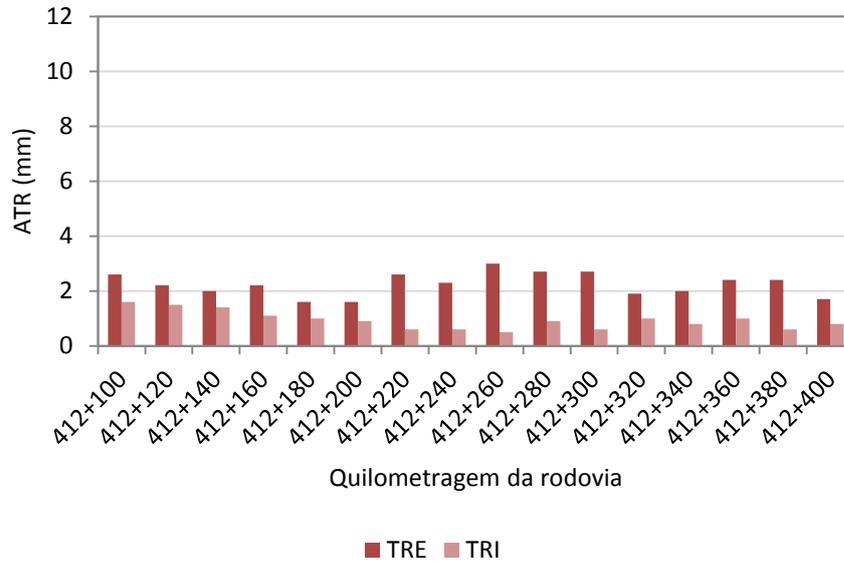
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 55 – Afundamento de trilha de roda na faixa direita do Segmento 05.



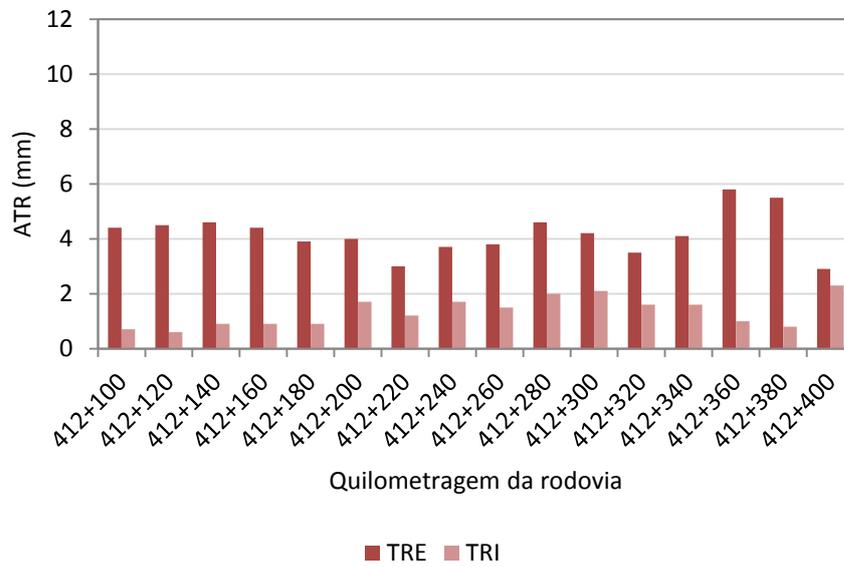
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 56 – Afundamento de trilha de roda na faixa esquerda do Segmento 03.



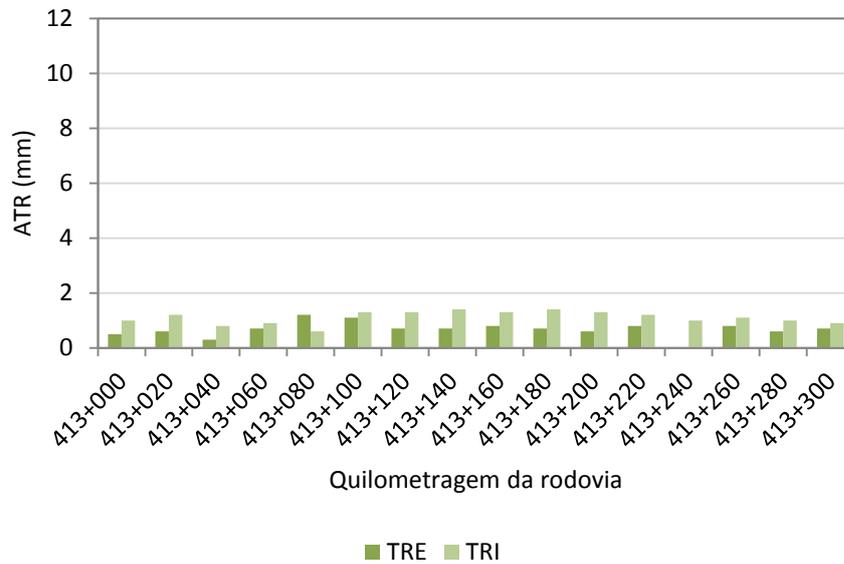
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 57 – Afundamento de trilha de roda na faixa direita do Segmento 03.



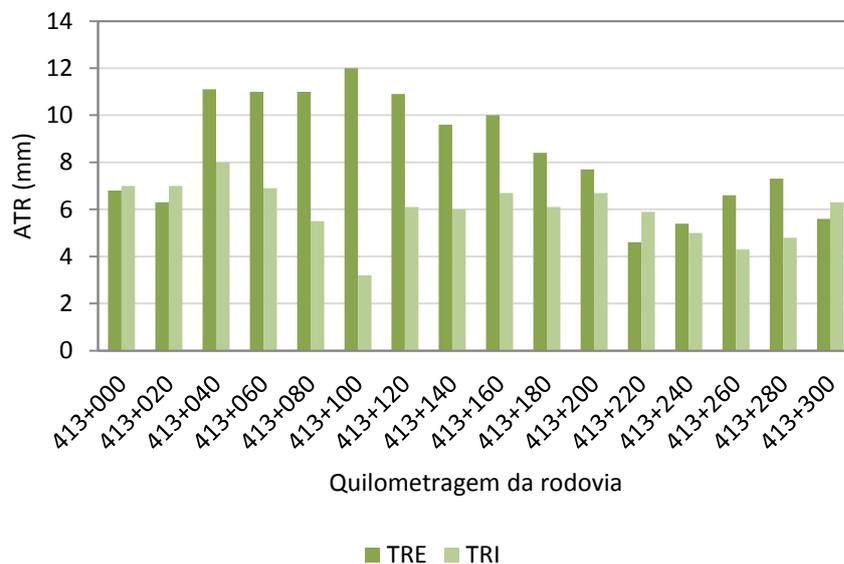
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 58 – Afundamento de trilha de roda na faixa esquerda do Segmento 04.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 59 – Afundamento de trilha de roda na faixa direita do Segmento 04.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Através da análise das Figuras 54 a 59 é possível observar que, de maneira geral, a trilha de roda externa apresenta maiores afundamentos do que as internas. Tal diferença é ainda mais acentuada na faixa da direita. Um fator apontado por Luz (2017) que pode

contribuir para este maior afundamento na trilha externa é o abaulamento da pista, que faz com que as cargas dos veículos fiquem mais concentradas na trilha externa devido à declividade. Outro fator que pode contribuir para esta diferença é o menor confinamento no bordo externo da pista, apontado por Kern (2017) como sendo um dos possíveis motivos ao avaliar o desempenho de dois trechos da rodovia BR-290/RS.

Além disso, pode-se observar na Figura 59 que em alguns pontos do segmento 04 o afundamento está bem próximo a 12 mm, chegando a atingir este valor no km 413+100. De acordo com o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos, afundamento nas trilhas de rodas acima de 12 mm já pode indicar comprometimento estrutural do pavimento (BRASIL, 2006). Vale ressaltar, ainda, que afundamento nesta magnitude pode ocasionar o acúmulo de água na trilha de roda em dias de chuva, afetando a segurança dos usuários, pois contribui para a ocorrência de hidroplanagem.

A Tabela 13 apresenta a média e o desvio padrão do afundamento de trilha de roda dos segmentos 05, 03 e 04, para as duas faixas de rolamento.

Tabela 13 – Média e desvio padrão de ATR (mm) em 2017.

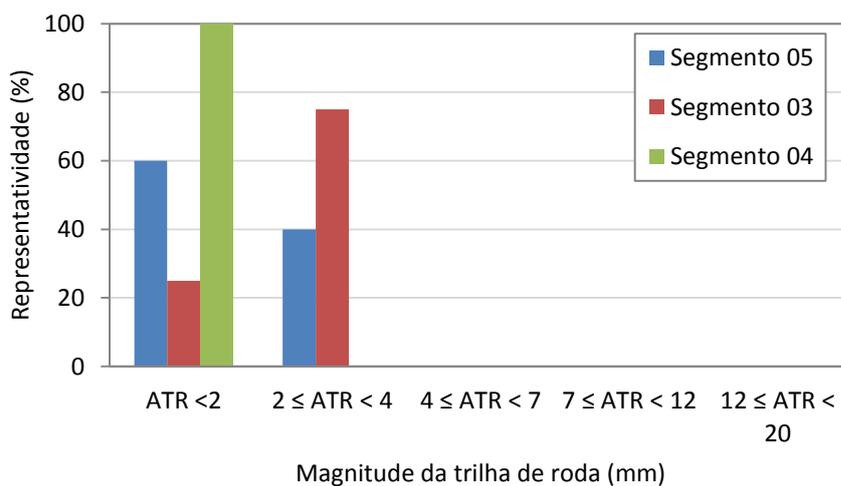
Segmento Monitorado	Faixa esquerda				Faixa direita			
	TRE	$\sigma$	TRI	$\sigma$	TRE	$\sigma$	TRI	$\sigma$
05	1,87	0,32	1,41	0,32	8,43	1,43	2,94	2,19
03	2,24	0,42	0,93	0,34	4,18	0,77	1,34	0,54
04	0,68	0,28	1,11	0,23	9,41	2,41	5,97	1,19

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Pode-se observar que, em geral, o afundamento é menor no segmento 03 do que nos outros dois segmentos. Apesar da trilha de roda externa da faixa esquerda apresentar resultado contrário, todos os outros resultados apresentam este melhor desempenho do segmento 03. Tal fato corresponde com o observado nos ensaios de deformação permanente, nos quais a mistura asfáltica modificada utilizada na camada inferior do segmento 03 apresentou melhor desempenho (Tabela 11).

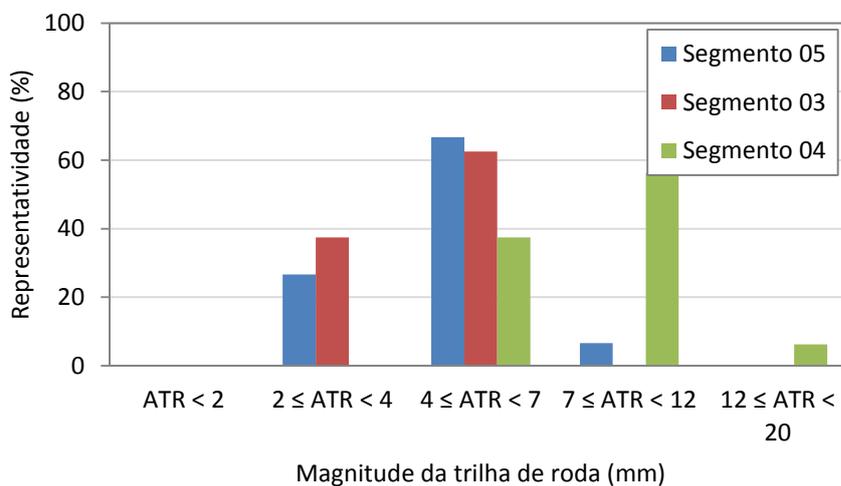
O afundamento medido em campo na trilha de roda externa (situação mais crítica) foi dividido em cinco categorias de porcentagem representativa. A Figura 60 apresenta a representatividade de ATR para a faixa esquerda e a Figura 61, para a faixa direita.

Figura 60 – Representatividade de ATR faixa esquerda.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 61 – Representatividade de ATR faixa direita.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Pode-se observar na Figura 60 que, na faixa esquerda, os valores de afundamento ficaram limitados nas primeiras categorias, ou seja, até 4 mm. O segmento 05 apresentou 60%

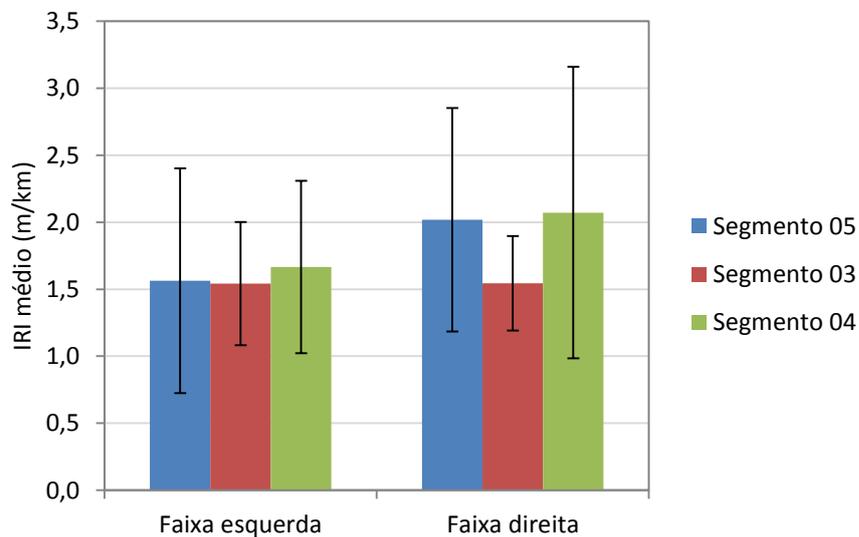
de afundamento na categoria menor que 2 mm e 40% entre 2 e 4 mm. O segmento 03 teve 25% de afundamento na categoria menor que 2 mm e 75% entre 2 e 4 mm. O segmento 04 apresentou 100% de afundamento na categoria menor do que 2 mm.

Observando a representatividade na faixa direita (Figura 61), nota-se que há um aumento em categorias de afundamentos maiores em comparação à Figura 60. O segmento 05 teve maior porcentagem de afundamento na categoria de 4 a 7 mm, cerca de 60% dos valores medidos. No segmento 03 também foi registrado maior parte das medidas na mesma faixa, porém não foi observado afundamento em categorias maiores como ocorreu no segmento 05. O segmento 04 foi o que exibiu maior amplitude de afundamento, chegando a ter quase 60% das medidas na faixa de 7 a 12 mm e cerca de 6% na faixa de 12 a 20 mm.

#### 4.2.1.2 Irregularidade longitudinal

A irregularidade longitudinal média e o desvio padrão, medidos na faixa da esquerda e da direita dos segmentos 05, 03 e 04, são apresentados na Figura 62 e na Tabela 14.

Figura 62 – IRI médio e desvio padrão.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Tabela 14 – Valores de IRI médio (m/km) e desvio padrão.

Segmento Monitorado	Faixa esquerda		Faixa direita	
	IRI	$\sigma$	IRI	$\sigma$
05	1,56	0,84	2,02	0,83
03	1,54	0,46	1,54	0,35
04	1,67	0,64	2,07	1,09

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Pode-se observar que, para os segmentos 05 e 04, os valores de IRI médio medidos na faixa direita foram maiores do que na faixa esquerda. Para o segmento 03 o IRI médio não variou significativamente ao se comparar os valores medidos na faixa da direita com a esquerda. Além disso, comparando o IRI médio obtido nos três segmentos monitorados, pode-se observar que o segmento 03 apresentou menor irregularidade do que os segmentos 05 e 04, nas duas faixas de rolamento.

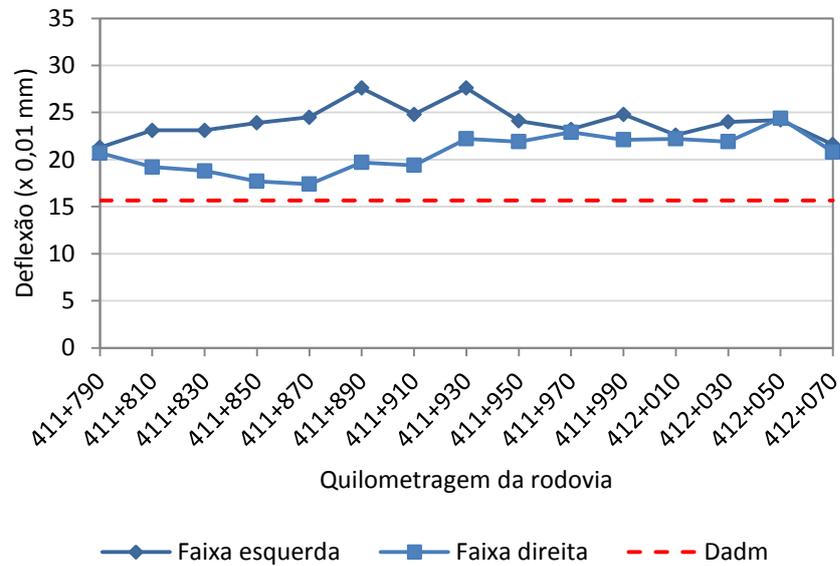
#### 4.2.1.3 Deflexões

Nas Figuras 63, 64 e 65 são apresentadas as deflexões máximas medidas nos segmentos 05, 03 e 04, respectivamente. Além disso, apresenta-se nas figuras a deflexão admissível ( $D_{adm}$ ), calculada a partir da Equação (33). Utilizando  $N_{8,2tf}$  de projeto igual a  $8,02 \times 10^7$ , obteve-se deflexão admissível de  $15,7 \times 10^{-2}$  mm.

Apesar da Equação (33) ter sido obtida a partir de medições com a viga Benkelman e os dados do levantamento com o FWD, segundo Fabrício *et al.* (1996 apud BORGES, 2001), as deflexões características com valores próximos ou menores do que  $20 \times 10^{-2}$  mm são praticamente iguais quando medidas com os dois equipamentos. Portanto, admitiu-se que a deflexão admissível seria equivalente a  $15,7 \times 10^{-2}$  também para o FWD.

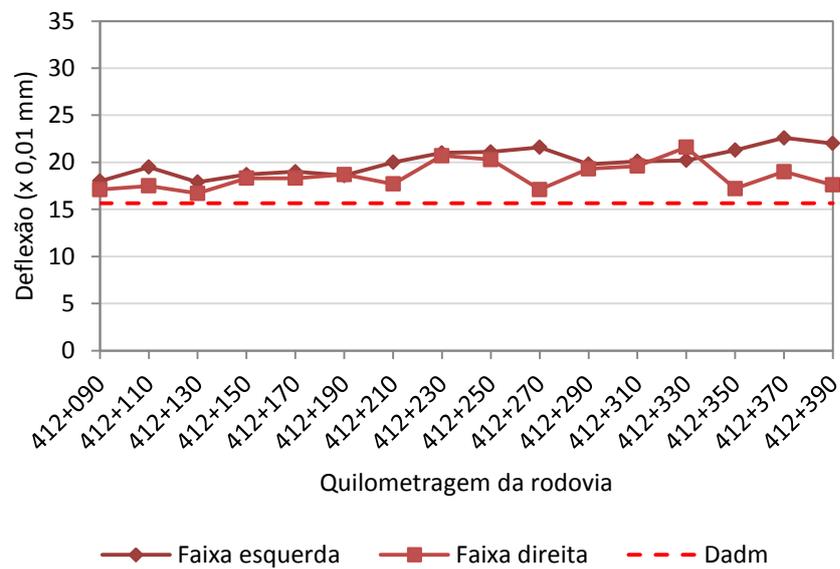
Observando-se as Figuras 63 a 64, nota-se que, em todos os segmentos, as deflexões máximas medidas foram maiores do que a deflexão admissível. Para o segmento 05, a maioria dos valores de deflexão máxima ficou entre  $15 \times 10^{-2}$  mm e  $25 \times 10^{-2}$  mm. No segmento 03, a maioria dos valores de deflexão máxima ficou na faixa entre  $15 \times 10^{-2}$  mm e  $20 \times 10^{-2}$  mm. O segmento 04 foi o que apresentou maiores valores de deflexão máxima, entre  $20 \times 10^{-2}$  mm e  $30 \times 10^{-2}$  mm.

Figura 63 – Deflexões máximas segmento 05.



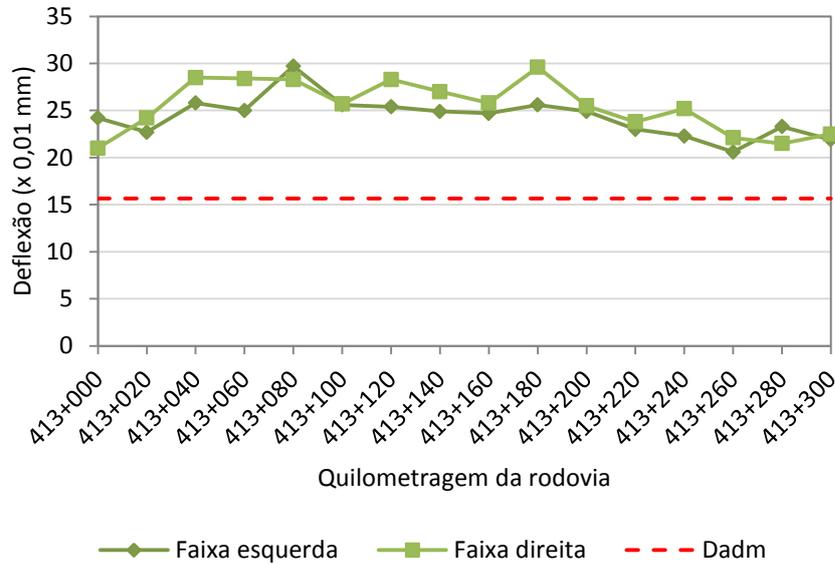
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 64 – Deflexões máximas segmento 03.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 65 – Deflexões máximas segmento 04.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

A Tabela 15 apresenta as deflexões máximas médias e o desvio padrão para cada faixa dos segmentos monitorados. Pode-se observar que o segmento 03 foi o que apresentou menor deflexão média, em ambas as faixas de rolamento. Por outro lado, o segmento 04 apresentou os maiores valores de deflexão máxima.

Tabela 15 – Deflexões máximas médias e desvio padrão (x 0,01 mm).

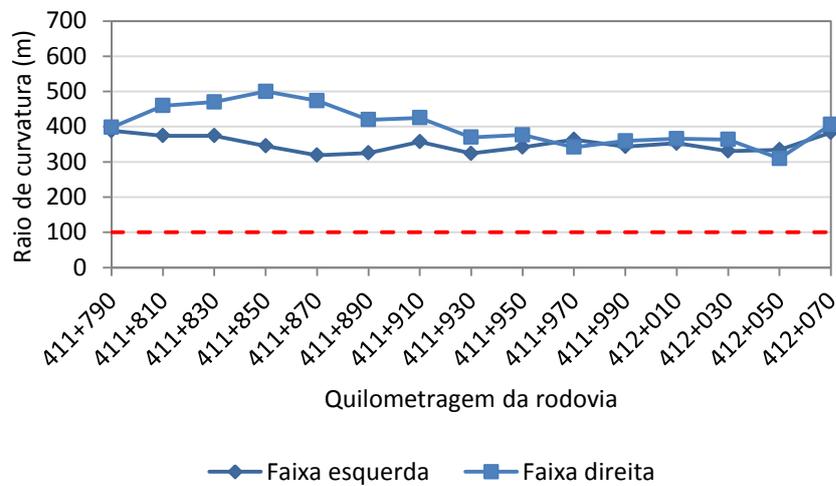
Segmento Monitorado	Faixa esquerda		Faixa direita	
	Média	$\sigma$	Média	$\sigma$
05	24,03	1,79	20,75	2,00
03	20,09	1,43	18,54	1,44
04	24,35	2,10	25,46	2,75

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Nas Figuras 66, 67 e 68 são apresentados os Raios de Curvatura (RC) calculados para os segmentos 05, 03 e 04, respectivamente. Pode-se notar que os segmentos 05 e 04 apresentaram valores de RC na faixa de 300 m a 500 m. O segmento 03 apresentou valores maiores, ficando na faixa de 400 m a 600 m.

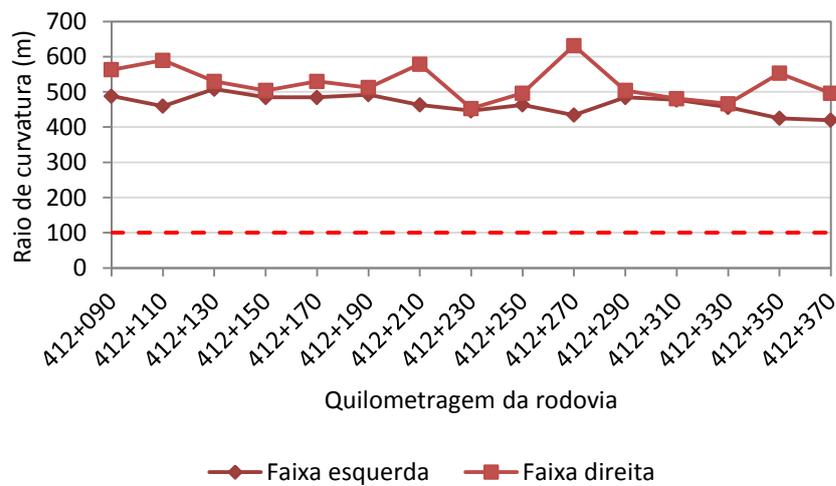
Comparando os resultados de RC com o limite de 100 m indicado por DNIT (BRASIL, 2006), observa-se que os segmentos 05 e 04 se encontram mais próximos do limite do que o segmento 03. Quanto menor o RC, menor a capacidade estrutural do pavimento, pois indica um arqueamento severo da bacia de deformação. Entretanto, destaca-se que os raios de curvatura apresentaram valores altos para mesmo segmentos que já se encontram com elevada porcentagem de área trincada (segmentos 05 e 04).

Figura 66 – Raio de curvatura no Segmento 05.



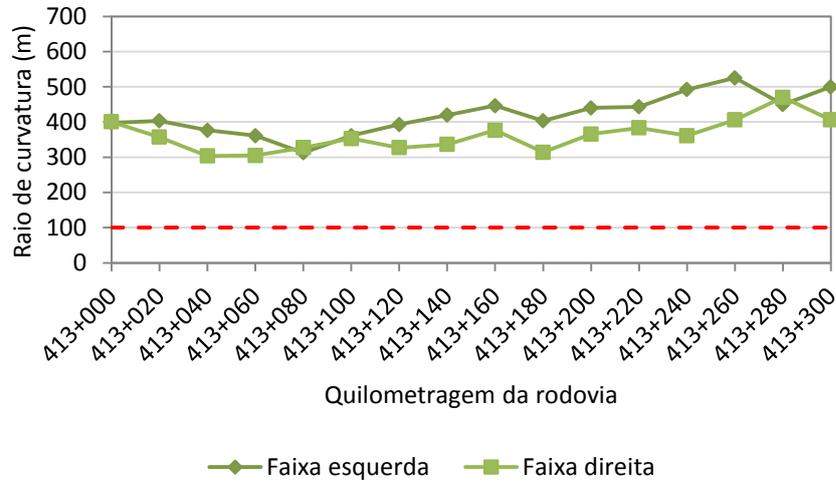
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 67 – Raio de curvatura no Segmento 03.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 68 – Raio de curvatura no Segmento 04.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

A partir da bacia de deformação, foi realizado o procedimento de retroanálise dos módulos de resiliência das camadas do pavimento com o *software* BackMeDiNa. Na Tabela 16 são apresentados os módulos de resiliência de cada camada.

Tabela 16 – Módulos de resiliência obtidos por retroanálise das bacias de deflexão medidas em 2017.

Segmento Monitorado	Camada	MR (MPa)
05	Revestimento (CAP 50/70)	3075
	Base	239
	Sub-base	339
	Subleito	417
03	Revestimento (CAP 50/70)	4028
	Revestimento (BMP)	4524
	Base	323
	Sub-base	218
	Subleito	377
04	Revestimento (CAP 50/70)	2919
	Base	274
	Sub-base	296
	Subleito	260

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Pode-se observar que a camada de revestimento dos segmentos monitorados 05 e 04 apresentou módulo de resiliência menor do que o revestimento do segmento 03. Tal fato pode ser relacionado com o maior nível de trincamento que o revestimento asfáltico apresenta nos segmentos 05 e 04.

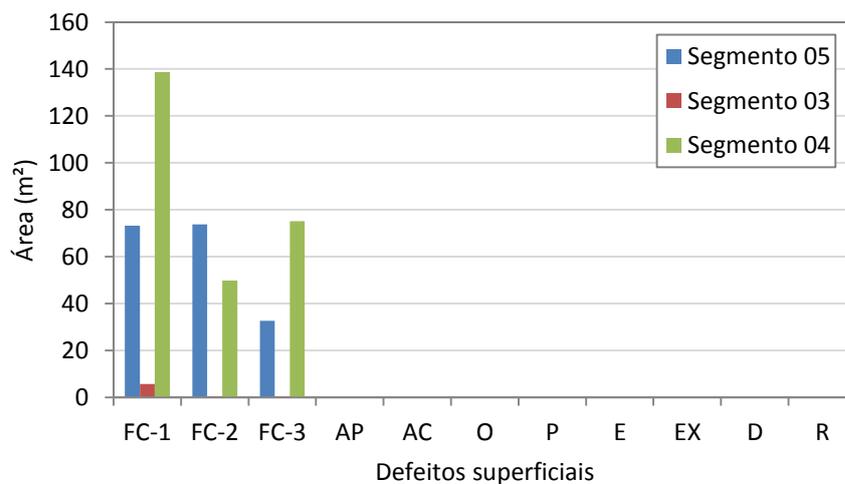
#### 4.2.2 Levantamento realizado em 2018

Após 57 meses de abertura ao tráfego, em novembro de 2018, foi realizado levantamento em campo de defeitos superficiais, afundamento na trilha de roda, microtextura e macrotextura. Estima-se que o tráfego atuante até o levantamento tenha sido de  $3,71 \times 10^7$  (USACE).

##### 4.2.2.1 Avaliação dos defeitos superficiais

Na Figura 69 é apresentada a área correspondente de cada defeito encontrado na superfície dos segmentos monitorados. Nota-se que os defeitos observados foram apenas trincas do tipo FC-1, FC-2 e FC-3. Apesar dos três segmentos apresentarem trincas do tipo FC-1, FC-2 e FC-3, a área de defeitos medida nos segmentos 05 e 04 foi significativamente maior do que no segmento 03.

Figura 69 – Defeitos superficiais nos segmentos monitorados.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

No segmento 05 as trincas do tipo FC-1 e FC-2 foram predominantes, correspondendo a 73,21 m<sup>2</sup> e 73,74 m<sup>2</sup> da faixa direita, respectivamente. Foram observadas ainda trincas do tipo FC-3, correspondendo a 32,72 m<sup>2</sup> da área da faixa direita deste mesmo segmento.

No segmento 03, o trincamento predominante foi do tipo FC-1. Neste segmento, as trincas do tipo FC-1, FC-2 e FC-3 atingiram, na faixa da direita, área de 5,72 m<sup>2</sup>, 0,44 m<sup>2</sup> e 0,28 m<sup>2</sup>, respectivamente.

O segmento 04 foi o que apresentou maior área de trincas do tipo FC-3. As fissuras classificadas nesta categoria possuem maior abertura e erosão nas bordas. Neste segmento, a área correspondente às trincas FC-1, FC-2 e FC-3 foram de 138,68 m<sup>2</sup>, 49,76 m<sup>2</sup> e 75,1 m<sup>2</sup>, respectivamente.

A Tabela 17 apresenta a porcentagem que a área trincada medida em cada segmento monitorado representa da área total da faixa direita e da área da trilha de roda.

Tabela 17 – Porcentagem de área trincada em relação à área total da faixa direita e em relação à área da trilha de roda.

Segmento Monitorado	% de área trincada em relação à área da faixa da direita	% de área trincada em relação à área da trilha de roda
05	17,11	24,95
03	0,61	0,89
04	25,10	36,60

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

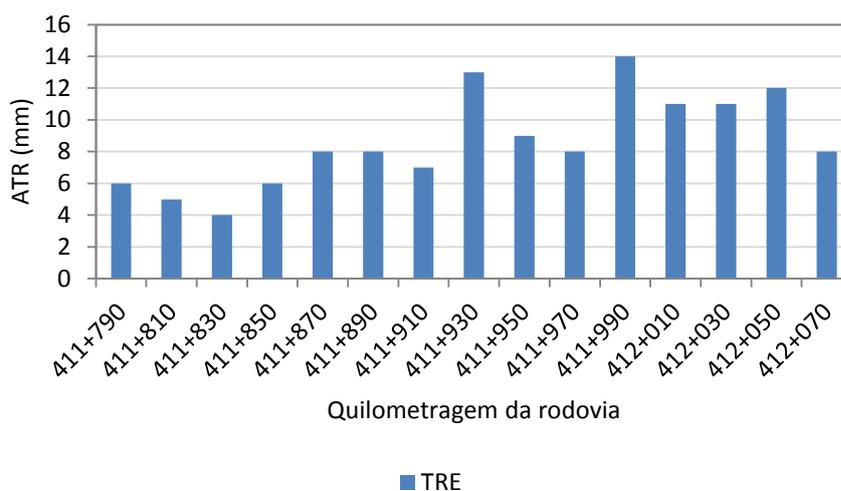
Observa-se que a porcentagem de área trincada medida nos segmentos 05 e 04 é significativamente superior à do segmento 03. Tal fato indica que a mistura asfáltica modificada por borracha utilizada em parte da camada de revestimento do segmento 03 tem atuado de forma efetiva em retardar o aparecimento de trincas, conforme esperado.

Além disso, nota-se que no segmento 04 a redução de 1 cm na camada de revestimento asfáltico em relação ao segmento 05 levou a um aumento de cerca de 45% da porcentagem de área trincada.

#### 4.2.2.2 Afundamento de trilha de roda

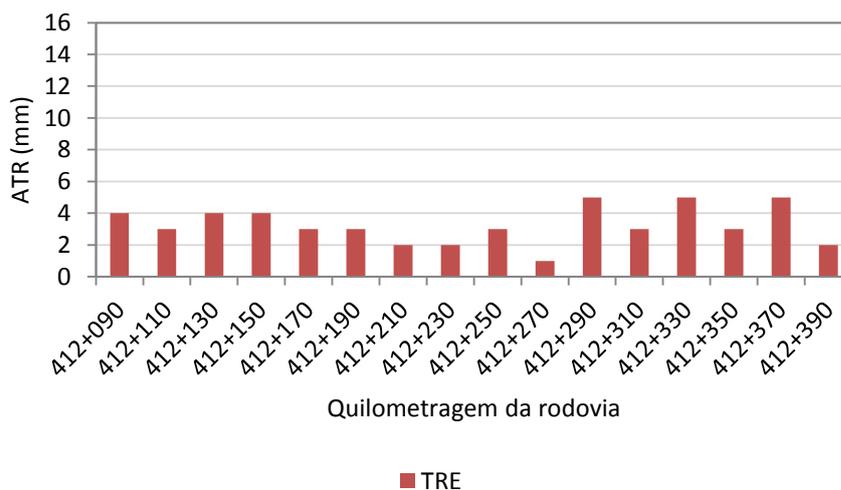
Nas Figuras 70, 71 e 72 são apresentados os afundamentos de trilha de roda por estaca, medidos na trilha de roda externa da faixa da direita dos segmentos 05, 03 e 04, respectivamente.

Figura 70 – Afundamento de trilha de roda na faixa direita do Segmento 05.



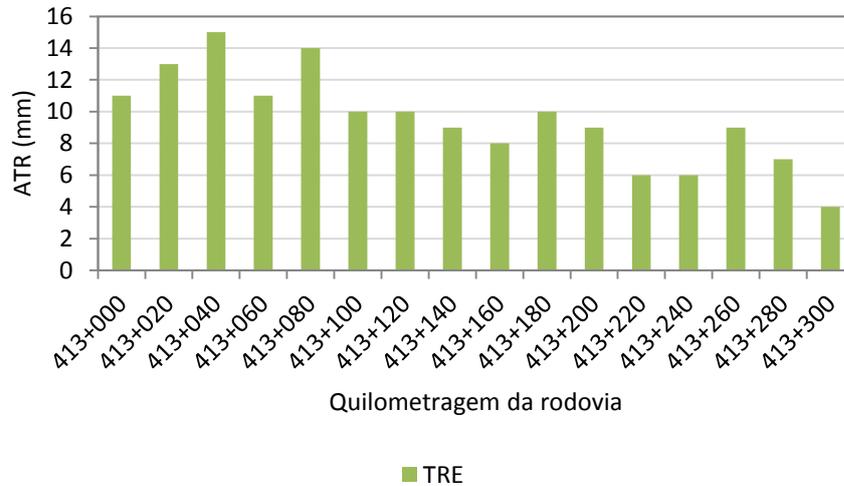
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 71 – Afundamento de trilha de roda na faixa direita do Segmento 03.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 72 – Afundamento de trilha de roda na faixa direita do Segmento 04.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

O segmento 03 apresentou menores níveis de afundamento do que os segmentos 05 e 04. Isto indica que o revestimento composto por dois tipos de mistura asfáltica (mistura convencional e mistura de asfalto-borracha) proporciona melhor desempenho ao ATR. O afundamento máximo medido no segmento 03 foi de 5 mm, enquanto que nos segmentos 05 e 04 os afundamentos máximos chegaram a 14 mm e 15 mm, respectivamente.

A partir dos dados de ATR, foi calculado o afundamento médio e o desvio padrão de cada segmento monitorado, conforme apresentado na Tabela 18. Pode-se observar que o afundamento de trilha de roda médio nos segmentos 05 e 04 é cerca de 3 vezes maior do que no segmento 03.

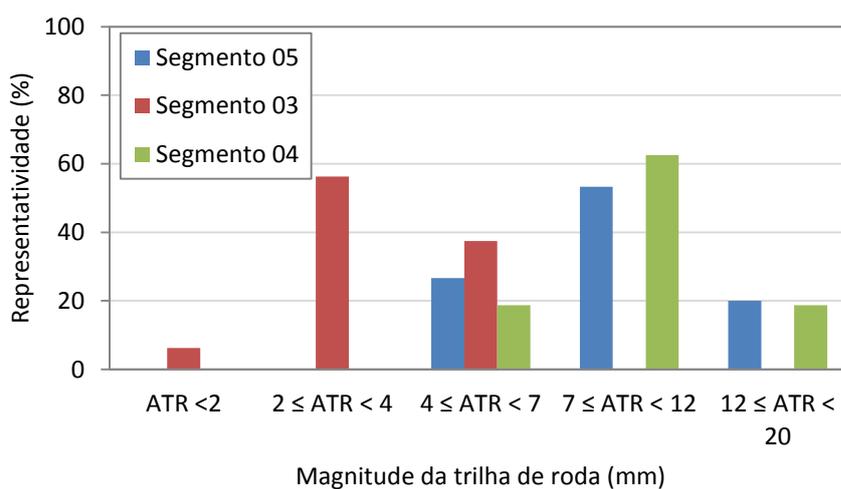
Tabela 18 – Média e desvio padrão de ATR (mm) em 2018.

Segmento Monitorado	Faixa direita	
	TRE	$\sigma$
05	8,67	2,97
03	3,25	1,18
04	9,50	2,97

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Os valores medidos de ATR foram separados conforme a profundidade em cinco categorias. Na Figura 73 são apresentados os resultados de representatividade em cada categoria.

Figura 73 – Representatividade de ATR faixa direita.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

O segmento 03 teve ATR distribuído nas três primeiras categorias, sendo cerca de 60% dos afundamentos classificados de 2 mm a 4 mm. Os segmentos 05 e 04 apresentaram ATR distribuído nas três últimas categorias, ou seja, nas categorias com maiores magnitudes de afundamento. Para estes segmentos, a maioria dos valores medidos foram classificados entre 7 mm e 12 mm. Além disso, apresentaram cerca de 20% dos afundamentos na categoria mais elevada, de 12 mm a 20 mm.

#### 4.2.2.3 Microtextura e Macrotextura

Na Tabela 19 são apresentados os valores médios e desvio padrão de microtextura, macrotextura e IFI para o segmento 03.

De acordo com DNIT (BRASIL, 2006), o valor obtido para  $VRD_{\text{médio}}$  classificaria a microtextura do revestimento como medianamente rugosa e a altura de mancha de areia ( $HS_{\text{média}}$ ) classifica a macrotextura como grosseira ou aberta. O valor de  $IFI_{\text{médio}}$ , calculado a

partir dos resultados do ensaio de mancha de areia e pêndulo britânico, classifica o revestimento como muito bom, quanto a aderência pneu/pavimento.

Tabela 19 – Valores médios e desvio padrão de microtextura, macrotextura e IFI.

Segmento Monitorado	Microtextura		Macrotextura		IFI	
	VRD <sub>médio</sub>	$\sigma$	HS <sub>médio</sub>	$\sigma$	IFI <sub>médio</sub>	$\sigma$
03	52,72	3,36	0,93	0,11	0,30	0,02

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

### 4.3 ETAPA 3 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DO DESEMPENHO DO PAVIMENTO

Desde a abertura ao tráfego em 2014, os segmentos monitorados vêm sendo avaliados periodicamente quanto as condições funcionais e estruturais. Os levantamentos foram analisados por Santos (2016), Luz (2017) e na presente pesquisa, na seção 4.2. Com os dados de todos estes levantamentos já realizados, foi verificada a evolução do desempenho do pavimento ao longo do tempo de serviço.

#### 4.3.1 Evolução do afundamento de trilha de roda

A evolução dos valores de afundamento de trilha de roda médio medido nos segmentos monitorados em função do tráfego atuante, estão apresentados na Tabela 20 e na Figura 74. Os dados são referentes ao ATR médio medido na trilha externa da faixa direita (situação mais crítica).

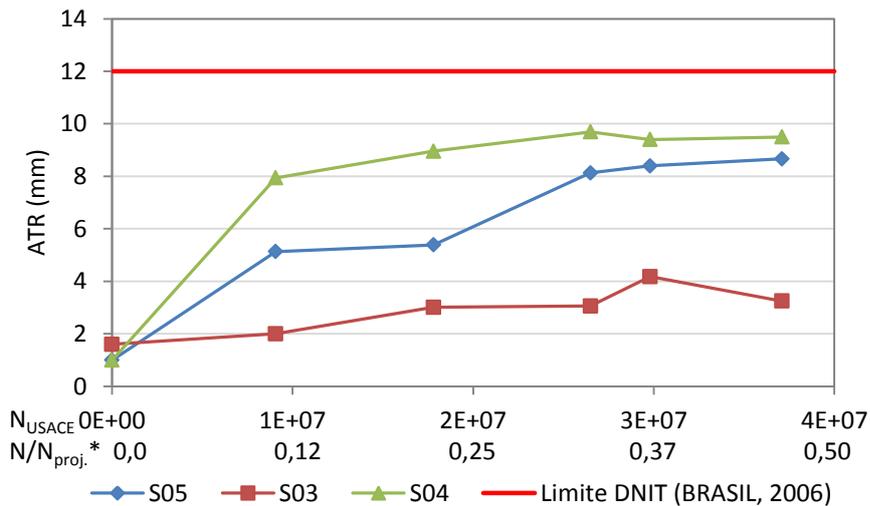
Apesar dos três segmentos monitorados iniciarem a vida de serviço com valores de ATR médio próximos, a evolução do afundamento ocorre de maneira mais acelerada para os segmentos 05 e 04. No último levantamento, o ATR médio foi aproximadamente 2,6 vezes maior para o segmento 05 e 2,9 vezes para o segmento 04 em comparação ao segmento 03. A menor taxa de crescimento de ATR no segmento 03 pode estar atrelada ao fato de que este segmento possui baixa porcentagem de área trincada em comparação aos outros dois, evitando a infiltração de água nas camadas subjacentes.

Tabela 20 – Evolução de ATR (mm) médio.

Ano	Meses de abertura ao tráfego	N <sub>atuante</sub>	N <sub>projeto</sub>	N <sub>atuante</sub> /N <sub>projeto</sub>	S05	S03	S04
2014 <sup>(1)</sup>	0	0		0,00	1,0	1,6	1,0
2015 <sup>(2)</sup>	13	9,07x10 <sup>6</sup>		0,11	5,1	2,0	7,9
2016 <sup>(2)</sup>	27	1,78x10 <sup>7</sup>	8,02x10 <sup>7</sup>	0,22	5,4	3,0	9,0
2017 <sup>(2)</sup>	41	2,65x10 <sup>7</sup>		0,33	8,1	3,1	9,7
2017	46	2,98x10 <sup>7</sup>		0,37	8,4	4,2	9,4
2018	57	3,71x10 <sup>7</sup>		0,46	8,7	3,3	9,5

Fonte: Elaborada pela autora (2019) com dados de Santos (2016) <sup>(1)</sup> e Luz (2017) <sup>(2)</sup>.

Figura 74 – Evolução de ATR médio em função do tráfego.



\* Relação entre o tráfego atuante e o tráfego de projeto (N<sub>proj.</sub> = 8,02x10<sup>7</sup>).

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

No segmento 05 e 04, a porcentagem de área trincada significativamente maior permite que a água infiltre pela camada de revestimento e altere a capacidade de suporte das camadas inferiores. A infiltração de água causada pelas trincas gerou bombeamento de finos nos segmentos monitorados, conforme mostra a Figura 75.

Nota-se ainda que, após atuação de quase metade do tráfego previsto em projeto, o ATR médio medido nos segmentos monitorados não atingiu o limite estabelecido por DNIT

(BRASIL, 2006). Sendo assim, avaliando os segmentos apenas quanto ao ATR médio, conclui-se que os segmentos não apresentam indicativo de comprometimento estrutural. No entanto, embora o ATR médio não ter atingido o limite, alguns pontos medidos nos segmentos 05 e 04 apresentaram ATR acima de 12 mm (conforme exposto na seção 4.2).

Figura 75 – Bombeamento de finos observado no levantamento de 2018.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Nas Figuras 77, 78 e 79 são apresentadas fotos do levantamento realizado em 2018, referente ao segmento 05, 03 e 04, respectivamente. As fotos exibem a estaca com o afundamento máximo medido em cada segmento monitorado.

Figura 76 – Afundamento de trilha de roda nos segmento 05 em 2018.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 77 – Afundamento de trilha de roda nos segmento 03 em 2018.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 78 – Afundamento de trilha de roda nos segmento 04 em 2018.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Pode-se observar que a diferença entre a magnitude de ATR é evidente. Nos segmentos 05 e 04, a profundidade atingida após 57 meses de abertura ao tráfego é significativamente maior do que no segmento 03.

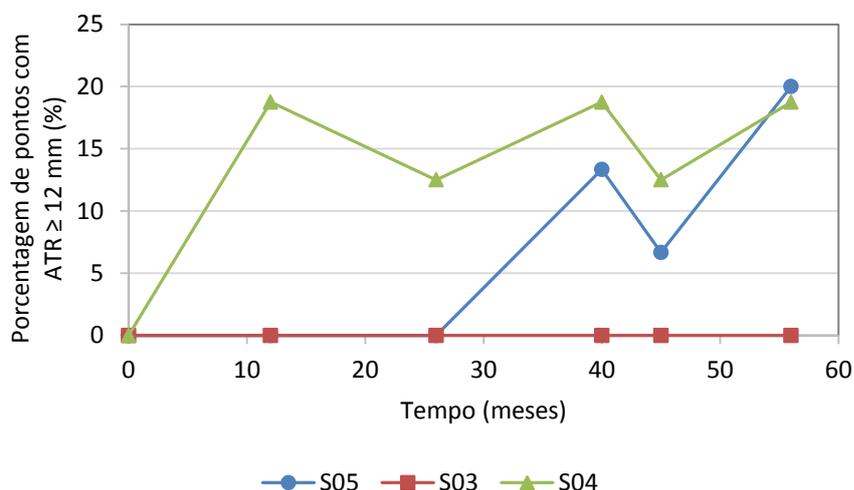
A Tabela 21 e a Figura 79 apresentam a evolução da porcentagem de pontos em que foi medido ATR maior do que 12 mm, em cada segmento monitorado, ao longo do tempo. Conforme mencionado anteriormente, ATR acima de 12 mm é considerado um indicativo de comprometimento estrutural de acordo com DNIT (BRASIL, 2006).

Tabela 21 – Evolução da porcentagem de pontos com ATR acima de 12 mm (%).

Ano	Meses de abertura ao tráfego	S05	S03	S04
2014 <sup>(1)</sup>	0	0	0	0
2015 <sup>(2)</sup>	13	0	0	19
2016 <sup>(2)</sup>	27	0	0	13
2017 <sup>(2)</sup>	41	13	0	19
2017	46	7	0	13
2018	57	20	0	19

Fonte: Elaborada pela autora (2019) com dados de Santos (2016)<sup>(1)</sup> e Luz (2017)<sup>(2)</sup>.

Figura 79 – Evolução da porcentagem de pontos com ATR acima de 12 mm em função do tempo.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Nos levantamentos realizados a 27 e 46 meses da abertura ao tráfego foi utilizado o equipamento perfilômetro a laser e nos demais levantamentos utilizou-se a régua metálica, conforme apresentado na Tabela 2. As medidas de ATR com o perfilômetro a laser são determinadas a cada 20 m e representam a média dos valores medidos ao longo do trecho entre as estacas. Quando utilizada a régua metálica, a medição é realizada em cada estaca, ou seja, de maneira pontual a cada 20 m. Dessa forma, a descontinuidade observada na Figura 79 pode estar relacionada aos diferentes equipamentos utilizados nos levantamentos.

Observa-se que o segmento 04 foi o que apresentou maior porcentagem de pontos acima de 12 mm nas medições realizadas. Com 13 meses de abertura ao tráfego, 19% dos valores medidos estavam acima do limite estabelecido por DNIT (BRASIL, 2006). O segmento 05 começou a apresentar pontos acima deste limite no levantamento realizado após 41 meses de abertura ao tráfego e o segmento 03 não apresentou ATR maior do que 12 mm em nenhum dos levantamentos.

Apesar dos segmentos 04 e 05 apresentarem pontos de ATR que indicam comprometimento estrutural, nota-se que até o último levantamento realizado, estes pontos representam em torno de 20% dos pontos medidos nos segmentos monitorados.

#### 4.3.2 Evolução da irregularidade longitudinal

A evolução da irregularidade longitudinal em função do tráfego atuante é apresentada na Tabela 22 e na Figura 80. Na figura, é apresentado ainda o limite determinado pela ARTESP (2019) de 2,69 m/km para intervenção.

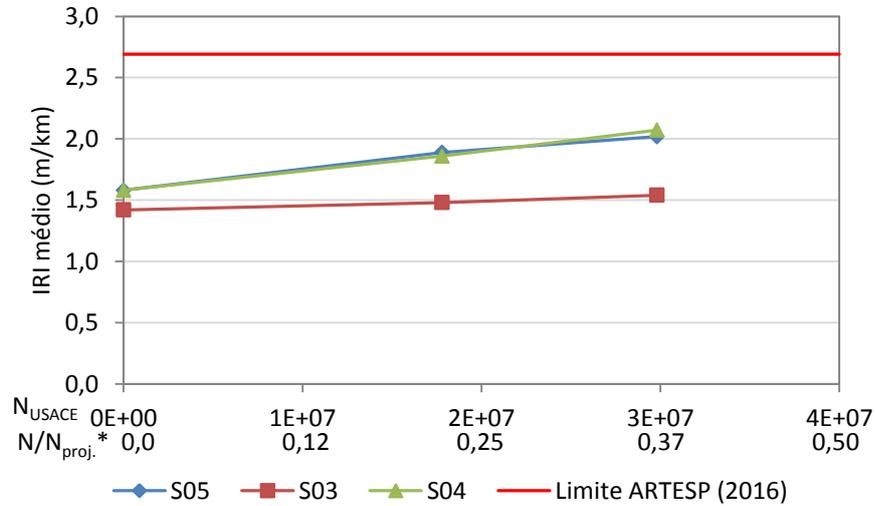
Tabela 22 – Evolução de IRI (m/km) médio.

Ano	Meses de abertura ao tráfego	N <sub>atuante</sub>	N <sub>projeto</sub>	N <sub>atuante</sub> /N <sub>projeto</sub>	S05	S03	S04
2014 <sup>(1)</sup>	0	0		0,00	1,58	1,42	1,58
2016 <sup>(2)</sup>	27	1,78x10 <sup>7</sup>	8,02x10 <sup>7</sup>	0,22	1,89	1,48	1,86
2017	46	2,98x10 <sup>7</sup>		0,37	2,02	1,54	2,07

Fonte: Elaborada pela autora (2019) com dados de Santos (2016)<sup>(1)</sup> e Luz (2017)<sup>(2)</sup>.

Apesar dos três segmentos terem iniciado a vida de serviço com valores próximos de IRI, nota-se, pela inclinação das retas, que o aumento deste defeito se deu de forma mais acelerada para os segmentos 05 e 04. Após atuação de 37% do tráfego de projeto, o IRI médio nos segmentos 05 e 04 foi aproximadamente 33% maior do que no segmento 03. Tal crescimento acentuado pode estar relacionado à solução adotada no revestimento, pois todos os segmentos possuem a mesma estrutura de pavimento e foram submetidos às mesmas solicitações.

Figura 80 – Evolução de IRI em função do tráfego ( $N_{USACE}$ ).



\* Relação entre o tráfego atuante e o tráfego de projeto ( $N_{proj.} = 8,02 \times 10^7$ ).

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Vale destacar que a irregularidade longitudinal não ocorre como um defeito isolado, sendo afetada diretamente pelo aumento de afundamento de trilha de roda, erosões, panelas, entre outros desvios superficiais. Dessa forma, conclui-se que o aumento mais acelerado de IRI também está relacionado ao maior afundamento de trilha de roda e trincamento observado nos segmentos 05 e 04.

Contudo, até o levantamento realizado com 46 meses de abertura ao tráfego, os valores medidos de IRI nos três segmentos ainda se enquadraram em faixas aceitáveis de acordo com DNIT (BRASIL, 2006). A superfície do pavimento dos segmentos 05 e 04 foram classificadas com conceito bom (IRI entre 1,9 e 2,7 m/km) e do segmento 03, classificada com conceito excelente (IRI entre 1,0 e 1,9 m/km).

#### 4.3.3 Evolução da porcentagem de área trincada

Na Tabela 23 é apresentada a área referente a cada tipo de trinca (FC-1, FC-2 e FC-3) medida nos levantamentos realizados.

Tabela 23 – Evolução de área trincada por tipo de trinca (m<sup>2</sup>).

Ano	Meses de abertura ao tráfego	Tipo de trinca	S05	S03	S04
2015 <sup>(1)</sup>	13	FC-1	19,8	-	51,4
		FC-2	-	-	-
		FC-3	-	-	-
2016 <sup>(1)</sup>	27	FC-1	71,1	1,0	174,0
		FC-2	-	-	-
		FC-3	-	-	-
2017 <sup>(1)</sup>	41	FC-1	65,5	2,3	115,1
		FC-2	27,3	-	87,0
		FC-3	1,0	-	3,8
2018	57	FC-1	73,2	5,7	138,7
		FC-2	73,7	0,4	49,8
		FC-3	32,7	0,3	75,1

Fonte: Elaborada pela autora (2019) com dados de Luz (2017) <sup>(1)</sup>.

Analisando a Tabela 23, verifica-se que, inicialmente, surgiram as trincas do tipo FC-1 na superfície. Tais trincas facilitaram a entrada de água na estrutura do pavimento, potencializando o processo de fadiga do revestimento. Com as solicitações contínuas do tráfego e das condições climáticas, as trincas FC-1 se interligaram formando as trincas do tipo FC-2. Além disso, novas trincas do tipo FC-1 foram surgindo na superfície do revestimento, pois a área trincada aumentou ao longo da vida de serviço.

Devido às solicitações no pavimento, com o tempo, as trincas do tipo FC-2 progrediram para trincas com erosão nas bordas classificadas como FC-3. A Figura 81 apresenta trincas do tipo FC-3 observadas no segmento 04 no levantamento realizado em 2018.

Figura 81 – Trincas do tipo FC-3 no segmento 04 em novembro de 2018.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

A evolução da área trincada nos segmentos monitorados foi analisada em relação a área total da faixa direita de rolamento de cada segmento. A Tabela 24 e a Figura 82 apresentam a evolução da porcentagem de área trincada em relação a área da faixa direita.

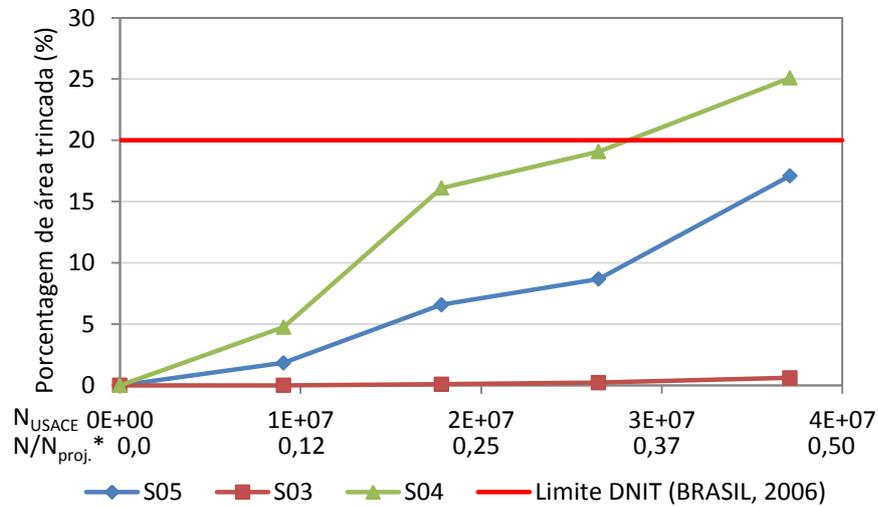
Tabela 24 – Evolução de porcentagem de área trincada em relação à área da faixa direita.

Ano	Meses de abertura ao tráfego	$N_{\text{atuante}}$	$N_{\text{projeto}}$	$\frac{N_{\text{atuante}}}{N_{\text{projeto}}}$	S05 (%)	S03 (%)	S04 (%)
2015 <sup>(1)</sup>	13	$9,07 \times 10^6$	$8,02 \times 10^7$	0,11	1,84	0,00	4,76
2016 <sup>(1)</sup>	27	$1,78 \times 10^7$		0,22	6,58	0,09	16,11
2017 <sup>(1)</sup>	41	$2,65 \times 10^7$		0,33	8,68	0,22	19,07
2018	57	$3,71 \times 10^7$		0,46	17,11	0,61	25,10

Fonte: Elaborada pela autora (2019) com dados de Luz (2017)<sup>(1)</sup>.

Pode-se observar que os segmentos 05 e 04 apresentam aumento na porcentagem de área trincada de forma muito mais acentuada do que o segmento 03. No último levantamento, realizado após 57 meses de abertura ao tráfego, o segmento 04 havia ultrapassado o limite estabelecido por DNIT (BRASIL, 2006) de 20% de área trincada e o segmento 05 se encontrava próximo ao limite. O segmento 03, no entanto, apresentou porcentagem de área trincada menor do que 1%.

Figura 82 – Evolução da porcentagem de área trincada em relação à área da faixa direita em função do tráfego.



\* Relação entre o tráfego atuante e o tráfego de projeto ( $N_{proj.} = 8,02 \times 10^7$ ).

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Verifica-se que, após a passagem de quase 50% do tráfego de projeto, a porcentagem de área trincada no segmento 05 foi cerca de 28 vezes maior do que o segmento 03. No segmento 04, a diferença foi ainda mais expressiva, sendo aproximadamente 41 vezes maior do que no segmento 03.

A diferença da área trincada na superfície dos segmentos 05, 03 e 04 pode ser observada nas Figuras 83, 84 e 85, respectivamente. As fotos apresentadas foram tiradas no último levantamento, realizado após 57 meses de abertura ao tráfego.

Observa-se que é evidente o melhor desempenho do segmento 03 em relação aos demais segmentos. Pode-se notar ainda que o trincamento se concentra predominantemente na região da trilha de roda.

Figura 83 – Trincamento no segmento 05 em novembro de 2018.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 84 – Trincamento no segmento 03 em novembro de 2018.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 85 – Trincamento no segmento 04 em novembro de 2018.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

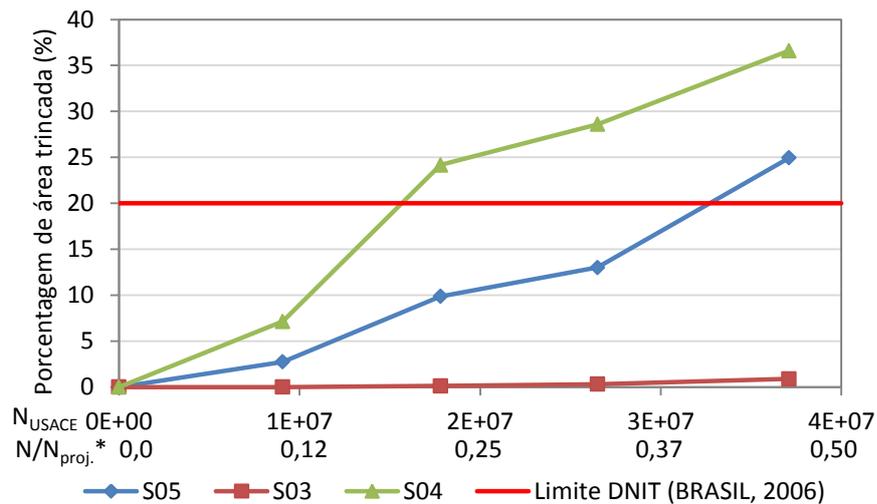
Na Tabela 25 e na Figura 86 é apresentada a evolução da porcentagem de área trincada em relação à área da região da trilha de roda.

Tabela 25 – Evolução de porcentagem de área trincada em relação à área da trilha de roda.

Ano	Meses de abertura ao tráfego	$N_{\text{atuante}}$	$N_{\text{projeto}}$	$N_{\text{atuante}}/N_{\text{projeto}}$	S05	S03	S04
2015 <sup>(1)</sup>	13	$9,07 \times 10^6$	$8,02 \times 10^7$	0,11	2,75	0,00	7,14
2016 <sup>(1)</sup>	27	$1,78 \times 10^7$		0,22	9,87	0,13	24,17
2017 <sup>(1)</sup>	41	$2,65 \times 10^7$		0,33	13,01	0,32	28,60
2018	57	$3,71 \times 10^7$		0,46	24,95	0,89	36,60

Fonte: Elaborada pela autora (2019) com dados de Luz (2017) <sup>(1)</sup>.

Figura 86 – Evolução de porcentagem de área trincada na trilha de roda em função do tráfego atuante.



\* Relação entre o tráfego atuante e o tráfego de projeto ( $N_{\text{proj.}} = 8,02 \times 10^7$ ).

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Analisando o trincamento na região da trilha de roda, nota-se que antes da passagem de 25% do tráfego de projeto, o segmento 04 já havia ultrapassado o limite de 20% de área trincada. Apesar de possuir o mesmo material no revestimento, o segmento 05 ultrapassou o limite apenas no levantamento realizado após 57 meses de abertura ao tráfego, com tráfego atuante próximo a 50% do previsto em projeto.

Como os segmentos 05 e 04 foram submetidos às mesmas solicitações e possuem estrutura similar, pode-se concluir que o pior desempenho observado no segmento 04 está atrelado ao fato deste possuir 1 cm a menos de espessura no revestimento do que o segmento 05. Dessa forma, verifica-se que, para as condições estudadas, o segmento 04 levou cerca de metade do tempo para atingir 20% de área trincada do que levaria com 1 cm a mais na espessura do revestimento.

Ao analisar o segmento 03, no entanto, nota-se que o pavimento não atingiu 20% de área trincada na trilha de roda e apresentou valores significativamente inferiores ao limite em todos os levantamentos. Com tráfego atuante de 46% do tráfego de projeto, o segmento não atingiu 1% de porcentagem de área trincada na região da trilha de roda.

Pode-se atribuir o melhor desempenho observado no segmento 03 à solução adotada na camada de revestimento asfáltico. Os três segmentos monitorados foram submetidos às mesmas solicitações ao longo da vida de serviço e a estrutura dos segmentos distinguem-se apenas em relação a camada de revestimento. A mistura asfáltica modificada por borracha moída de pneus utilizada na camada inferior do revestimento possui maior resistência à fadiga do que a mistura convencional. Nesta região, as solicitações de tração são maiores, sendo o possível local de início das trincas. Deste modo, pode-se concluir que a composição de camada de mistura asfáltica convencional sobre mistura modificada utilizada no segmento 03 tem controlado o aparecimento de trincas de forma significativa.

#### **4.3.4 Evolução de microtextura e macrotextura**

A Tabela 26 e a Figura 87 apresentam a evolução do Valor de Resistência à Derrapagem (VRD) médio em função do tráfego atuante no segmento 03. Além dos valores medidos de VRD, na Figura 87 é apresentado o limite de VRD mínimo ( $\geq 55$ ) sugerido por DNIT (BRASIL, 2006). O levantamento realizado em 2016, após 27 meses de abertura ao tráfego, foi realizado com o Griptester, dessa forma, os valores apresentados foram corrigidos a partir da Equação (29).

Nota-se que após o primeiro ano de abertura ao tráfego, o segmento apresentou valor de VRD abaixo do limite estabelecido. Segundo Luz (2017), essa redução pode ter ocorrido devido à ação de pós compactação gerada pelo tráfego, que pode ter feito com que o ligante

migrasse para a superfície do revestimento, encobrindo o agregado. No levantamento realizado em 2016, notou-se um aumento no VRD. Este aumento pode estar ligado à ação do tráfego na remoção do ligante asfáltico que recobria o agregado na superfície, fazendo com que as arestas do agregado ficassem expostas.

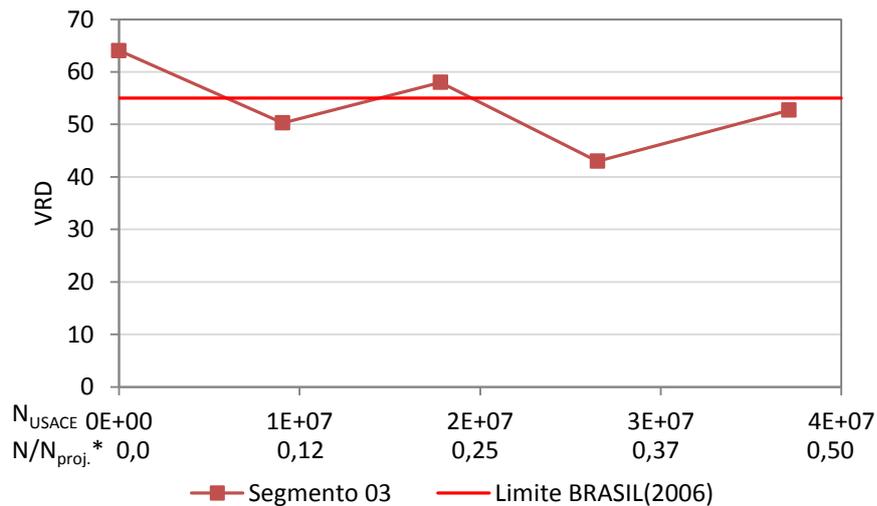
Devido à abrasão das arestas vivas dos agregados, no levantamento de 2017, observou-se uma redução no VRD da superfície do segmento. No entanto, em 2018, notou-se um aumento no VRD, sendo a superfície classificada como medianamente rugosa de acordo com DNIT (BRASIL, 2006).

Tabela 26 – Evolução de VRD médio.

Ano	Meses de abertura ao tráfego	$N_{\text{atuante}}$	$N_{\text{projeto}}$	$N_{\text{atuante}}/N_{\text{projeto}}$	S03
2014 <sup>(1)</sup>	0	0		0,00	64,06
2015 <sup>(2)</sup>	13	$9,07 \times 10^6$		0,11	50,30
2016 <sup>(2)</sup>	27	$1,78 \times 10^7$	$8,02 \times 10^7$	0,22	58,00
2017 <sup>(2)</sup>	41	$2,65 \times 10^7$		0,33	43,00
2018	57	$3,71 \times 10^7$		0,46	52,72

Fonte: Elaborada pela autora (2019) com dados de Santos (2016) <sup>(1)</sup> e Luz (2017) <sup>(2)</sup>.

Figura 87 – Evolução de VRD médio em função do tráfego.



\* Relação entre o tráfego atuante e o tráfego de projeto ( $N_{\text{proj.}} = 8,02 \times 10^7$ ).

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

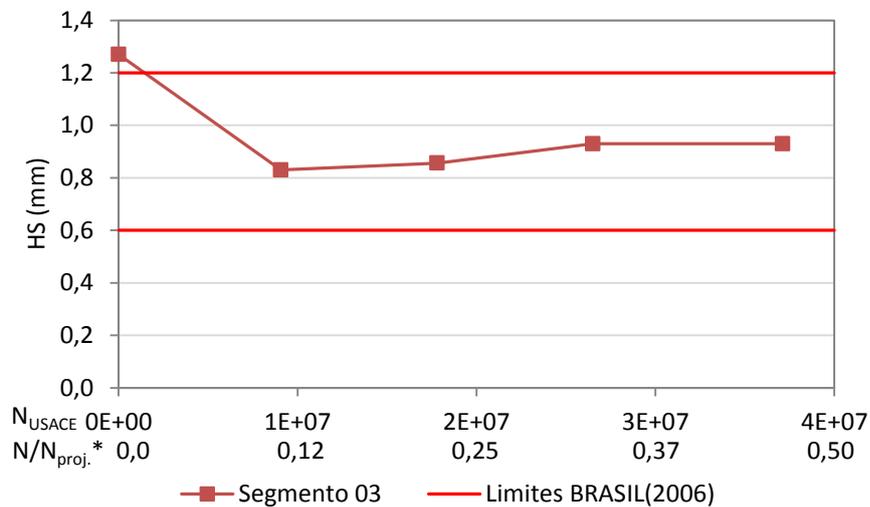
Na Tabela 27 e na Figura 88 é apresentada a evolução da macrotextura no segmento 03 em função do tráfego atuante. O intervalo de macrotextura sugerido por DNIT (BRASIL, 2006) também é apresentado no gráfico, sendo de  $0,6 \text{ mm} \leq HS \leq 1,2 \text{ mm}$ . No levantamento realizado em 2016, após 27 meses de abertura ao tráfego, foi utilizado o perfilômetro a laser, sendo os resultados convertidos para ETD através da Equação (30).

Tabela 27 – Evolução de HS médio (mm).

Ano	Meses de abertura ao tráfego	$N_{\text{atuante}}$	$N_{\text{projeto}}$	$N_{\text{atuante}}/N_{\text{projeto}}$	S03
2014 <sup>(1)</sup>	0	0		0,00	1,27
2015 <sup>(2)</sup>	13	$9,07 \times 10^6$		0,11	0,83
2016 <sup>(2)</sup>	27	$1,78 \times 10^7$	$8,02 \times 10^7$	0,22	0,86
2017 <sup>(2)</sup>	41	$2,65 \times 10^7$		0,33	0,93
2018	57	$3,71 \times 10^7$		0,46	0,93

Fonte: Elaborada pela autora (2019) com dados de Santos (2016) <sup>(1)</sup> e Luz (2017) <sup>(2)</sup>.

Figura 88 – Evolução de altura de mancha de areia (HS) em função do tráfego.



\* Relação entre o tráfego atuante e o tráfego de projeto ( $N_{\text{proj.}} = 8,02 \times 10^7$ ).

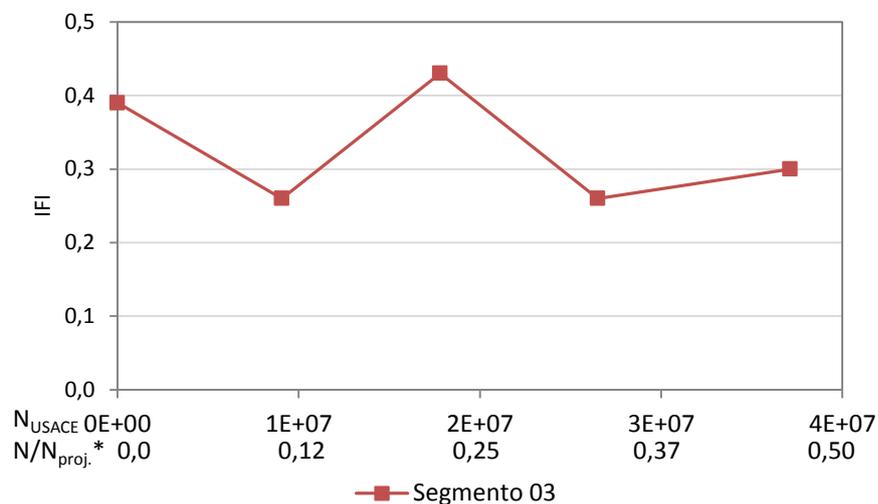
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Observa-se que em todos os levantamentos realizados após a abertura ao tráfego, o segmento 03 apresentou altura média de mancha de areia dentro do limite estabelecido por

DNIT (BRASIL, 2006). Além disso, nota-se que houve pouca variação no valor de HS ao longo do tempo. Nos últimos dois levantamentos realizados, a média de HS foi de 0,93, indicando uma possível estabilização de HS neste valor.

Na Figura 89 é apresentada a evolução do IFI médio em função do tráfego atuante. Como o IFI é calculado a partir dos valores de VRD e HS, pode-se observar que a sua evolução ocorreu de forma similar à evolução da microtextura e da macrotextura. Ao longo do tempo, o IFI variou de 0,26 a 0,43, mantendo-se dentro da classificação “muito bom” (0,22 a 0,35) e “ótimo” (>0,35), conforme sugerido por DNIT (BRASIL, 2006).

Figura 89 – Evolução de IFI em função do tráfego.



\* Relação entre o tráfego atuante e o tráfego de projeto ( $N_{proj.} = 8,02 \times 10^7$ ).

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

#### 4.3.5 Evolução de deflexão

A Tabela 28 e a Figura 90 apresentam a evolução da deflexão média dos segmentos monitorados em função do tráfego atuante. Os valores médios foram obtidos a partir das medidas de deflexão realizadas na faixa direita dos segmentos monitorados com o FWD.

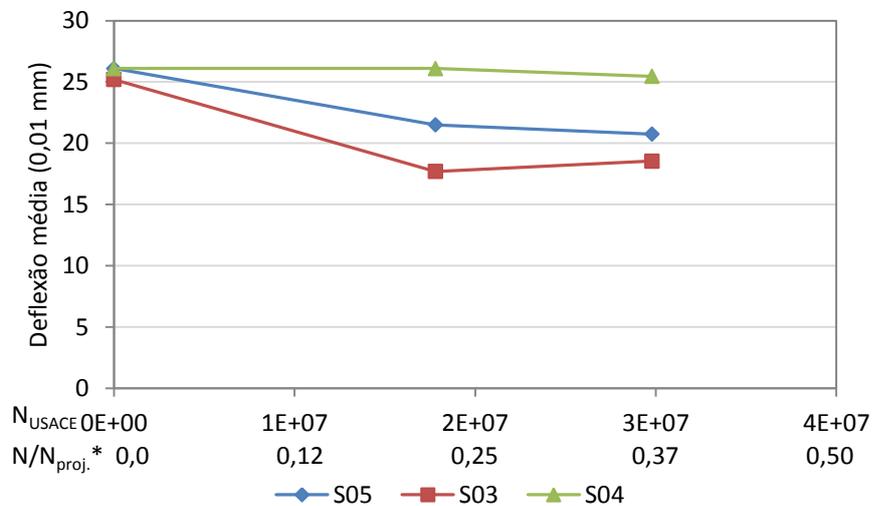
Ao longo do tempo de serviço, houve uma redução na deflexão média dos segmentos monitorados. Possivelmente esta redução está relacionada à consolidação adicional causada pelo tráfego, que aumenta a rigidez do pavimento e reduz a deflexão.

Tabela 28 – Evolução de deflexão média (0,01 mm).

Ano	Meses de abertura ao tráfego	N <sub>atuante</sub>	N <sub>projeto</sub>	N <sub>atuante</sub> /N <sub>projeto</sub>	S05	S03	S04
2014 <sup>(1)</sup>	0	0		0,00	26,10	25,20	26,10
2016 <sup>(2)</sup>	27	1,78x10 <sup>7</sup>	8,02x10 <sup>7</sup>	0,22	21,50	17,70	26,10
2017	46	2,98x10 <sup>7</sup>		0,37	20,75	18,54	25,46

Fonte: Elaborada pela autora (2019) com dados de Santos (2016)<sup>(1)</sup> e Luz (2017)<sup>(2)</sup>.

Figura 90 – Evolução da deflexão média nos segmentos monitorados em função do tráfego.



\* Relação entre o tráfego atuante e o tráfego de projeto (N<sub>proj.</sub> = 8,02x10<sup>7</sup>).

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Nota-se, ainda, que as deflexões máximas médias medidas no segmento 03 foram menores do que as medidas nos segmentos 05 e 04. Após a passagem de cerca de 37% do tráfego de projeto, a deflexão no segmento 05 foi aproximadamente 12% maior do que no segmento 03. No segmento 04, a deflexão medida foi cerca de 38% maior do que no segmento 03. Vale destacar que o trincamento acentuado observado nos segmentos monitorados 05 e 04 pode estar interferindo nos valores medidos de deflexão.

A partir das bacias de deflexões obtidas em campo, foi estimado o módulo de resiliência das camadas por retroanálise. Na Tabela 29 são apresentados os módulos retroanalisados para cada camada dos três segmentos monitorados.

Vale destacar que os segmentos 05 e 04 foram incorporados ao estudo somente a partir de 2015. Dessa forma, os módulos apresentados para os segmentos 05 e 04 no ano de 2014 foram estimados com base na retroanálise realizada para o segmento 01, pois estes segmentos possuem estrutura semelhante.

Tabela 29 – Evolução dos módulos de resiliência obtidos por retroanálise das bacias de deflexão medidas em 2014, 2016 e 2017.

Seg.	Camada	2014 <sup>(1)</sup>	2016 <sup>(2)</sup>	2017
		MR (MPa)	MR (MPa)	MR (MPa)
05	Revestimento (CAP 50/70)	5182	3473	3075
	Base	198	283	239
	Sub-base	188	248	339
	Subleito	237	330	417
03	Revestimento (CAP 50/70)	5797	5564	4028
	Revestimento (BMP)	4696	5943	4524
	Base	212	315	323
	Sub-base	132	227	218
	Subleito	230	307	377
04	Revestimento (CAP 50/70)	5182	3204	2919
	Base	198	287	274
	Sub-base	188	228	296
	Subleito	237	224	260

Fonte: Elaborada pela autora (2019) com dados de Santos (2016)<sup>(1)</sup> e Luz (2017)<sup>(2)</sup>.

De maneira geral, nota-se um aumento nos módulos de resiliência das camadas de base, sub-base e subleito ao longo do tempo de serviço. Exceto para a camada de base do segmento 04 e 05 e sub-base do segmento 03, que apresentaram uma redução no módulo no levantamento de 2017.

Na camada de revestimento asfáltico dos segmentos 05 e 04, ocorreu uma redução nos módulos ao longo do tempo. Até o levantamento realizado em 2017, pode-se observar que houve uma redução de 40,7% e 43,7% no módulo do revestimento dos segmentos 05 e 04, respectivamente, em relação ao módulo inicial. No segmento 03 a redução no módulo ocorreu

com menor intensidade. Na mistura convencional, a redução no módulo foi de 30,5% em relação ao módulo inicial e na mistura modificada, a redução foi de 3,7%. Ressalta-se que do ponto de vista do envelhecimento do ligante frente a ação do meio ambiente é de se esperar o aumento da rigidez da mistura asfáltica (TONIAL, 2001), notadamente para revestimentos de pouca espessura. Entretanto, a redução na rigidez do revestimento, mais acentuada dos segmentos 05 e 04, pode estar relacionada ao elevado trincamento observado nestes segmentos.

#### 4.4 ETAPA 4 – COMPARAÇÃO DE ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL: LVECD E FLEXÃO 4 PONTOS

Nesta etapa buscou-se comparar os resultados de dois métodos distintos de estimativa de vida útil com os resultados obtidos em campo em termos de porcentagem de área trincada. O primeiro método, realizado com análise no programa LVECD e a função de transferência de Nascimento (2015), permite estimar a porcentagem de área trincada nas camadas do revestimento e a forma de início de propagação das trincas, através do contorno de dano que o programa gera. O segundo método, realizado com análises no programa Viscoroute e curvas de fadiga a partir do ensaio de flexão alternada em 4 pontos, permite estimar o número de solicitações de tráfego para a ruptura por fadiga da mistura asfáltica. Como ainda não se tem uma função de transferência para convertê-lo em porcentagem de área trincada, neste método, a vida útil foi estimada em termos de número de solicitações para a ruptura, sem estar atrelada a uma porcentagem de área trincada.

Por possuírem dados de saída distintos, os resultados obtidos em cada método foram comparados em termos de um fator de calibração necessário para que o  $N_{8,2t}$  estimado no método coincidissem com o  $N_{8,2t}$  atuante em campo para dada porcentagem de área trincada. O fator de calibração foi calculado para 1%, 10% e 20% de área trincada no pavimento.

##### 4.4.1 Ajuste dos levantamentos para o método de mapeamento por células

Como detalhado no método da pesquisa, o ajuste da porcentagem de área trincada medida para o procedimento de mapeamento por células foi necessário devido ao fato de que a função de transferência obtida por Nascimento (2015) para os resultados do LVECD se

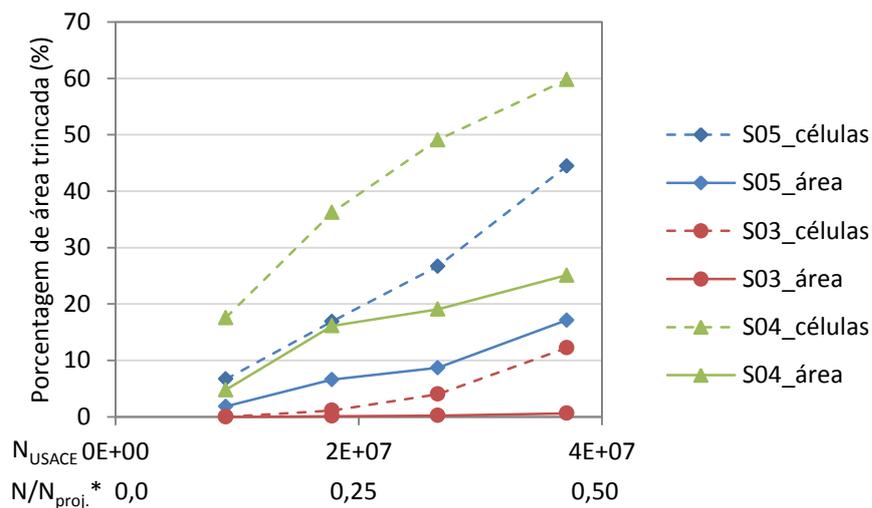
baseou neste procedimento para estimativa de área trincada. Dessa forma, para que se fosse possível comparar as medições dos levantamentos de campo (área total abrangida por trincamentos) com os resultados da função de transferência, realizou-se o ajuste nos dados do levantamento de forma a convertê-los para o método contemplando o mapeamento por células (1,2 x 2,0 m). Na Tabela 30 e na Figura 91 estão apresentadas as porcentagens de área trincada obtidas nos dois métodos.

Tabela 30 – Evolução da porcentagem de área trincada em medição de área e mapeamento por células.

Ano	Tempo (meses)	N <sub>atuante</sub>	Área trincada na superfície (%)					
			Medição de área			Mapeamento por células		
			S05	S03	S04	S05	S03	S04
2015 <sup>(1)</sup>	13	9,07x10 <sup>6</sup>	1,84	0,00	4,76	6,67	0,00	17,56
2016 <sup>(1)</sup>	27	1,78x10 <sup>7</sup>	6,58	0,09	16,11	16,89	1,11	36,22
2017 <sup>(1)</sup>	41	2,65x10 <sup>7</sup>	8,68	0,22	19,07	26,67	4,00	49,11
2018	57	3,71x10 <sup>7</sup>	17,11	0,61	25,10	44,44	12,22	59,78

Fonte: Elaborada pela autora (2019) com dados de Luz (2017) <sup>(1)</sup>.

Figura 91 – Evolução de porcentagem de área trincada através do método de medição de área e mapeamento por células em função do tráfego.



\* Relação entre o tráfego atuante e o tráfego de projeto (N<sub>proj.</sub> = 8,02x10<sup>7</sup>).

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Observa-se que, conforme esperado, os valores de porcentagem de área trincada obtidos através do mapeamento por células são maiores do que os obtidos através do método de medição de área. Para o segmento 05, a porcentagem de área trincada por células foi de 2,6 a 3,6 vezes maior do que para o método de medição de área. Para o segmento 03, a medição com mapeamento por células atingiu valor de 12 a 20 vezes maior. Para o segmento 04, a porcentagem de área trincada por células foi de 2,2 a 3,7 vezes maior do que por medição de área, similar à diferença obtida para o segmento 05.

A diferença entre os métodos se deu de forma mais acentuada para o segmento 03 pois neste segmento foram observadas trincas isoladas e espaçadas (Figura 84). No método de medição de área, se considerou apenas a área efetiva que cada trinca representa. Por outro lado, no método de mapeamento por células, estas trincas estariam sendo computadas em diferentes células devido ao espaçamento entre elas, aumentando consideravelmente a porcentagem de área afetada por trincas neste procedimento.

Nos segmentos 05 e 04, as trincas ocorreram de forma interligada e menos espaçada. Conseqüentemente, a área que delimita a região trincada se aproximou mais do valor obtido pelo método de mapeamento por células.

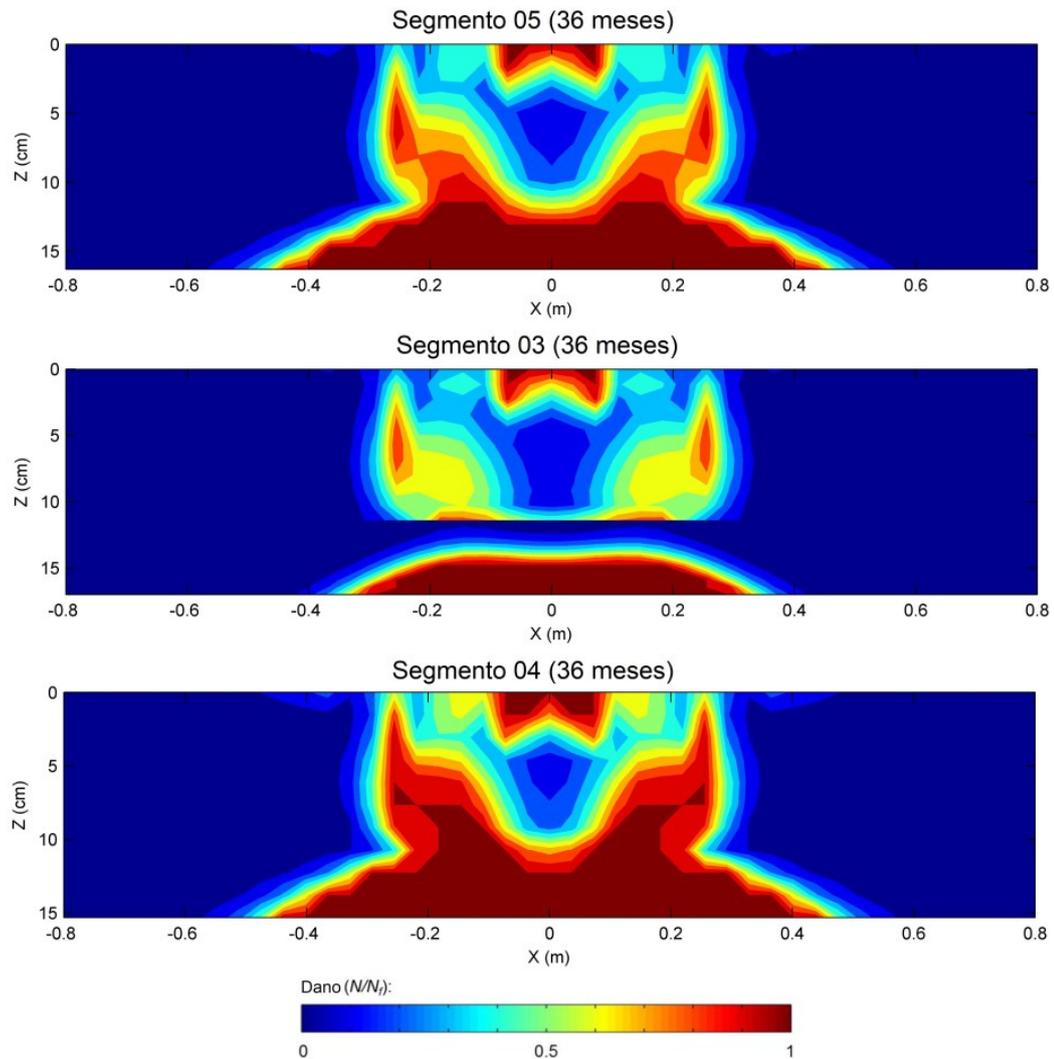
#### **4.4.2 Estimativa de vida útil**

##### **4.4.2.1 Procedimento utilizando o LVECD**

Na Figura 92 são apresentados os contornos de dano obtidos para os segmentos de Araranguá a partir do *software* LVECD considerando temperatura constante de 20°C. As imagens são referentes ao dano no pavimento com 36 meses de abertura ao tráfego.

Como pode ser visto, embora haja presença de trincas do tipo *top-down* de acordo com as análises no *software*, o trincamento é predominantemente do tipo *bottom-up* nos três segmentos de Araranguá. Observa-se que, com 3 anos de abertura ao tráfego, é elevado o nível de dano na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico. Neste período, o tráfego atuante estimado era de  $2,32 \times 10^7$ , correspondendo a cerca de 30% do tráfego de projeto ( $8,02 \times 10^7$ ).

Figura 92 – Contorno de dano para os segmentos de Araranguá com 36 meses.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

O comportamento estimado pelo programa corresponde ao observado em campo, pois foi possível evidenciar, através da extração de corpos de prova, que as trincas se iniciam de baixo para cima, chegando à superfície do revestimento. A Figura 93 apresenta um dos furos realizados para a extração dos corpos de prova.

Luz (2017) ressalta que a baixa porcentagem de trincas no segmento 03 em comparação aos segmentos 04 e 05 é outro fator que indica que as trincas são do tipo *bottom-up*, pois no segmento 03 a mistura asfáltica utilizada na camada inferior do revestimento apresenta melhor desempenho à fadiga. Portanto, se as trincas fossem do tipo *top-down*, o

revestimento 03 tenderia a apresentar porcentagem de área trincada similar aos outros dois segmentos.

Figura 93 – Furo para extração de corpo de prova com evidência do mecanismo de trincamento.



Fonte: Trichês (2014).

Com a função de transferência proposta por Nascimento (2015) e os resultados das análises no *software* LVECD, foi prevista a evolução da porcentagem de área trincada nos segmentos monitorados, conforme mostra a Tabela 31.

Tabela 31 – Previsão de porcentagem de área trincada com LVECD (%).

Seg.	Tempo (meses)	13	27	41	58
	$N_{\text{atuante}}$	$9,07 \times 10^6$	$1,78 \times 10^7$	$2,65 \times 10^7$	$3,78 \times 10^7$
05	Área trincada prevista	0,5	9,4	37,5	82,1
	Área trinc. prev. + conf. 85%	0,9	22,3	61,3	100,0
	Área trinc. prev. - conf. 85%	0,0	0,0	13,7	64,2
	Área trincada medida	6,7	16,9	26,7	44,4
03	Área trincada prevista	0,0	1,6	13,1	49,7
	Área trinc. prev. + conf. 85%	0,4	2,5	30,3	73,9
	Área trinc. prev. - conf. 85%	0,0	0,0	0,0	25,5
	Área trincada medida	0,0	1,1	4,0	12,2
04	Área trincada prevista	1,2	19,3	53,7	94,6
	Área trinc. prev. + conf. 85%	1,9	40,2	78,0	100,0
	Área trinc. prev. - conf. 85%	0,0	0,0	29,4	89,2
	Área trincada medida	17,6	36,2	49,1	59,8

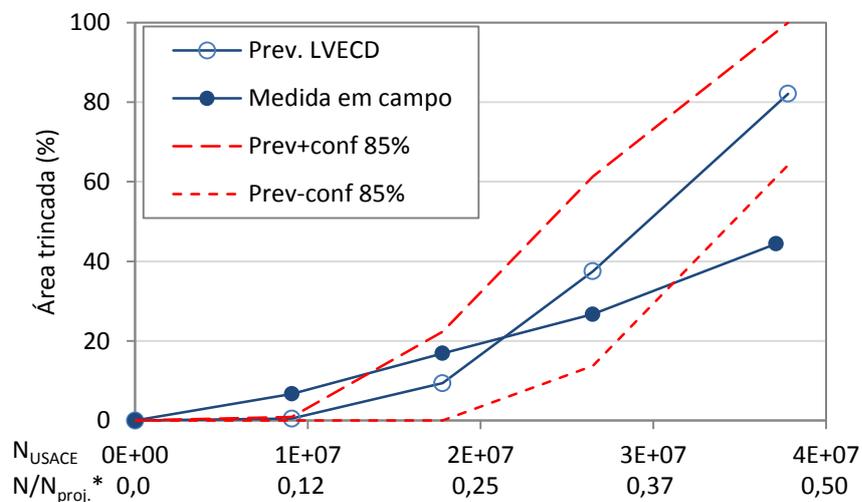
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

A porcentagem de área trincada também foi calculada para um intervalo de confiança da previsão de 85%. Dessa forma, na tabela, apresenta-se a área trincada prevista, os limites superior e inferior do intervalo de confiança e a área trincada medida em campo ajustada para o método de mapeamento por células (Tabela 30), respectivamente nesta ordem, para cada segmento monitorado.

Para o segmento 03, a previsão de área trincada apresentada corresponde à estimativa feita com base no dano médio na camada de revestimento como um todo. Portanto, no primeiro momento, a camada de mistura asfáltica convencional e modificada foram analisadas em conjunto, pois não é possível definir a porcentagem de área trincada da camada inferior.

A partir dos resultados do LVECD e dos levantamentos de campo ajustados para o mapeamento por células, foram gerados gráficos de evolução de área trincada pelo tráfego atuante. Nas Figuras 94, 95 e 96 são apresentados os gráficos de evolução de trincamento medido e previsto para os segmentos 05, 03 e 04, respectivamente.

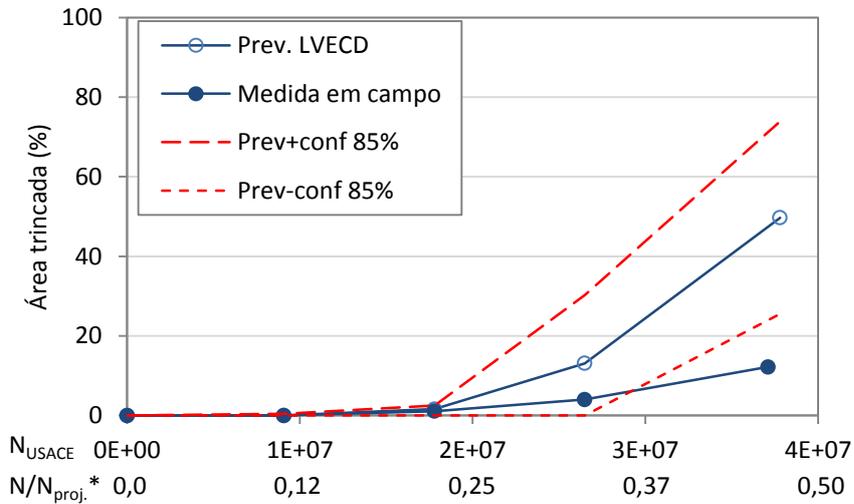
Figura 94 – Porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD para o segmento 05.



\* Relação entre o tráfego atuante e o tráfego de projeto ( $N_{proj.} = 8,02 \times 10^7$ ).

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

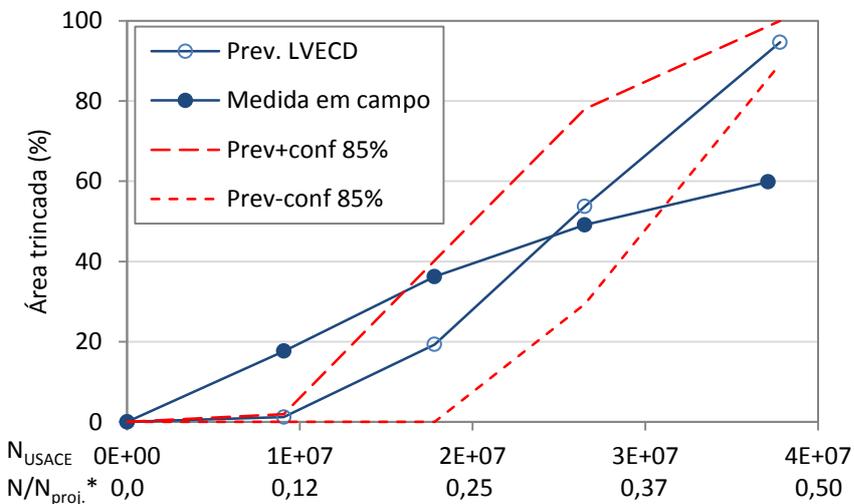
Figura 95 – Porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD para o segmento 03.



\* Relação entre o tráfego atuante e o tráfego de projeto ( $N_{proj.} = 8,02 \times 10^7$ ).

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 96 – Porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD para o segmento 04.



\* Relação entre o tráfego atuante e o tráfego de projeto ( $N_{proj.} = 8,02 \times 10^7$ ).

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

No segmento 05 (Figura 94), pode-se observar que, inicialmente, o trincamento em campo ocorre mais rápido do que o previsto no programa LVECD. Nota-se que o primeiro levantamento de campo, realizado após a passagem de tráfego de  $9,1 \times 10^6$ , apresentou porcentagem de área trincada fora do intervalo de confiança de 85%, indicando início de

trincamento antes do previsto. No entanto, após o tráfego de  $2,0 \times 10^7$  a previsão passa a ser maior do que a porcentagem de área trincada medida em campo, ou seja, a previsão do modelo teve uma aceleração maior do que a aceleração com que as trincas ocorreram no campo.

Para o segmento 03 (Figura 95), até próximo a passagem de 25% do tráfego de projeto, a previsão do programa foi bem próxima do trincamento medido em campo. Com atuação do tráfego igual a  $1,8 \times 10^7$ , por exemplo, a área trincada medida em campo foi de 1,1% e a prevista no LVECD foi de 1,6%. Entretanto, a partir do tráfego de  $2,6 \times 10^7$  a porcentagem de área trincada prevista pelo LVECD passou a ser maior do que a medida em campo. No último levantamento, realizado após atuação de tráfego igual a  $3,8 \times 10^7$ , o trincamento previsto (49,7%) foi significativamente maior do que o medido em campo (12,2%).

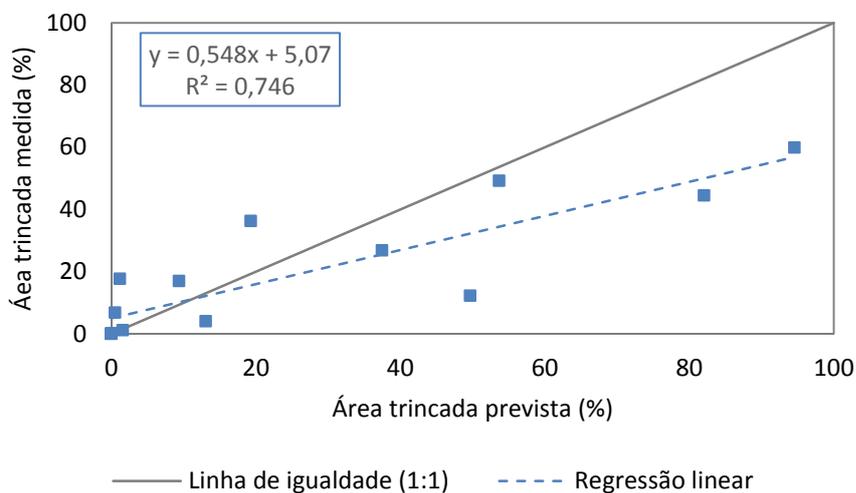
Similar ao comportamento observado no segmento 05, o segmento 04 (Figura 96), na fase inicial, apresentou trincamento em campo mais rápido do que o previsto pelo programa. Nota-se ainda que para este segmento a diferença entre trincamento previsto e medido é significativamente maior. Após atuação de tráfego igual a  $9,1 \times 10^6$ , por exemplo, a área trincada prevista foi de 1,2% enquanto que a medida em campo foi de 17,6%. Porém, após atuação de tráfego igual a  $2,6 \times 10^7$ , observa-se que o trincamento previsto passou a ser maior do que o medido em campo, invertendo o comportamento. No último levantamento, a porcentagem de área trincada prevista pelo LVECD foi de 94,6% e a medida em campo foi de 59,8%.

Por outro lado, Nascimento (2015) ressalta que prever porcentagem de área trincada maior do que 50% pode não ser apropriado, pois os danos são muito elevados e podem ocorrer distorções nas análises. Outros mecanismos de dano, diferentes dos utilizados no modelo do VECD, podem estar ocorrendo nesta etapa. Quando a camada de revestimento asfáltico está muito danificada até a estrutura do pavimento pode mudar, pois pode permitir a entrada de água nas camadas subjacentes, comprometendo o desempenho do pavimento como um todo.

A Figura 97 apresenta a comparação entre a porcentagem de área trincada medida em campo nos segmentos monitorados e a porcentagem de área trincada prevista no LVECD.

Foram utilizados os dados sem o intervalo de confiança, ou seja, representando a probabilidade de ocorrência de 50%.

Figura 97 – Comparação entre porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

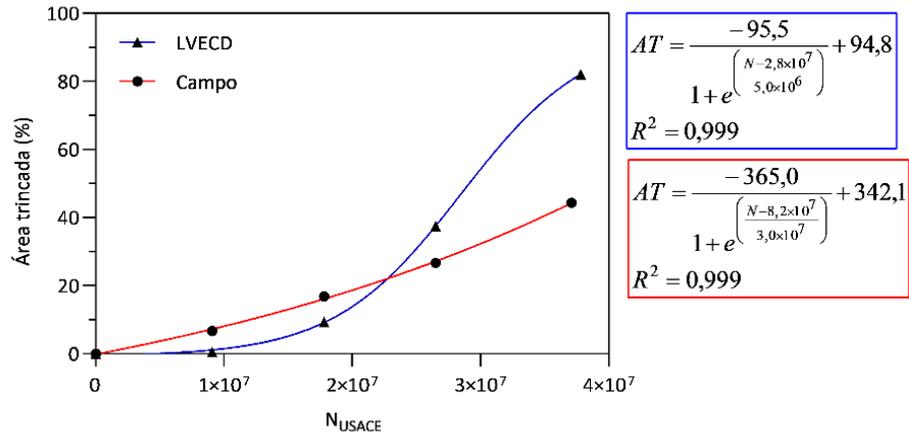
Nota-se que a regressão linear obtida com os pontos apresentou boa correlação, com  $R^2$  igual a 0,75. Porém, pode-se observar que os dados ficaram dispersos em relação a linha de igualdade. Contudo, vale ressaltar que até mesmo as análises de desempenho realizadas em laboratório apresentam alta variabilidade de resultados. Portanto, é de se esperar que em campo a variabilidade seja ainda maior, onde os fatores que interferem no desempenho não são controláveis como em laboratório. Dessa forma, a busca pela idêntica previsão de desempenho, se tratando de dados de campo, se reveste de grande complexidade.

Nascimento (2015) destaca que grandes diferenças entre área trincada prevista e medida não estão necessariamente associadas com grande diferença em previsões de tempo ou em número de solicitações de tráfego. Para verificar a diferença em relação ao tráfego, primeiramente, foi determinada a linha de tendência para a porcentagem de área trincada medida e prevista. Para cada segmento monitorado, foi encontrado o modelo que mais se ajustou aos dados medidos em campo e aos resultados do programa (Tabela 31).

As Figuras 98, 99 e 100 apresentam os modelos das linhas de tendência para o segmento 05, 03 e 04, respectivamente. Com relação aos resultados do LVECD, inicialmente,

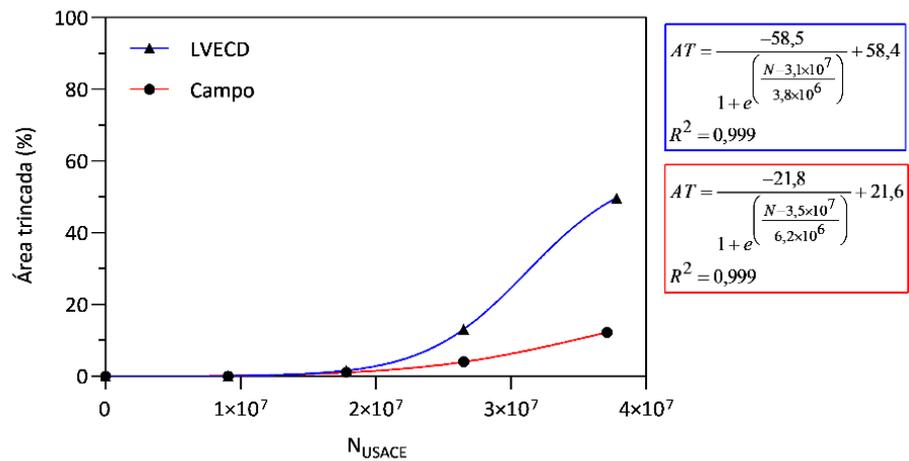
foram utilizados os valores previstos sem o intervalo de confiança, representando probabilidade de ocorrência de 50%.

Figura 98 – Linha de tendência para porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD com 50% de confiabilidade para o Segmento 05.



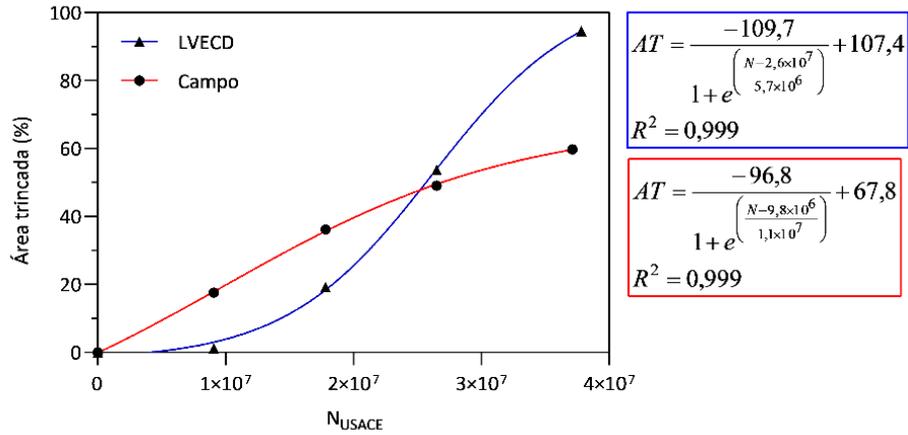
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 99 – Linha de tendência para porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD com 50% de confiabilidade para o Segmento 03.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 100 – Linha de tendência para porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD com 50% de confiabilidade para o Segmento 04.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

A partir dos modelos das linhas de tendência, foi estimado o número de solicitações de tráfego para atingir as porcentagens de área trincada de 1%, 10% e 20%. Assim, foi encontrado o N correspondente a estas áreas de trincamento tanto para a medição de área trincada em campo, quanto para a previsão dada pelo LVECD, utilizando os respectivos modelos. Na Tabela 32 são apresentados os resultados para os segmentos 05, 03 e 04.

Tabela 32 – Número de solicitações de tráfego em campo e previsto pelo LVECD para 1%, 10% e 20% área trincada.

Área trincada (%)	N <sub>USACE</sub> – Campo			N <sub>USACE</sub> – LVECD		
	S05	S03	S04	S05	S03	S04
1	1,52x10 <sup>6</sup>	1,76x10 <sup>7</sup>	6,02x10 <sup>5</sup>	8,72x10 <sup>6</sup>	1,61x10 <sup>7</sup>	6,19x10 <sup>6</sup>
10	1,21x10 <sup>7</sup>	3,46x10 <sup>7</sup>	5,27x10 <sup>6</sup>	1,82x10 <sup>7</sup>	2,52x10 <sup>7</sup>	1,43x10 <sup>7</sup>
20	2,11x10 <sup>7</sup>	5,10x10 <sup>7</sup> *	1,01x10 <sup>7</sup>	2,21x10 <sup>7</sup>	2,87x10 <sup>7</sup>	1,83x10 <sup>7</sup>

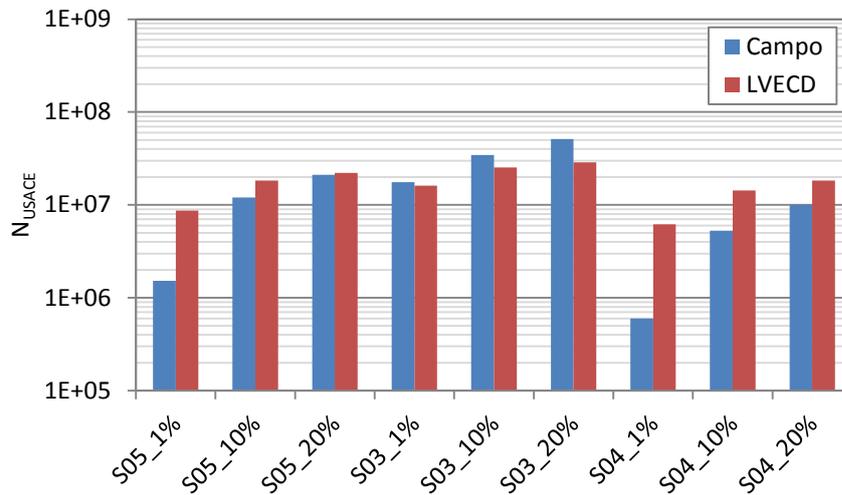
\* Extrapolado a partir do modelo.

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Para melhor visualizar os resultados da Tabela 32, foram gerados gráficos do número de solicitações de tráfego em campo e do previsto no LVECD para atingir 1%, 10% e 20% de área trincada. Na Figura 101 é apresentado um gráfico de barras em escala logarítmica. No

eixo horizontal é indicado o segmento monitorado e a porcentagem de área trincada que os resultados se referem, nesta ordem.

Figura 101 – Número de solicitações de tráfego em campo e previsto pelo LVECD para dada porcentagem de área trincada.



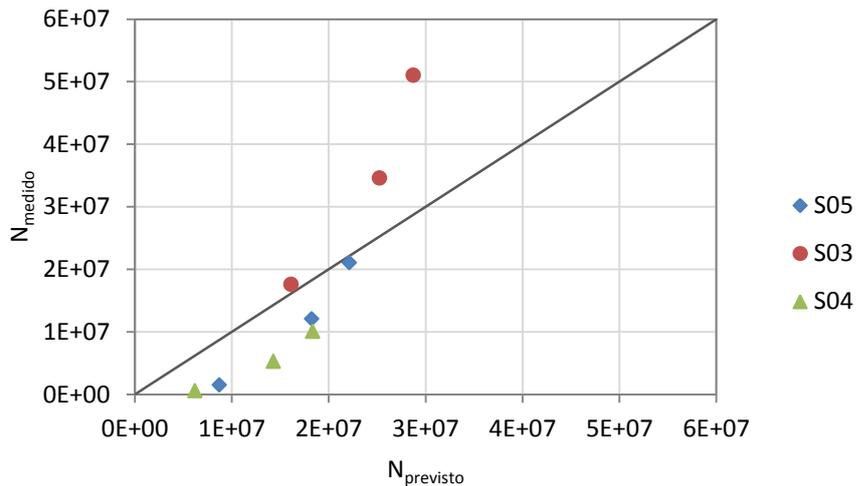
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Pode-se notar que, de maneira geral, os valores de N em campo e N previsto ficaram próximos, indicando boa previsão do programa mesmo sem considerar a variação da temperatura. Destaca-se a proximidade dos valores de N medido e previsto pelo LVECD para 20% de área trincada no segmento 05 e 1% de área trincada no segmento 03. Por outro lado, os resultados para 1% de área trincada nos segmentos 05 e 04 apresentaram maior divergência. Tal fato indica que o LVECD não conseguiu estimar de maneira precisa o início do trincamento nesses segmentos.

Na Figura 102 é apresentado um gráfico de dispersão entre os resultados de número de solicitações de tráfego previsto e medido em campo nos três segmentos monitorados para as porcentagens de área trincada analisadas. Pode-se notar que para os segmentos 05 e 04, todos os pontos ficaram abaixo da linha de igualdade, indicando que, em campo, o revestimento apresentou as porcentagens de área trincada analisadas antes do previsto pelo LVECD. Porém, para o segmento 03, o comportamento foi oposto. Os pontos ficaram acima

da linha de igualdade, indicando que, em campo, o pavimento resistiu mais ao trincamento do que o previsto no LVECD.

Figura 102 – Número de solicitações de tráfego em campo e previsto pelo LVECD para 1%, 10% e 20% de área trincada.



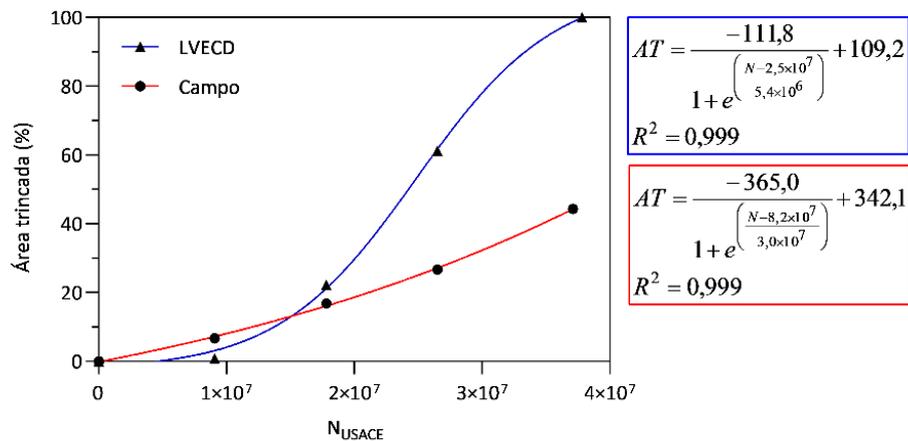
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Na Figura 102, pode-se observar, ainda, que um ponto do segmento 03 ficou significativamente afastado da linha de igualdade, com  $N$  medido em  $5,1 \times 10^7$  e  $N$  previsto de  $2,9 \times 10^7$ . Esse ponto corresponde a estimativa de tráfego para 20% de área trincada, conforme apresentado na Tabela 32. No entanto, o valor máximo de área trincada atingido em campo até o último levantamento foi de 12,2%. Dessa forma, o  $N$  medido para 20% de área trincada corresponde apenas a uma estimativa obtida a partir do modelo da linha de tendência dos levantamentos em campo, podendo não representar de forma precisa o que ocorrerá no segmento.

Por se tratar de resultados com alta variabilidade, buscou-se comparar também os resultados de campo com os resultados da previsão com 85% de confiabilidade. Assim, os resultados previstos têm 15% de chances de acontecer antes e 85% de acontecer após a estimativa. A análise foi realizada da mesma forma, no entanto, foram utilizados os dados de previsão + confiabilidade de 85% da Tabela 31.

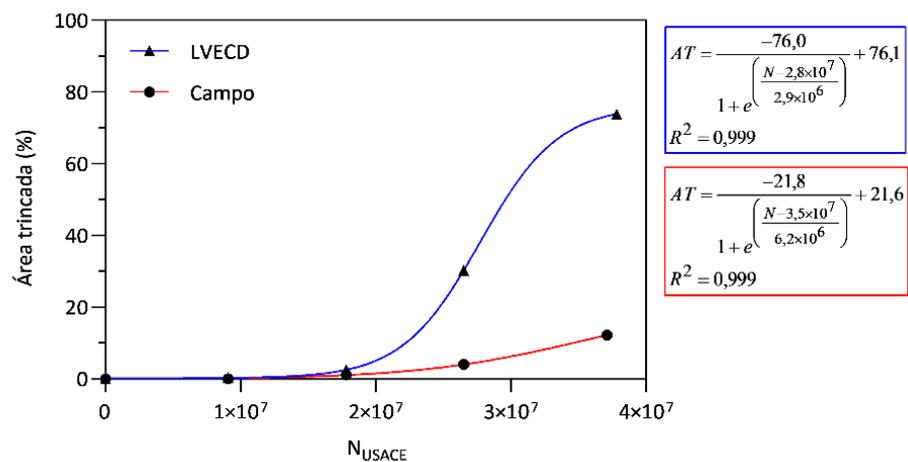
Os gráficos com as linhas de tendência para o segmento 05, 03 e 04 estão apresentados nas Figuras 103, 104 e 105, nesta ordem. As linhas de tendência referentes aos levantamentos de campo foram apresentadas apenas a título de comparação, pois são as mesmas apresentadas nas Figuras 98, 99 e 100.

Figura 103 – Linha de tendência para porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD com 85% de confiabilidade para o Segmento 05.



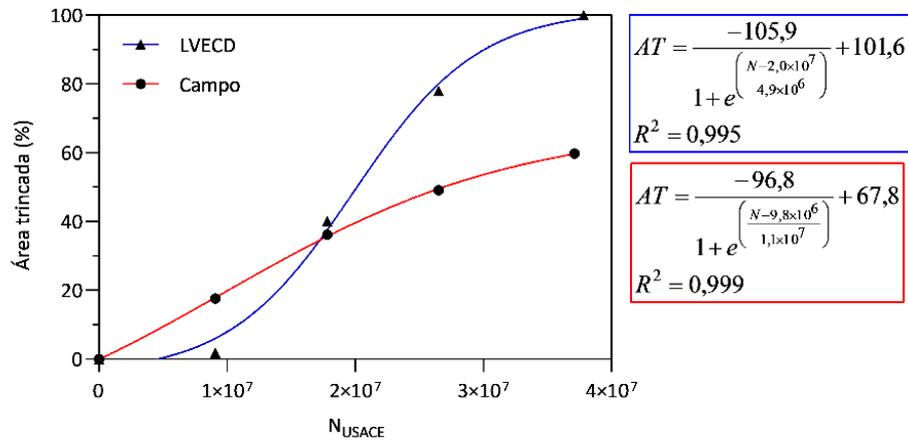
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 104 – Linha de tendência para porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD com 85% de confiabilidade para o Segmento 03.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 105 – Linha de tendência para porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD com 85% de confiabilidade para o Segmento 04.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

A partir dos modelos das linhas de tendência, foi obtida a estimativa do número de solicitações de tráfego para atingir 1%, 10% e 20% de área trincada. Na Tabela 33 são apresentados os resultados com o intervalo de confiança de 85%.

Tabela 33 – Número de solicitações de tráfego em campo e previsto pelo LVECD para 1%, 10% e 20% área trincada com 85% de confiabilidade.

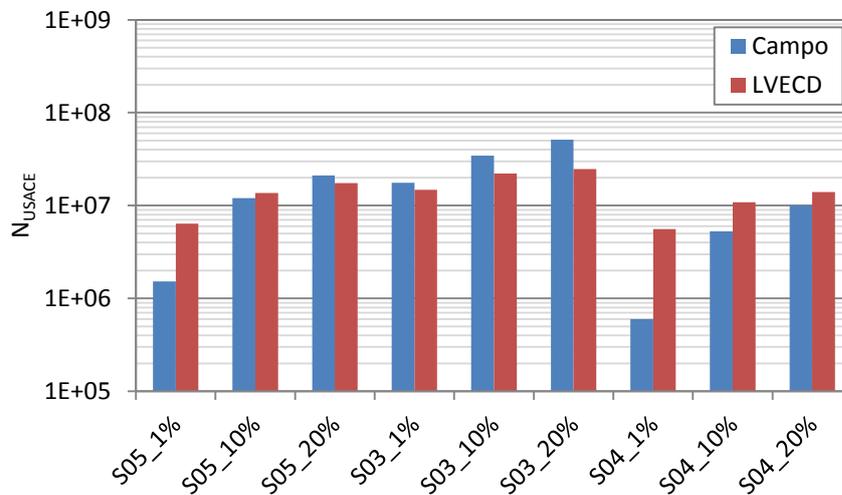
Área trincada (%)	N <sub>USACE</sub> – Campo			N <sub>USACE</sub> – LVECD		
	S05	S03	S04	S05	S03	S04
1	1,52x10 <sup>6</sup>	1,76x10 <sup>7</sup>	6,02x10 <sup>5</sup>	6,41x10 <sup>6</sup>	1,48x10 <sup>7</sup>	5,58x10 <sup>6</sup>
10	1,21x10 <sup>7</sup>	3,46x10 <sup>7</sup>	5,27x10 <sup>6</sup>	1,37x10 <sup>7</sup>	2,22x10 <sup>7</sup>	1,09x10 <sup>7</sup>
20	2,11x10 <sup>7</sup>	5,10x10 <sup>7</sup> *	1,01x10 <sup>7</sup>	1,74x10 <sup>7</sup>	2,47x10 <sup>7</sup>	1,40x10 <sup>7</sup>

\* Extrapolados a partir dos modelos.

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Com os resultados da Tabela 33, foi gerado o gráfico de número de solicitações de tráfego em campo e previsto pelo LVECD para atingir 1%, 10% e 20% de área trincada nos três segmentos, conforme apresentado na Figura 106.

Figura 106 – Número de solicitações de tráfego em campo e previsto pelo LVECD com 85% de confiabilidade para dada porcentagem de área trincada.



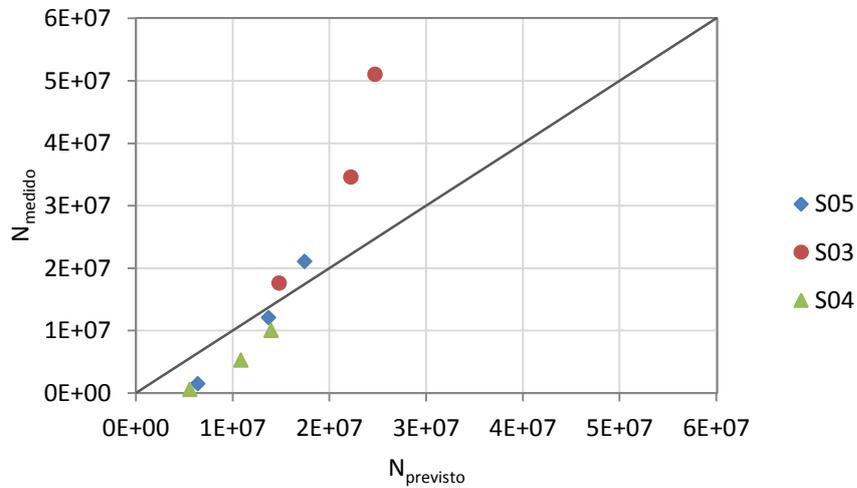
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Ao se comparar os resultados de número de solicitações de tráfego utilizando o intervalo de confiança de 85% (Figura 106) e os resultados sem o intervalo de confiança (Figura 101), pode-se notar que utilizando a análise de confiabilidade os valores previstos pelo LVECD ficaram mais próximos dos valores medidos em campo.

Na Figura 107 é apresentado um gráfico de dispersão entre os resultados previstos e medidos em campo para atingir 1%, 10% e 20% de área trincada. Pode-se observar que houve maior proximidade dos pontos com a linha de igualdade em comparação com a Figura 102. Estes resultados evidenciam a importância de se utilizar critérios de confiabilidade em simulações de pavimento, cujas análises são estocásticas. Portanto, considerando as variáveis da análise e a variabilidade dos ensaios de fadiga, os resultados obtidos mostram que o uso de critérios de confiabilidade é fundamental em simulações de pavimento.

Vale ressaltar que o método do LVECD prevê a porcentagem de área trincada utilizando fatores de calibração nacionais, desenvolvidos por Nascimento (2015). Ainda assim, mesmo sem o uso de calibração local, o resultado obtido através do procedimento de previsão com o intervalo de confiança apresentou valores próximos do observado em campo.

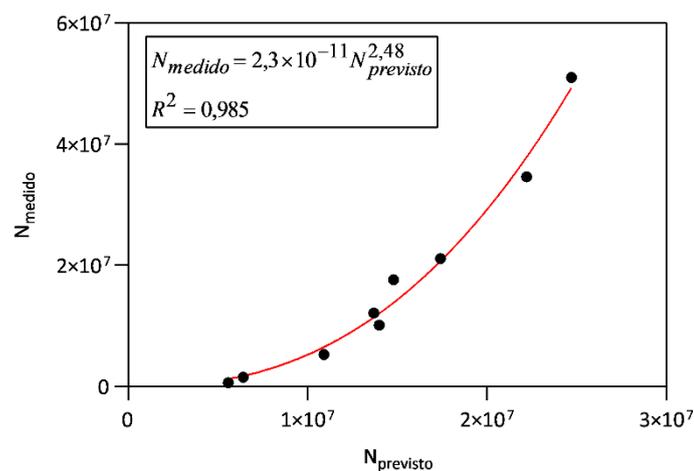
Figura 107 – Número de solicitações de tráfego em campo e previsto pelo LVECD com 85% de confiabilidade para 1%, 10% e 20% de área trincada.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Na Figura 108 é apresentada a correlação obtida entre os resultados para número de solicitações em campo e previsto pelo LVECD com 85% de confiabilidade para atingir 1%, 10% e 20% de área trincada.

Figura 108 – Correlação entre  $N_{medido}$  (estimado pela contagem) e  $N_{previsto}$  (pelo LVECD) válida para porcentagem de área trincada entre 0 e 20%.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Nota-se que há uma boa correlação entre os dados, com  $R^2$  igual a 0,985. Dessa forma, o modelo de regressão potencial pode ser utilizado para ajustar os dados obtidos na previsão do LVECD em valores medidos em campo nos segmentos analisados.

#### 4.4.2.2 Procedimento utilizando flexão a 4 pontos e Viscoroute

Conforme descrito na seção 4.1, foram realizados ensaios de flexão alternada 4 pontos com as misturas asfálticas utilizadas nos segmentos monitorados. Nesta etapa, para estimativa de vida útil, foram utilizados os modelos de fadiga apresentados na Tabela 34, obtidos por Trichês (2014) e Marcon (2016) com temperatura de ensaio de 20°C.

Tabela 34 – Modelo de fadiga das misturas asfálticas utilizadas em Araranguá.

Mistura asfáltica	Equação de fadiga	$R^2$
Convencional <sup>(1)</sup>	$N = 4,074 \cdot 10^{13} \cdot \varepsilon^{-4,076}$	0,948
Modificada – BMP <sup>(2)</sup>	$N = 1,265 \cdot 10^{17} \cdot \varepsilon^{-5,004}$	0,878

Fonte: Elaborada pela autora (2019) com dados de Trichês (2014) <sup>(1)</sup> e Marcon (2016) <sup>(2)</sup>.

Com o *software* Viscoroute, determinou-se a deformação específica de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico em cada segmento para estimar a sua respectiva vida útil a partir dos modelos de fadiga. A partir do modelo de fadiga de cada mistura asfáltica e das deformações obtidas para cada segmento monitorado, foi possível encontrar o número de solicitações para a ruptura, ou seja, a estimativa de vida útil.

No Quadro 4 são apresentados a deformação específica de tração e o N para ruptura, para cada segmento monitorado. Para o segmento 03, por possuir duas camadas com misturas asfálticas distintas, calculou-se a deformação na fibra inferior da camada com mistura convencional e na camada com mistura modificada por borracha. Além disso, são apresentados os percentuais de área trincada que cada  $N_{ruptura}$  corresponde, estimado a partir dos modelos obtidos para os valores medidos em campo, em cada segmento monitorado (Figuras 98, 99 e 100).

Quadro 4 – Deformação específica de tração ( $\times 10^{-6}$ ),  $N_{ruptura}$  e porcentagem de área trincada equivalente.

Segmento	S05	S03		S04
Mistura asfáltica	Conv.	Conv.	Modif.	Conv.
Deformação ( $\mu$ )	64,68	32,14	77,01	69,50
$N_{ruptura}$	1,70E+06	2,93E+07	4,59E+07	1,27E+06
Área trincada (%)*	1,1	5,8	18,2	2,2

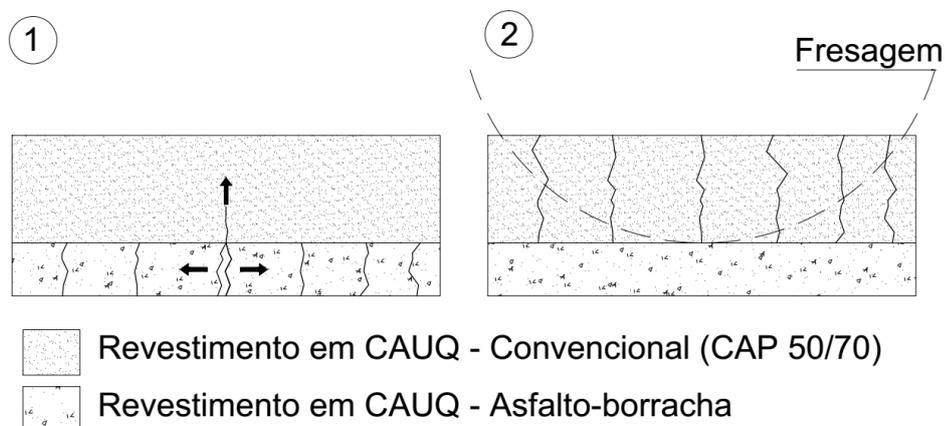
\* Estimado a partir dos modelos das linhas de tendência dos dados de campo.

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Quanto ao  $N_{ruptura}$ , nota-se que ele é maior para o segmento 03, que possui dois tipos misturas asfálticas, do que para os outros dois segmentos monitorados. Isto corresponde ao observado em campo, pois este segmento apresentou menor porcentagem de área trincada em todos os levantamentos. Pode-se observar, ainda, que a camada convencional do segmento 03 apresentou  $N_{ruptura}$  menor do que a modificada. Este resultado indica que a mistura asfáltica convencional trincaria antes do que a mistura modificada por borracha.

Isto foi propositalmente projetado para que as trincas na camada inferior não induzissem o trincamento na camada superior, conforme ilustrado no esquema da Figura 109 (Caso 1). Além disso, teve também o propósito de que, caso se venha a fazer uma intervenção somente na parte superior do revestimento, como fresagem, por exemplo, apenas esta camada precisaria ser removida, conforme apresentado na Figura 109 (Caso 2), com a minimização do potencial de reflexão de trincas para a nova camada de revestimento.

Figura 109 – Esquema do trincamento se iniciando: na camada inferior (1) e na camada superior (2).



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Com relação ao segmento 05 e 04, a diferença observada nos resultados no Quadro 4 se deve ao fato de que no segmento 05 a espessura do revestimento é 1,0 cm maior. Tal fato levou ao  $N_{ruptura}$  maior para este segmento em relação ao segmento 04. Analisando a porcentagem de área trincada, observa-se que para os segmentos 05 e 04, o  $N_{ruptura}$  obtido em laboratório e análise no Viscoroute equivale a 1% e 2% de área trincada em campo, respectivamente. Para estes casos, o fator campo/laboratório para 1% de área trincada seria próximo a 1.

Para o segmento 03, os valores correspondentes de área trincada para o  $N_{ruptura}$  foram maiores nas duas camadas, sendo 5,8% para a mistura convencional e 18,2% para a mistura modificada. Dessa forma, o fator campo/laboratório para 1% de área trincada seria menor do que 1 para este segmento. No entanto, para estimar as porcentagens de área trincada correspondente ao  $N_{ruptura}$  foi utilizado o modelo da linha de tendência dos dados medidos na superfície do revestimento, ou seja, na mistura asfáltica convencional. Sendo assim, o valor de área trincada obtido pode não corresponder ao trincamento da camada subjacente.

#### 4.4.3 Comparação entre os métodos de estimativa de vida útil

##### 4.4.3.1 Segmentos 05 e 04

A partir dos resultados do LVECD com 85% de confiabilidade (Tabela 33) e do ensaio de fadiga a 4 pontos com análise no Viscoroute (Quadro 4), foi encontrado o fator de calibração necessário para cada método de estimativa de vida útil analisado. Os Quadros 5 e 6 apresentam os fatores de calibração para atingir 1%, 10% e 20% de área trincada em cada método, referentes ao segmento 05 e 04, nesta ordem.

Quadro 5 – Fator de calibração necessário para o Segmento 05.

% área trincada	N(USACE)			Fator Campo/LVECD	Fator Campo/4PViscoroute
	Campo	LVECD	4P/Viscoroute		
1	1,52E+06	6,41E+06	1,70E+06	0,24	0,90
10	1,21E+07	1,37E+07	1,70E+06	0,88	7,11
20	2,11E+07	1,74E+07	1,70E+06	1,21	12,43

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Quadro 6 – Fator de calibração necessário para o Segmento 04.

% área trincada	N(USACE)			Fator Campo/LVECD	Fator Campo/4PViscoroute
	Campo	LVECD	4P/Viscoroute		
1	6,02E+05	5,58E+06	1,27E+06	0,11	0,48
10	5,27E+06	1,09E+07	1,27E+06	0,49	4,17
20	1,01E+07	1,40E+07	1,27E+06	0,72	7,96

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

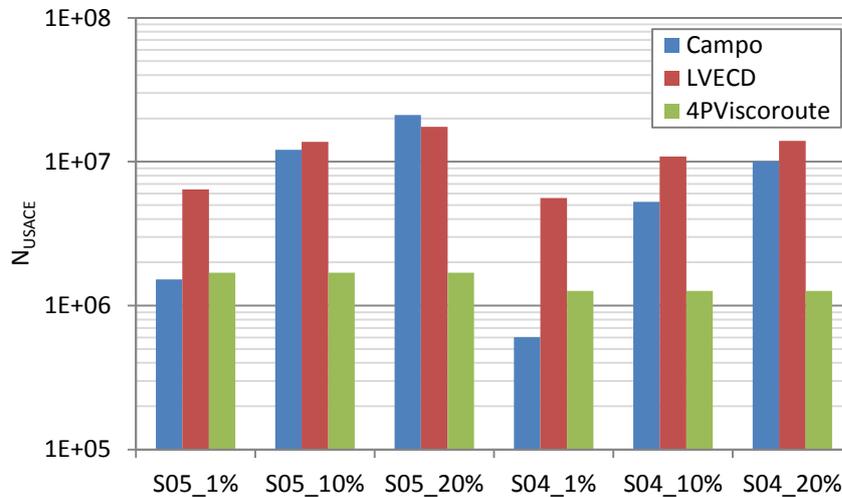
Pode-se observar que, para os segmentos 05 e 04, o fator de calibração campo/4PViscoroute foi maior do que o fator campo/LVECD, para todas as porcentagens de área trincada analisadas. Pode-se observar, ainda, que o fator campo/LVECD estaria entre 0,1 e 1,2. O baixo valor deste fator indica que o *software* conseguiria prever com mais precisão a estimativa de vida útil para diferentes porcentagens de área trincada do que o método com ensaio de fadiga a 4 pontos, mesmo utilizando temperatura constante nas análises.

O fator campo/4PViscoroute apresentou valor maior do que 1 na maioria dos pontos calculados, exceto para 1% de área trincada, indicando que em campo, a vida útil do pavimento seria maior do que a estimada pelo método. Porém, o N para a ruptura determinado em laboratório é medido a partir da queda de rigidez do material, o qual é relacionado posteriormente com a deformação de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico. Em campo, o que se avalia são as trincas que surgem na superfície do revestimento. Assim, o maior valor do fator de calibração pode estar relacionado com o tempo de surgimento destas trincas na superfície do revestimento, as quais tenderiam a se iniciar na fibra inferior da camada e se propagar até a superfície.

Pode-se observar, ainda, que o fator campo/4PViscoroute ficou próximo a 1, 5 e 10 para atingir 1%, 10% e 20% de área trincada, respectivamente. Neste sentido, conclui-se que, sem o fator de calibração, a estimativa de vida útil dada pelo ensaio em flexão 4 pontos e análise no Viscoroute corresponde a aproximadamente 1% de área trincada em campo, pelo método de mapeamento por células.

Na Figura 110 são apresentados os resultados dos Quadros 5 e 6, relacionando o número de solicitações de tráfego para atingir 1%, 10% e 20% de área trincada em campo e em cada método analisado.

Figura 110 – N de campo, N previsto no LVECD e no ensaio de flexão 4 pontos e análise no Viscoroute para 1%, 10% e 20% de área trincada.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Nota-se que, utilizando critérios de confiabilidade, a previsão com o LVECD descreve bem o comportamento observado em campo nas porcentagens de área trincada analisadas. Pode-se destacar, sobretudo, a proximidade dos resultados de previsão do LVECD com os medidos em campo para atingir 20% de área trincada. Os resultados coincidem com o observado por Nascimento (2015), em que grandes variações entre porcentagem de área trincada prevista e medida, não necessariamente estão associadas a grandes variações em número de solicitações de tráfego ou em tempo, pois quando o trincamento se inicia, cresce rapidamente.

Do ponto de vista prático, no dimensionamento de pavimentos, se relaciona o tráfego de projeto com o limite aceitável de porcentagem de área trincada no pavimento. Deste modo, nota-se que o método de estimativa de vida útil a partir do LVECD se mostrou promissor, pois é capaz de prever valores próximos da realidade em campo no que se refere a tráfego atuante e trincamento esperado, principalmente para atingir 20% de área trincada.

Entretanto, observa-se que o programa não conseguiu prever de maneira precisa o número de solicitações de tráfego para atingir 1% de área trincada, ou seja, a fase inicial do trincamento. De acordo com os modelos das linhas de tendência, o segmento 05 atingiria 1% de área trincada em campo após a solicitação de tráfego igual a  $1,5 \times 10^6$  e com a estimativa do

LVECD o tráfego seria de  $6,4 \times 10^6$ , resultando em uma diferença de tráfego de  $4,9 \times 10^6$ . O mesmo comportamento pode ser notado para o segmento 04 atingir 1% de área trincada, com diferença de  $5,0 \times 10^6$  entre o número de solicitações em campo e previsto. Analisando em termos de tráfego de projeto ( $8,02 \times 10^7$  para 10 anos), verifica-se que essa diferença corresponde a aproximadamente 7 meses, ou seja, 1% de área trincada em campo teria sido atingido em torno de 7 meses antes do que previsto pelo LVECD.

Vale ressaltar que nas análises realizadas no LVECD a temperatura no pavimento foi considerada constante, sendo igual a  $20^\circ\text{C}$ . Portanto, o pavimento pode ter apresentado início de trincamento antes do previsto no programa devido ao fato de que em campo a sazonalidade da temperatura atua na estrutura, o que pode intensificar o processo de trincamento.

Com relação aos resultados obtidos a partir do ensaio de flexão alternada 4 pontos e análise no Viscoroute, observou-se que o valor estimado ficou próximo ao número de solicitações para 1% de área trincada. Para o segmento 05, o número de solicitações para a ruptura ( $1,7 \times 10^6$ ) quase coincide ao número de solicitações para atingir 1% de área trincada em campo ( $1,5 \times 10^6$ ). Para o segmento 04, o número de solicitações para a ruptura ( $1,3 \times 10^6$ ) foi em torno de 2 vezes maior do que o número de solicitações para atingir 1% de área trincada em campo ( $6,0 \times 10^5$ ).

#### 4.4.3.2 Segmento 03

O segmento 03 possui a camada de revestimento asfáltico composta por duas misturas distintas, sendo mistura convencional com CAP 50/70 na parte superior (11,4 cm) e mistura modificada por borracha moída de pneus na parte inferior (5,6 cm), conforme apresentado na Figura 52. Dessa forma, além de analisar a vida útil da estrutura como um todo, buscou-se verificar a estimativa de vida útil em cada uma das camadas do revestimento deste segmento.

Analisando inicialmente as camadas em conjunto, a partir dos resultados do LVECD com 85% de confiabilidade (Tabela 33) e do ensaio de fadiga a 4 pontos com análise no Viscoroute (Quadro 4), foi obtido o fator de calibração necessário para cada método de estimativa de vida útil analisado. O Quadro 7 apresenta o fator de calibração necessário para atingir 1%, 10% e 20% de área trincada em cada método.

O fator campo/4PViscoroute foi calculado a partir do  $N_{ruptura}$  obtido para a mistura convencional, pois esta mistura asfáltica se encontra na superfície do revestimento, onde os defeitos foram avaliados em campo. Além disso, foi a mistura asfáltica do segmento 03 que apresentou menor  $N_{ruptura}$  (Quadro 4), representando a situação mais crítica.

Quadro 7 – Fator de calibração necessário para o Segmento 03.

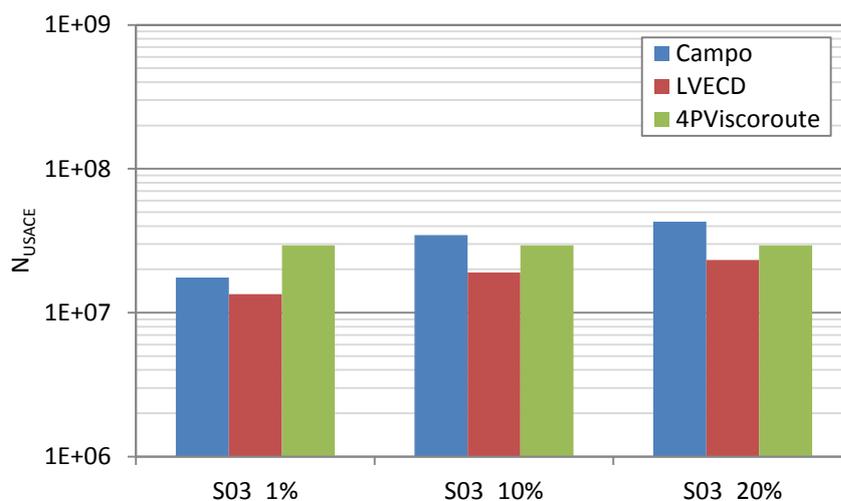
% área trincada	N(USACE)			Fator Campo/LVECD	Fator Campo/4PViscoroute
	Campo	LVECD	4P/Viscoroute		
1	1,76E+07	1,48E+07	2,93E+07	1,19	0,60
10	3,46E+07	2,22E+07	2,93E+07	1,56	1,18
20	5,10E+07	2,47E+07	2,93E+07	2,07	1,74

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Pode-se observar que o fator campo/LVECD estaria entre 1 e 2 e o fator campo/4PViscoroute estaria entre 0,6 e 1,7. Embora tenha apresentado fator de calibração similar ao método com o LVECD, para o cálculo do fator campo/4PViscoroute foi utilizado apenas o  $N_{ruptura}$  da mistura convencional. Sendo assim, a contribuição da mistura modificada utilizada na parte inferior da camada não foi considerada nesta análise inicial.

Na Figura 111 são apresentados os resultados do Quadro 7.

Figura 111 – N de campo, N previsto no LVECD e no ensaio de flexão 4 pontos e análise no Visoroute para 1%, 10% e 20% de área trincada no segmento 03.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Observa-se que, em termos de número de solicitações, a estimativa dada pelo *software* LVECD seria menor do que em campo para as três porcentagens de área trincada analisadas. Pode-se concluir que a estimativa dada pelo LVECD seria a favor da segurança, pois estaria prevendo que a porcentagem de área trincada iria ocorrer antes do que medido em campo.

Quanto aos resultados a partir do ensaio de 4 pontos e análise no Viscoroute, nota-se que o  $N_{ruptura}$  ficou próximo ao N para atingir 10% de área trincada em campo. O  $N_{ruptura}$  da mistura convencional foi de  $2,93 \times 10^7$  e para atingir 10% de área trincada em campo, estima-se que o tráfego atuante seja de  $3,46 \times 10^7$ .

A fim de verificar o comportamento em cada camada do revestimento do segmento 03, foi realizado o acúmulo de dano no *software* LVECD em cada camada separadamente. Com o dano acumulado, foi estimada a porcentagem de área trincada para a camada superior e inferior do revestimento asfáltico através da função de transferência proposta por Nascimento (2015). O procedimento foi similar ao realizado na seção 4.4.2.1.

Na Tabela 35 é apresentada a previsão de porcentagem de área trincada em função do tráfego atuante para cada camada asfáltica.

Tabela 35 – Previsão de porcentagem de área trincada com LVECD para as camadas asfálticas do segmento 03 (%).

Tempo (meses)		13	27	41	58
$N_{atuante}$		$9,07 \times 10^6$	$1,78 \times 10^7$	$2,65 \times 10^7$	$3,78 \times 10^7$
CAP 50/70	Área trincada prevista	0,0	1,4	20,3	98,5
	Área trinc. prev. + conf. 85%	0,4	2,3	41,4	100,0
	Área trinc. prev. - conf. 85%	0,0	0,0	0,0	97,0
	Área trincada medida	0,0	1,1	4,0	12,2
BMP	Área trincada prevista	0,2	2,2	6,4	14,1
	Área trinc. prev. + conf. 85%	0,6	3,6	14,5	32,1
	Área trinc. prev. - conf. 85%	0,0	0,0	0,0	0,0
	Área trincada medida	-	-	-	-

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Na tabela são apresentados os resultados com 50% de confiança e os limites superior e inferior do intervalo de confiança de 85%, nesta ordem. Além disso, é apresentada a porcentagem de área trincada medida em campo pelo método de mapeamento por células.

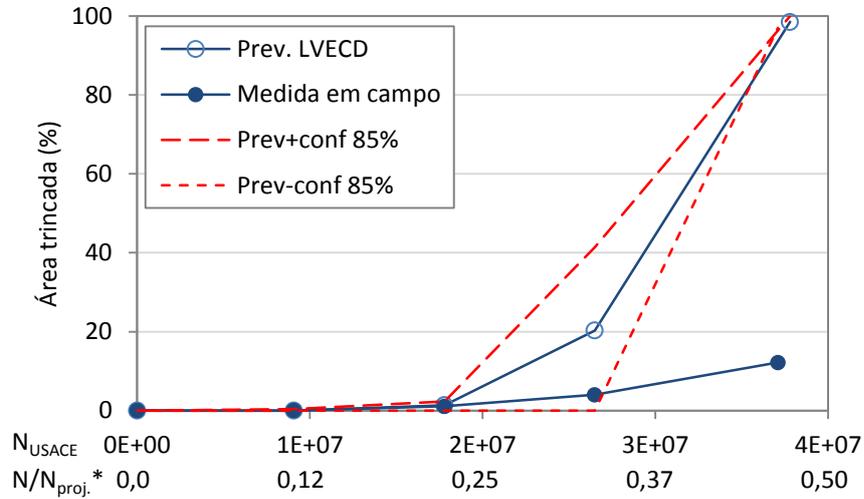
A área trincada em campo foi medida na superfície do revestimento, ou seja, se refere ao trincamento da camada de mistura asfáltica convencional. No entanto, não há como estimar qual seria o trincamento em campo da camada inferior constituída de mistura asfáltica modificada por borracha.

Ao analisar as porcentagens previstas pelo LVECD, nota-se que, apesar da camada inferior (BMP) apresentar início de trincamento primeiro, a camada superior (CAP 50/70) atinge maior porcentagem de área trincada. Conforme observado nas curvas características de dano (Figura 43), a mistura modificada por borracha apresentou melhor desempenho à fadiga, sendo mais resistente ao trincamento. Na camada de revestimento asfáltico do segmento 03, esta mistura foi estrategicamente colocada na região mais solicitada, onde a deformação de tração é maior. Após 58 meses de abertura ao tráfego, a previsão de porcentagem de área trincada para a mistura modificada é cerca de 7 vezes menor do que a previsão para a camada convencional.

Com intuito de comparar a porcentagem de área trincada prevista e medida em campo, foram gerados gráficos a partir dos resultados da Tabela 35 e do levantamento de área trincada por células (Tabela 30). Nas Figuras 112 e 113 são apresentados os resultados de porcentagem de área trincada medida e prevista para a camada superior e inferior do revestimento asfáltico do segmento 03, respectivamente.

Para os resultados de campo, utilizou-se a mesma relação entre tráfego e área trincada para as duas camadas. Entretanto, as medições de porcentagem de área trincada foram realizadas na superfície do pavimento, ou seja, na camada de mistura convencional. Dessa forma, ao se utilizar o mesmo tráfego para atingir as mesmas porcentagens de área trincada nas duas misturas asfálticas, parte-se da premissa de que as duas camadas estão trincando ao mesmo tempo. Sabe-se que uma camada pode sofrer trincamento primeiro do que a outra, no entanto, não foi possível mensurar este comportamento distinto das camadas a partir dos levantamentos realizados em campo.

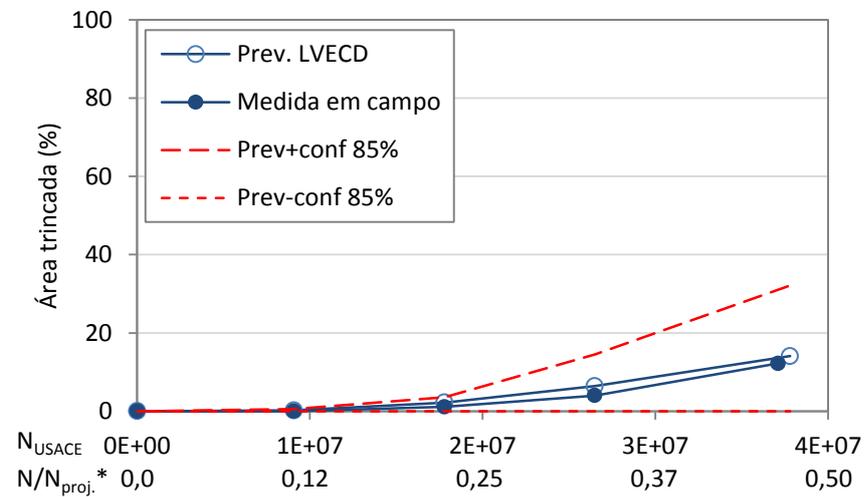
Figura 112 – Porcentagem de área trincada medida e prevista para a camada superior (CAP 50/70) do segmento 03.



\* Relação entre o tráfego atuante e o tráfego de projeto ( $N_{proj.} = 8,02 \times 10^7$ ).

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 113 – Porcentagem de área trincada medida e prevista para a camada inferior (asfalto-borracha) do segmento 03.



\* Relação entre o tráfego atuante e o tráfego de projeto ( $N_{proj.} = 8,02 \times 10^7$ ).

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

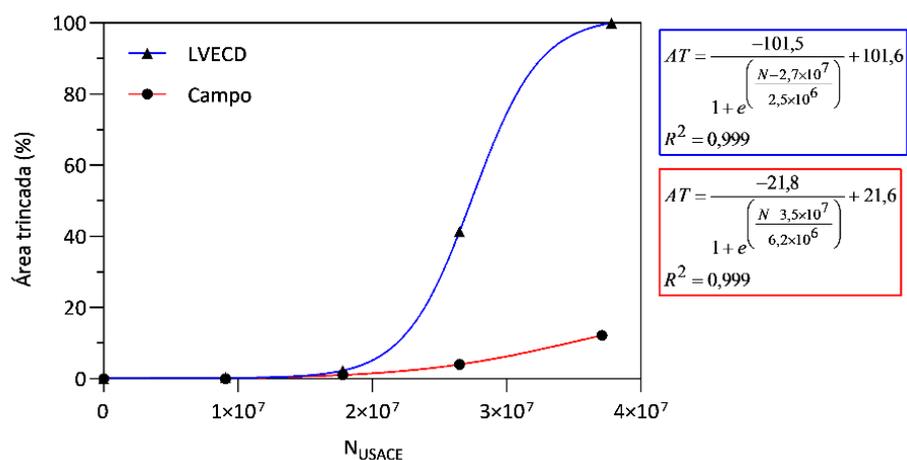
Nos primeiros levantamentos de campo, a camada de mistura asfáltica convencional (Figura 112) apresentou porcentagem de área trincada bem próxima da prevista através do

LVECD. Observa-se que o LVECD conseguiu prever a faixa de tráfego onde o trincamento se iniciaria. Entretanto, em campo, o crescimento do trincamento ocorreu de forma mais lenta do que o previsto. Nota-se que no levantamento realizado após a atuação de tráfego de  $2,65 \times 10^7$ , a porcentagem de área trincada medida foi menor do que a prevista. Estes resultados apontam que, em campo, a mistura asfáltica modificada por borracha está controlando mais o trincamento da mistura convencional do que esperado pelo programa.

Para a mistura modificada por borracha (Figura 113), pode-se observar que, os pontos quase se sobrepõem, indicando boa previsão de trincamento para esta camada, mesmo utilizando os dados do LVECD com 50% de confiabilidade. Porém, vale ressaltar que a porcentagem de área trincada é medida na superfície do revestimento asfáltico, podendo não representar o trincamento da camada inferior.

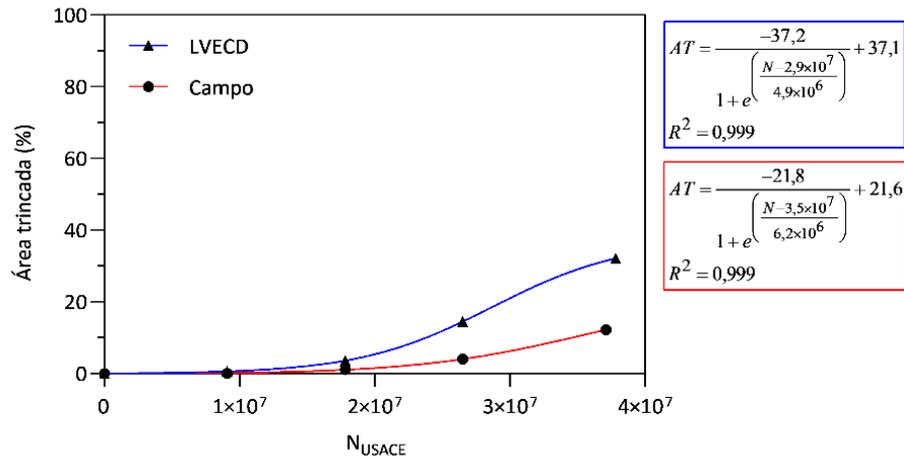
Com o intuito de verificar a diferença em relação ao número de solicitações de tráfego, foi determinada a linha de tendência para a porcentagem de área trincada prevista em cada camada. Na Figura 114 e na Figura 115 é apresentada a linhas de tendência para mistura convencional e modificada, respectivamente. Para os dados do LVECD, foram utilizados os resultados com 85% de confiabilidade, visto que foram observados melhores resultados com o uso do intervalo de confiança.

Figura 114 – Linha de tendência para porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD com 85% de confiabilidade para a mistura convencional (CAP 50/70) do Segmento 03.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 115 – Linha de tendência para porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD com 85% de confiabilidade para a mistura modificada (BMP) do Segmento 03.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

A partir dos modelos das linhas de tendência, foi estimado o número de solicitações de tráfego para que as camadas atingissem porcentagem de área trincada de 1%, 10% e 20%. Na Tabela 36 são apresentados os resultados encontrados. Pode-se observar que os resultados previstos pelo LVECD ficaram próximos dos valores medidos em campo.

Tabela 36 – N de campo e previsto no LVECD para 1%, 10% e 20% área trincada para as camadas do segmento 03.

Área trincada (%)	N <sub>USACE</sub> – Campo	N <sub>USACE</sub> – LVECD	
		CAP50/70	BPM
1	1,76x10 <sup>7</sup>	1,54x10 <sup>7</sup>	1,14x10 <sup>7</sup>
10	3,46x10 <sup>7</sup>	2,18x10 <sup>7</sup>	2,38x10 <sup>7</sup>
20	5,10x10 <sup>7</sup>	2,39x10 <sup>7</sup>	2,94x10 <sup>7</sup>

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Com o número de solicitações previsto e o atuante em campo, foi determinado o fator campo/LVECD para cada mistura asfáltica do segmento 03. Além disso, com a estimativa de vida útil obtida através dos resultados do ensaio de fadiga a 4 pontos e análise no Viscoroute (Quadro 4), foi calculado o fator campo/4PViscoroute. Nos Quadros 8 e 9 são

apresentados os resultados para a mistura asfáltica convencional e modificada do segmento 03, respectivamente.

Quadro 8 – Fator de calibração necessário para a mistura asfáltica convencional do segmento 03.

% área trincada	N(USACE)			Fator Campo/LVECD	Fator Campo/4PViscoroute
	Campo	LVECD	4P/Viscoroute		
1	1,76E+07	1,54E+07	2,93E+07	1,14	0,60
10	3,46E+07	2,18E+07	2,93E+07	1,58	1,18
20	5,10E+07	2,39E+07	2,93E+07	2,14	1,74

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Quadro 9 – Fator de calibração necessário para a mistura asfáltica modificada do segmento 03.

% área trincada	N(USACE)			Fator Campo/LVECD	Fator Campo/4PViscoroute
	Campo	LVECD	4P/Viscoroute		
1	1,76E+07	1,14E+07	4,59E+07	1,54	0,38
10	3,46E+07	2,38E+07	4,59E+07	1,45	0,75
20	5,10E+07	2,94E+07	4,59E+07	1,73	1,11

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

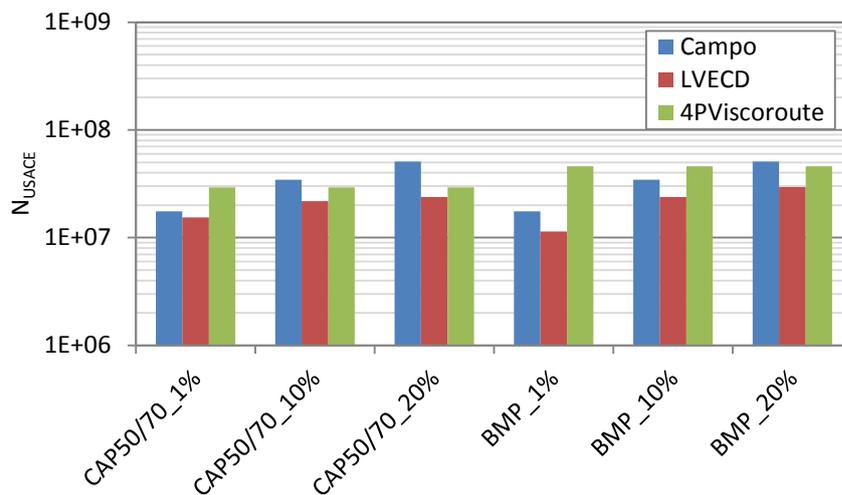
Analisando os Quadros 8 e 9, pode-se observar que os fatores de calibração variaram entre 1 e 2,1 para campo/LVECD e entre 0,4 e 1,7 para campo/4PViscoroute. Tal fato indica boa relação entre o número de solicitações de tráfego estimado e atuante para ambos os métodos de estimativa de vida útil, pois quanto mais próximo de 1 for o fator de calibração, mais próxima da realidade de campo é a previsão. Entretanto, ressalta-se que o tráfego para atingir 20% de área trincada em campo foi obtido através de extrapolação a partir dos modelos, podendo não representar o que ocorrerá em campo.

Pode-se observar, ainda, que o fator campo/4PViscoroute ficou próximo a 1 para 10% de área trincada na mistura convencional e para 20% de área trincada na mistura modificada. Assim, a estimativa de vida útil dada pelo método corresponde a cerca de 10% de área trincada na mistura convencional e 20% na mistura modificada.

Vale destacar que os resultados de campo foram utilizados para as duas camadas asfálticas como sendo o mesmo. No entanto, não há como definir qual a porcentagem de área trincada na camada de mistura asfáltica modificada por borracha. Portanto, trata-se apenas de uma aproximação, partindo da hipótese de que as duas estão trincando ao mesmo tempo.

Na Figura 116 são apresentados os resultados dos Quadros 11 e 12 em termos de número de solicitações de tráfego.

Figura 116 – N de campo, previsto no LVECD e no ensaio de flexão 4 pontos/Viscoroute para 1%, 10% e 20% de área trincada nas misturas do segmento 03.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Pode-se observar que para a estimativa de vida útil obtida através do LVECD, a camada de mistura asfáltica modificada por borracha apresentaria 1% de trincamento antes do que a camada de mistura convencional. Para a estimativa de vida útil a partir do ensaio de flexão 4 pontos e análise no Viscoroute, o comportamento foi contrário. A mistura convencional apresentaria trincamento antes da mistura modificada por borracha, pois o número de solicitações de tráfego para a mistura convencional foi menor do que para a mistura modificada por borracha.

No entanto, no método de estimativa de vida útil a partir do ensaio de flexão 4 pontos foi avaliado apenas o trincamento do tipo *bottom-up*, pois se considerou apenas a deformação de tração na fibra inferior das camadas asfálticas. Dessa forma, outros tipos de trincamento não foram considerados na análise. Por outro lado, na estimativa de vida útil com o programa LVECD, o dano é calculado na camada de revestimento como um todo, ou seja, é considerado também trincamento do tipo *top-down*.

#### 4.5 ETAPA 5 – AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA SAZONALIDADE DA TEMPERATURA NO ACÚMULO DE DANO

Sabe-se que a mistura asfáltica, por ser um material viscoelástico, apresenta comportamento mecânico distinto de acordo com a temperatura na qual está submetida. Em campo, ocorrem variações horárias, mensais e sazonais de temperatura que não são levadas em consideração quando utilizada temperatura constante no cálculo da estimativa de vida útil. Dessa forma, nesta etapa, buscou-se avaliar a influência da consideração da sazonalidade da temperatura no acúmulo de dano no revestimento dos segmentos monitorados de Araranguá.

Para isso, foi estimada a temperatura no revestimento asfáltico a partir de dados meteorológicos da região de Araranguá. A temperatura foi obtida para subcamadas com espessura próxima a 2 cm e considerada nas simulações numéricas realizadas no Viscoroute. Com o tráfego diário e o número de solicitações para a ruptura, foi estimado o dano acumulado considerando a sazonalidade.

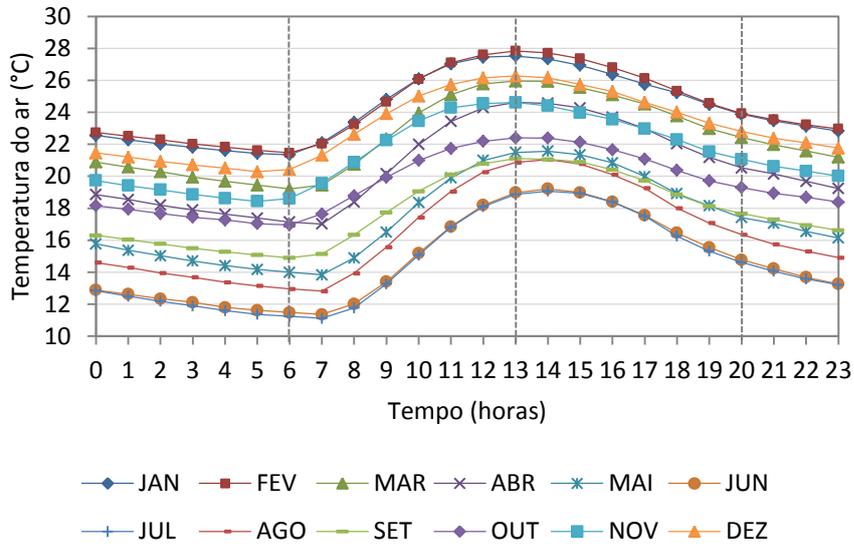
##### 4.5.1 Variação da temperatura do ar e do tráfego durante o dia

Com os dados disponibilizados pelo INMET (2018), foi calculada a distribuição horária de temperatura em cada mês para a região de Araranguá. Na Figura 117 são apresentadas as médias horárias mensais de temperatura do ar para os doze meses do ano.

Para a região analisada, pode-se observar que o mês com temperatura média do ar mais elevada é fevereiro, chegando próxima a 28°C, às 13 h. Ao longo do ano, as temperaturas médias horária vão decrescendo até os meses de junho e julho, onde voltam a subir gradativamente até fevereiro. Nota-se que os meses de junho e julho possuem temperatura média do ar similar ao longo do dia, apresentando curvas sobrepostas. Em junho, a temperatura média horária do ar atinge 11,4°C às 07 h e em julho, no mesmo horário, a temperatura média do ar atinge 11,1°C.

Além disso, observa-se que as curvas de temperatura apresentam comportamento similar ao longo do dia: decrescem no primeiro período do dia, aumentam a partir das 06 h e, por volta das 13 h, decrescem novamente. Ainda, no intervalo entre às 20 h e às 06 h, a variação na temperatura é de aproximadamente apenas 2°C, mantendo-se pouco variável neste período se comparado ao restante do dia.

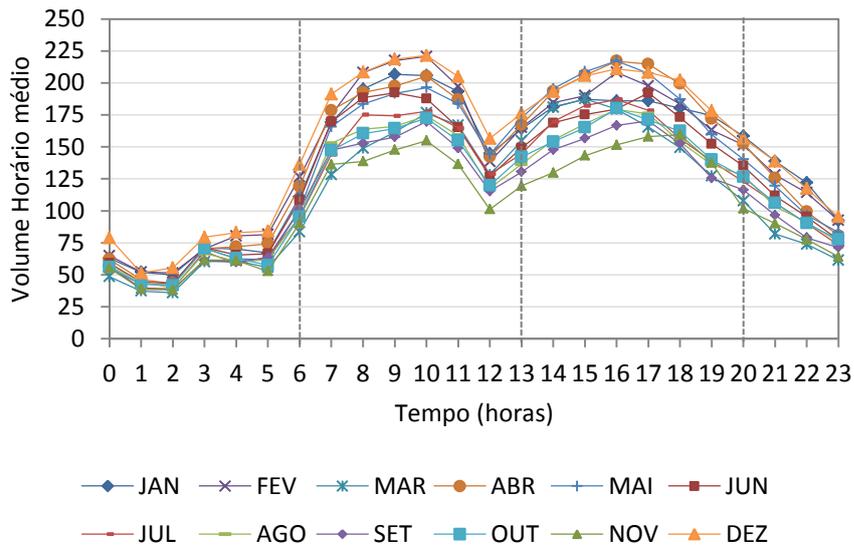
Figura 117 – Média horária de temperatura do ar em cada mês (2008 a 2017).



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

A partir dos dados de contagem de tráfego disponibilizados pelo Plano Nacional de Contagem de Tráfego (PNCT, 2018), calculou-se a distribuição horária de tráfego na região para cada mês. A Figura 118 apresenta o volume horário médio para todos os meses analisados.

Figura 118 – Volume horário médio de tráfego em 2017.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

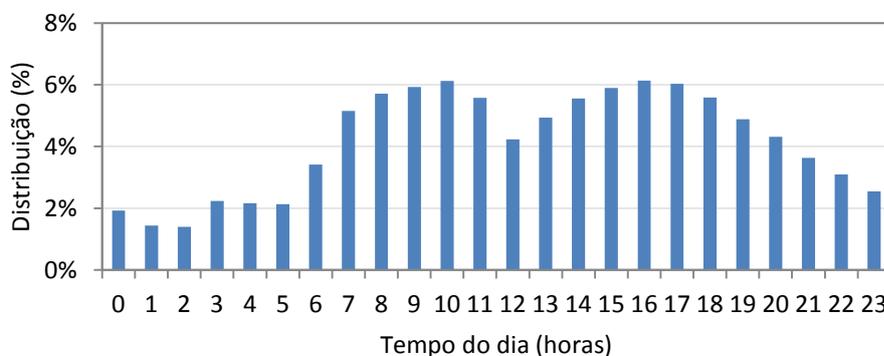
Observa-se que o menor volume de tráfego ocorre por volta das 02 h e os picos de tráfego estão entre 09 h e 10 h e entre 15 h e 17 h. Pode-se observar ainda que, de maneira geral, os períodos do dia com maior volume de tráfego na rodovia ocorrem pela manhã e pela tarde.

Comparando as distribuições horárias de temperatura e de tráfego nas Figuras 117 e 118, nota-se que a distribuição de tráfego não coincide precisamente com a de temperatura, tendo picos em horários diferentes. No entanto, o maior volume de tráfego ocorre no período com valores mais elevados de temperatura, entre 06 h e 20 h.

Como o objetivo principal desta etapa é verificar o efeito da variação da temperatura no desempenho estrutura, foram adotados como intervalos de análise os períodos do dia definidos pelo comportamento da temperatura na região. Dessa forma, foram considerados três intervalos de análise de temperatura dentro de cada mês, sendo: 06h – 13h (período de aumento de temperatura), 13h – 20h (período de decréscimo da temperatura) e 20h – 06h (período com pouca variação da temperatura). Os três intervalos do dia adotados estão representados nas Figuras 117 e 118 pelas linhas pontilhadas.

Visando considerar a variação de tráfego horária observada na Figura 118, calculou-se a porcentagem do tráfego que ocorre em cada um dos três períodos do dia adotados, ou seja, em cada intervalo de análise. Para isto, primeiramente, foi calculada a média anual do volume de tráfego em cada hora do dia e a porcentagem que este volume representa do total. A Figura 119 apresenta a distribuição horária de tráfego, em porcentagem, para cada hora do dia, calculado com base nos dados de 2017 disponibilizados pelo PNCT.

Figura 119 – Distribuição horária de tráfego nos segmentos monitorados.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

A partir da distribuição horária do tráfego, foi obtido o tráfego em cada período do dia analisado. A Tabela 37 apresenta o volume horário médio calculado para o ano de 2017, a porcentagem de tráfego que passa em cada hora do dia e a porcentagem de tráfego distribuída nos períodos do dia determinados pela temperatura.

Tabela 37 – Distribuição do volume de tráfego nos períodos analisados.

Hora	VH médio (anual)	% do total	% em cada período
6	102	3,4%	
7	156	5,1%	
8	173	5,7%	
9	180	5,9%	36,1%
10	186	6,1%	
11	169	5,6%	
12	128	4,2%	
13	150	4,9%	
14	169	5,6%	
15	179	5,9%	
16	187	6,2%	39,1%
17	183	6,1%	
18	169	5,6%	
19	148	4,9%	
20	131	4,3%	
21	110	3,6%	
22	94	3,1%	
23	77	2,5%	
0	58	1,9%	24,8%
1	44	1,4%	
2	42	1,4%	
3	68	2,2%	
4	65	2,1%	
5	64	2,1%	
TOTAL	3030	100,0%	100,0%

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Portanto, pode-se concluir que no período das 06h às 13h os segmentos monitorados sofrem a solicitação de aproximadamente 36% do tráfego diário. Das 13h às 20h trafega na rodovia aproximadamente 39% do tráfego diário. E no período entre 20h e 06h, o pavimento sofre solicitação de apenas 25% do tráfego diário. A Tabela 38 apresenta os valores adotados para o tráfego de cada período.

Tabela 38 – Distribuição do tráfego diário em cada período do dia analisado.

Intervalos	06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h
Porcentagem do tráfego	36%	39%	25%

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

#### 4.5.2 Cálculo da temperatura do revestimento

Para estimar a temperatura no revestimento nas profundidades especificadas na seção 3.5.2, primeiramente, determinou-se os parâmetros climáticos necessários a partir dos dados meteorológicos. O modelo de Barber (1957), apresentado na Equação (15), tem como dados de entrada meteorológicos: temperatura do ar ( $T_A$ ), velocidade do vento ( $V$ ), amplitude de variação de temperatura do ar ( $T_R$ ) e radiação solar ( $I$ ). Dessa forma, a partir do banco de dados do INMET (2018), foi calculada a média da temperatura do ar e da velocidade do vento em cada intervalo de análise, em cada mês, conforme apresenta a Tabela 39.

Os dados de temperatura do ar utilizados para cálculo da média foram obtidos no período de setembro de 2008 a dezembro de 2017. Dessa forma, têm-se a temperatura média em cada intervalo de análise obtida com dados coletados em 9 anos. Para a velocidade do vento foram utilizados dados coletados de julho de 2017 a setembro de 2018.

Tabela 39 – Temperatura média do ar e velocidade média do vento nos três períodos do dia para cada mês.

Mês	06h - 13h		13h - 20h		20h - 06h	
	T <sub>A</sub> (°C)	V (km/h)	T <sub>A</sub> (°C)	V (km/h)	T <sub>A</sub> (°C)	V (km/h)
Janeiro	25,0	7,3	25,9	11,5	22,4	4,9
Fevereiro	25,0	6,0	26,2	13,4	22,6	4,1
Março	22,8	6,1	24,5	11,1	20,7	4,4
Abril	20,9	5,4	23,0	10,0	18,7	3,6
Mai	17,5	6,4	20,0	8,8	15,5	4,2
Junho	14,7	6,9	17,5	8,2	12,8	5,5
Julho	14,5	5,0	17,4	9,1	12,6	4,0
Agosto	16,6	9,1	19,2	14,2	14,4	7,0
Setembro	18,2	7,5	19,7	10,7	16,1	7,1
Outubro	20,1	9,5	21,1	13,8	18,0	7,4
Novembro	22,3	9,6	23,1	14,6	19,5	6,8
Dezembro	23,9	8,4	24,8	13,9	21,3	5,5

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

A Tabela 40 apresenta a média da amplitude de variação de temperatura do ar ( $T_R$ ) e da radiação solar ( $I$ ) durante o dia calculada para cada mês. A amplitude de variação foi obtida com dados de temperatura de setembro de 2008 a dezembro de 2017. A radiação solar média durante o dia foi calculada a partir dos dados de setembro de 2017 a setembro de 2018, disponibilizados pelo INMET.

Para o cálculo da radiação solar média foram retirados os dias que apresentaram precipitação, pois o modelo de Barber (1957) não leva em consideração a influência da água nas equações de transferência de calor entre a mistura asfáltica e o ambiente.

Além dos dados meteorológicos, para se utilizar o modelo de Barber (1957) são necessárias propriedades físicas das misturas asfálticas, como: condutividade térmica ( $k$ ), capacidade calorífica específica ( $c$ ), coeficiente de absorção superficial da radiação solar ( $b$ ) e massa específica ( $w$ ). Os parâmetros térmicos foram obtidos na literatura devido à falta de instrumentação necessária para a sua obtenção.

Tabela 40 – Média da amplitude de variação de temperatura e radiação solar durante o dia em cada mês.

Mês	$T_R$ (°C)	$I$ (kJ/m <sup>2</sup> dia)
Janeiro	6,2	23305,4
Fevereiro	6,4	25594,7
Março	6,7	20271,4
Abril	7,6	16816,3
Mai	7,7	14192,8
Junho	7,9	10329,0
Julho	8,0	9996,8
Agosto	8,2	14296,3
Setembro	6,2	19097,1
Outubro	5,4	20390,9
Novembro	6,2	24016,6
Dezembro	6,0	24066,8

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

A condutividade térmica e a capacidade calorífica foram adotadas de Specht *et al.* (2008) para mistura asfáltica com ligante CAP 50/70 e com asfalto-borracha. O fator de absorção da radiação adotado foi o valor indicado por Barber (1957) para superfície negra. A massa específica foi obtida por Santos (2016) para as misturas asfálticas utilizadas nos segmentos monitorados. Na Tabela 41 estão apresentados os valores adotados para cada propriedade.

No modelo de Barber (Equação 15) é necessário informar ainda o tempo em horas decorrido a partir do início do ciclo. Considerou-se o início do ciclo às 6h, próximo ao horário do nascer do sol na região (conforme Figura 117). A hora do dia considerada no cálculo do gradiente de temperatura para cada intervalo de análise foi a hora correspondente à metade do intervalo. Assim, para o intervalo entre 06h-13h calculou-se o gradiente de temperatura no revestimento às 9h30 (3,5 horas após o início do ciclo), para o intervalo entre 13h-20h calculou-se às 16h30 (10,5 horas após o início do ciclo) e para o intervalo entre 20h-6h o gradiente foi calculado à 1h (19 horas após o início do ciclo).

Tabela 41 – Propriedades físicas das misturas asfálticas encontradas na literatura.

Propriedade	Mistura Asfáltica	Valor	Autor
Condutividade térmica (k)	CAP 50/70	1,26 W/m.°C	Specht <i>et al.</i> (2008)
	Asfalto-borracha	1,23 W/m.°C	Specht <i>et al.</i> (2008)
Cap. calorífica específica (c)	CAP 50/70	1049 J/kg.°C	Specht <i>et al.</i> (2008)
	Asfalto-borracha	1032 J/kg.°C	Specht <i>et al.</i> (2008)
Coef. de absorção da radiação solar (b)	Em geral	0,95	Barber (1957)
Massa específica (w)	CAP 50/70	2,600 g/cm <sup>3</sup>	Santos (2016)
	Asfalto-borracha	2,565 g/cm <sup>3</sup>	Santos (2016)

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Dessa forma, com os dados meteorológicos e as propriedades físicas das misturas, calculou-se a temperatura no centro de cada subcamada do revestimento asfáltico (Tabela 6) em cada intervalo de análise. Assim, o gradiente de temperatura na camada do revestimento foi estimado para cada intervalo de análise (06h-13h, 13h-20h e 20h-06h) em cada mês, para cada segmento monitorado, totalizando 108 perfis de temperatura (3x12x3).

Nas Tabelas 42, 43 e 44 são apresentadas as temperaturas calculadas no revestimento para o segmento 05, 03 e 04, respectivamente. Também são apresentadas as profundidades em que a temperatura foi calculada, correspondendo ao centro das subcamadas (conforme Figura 48).

Tabela 42 – Gradiente de temperatura (°C) no revestimento do Segmento 05.

Mês	Intervalo de análise	Profundidade calculada (cm)							
		1,02	3,06	5,09	7,13	9,17	11,2	13,2	15,3
JAN	06h-13h	41,7	38,1	35,5	33,5	32,2	31,4	31,0	30,9
	13h-20h	44,2	43,8	43,0	41,9	40,7	39,4	38,2	37,2
	20h-06h	16,2	19,9	23,2	26,0	28,4	30,4	31,9	33,1
FEV	06h-13h	44,3	40,3	37,3	35,1	33,7	32,8	32,4	32,3
	13h-20h	44,9	44,6	43,8	42,7	41,4	40,2	38,9	37,8
	20h-06h	16,2	20,3	24,0	27,3	30,0	32,1	33,8	35,1
MAR	06h-13h	38,2	34,9	32,5	30,8	29,6	28,9	28,5	28,5
	13h-20h	40,9	40,6	39,8	38,8	37,7	36,6	35,5	34,5
	20h-06h	15,1	18,4	21,4	24,0	26,2	27,9	29,3	30,3
ABR	06h-13h	34,2	31,4	29,3	27,7	26,7	26,1	25,8	25,8
	13h-20h	37,5	37,2	36,5	35,6	34,6	33,6	32,6	31,8
	20h-06h	13,9	16,9	19,5	21,8	23,7	25,2	26,4	27,3
MAI	06h-13h	28,5	26,1	24,2	22,9	22,1	21,5	21,3	21,2
	13h-20h	33,1	32,8	32,1	31,3	30,4	29,5	28,6	27,8
	20h-06h	11,0	13,5	15,7	17,7	19,3	20,6	21,6	22,4
JUN	06h-13h	22,8	20,9	19,5	18,5	17,8	17,4	17,2	17,2
	13h-20h	27,7	27,5	27,0	26,3	25,6	24,8	24,1	23,5
	20h-06h	8,7	10,6	12,2	13,7	14,9	15,9	16,7	17,3
JUL	06h-13h	22,9	21,1	19,7	18,6	18,0	17,6	17,4	17,4
	13h-20h	27,0	26,8	26,3	25,7	25,0	24,3	23,6	23,0
	20h-06h	8,9	10,8	12,5	14,0	15,2	16,2	17,0	17,6
AGO	06h-13h	26,9	24,5	22,7	21,4	20,5	20,0	19,7	19,6
	13h-20h	30,3	30,2	29,7	29,0	28,2	27,3	26,6	25,8
	20h-06h	9,1	11,4	13,5	15,3	16,9	18,1	19,1	19,9
SET	06h-13h	31,9	28,9	26,7	25,1	24,0	23,4	23,0	22,9
	13h-20h	35,3	35,0	34,3	33,4	32,3	31,2	30,2	29,3
	20h-06h	10,2	13,1	15,6	17,9	19,8	21,3	22,5	23,4
OUT	06h-13h	33,7	30,8	28,5	26,9	25,8	25,1	24,7	24,6
	13h-20h	35,9	35,7	35,0	34,1	33,2	32,1	31,1	30,2
	20h-06h	12,0	14,9	17,5	19,9	21,8	23,4	24,7	25,6
NOV	06h-13h	38,3	34,8	32,2	30,3	29,0	28,2	27,7	27,6
	13h-20h	40,0	39,7	39,0	38,0	36,9	35,7	34,6	33,5
	20h-06h	12,6	16,1	19,3	22,0	24,4	26,3	27,8	28,9
DEZ	06h-13h	40,5	37,0	34,3	32,4	31,0	30,2	29,8	29,7
	13h-20h	42,1	41,8	41,1	40,0	38,9	37,7	36,5	35,5
	20h-06h	14,8	18,4	21,8	24,6	27,1	29,0	30,6	31,7

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Tabela 43 – Gradiente de temperatura (°C) no revestimento do Segmento 03.

Mês	Intervalo de análise	Profundidade calculada (cm)								
		0,95	2,85	4,75	6,65	8,55	10,4	12,3	14,2	16,1
JAN	06h-13h	41,8	38,4	35,9	33,9	32,6	31,7	31,2	31,0	30,9
	13h-20h	44,2	43,9	43,2	42,2	41,1	39,9	38,9	37,8	36,8
	20h-06h	16,0	19,5	22,6	25,4	27,8	29,7	31,2	32,4	33,4
FEV	06h-13h	44,4	40,6	37,7	35,6	34,1	33,1	32,6	32,3	32,3
	13h-20h	44,9	44,7	44,0	43,0	41,8	40,6	39,5	38,4	37,4
	20h-06h	16,0	19,9	23,5	26,6	29,2	31,4	33,0	34,4	35,4
MAR	06h-13h	38,3	35,2	32,9	31,1	29,9	29,1	28,7	28,5	28,5
	13h-20h	40,9	40,6	40,0	39,1	38,1	37,0	36,1	35,1	34,2
	20h-06h	15,0	18,1	20,9	23,4	25,5	27,3	28,6	29,7	30,6
ABR	06h-13h	34,3	31,6	29,6	28,1	27,0	26,3	25,9	25,8	25,8
	13h-20h	37,5	37,3	36,7	35,9	34,9	34,0	33,1	32,3	31,5
	20h-06h	13,8	16,6	19,1	21,3	23,1	24,7	25,9	26,8	27,6
MAI	06h-13h	28,6	26,3	24,5	23,2	22,3	21,7	21,4	21,2	21,2
	13h-20h	33,1	32,8	32,3	31,5	30,7	29,8	29,1	28,3	27,6
	20h-06h	10,9	13,3	15,4	17,3	18,9	20,2	21,2	22,0	22,6
JUN	06h-13h	22,9	21,1	19,7	18,7	18,0	17,5	17,3	17,2	17,2
	13h-20h	27,7	27,5	27,1	26,5	25,8	25,1	24,5	23,9	23,3
	20h-06h	8,6	10,4	12,0	13,4	14,6	15,5	16,3	16,9	17,4
JUL	06h-13h	23,0	21,2	19,9	18,9	18,2	17,7	17,5	17,4	17,4
	13h-20h	27,0	26,8	26,4	25,8	25,2	24,5	24,0	23,4	22,8
	20h-06h	8,9	10,7	12,3	13,7	14,9	15,9	16,6	17,3	17,8
AGO	06h-13h	27,0	24,7	23,0	21,7	20,8	20,2	19,8	19,6	19,6
	13h-20h	30,3	30,2	29,8	29,1	28,4	27,6	27,0	26,3	25,6
	20h-06h	9,0	11,2	13,2	14,9	16,4	17,7	18,7	19,5	20,1
SET	06h-13h	32,0	29,2	27,0	25,4	24,3	23,6	23,1	22,9	22,9
	13h-20h	35,3	35,1	34,4	33,6	32,6	31,6	30,7	29,8	29,0
	20h-06h	10,1	12,8	15,2	17,4	19,2	20,8	21,9	22,9	23,7
OUT	06h-13h	33,8	31,0	28,8	27,2	26,1	25,3	24,8	24,6	24,6
	13h-20h	35,9	35,7	35,1	34,4	33,5	32,5	31,6	30,8	30,0
	20h-06h	11,9	14,6	17,1	19,3	21,3	22,9	24,1	25,1	25,9
NOV	06h-13h	39,6	36,2	33,5	31,5	30,1	29,2	28,7	28,5	28,4
	13h-20h	41,8	41,5	40,8	39,8	38,6	37,4	36,3	35,3	34,3
	20h-06h	13,0	16,6	19,8	22,6	25,1	27,1	28,6	29,9	30,8
DEZ	06h-13h	40,7	37,3	34,7	32,8	31,4	30,5	30,0	29,7	29,7
	13h-20h	42,1	41,9	41,2	40,3	39,3	38,1	37,1	36,1	35,2
	20h-06h	14,6	18,1	21,2	24,0	26,4	28,3	29,8	31,1	32,0

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

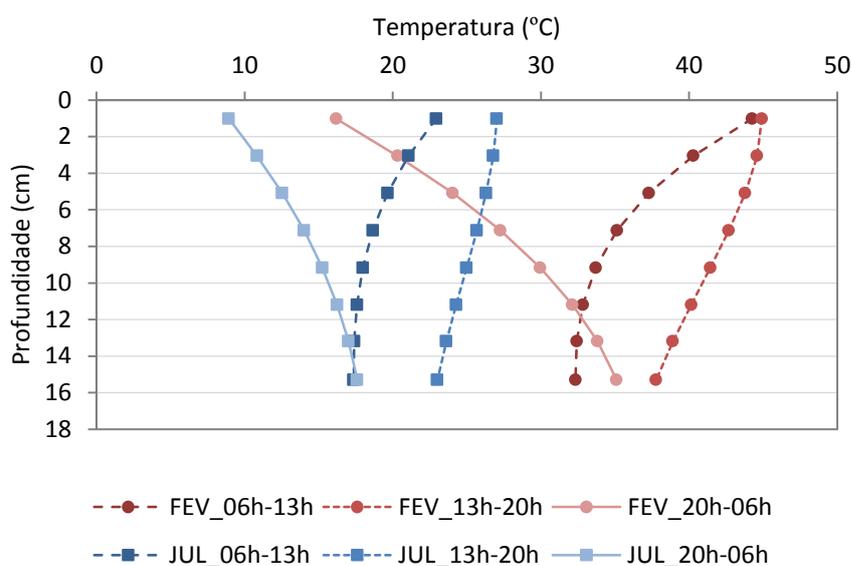
Tabela 44 – Gradiente de temperatura (°C) no revestimento do Segmento 04.

Mês	Intervalo de análise	Profundidade calculada (cm)							
		0,96	2,87	4,78	6,69	8,61	10,5	12,4	14,3
JAN	06h-13h	41,8	38,4	35,8	33,9	32,5	31,7	31,2	31,0
	13h-20h	44,2	43,9	43,1	42,2	41,0	39,9	38,7	37,6
	20h-06h	16,1	19,5	22,7	25,5	27,8	29,8	31,3	32,6
FEV	06h-13h	44,4	40,6	37,7	35,5	34,0	33,1	32,5	32,3
	13h-20h	44,9	44,7	43,9	42,9	41,8	40,6	39,4	38,3
	20h-06h	16,0	20,0	23,5	26,6	29,3	31,5	33,2	34,6
MAR	06h-13h	38,3	35,2	32,8	31,1	29,9	29,1	28,6	28,5
	13h-20h	40,9	40,6	40,0	39,1	38,0	37,0	35,9	35,0
	20h-06h	15,0	18,1	21,0	23,5	25,6	27,4	28,8	29,9
ABR	06h-13h	34,3	31,6	29,6	28,0	27,0	26,3	25,9	25,8
	13h-20h	37,5	37,3	36,6	35,8	34,9	34,0	33,0	32,2
	20h-06h	13,8	16,6	19,1	21,3	23,2	24,7	26,0	26,9
MAI	06h-13h	28,6	26,3	24,5	23,2	22,3	21,7	21,4	21,2
	13h-20h	33,1	32,8	32,3	31,5	30,7	29,8	29,0	28,2
	20h-06h	10,9	13,3	15,4	17,3	18,9	20,2	21,3	22,1
JUN	06h-13h	22,9	21,1	19,7	18,7	18,0	17,5	17,3	17,2
	13h-20h	27,7	27,5	27,0	26,4	25,8	25,1	24,4	23,8
	20h-06h	8,6	10,4	12,0	13,4	14,6	15,6	16,4	17,0
JUL	06h-13h	23,0	21,2	19,8	18,8	18,1	17,7	17,5	17,4
	13h-20h	27,0	26,8	26,4	25,8	25,2	24,5	23,9	23,3
	20h-06h	8,9	10,7	12,3	13,7	14,9	15,9	16,7	17,4
AGO	06h-13h	26,9	24,7	23,0	21,7	20,8	20,1	19,8	19,6
	13h-20h	30,3	30,2	29,7	29,1	28,4	27,6	26,9	26,2
	20h-06h	9,0	11,2	13,2	15,0	16,5	17,7	18,8	19,6
SET	06h-13h	32,0	29,2	27,0	25,4	24,3	23,5	23,1	22,9
	13h-20h	35,3	35,1	34,4	33,6	32,6	31,6	30,6	29,7
	20h-06h	10,1	12,8	15,3	17,4	19,3	20,8	22,1	23,0
OUT	06h-13h	33,8	31,0	28,8	27,2	26,0	25,3	24,8	24,6
	13h-20h	35,9	35,7	35,1	34,3	33,4	32,5	31,5	30,6
	20h-06h	11,9	14,6	17,2	19,4	21,3	22,9	24,2	25,2
NOV	06h-13h	39,6	36,1	33,5	31,5	30,1	29,2	28,7	28,5
	13h-20h	41,8	41,5	40,7	39,7	38,6	37,4	36,2	35,1
	20h-06h	13,0	16,6	19,9	22,7	25,1	27,1	28,8	30,0
DEZ	06h-13h	40,7	37,3	34,7	32,7	31,3	30,5	29,9	29,7
	13h-20h	42,1	41,9	41,2	40,3	39,2	38,1	37,0	36,0
	20h-06h	14,6	18,1	21,3	24,1	26,4	28,4	30,0	31,2

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Na Figura 120 são apresentados os gradientes de temperatura calculados para os três períodos do dia no revestimento do segmento 05 em fevereiro e em julho. Foram escolhidos estes meses por representarem os dois extremos de temperatura que ocorrem durante o ano, sendo fevereiro o mês mais quente e julho, o mais frio (conforme Figura 117).

Figura 120 – Gradiente de temperatura ao longo do dia no revestimento do segmento 05 nos meses de fevereiro e julho.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Nota-se que, com o modelo de Barber (1957), foi possível descrever a inversão de temperatura que ocorre no revestimento durante o dia e a noite, apontada por diversos autores (Motta (1979), Park *et al.* (2001), Chong *et al.* (2009) e Zheng *et al.* (2017)). No período das 06h às 20h, devido à exposição da superfície à radiação solar, a temperatura do revestimento foi maior quanto mais próximo da superfície. No entanto, no período das 20h às 06h ocorre comportamento inverso, quanto mais próximo da superfície, menor foi a temperatura calculada, como era esperado.

Além disso, pode-se observar que no mês de fevereiro a amplitude de variação de temperatura próximo a superfície do revestimento (29°C) é maior do que no mês de julho (18°C). Tal fato está relacionado com a maior radiação solar que o pavimento recebe nos meses de fevereiro (Tabela 40).

### 4.5.3 Influência da temperatura na deformação de tração no revestimento

Para verificar a influência da temperatura na deformação de tração no revestimento, foram feitas simulações numéricas no *software* Viscoroute. Foram adotados os parâmetros da Tabela 3 para as camadas de base, sub-base e subleito. Na camada de revestimento, foram adotados os parâmetros da Tabela 4, de acordo com a mistura asfáltica utilizada em cada subcamada do revestimento dos segmentos monitorados. O carregamento considerado foi um semieixo do eixo padrão de 8,2 toneladas, conforme apresentado no esquema da Figura 44.

Para considerar a sazonalidade da temperatura da região, cada subcamada do revestimento asfáltico foi lançada na estrutura da simulação computacional com a respectiva temperatura calculada para o centro da mesma (Tabelas 42, 43 e 44). Ao informar a temperatura, o programa Viscoroute calcula o módulo de rigidez de cada subcamada a partir do modelo de Huet-Sayegh.

Foi determinada a deformação específica de tração na fibra inferior do revestimento nos segmentos 05 e 04 e, no segmento 03, na fibra inferior da mistura asfáltica convencional e da mistura asfáltica modificada. As Tabelas 45, 46 e 47 apresentam os resultados encontrados para os segmentos 05, 03 e 04, respectivamente. Nas tabelas estão destacadas as maiores e as menores deformações obtidas em cada segmento monitorado.

Em cada intervalo de análise, pode-se observar que a deformação específica de tração é cerca de duas vezes maior no mês de fevereiro do que no mês de junho, para todos os segmentos monitorados. Tal fato correlaciona-se com a distribuição de temperatura anual apresentada na Figura 117. Fevereiro corresponde ao mês com temperatura mais elevada e junho, com temperatura similar a julho, corresponde ao mês mais frio. Quanto maior a temperatura, maior a deformação de tração gerada no revestimento asfáltico, pois menor é o módulo de rigidez da mistura.

Nos segmentos 05 e 04, em fevereiro, no período das 13h às 20h, as deformações são aproximadamente três vezes maior do que as deformações que ocorrem no mês de junho, das 20h às 06h. O mesmo comportamento pode ser observado na deformação da mistura modificada do segmento 03. Na mistura convencional do segmento 03, a maior deformação também ocorre em fevereiro e a menor em junho, no entanto, em intervalos de análise diferentes.

Tabela 45 – Deformação específica de tração no segmento 05 com sazonalidade de temperatura ( $\times 10^{-6}$  mm/mm).

Mês	Deformação na fibra inferior da camada asfáltica		
	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Janeiro	116,25	160,04	102,82
Fevereiro	126,03	165,27	112,88
Março	101,53	138,80	90,51
Abril	88,14	118,99	79,58
Mai	71,44	96,67	65,60
Junho	60,52	78,04	55,59
Julho	60,90	76,23	56,19
Agosto	67,10	87,12	59,94
Setembro	77,91	105,02	67,43
Outubro	84,10	109,87	73,60
Novembro	98,29	131,86	83,80
Dezembro	109,19	146,39	95,87

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Tabela 46 – Deformação específica de tração no segmento 03 com sazonalidade de temperatura ( $\times 10^{-6}$  mm/mm).

Mês	Deformação na fibra inferior da mistura convencional			Deformação na fibra inferior da mistura modificada		
	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Janeiro	47,14	60,85	68,50	143,85	188,10	123,14
Fevereiro	48,33	61,01	76,59	155,32	192,78	132,71
Março	43,22	58,20	58,68	125,78	167,58	109,99
Abril	38,90	53,50	49,56	108,39	146,15	97,09
Mai	31,66	45,14	37,75	85,82	119,22	78,86
Junho	26,83	36,92	29,10	70,95	94,80	65,04
Julho	27,08	36,11	29,58	71,48	92,34	65,87
Agosto	29,41	41,43	33,08	79,86	106,88	71,12
Setembro	33,52	47,40	39,81	94,56	129,62	81,38
Outubro	36,25	50,11	44,94	102,94	135,46	89,50
Novembro	41,87	56,02	59,09	127,28	169,40	109,08
Dezembro	44,46	59,18	63,41	135,39	175,19	115,70

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Tabela 47 – Deformação específica de tração no segmento 04 com sazonalidade de temperatura ( $\times 10^{-6}$  mm/mm).

Mês	Deformação na fibra inferior da camada asfáltica		
	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Janeiro	123,29	170,58	107,02
Fevereiro	133,29	176,00	116,87
Março	108,10	148,58	94,79
Abril	94,18	127,78	83,90
Mai	76,70	104,14	69,72
Junho	65,18	84,23	59,50
Julho	65,57	82,27	60,12
Agosto	72,17	93,98	63,88
Setembro	83,53	113,19	71,45
Outubro	90,03	118,26	77,73
Novembro	109,36	150,49	93,99
Dezembro	116,11	156,54	99,97

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Pode-se verificar que também ocorrem variações na deformação específica de tração ao longo do dia. Nos segmentos 05 e 04 e na mistura modificada do segmento 03, a deformação durante a tarde (13h-20h) foi em torno de 50% maior do que à noite (20h-06h), em cada mês. Na mistura convencional do segmento 03 o comportamento foi distinto. Nos meses de novembro a março, a deformação durante à noite (20h-06h) foi cerca de 40% maior do que pela manhã (06h-13h) e nos meses de abril a outubro, a deformação a tarde (13h-20h) foi cerca de 40% maior do que durante a manhã (06h-13h).

Comparando as Tabelas 45 a 47, observa-se que a fibra inferior da camada de mistura modificada do segmento 03 foi a que apresentou maiores deformações ao longo do ano. Segundo Marcon (2016), a maior deformação obtida neste ponto de análise está relacionada com a menor rigidez da mistura asfalto-borracha observada nos estudos reológicos da mistura.

Pode-se notar, ainda, que o segmento 04 apresentou maiores deformações do que o segmento 05. Apesar de possuírem a mesma mistura asfáltica, o segmento 04 tem 1 cm a menos na espessura do revestimento. Tal fato levou a ocorrência de maiores deformações neste segmento.

Além das simulações considerando a sazonalidade de temperatura, foram realizadas simulações para temperatura constante. As deformações específicas de tração foram obtidas para os mesmos pontos, porém utilizando-se apenas as temperaturas nas quais os ensaios de fadiga foram realizados, ou seja, 15°C e 20°C. Os resultados obtidos nas simulações numéricas estão apresentados na Tabela 48.

Tabela 48 – Deformação específica de tração com temperatura constante.

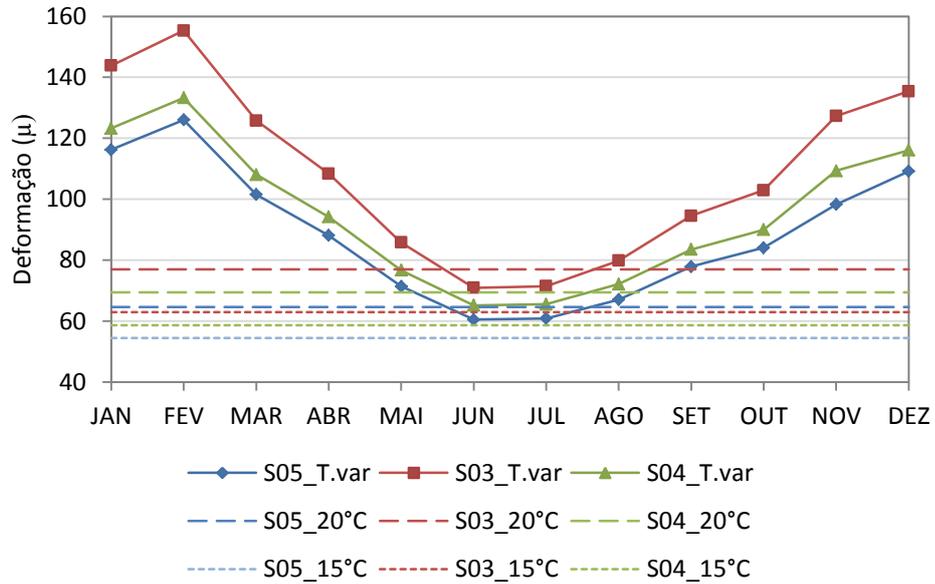
Segmento	Temperatura (°C)	Deformação na fibra inferior da mistura ( $\mu$ )	
		Convencional	Modificada
05	15	54,45	-
	20	64,68	-
03	15	25,61	63,02
	20	32,14	77,01
04	15	58,70	-
	20	69,50	-

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Nas Figuras 121, 122 e 123 são apresentadas as deformações obtidas nas simulações com 15°C, 20°C e com sazonalidade de temperatura (T.var) para os três períodos de análise: 06h – 13h, 13h – 20h e 20h – 06h, respectivamente. Nos gráficos, são apresentados os resultados obtidos na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico dos três segmentos monitorados.

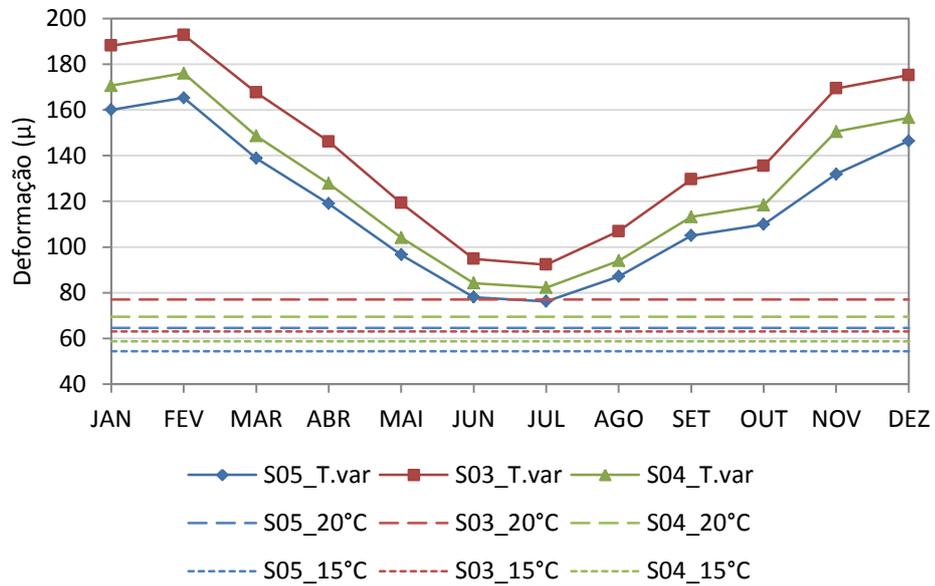
Pode-se observar que, com a temperatura constante de 15°C, as deformações são menores do que a mínima atingida com a sazonalidade da temperatura. Apenas nos meses de junho e julho, no período das 20 h às 06 h (Figura 123), a curva de deformação com sazonalidade de temperatura atingiu valores próximos a curva de deformação com temperatura de 15°C. Dessa forma, verifica-se que a deformação seria subestimada ao se utilizar temperatura constante de 15°C nas simulações computacionais pois, em campo, na região de Araranguá, a temperatura no revestimento estaria acima desta, gerando maiores deformações.

Figura 121 – Deformação específica de tração no período das 06h – 13h.



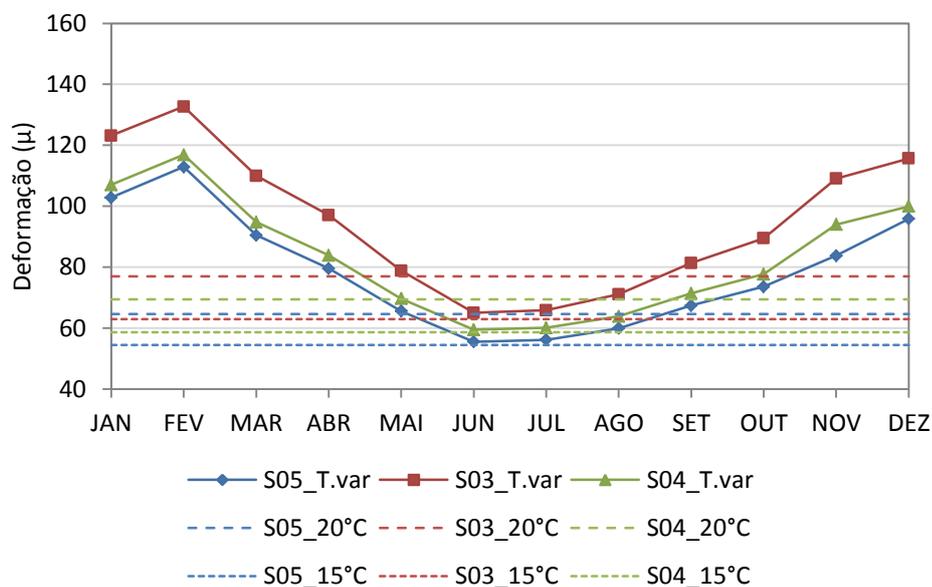
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 122 – Deformação específica de tração no período das 13h – 20h.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 123 – Deformação específica de tração no período das 20h – 06h.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

As deformações obtidas nas simulações com temperatura de 20°C também ficaram abaixo das deformações considerando a sazonalidade de temperatura na maioria dos meses do ano, nos três períodos do dia analisados. Na Figura 121, observa-se que, no período das 06h às 13h, apenas os meses de junho, julho e agosto poderiam ser retratados com a temperatura de 20°C, pois as deformações com sazonalidade ficaram próximas às deformações com temperatura de 20°C nestes meses.

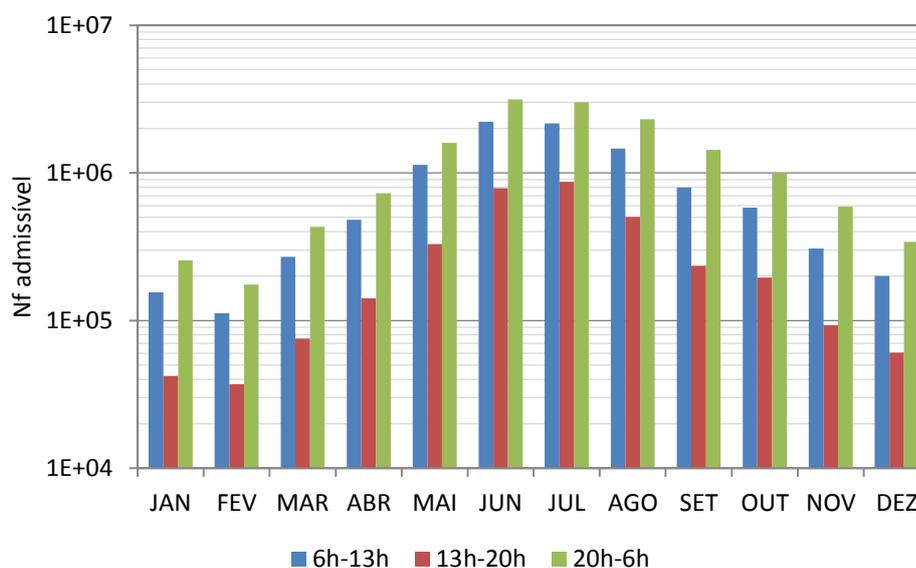
No entanto, para o período das 13h às 20h (Figura 122) nenhum mês do ano poderia ser retratado com a temperatura de 20°C, sendo maiores as deformações com sazonalidade de temperatura inclusive para os meses mais frios. No período da noite, das 20h às 06h (Figura 123), os meses de maio, agosto e setembro poderiam ser caracterizados com temperatura de 20°C. Para os demais meses do ano e períodos do dia, observa-se que a deformação obtida com 20°C não estaria representando a deformação que ocorre com a sazonalidade da temperatura da região.

#### 4.5.4 Variação da estimativa de vida útil ao longo do ano em função da temperatura

A vida útil foi estimada em termos de número de solicitações de tráfego ( $N_{8,2t}$ ) para a ruptura obtida através da aplicação dos modelos de fadiga apresentados na Tabela 7. Utilizou-se as curvas de fadiga de 20°C, visto que no pavimento, a maior parte das temperaturas calculadas se encontra acima deste valor.

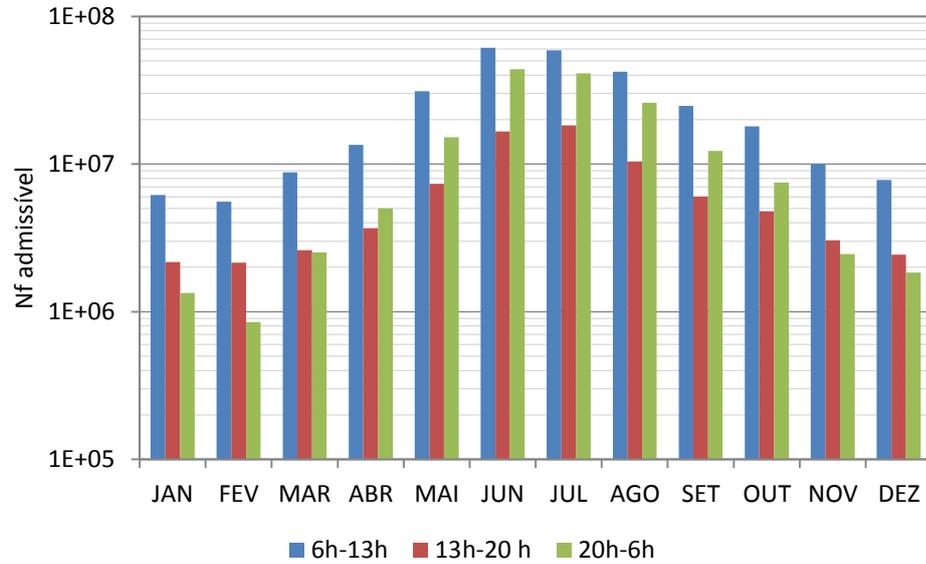
Os resultados obtidos para número de solicitações para a ruptura estão dispostos no Apêndice E. As Figuras de 124 a 127 apresentam a variação da estimativa de vida útil ( $N_f$  admissível) ao longo do ano em cada intervalo de análise para o segmento 05, mistura convencional do segmento 03, mistura modificada do segmento 03 e segmento 04, respectivamente. O  $N_f$  admissível varia em função do período do dia, visto que a temperatura na camada do revestimento e, conseqüentemente, a deformação obtida em cada período também varia.

Figura 124 – Variação do  $N_f$  admissível ao longo do ano no segmento 05.



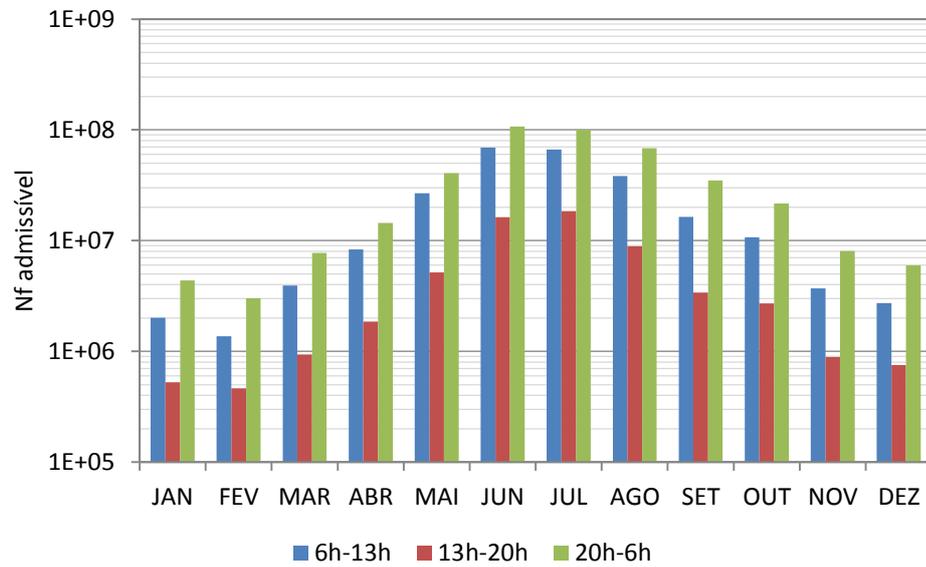
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 125 – Variação do  $N_f$  admissível ao longo do ano na mistura convencional do segmento 03.



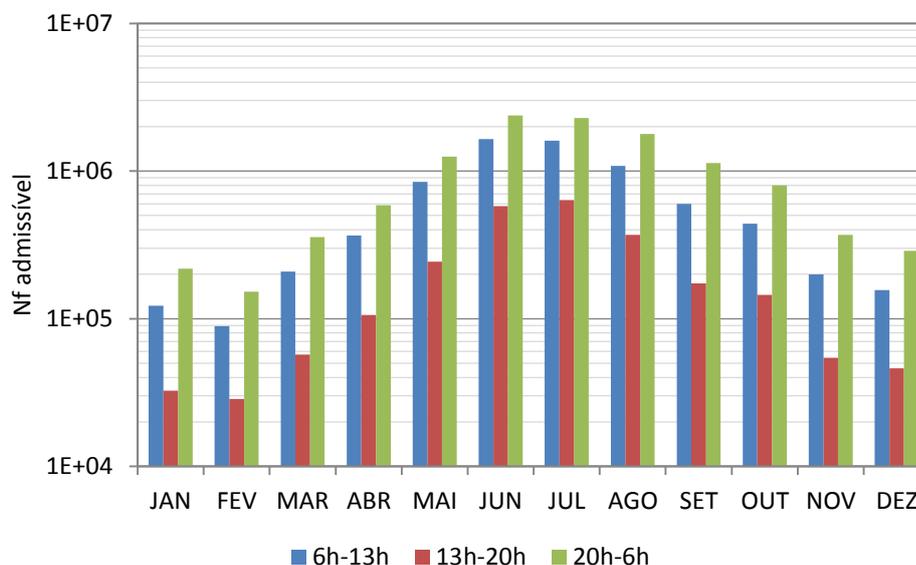
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 126 – Variação do  $N_f$  admissível ao longo do ano na mistura modificada do segmento 03.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 127 – Variação do  $N_f$  admissível ao longo do ano no segmento 04.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Analisando as Figuras 124, 125, 126 e 127, pode-se observar que o  $N_f$  admissível é maior nos meses com temperatura mais amena. Tal fato ocorre devido ao aumento na rigidez do revestimento asfáltico nestes meses do ano, levando a menores deformações e, conseqüentemente, a maior vida de fadiga do revestimento. O efeito contrário acontece nos meses mais quentes. A mistura asfáltica se deforma mais devido à queda da rigidez causada pelo aumento da temperatura, que induz a uma menor vida de fadiga neste período.

Além disso, para os segmentos 05 e 04 e para a mistura modificada do segmento 03, observa-se que o período da noite (20h – 06h) apresentou maior  $N_f$  admissível do que os outros dois períodos do dia analisados. Essa diferença ocorre pois, de maneira geral, neste intervalo de tempo em que a temperatura é mais amena, a rigidez da mistura aumenta, diminuindo a deformação de tração no revestimento e aumentando o número de solicitações necessárias para levar ao trincamento por fadiga da mistura. No período da tarde (13h – 20h) ocorreu o efeito oposto. Por ser o período mais quente do dia, as deformações aumentam e o  $N_f$  admissível é menor.

Conforme a distribuição de tráfego da região (Tabela 37), nota-se que no período da noite ocorre o menor volume de tráfego e no período da tarde, o maior. Verifica-se, então, que o volume de tráfego é maior no período do dia em que a deformação na fibra inferior do

revestimento asfáltico é maior, o que pode intensificar o processo de trincamento no revestimento.

Pode-se observar, ainda, que para a mistura convencional do segmento 03 o comportamento foi distinto (Figura 125). De novembro a março, o período da noite (20h – 06h) foi o que apresentou menor  $N_f$  admissível e, de abril e outubro, o período da tarde (13h – 20h) foi o que apresentou menor  $N_f$  admissível. Assim, conclui-se que em meses com temperatura mais elevada, a mistura convencional apresentaria menor resistência a fadiga durante à noite e, em meses com temperatura mais amena, a mistura apresentaria menor resistência no período da tarde. Tal diferença pode estar relacionada a maior amplitude de variação de temperatura que ocorre dentro da camada nos meses mais quentes, conforme apresentado na Figura 120.

Observa-se, ainda, que para as duas misturas asfálticas do segmento 03 (Figura 125 e Figura 126) o  $N_f$  admissível atingiu ordem de grandeza de  $10^7$  e  $10^8$ , enquanto que os segmentos 05 (Figura 124) e 04 (Figura 127) chegam apenas até  $10^6$ , no ponto mais alto. Como a diferença entre as estruturas dos segmentos se dá apenas na camada de revestimento asfáltico, pode-se afirmar que o melhor desempenho à fadiga do segmento 03 está relacionado com a mistura asfáltica modificada BMP utilizada na parte inferior da camada.

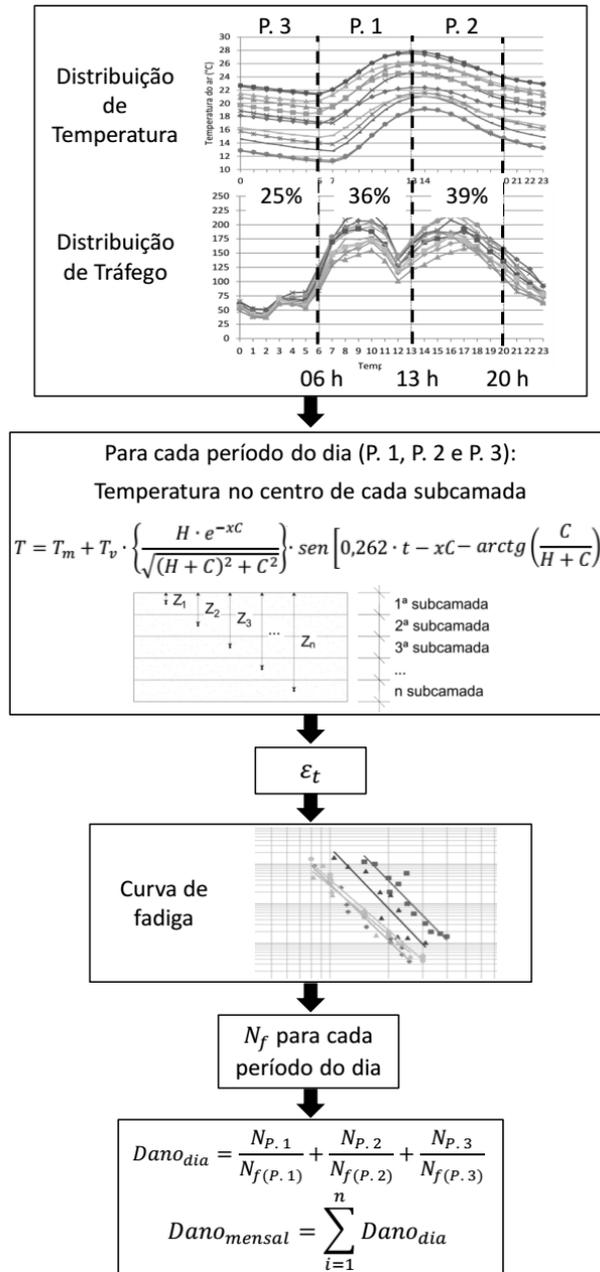
#### **4.5.5 Estimativa de dano acumulado no período de projeto**

Com o número de repetições para atingir a ruptura e a porcentagem de tráfego referente a cada período (Tabela 38), foi possível estimar o dano acumulado na estrutura no período de projeto, a partir da hipótese de Miner (Equação (1)). Para o acúmulo do dano, considerou-se que o pavimento não teria nenhum tipo de manutenção ao longo da vida de serviço, ou seja, estaria apenas sofrendo deterioração. A Figura 128 apresenta um resumo geral do procedimento utilizado para o acúmulo de dano na estrutura.

Primeiramente, foi determinado o número e a duração dos intervalos de análise dentro do dia típico de cada mês, ou seja, o dia com as temperaturas médias horárias de cada mês. Para cada intervalo de análise foi estimada a temperatura nas subcamadas do revestimento asfáltico, para cada segmento monitorado. Estas temperaturas foram inseridas no Viscoroute para determinar a deformação específica de tração na fibra inferior do

revestimento. Com as curvas de fadiga das misturas asfálticas e a deformação de tração, foi estimado o número de solicitações para ruptura em cada intervalo de análise. Utilizando o tráfego diário e o número de solicitações para ruptura, estimou-se o dano acumulado no período de projeto. Os resultados obtidos estão apresentados no Apêndice F.

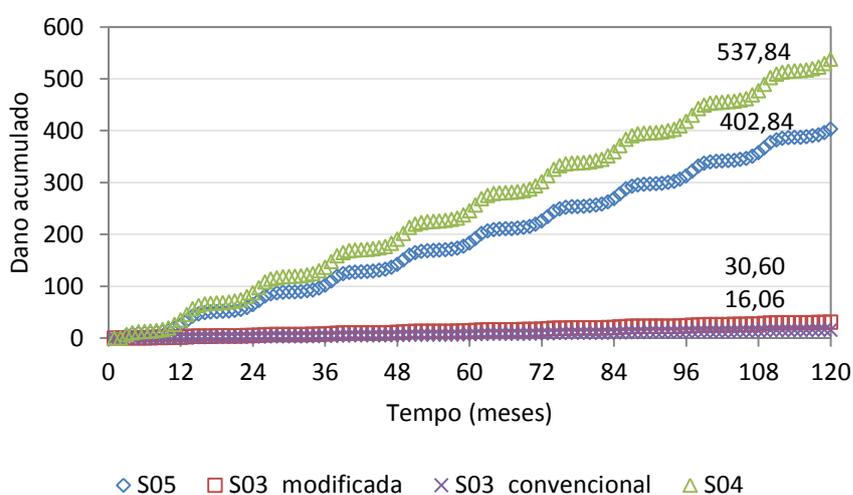
Figura 128 – Resumo do procedimento de cálculo do dano.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

A Figura 129 apresenta o dano acumulado considerando a sazonalidade de temperatura nos três segmentos monitorados. O dano foi calculado na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico e acumulado ao longo do período de projeto. Para o segmento 03, também foi calculado o dano acumulado na fibra inferior da mistura convencional. Dano acumulado maior que 1 indica que o revestimento já teria atingido a ruptura por fadiga. Observa-se que o dano acumulado atingido no final do período de projeto é significativamente maior do que 1, indicando que o tráfego atuante é muito maior do que o admissível.

Figura 129 – Dano acumulado com sazonalidade de temperatura no período de projeto.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

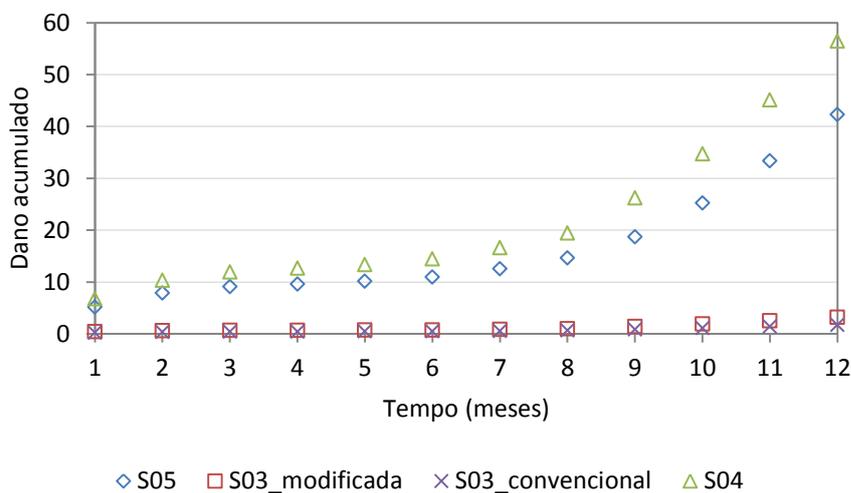
Pode-se notar, ainda, que no final do período de projeto, o dano acumulado da mistura modificada foi maior do que o dano acumulado na mistura convencional, o que indica que a mistura modificada se romperia primeiro.

Observando a Figura 129, fica evidente que o dano acumulado no segmento 03 é significativamente menor do que nos segmentos 05 e 04. No final do período de projeto, o dano acumulado no segmento 05 é aproximadamente 13 vezes maior do que na mistura modificada do segmento 03. No segmento 04, o dano acumulado após 10 anos é cerca de 18 vezes maior do que na mistura modificada do segmento 03.

Ao longo do período de projeto, nota-se que o crescimento do dano acumulado não ocorre precisamente de forma linear, sendo mais rápido em determinados períodos. Na Figura

130 é possível visualizar este comportamento a partir da verificação do dano acumulado nos 12 meses iniciais.

Figura 130 – Dano acumulado com sazonalidade de temperatura nos 12 meses iniciais.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

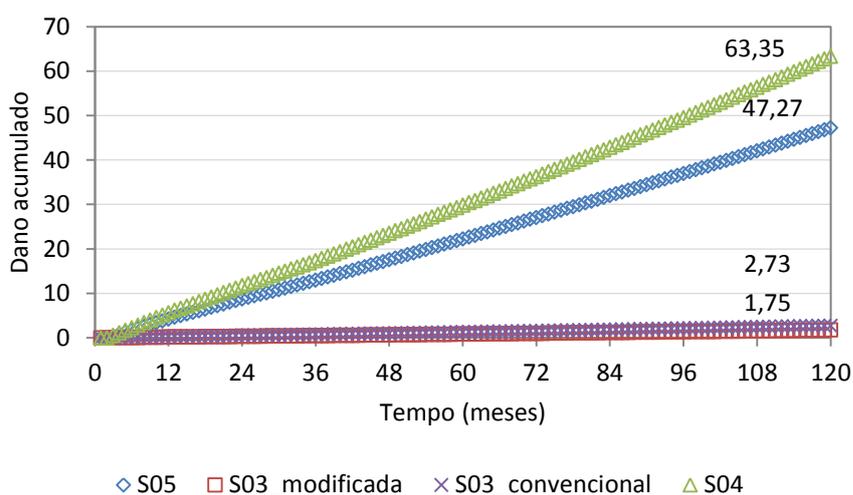
Pode-se observar que a taxa de crescimento do dano acumulado varia em cada mês, gerando diferentes inclinações no gráfico. Esta variação ocorre em consequência da sazonalidade de temperatura incorporada nas análises de dano. Vale destacar que o mês 1 indicado no gráfico corresponde ao dano calculado para a temperatura e o tráfego do mês de março de 2014, pois os segmentos monitorados foram abertos ao tráfego neste mês do ano.

A Figura 131 apresenta o dano acumulado no período de projeto considerando apenas a temperatura de 20°C. Os resultados de dano acumulado estão dispostos no Apêndice F. Nota-se que, quando a sazonalidade de temperatura não é incorporada na análise do dano, a taxa de crescimento é contínua ao longo do período de projeto. O dano acumulado cresce linearmente.

Ao comparar a Figura 129 e a Figura 131, observa-se que o dano acumulado considerando a sazonalidade de temperatura da região chega a valores expressivamente maiores. Considerando a sazonalidade, os segmentos monitorados 05 e 04 apresentaram, no final do período de projeto, dano acumulado em torno de 8 vezes maior do que com a temperatura constante de 20°C. Para o segmento 03, na mistura modificada e na mistura

convencional, o dano acumulado com sazonalidade ficou cerca de 17 vezes e 6 vezes maior do que com 20°C, respectivamente. Tal fato evidencia a importância de se analisar a variação da temperatura no que se refere ao desempenho à fadiga.

Figura 131 – Dano acumulado no período de projeto com temperatura de 20°C.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

#### 4.5.6 Estimativa de vida útil para dano acumulado igual a 1

De acordo com a hipótese de Miner, dano acumulado igual a 1 indica que a estrutura atingiu a ruptura. Dessa forma, a vida útil do pavimento foi calculada encontrando o tráfego que levaria ao dano acumulado igual a 1.

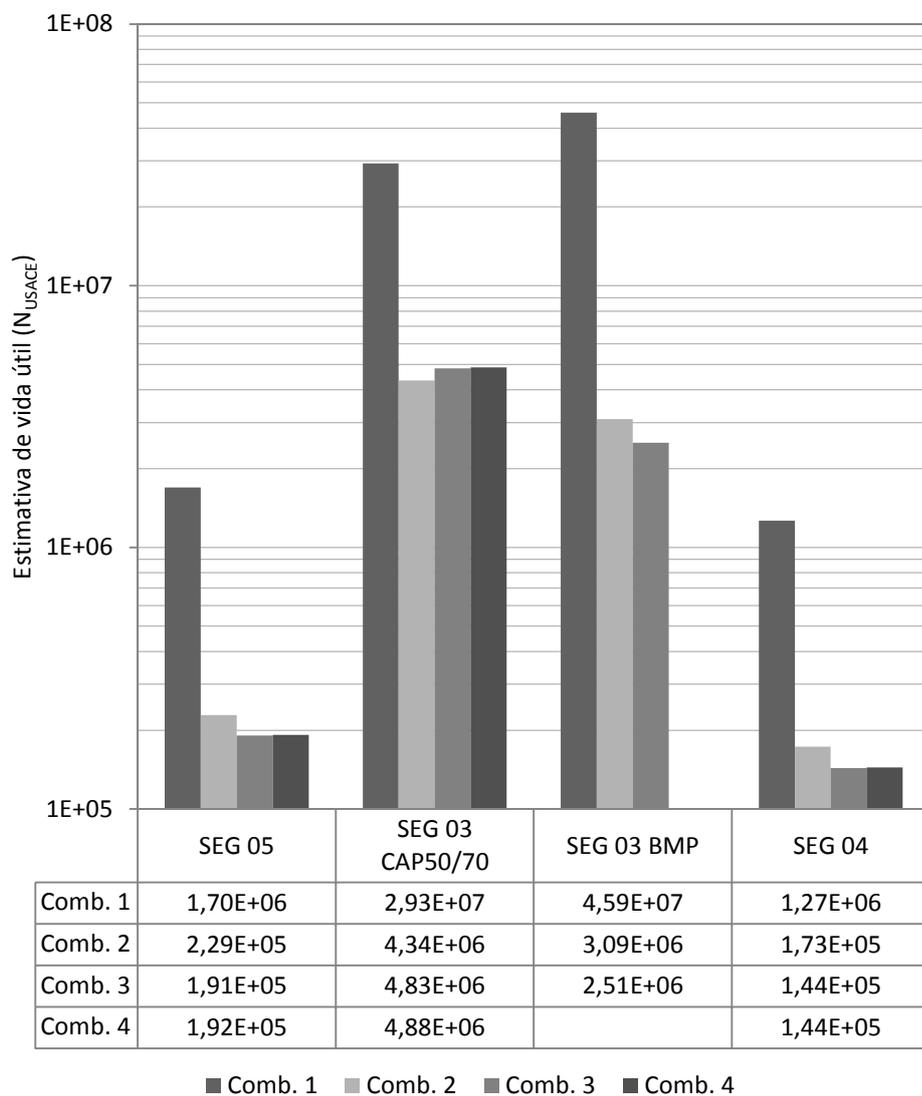
Para verificar a influência dos parâmetros adotados no acúmulo de dano, foi analisada a estimativa de vida útil dos segmentos monitorados em 4 combinações de dados, conforme apresentado no Quadro 3. Em cada combinação foi alterada a distribuição horária de tráfego, a temperatura do pavimento e a curva de fadiga.

Na combinação 1, foi considerado tráfego distribuído uniformemente ao longo do dia, temperatura constante de 20°C nas simulações numéricas e curva de fadiga obtida a 20°C. Na combinação 2, alterou-se a temperatura, considerando a sazonalidade estimada para cada intervalo de análise no ano. Na combinação 3, além da sazonalidade de temperatura, considerou-se também a distribuição do tráfego diário dentro dos intervalos de análise. Por fim, na combinação 4, além da curva de fadiga de 20°C utilizada em todas as combinações

anteriores, foi utilizada a curva de fadiga de 15°C para os intervalos de análise que apresentaram temperatura abaixo de 20°C.

A estimativa de vida útil para cada segmento monitorado é apresentada na Figura 132. Para o segmento 03, a estimativa de vida útil foi calculada na fibra inferior da mistura asfáltica convencional (CAP 50/70) e da mistura asfalto-borracha (BMP). O número de solicitações para a ruptura em cada combinação está apresentado no Apêndice G.

Figura 132 – Estimativa de vida útil a partir do dano acumulado.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Vale destacar que não foi possível realizar a combinação 4 para a mistura asfáltica modificada por borracha do segmento 03. Nesta combinação, a curva de fadiga de 15°C seria utilizada para temperaturas do pavimento abaixo de 20°C. No entanto, tem-se apenas a curva de fadiga à 20°C para a mistura asfáltica modificada.

Nota-se que a combinação 1 foi a que apresentou maior estimativa de vida útil. Nesta combinação, o tráfego e a temperatura foram considerados constantes ao longo do ano. Tal fato indica que o pavimento dimensionado nas condições adotadas seria subdimensionado, pois em campo ocorre a sazonalidade destes fatores.

Pode-se observar também que a estimativa de vida útil diminuiu na combinação 2 para os três segmentos monitorados. Esta redução indica que o dano previsto é maior com o aumento do refinamento dos dados de temperatura, pois na combinação 2 introduziu-se a temperatura sazonal. Em relação à combinação 1, na combinação 2 houve redução de 86,5% na estimativa de vida útil do segmento 05, 85,2% na mistura convencional do segmento 03, 93,3% na mistura modificada do segmento 03 e 86,3% no segmento 04. Pode-se concluir que, utilizando a variação da temperatura nas análises, a estimativa de vida útil foi cerca de 85% a 90% menor do que a estimativa de vida útil com temperatura constante de 20°C.

Na combinação 3, com a introdução da distribuição horária do volume de tráfego, ocorreu redução na estimativa de vida útil para os segmentos 05 e 04 e para a mistura modificada do segmento 03. Em comparação com a combinação 2, a combinação 3 apresentou redução na estimativa de vida útil de 16,4% no segmento 05, 18,7% na mistura modificada do segmento 03 e 17,1% no segmento 04. Dessa forma, conclui-se que, quando o tráfego distribuído ao longo do dia é inserido nas análises, a estimativa de vida útil na fibra inferior da camada asfáltica é, em média, 17% menor do que a estimativa de vida útil com tráfego uniforme.

Esta redução ocorre no período do dia com maior volume de tráfego na região (Tabela 38) pois coincide com o período de maior deformação de tração na fibra inferior da camada asfáltica (Figuras 121, 122 e 123). Assim, 39% do volume de tráfego diário trafega na rodovia durante o período do dia em que o revestimento apresenta maior deformação de tração, reduzindo a vida útil do pavimento.

Entretanto, para a mistura convencional do segmento 03, observa-se que o comportamento foi distinto. Houve um aumento na estimativa de vida útil de 11,3% na

combinação 3 em relação à combinação 2. Tal fato ocorreu pois, para esta camada, nos meses de novembro a março, o período com maior deformação de tração foi o período da noite (20h-06h), que corresponde ao intervalo com menor porcentagem do tráfego diário. Assim, durante 5 meses do ano, o período do dia com maior deformação sofreu a menor porcentagem de tráfego, favorecendo a vida de fadiga nesta camada.

Observa-se, ainda, que a queda na estimativa de vida útil foi significativamente maior para a combinação na qual foi inserida a variação de temperatura (combinação 2) do que com a inclusão de distribuição de volume de tráfego horário (combinação 3). Verifica-se então que a variação de temperatura tem maior influência na estimativa de vida útil do que a variação horária de tráfego para a região analisada. No entanto, para regiões com diferente distribuição de volume de tráfego e de temperatura o comportamento pode ser distinto. Quanto maior a correlação entre os picos de volume de tráfego e de temperatura ao longo do dia, maior será a influência da inclusão destes dados na estimativa de vida útil.

Os métodos empíricos utilizados para o dimensionamento de pavimentos brasileiros não levam em consideração a variação de temperatura local. De acordo com as análises realizadas, a não consideração da sazonalidade de temperatura pode provocar o trincamento precoce do pavimento em campo, ou seja, antes do período previsto em projeto. Destaca-se que regiões com diferente distribuição de temperatura podem apresentar diferença ainda mais expressiva na estimativa de vida útil, o que evidencia a importância de se analisar este fator no dimensionamento.

Por outro lado, a combinação 4 apresentou um aumento na estimativa de vida útil em relação à combinação 3. Para o segmento 05, o aumento foi de 0,5%. Na mistura convencional do segmento 03, o aumento foi de 1,0%. Similar ao segmento 05, no segmento 04 a estimativa de vida útil apresentou aumento de 0,4%. Logo, pode-se concluir que utilizando a curva de fadiga de 15°C nos intervalos que possuíam temperatura do revestimento abaixo de 20°C a estimativa de vida útil foi em torno de 0,5% a 1,0% maior do que a estimativa com apenas curva de fadiga de 20°C.

Nota-se que a diferença entre a estimativa de vida útil obtida na combinação 3 e na 4 foi notadamente pequena. Tal fato indica que o uso da curva de fadiga de 15°C nestas condições não alterou significativamente a previsão de dano, tendo pouca influência nas análises. No entanto, vale destacar que dentre as 36 temperaturas calculadas para a fibra

inferior do revestimento durante o ano (12 meses x 3 períodos do dia) apenas 6 ficaram abaixo de 20°C, ou seja, em apenas 17% das temperaturas calculadas. Dessa forma, a curva de 15°C foi utilizada somente 6 vezes no cálculo do dano em cada ano. Ressalta-se que em regiões que apresentam temperatura mais amena ao longo do ano, esta influência na vida útil pode ser mais significativa.

Ao se comparar os resultados obtidos para as duas subcamadas do segmento 03, nota-se que exceto na combinação 1, as outras combinações estudadas indicaram que a mistura modificada teria menor estimativa de vida útil do que a mistura convencional. Logo, pelas simulações realizadas, pode-se concluir que, em campo, a mistura modificada do segmento 03 se romperia primeiro do que a mistura convencional.

Pode-se observar, ainda, que nenhuma combinação atingiria o tráfego do período de projeto de  $8,02 \times 10^7 (N_{USACE})$  com a estimativa de vida útil a partir do dano acumulado. Entretanto, no cálculo de acúmulo de dano através da hipótese de Miner comparou-se o quanto da vida de fadiga prevista em ensaio laboratorial seria consumida pelas solicitações de tráfego em campo. Portanto, nesta análise inicial se tem uma estimativa de vida útil com fator campo/laboratório igual a 1.

#### **4.5.7 Relação entre o dano acumulado e o trincamento em campo**

A partir da porcentagem de área trincada medida em campo, buscou-se encontrar uma relação entre os valores medidos e o dano acumulado calculado. Nesta etapa, apenas o dano acumulado obtido nas combinações 1 e 3 foram utilizados. Estas combinações foram escolhidas pois buscou-se comparar a combinação com menor detalhamento de dados (combinação 1) com a de maior detalhamento (combinação 3). A combinação 4 não foi empregada como a combinação de maior detalhamento pois apresentou diferença pouco significativa em relação à combinação 3.

A Tabela 49 apresenta a porcentagem de área trincada (AT) medida na trilha de roda em cada levantamento e o respectivo dano acumulado calculado nas duas combinações. Para o segmento 03, foi utilizado o dano acumulado na camada de mistura convencional, pois na superfície desta camada que foram realizados os levantamentos de área trincada.

Tabela 49 – Porcentagem de área trincada medida na trilha de roda e dano acumulado com temperatura constante e temperatura sazonal.

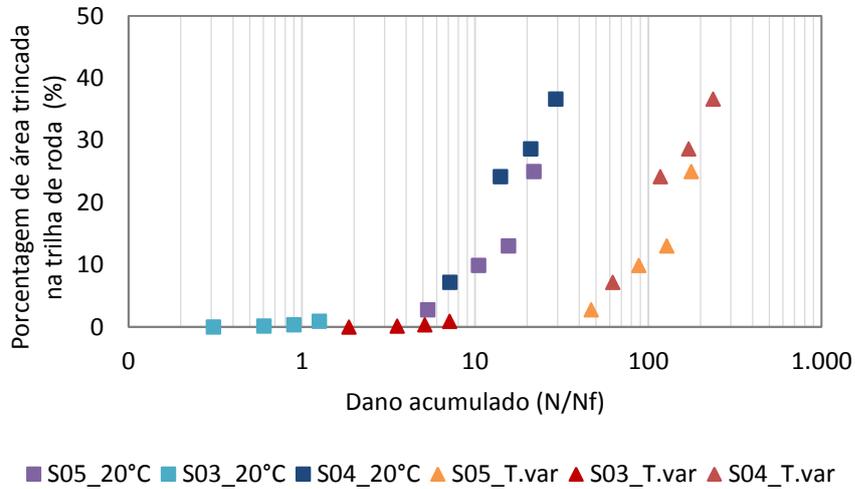
Meses de abertura ao tráfego		13	27	41	57
S05	AT (%)	2,75	9,87	13,01	24,95
	Dano c/ 20°C	5,35	10,49	15,63	21,87
	Dano c/ T.var	46,85	88,36	128,41	177,40
S03	AT (%)	0,00	0,13	0,32	0,89
	Dano c/ 20°C	0,31	0,61	0,90	1,26
	Dano c/ T.var	1,87	3,55	5,14	7,13
S04	AT (%)	7,14	24,17	28,60	36,60
	Dano c/ 20°C	7,17	14,06	20,94	29,31
	Dano c/ T.var	62,42	117,79	171,07	237,66

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Na Figura 133 é apresentada a porcentagem de área trincada medida na área da trilha de roda e o dano acumulado até o período de cada levantamento. Na Figura, é apresentado o dano com temperatura constante de 20°C (combinação 1) e o dano adotando a variação de temperatura e distribuição de tráfego diário da região (combinação 3) para os três segmentos monitorados.

Pode-se observar que ocorre um deslocamento horizontal entre as curvas. Assim, quando utilizado a variação de temperatura, se obteve dano acumulado maior para a mesma porcentagem de área trincada do que quando utilizada temperatura constante de 20°C.

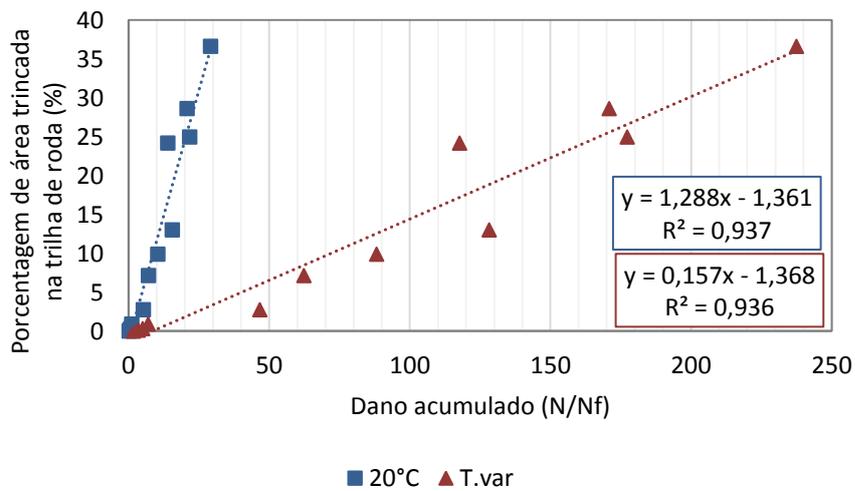
Figura 133 – Porcentagem de área trincada medida *versus* dano acumulado com variação de temperatura e com temperatura constante (20°C) em cada segmento.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

As regressões obtidas a partir dos dados de dano acumulado calculado e porcentagem de área trincada medida em campo são apresentadas na Figura 134. As regressões foram ajustadas com os dados dos três segmentos monitorados para dano acumulado com sazonalidade de temperatura e temperatura constante.

Figura 134 – Relação entre porcentagem de área trincada e dano acumulado com variação de temperatura e com temperatura constante.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Nota-se que há uma boa correlação entre o dano acumulado e a porcentagem de área trincada medida em campo. O melhor ajuste de regressão foi obtido com a função linear, apresentando  $R^2$  de 0,936 para o acúmulo de dano com variação de temperatura e de 0,937 para o dano com temperatura constante de 20°C.

#### 4.6 ETAPA 6 – RELAÇÃO ENTRE PORCENTAGEM DE ÁREA TRINCADA E DANO MÉDIO ACUMULADO

Visando um maior detalhamento do dano a partir dos resultados do ensaio de flexão 4 pontos e análise no Viscoroute, buscou-se determinar não apenas a deformação de tração na fibra inferior da camada, mas o dano médio na seção transversal do revestimento. Assim, foi utilizado procedimento similar ao adotado por Nascimento (2015), no qual é obtido o dano médio para uma malha de pontos embaixo do ponto de aplicação da carga.

A camada de revestimento asfáltico de cada segmento foi dividida em uma malha de pontos na direção vertical e horizontal embaixo do ponto de aplicação da carga, conforme ilustrado na Figura 49. A deformação específica foi calculada para cada ponto através do programa Viscoroute. Os quadros 10, 11 e 12 apresentam os resultados de deformação específica em cada ponto da malha no segmento 05 para cada mês. Os resultados obtidos para os segmentos 03 e 04 estão dispostos no apêndice H.

Nos quadros, os resultados negativos representam deformação de compressão e os positivos representam tração. Nota-se que nas profundidades próximas à superfície ocorreram apenas deformações de compressão.

Além disso, pode-se observar que ocorre uma variação na distribuição da deformação de tração dentro da camada ao longo do dia e ao longo do ano. No período mais frio do dia (20h - 06h) e nos meses com temperatura mais amena, há uma maior distribuição da deformação de tração dentro da camada. Por outro lado, nos períodos mais quentes e nos meses com temperatura mais elevada, ocorre uma maior concentração de deformação de tração na fibra inferior da camada asfáltica. Esta variação está relacionada ao aumento na rigidez da camada asfáltica com a diminuição da temperatura.

Quadro 10 – Deformação específica no segmento 05 em cada ponto da malha nos meses de janeiro a abril ( $\times 10^{-6}$  mm/mm).

Mês	JANEIRO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
2,04 cm	-122,51	-121,49	-109,81	-87,76	-165,22	-163,23	-146,23	-115,85	-41,66	-41,79	-38,24	-30,76
4,08 cm	-85,40	-82,12	-72,83	-61,52	-111,33	-103,69	-89,42	-78,49	-16,33	-15,03	-12,91	-12,51
6,11 cm	-52,68	-48,74	-42,43	-38,51	-68,79	-59,97	-49,85	-49,44	5,32	7,24	7,71	3,18
8,15 cm	-21,61	-18,38	-15,32	-16,78	-30,09	-23,12	-17,83	-23,30	24,50	26,23	24,97	17,13
10,19 cm	9,17	11,33	11,07	4,73	9,01	13,52	13,81	2,98	42,40	43,45	40,42	30,19
12,23 cm	41,33	42,38	38,74	27,14	51,91	54,30	49,51	31,69	60,30	60,60	55,79	43,24
14,26 cm	76,29	76,75	69,74	51,37	101,37	103,04	93,23	64,74	79,81	79,62	73,01	57,34
16,30 cm	116,25	117,35	107,04	78,96	160,04	163,59	149,02	104,01	102,82	102,87	94,48	73,77
Mês	FEVEREIRO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
2,04 cm	-140,40	-139,04	-125,27	-99,54	-172,82	-170,65	-152,69	-120,77	-41,80	-41,96	-38,37	-30,68
4,07 cm	-99,35	-95,48	-84,46	-70,77	-116,57	-108,20	-93,00	-81,86	-14,31	-12,91	-10,90	-10,99
6,11 cm	-62,93	-58,39	-50,79	-45,44	-72,55	-62,93	-52,08	-51,91	9,22	11,29	11,51	5,94
8,15 cm	-28,15	-24,41	-20,54	-21,37	-32,65	-25,09	-19,32	-25,11	29,99	31,81	30,12	20,92
10,18 cm	6,37	8,91	8,98	2,45	7,71	12,61	13,11	1,86	49,14	50,30	46,69	34,81
12,22 cm	42,36	43,66	39,88	27,26	52,26	54,90	50,08	31,52	68,09	68,42	62,90	48,54
14,26 cm	81,43	82,09	74,47	54,07	103,91	105,84	95,76	65,92	88,61	88,38	80,94	63,30
16,3 cm	126,03	127,45	116,09	84,57	165,27	169,31	154,29	106,87	112,88	112,89	103,52	80,54
Mês	MARÇO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
2,04 cm	-99,92	-99,24	-90,10	-72,61	-135,13	-133,71	-120,37	-96,17	-40,02	-40,11	-36,77	-29,78
4,07 cm	-68,39	-65,87	-58,68	-50,04	-90,24	-84,80	-73,87	-64,70	-17,47	-16,31	-14,22	-13,40
6,11 cm	-40,69	-37,58	-32,79	-30,26	-53,91	-47,52	-39,97	-39,45	1,79	3,49	4,15	0,69
8,15 cm	-14,49	-11,94	-9,78	-11,61	-20,73	-15,66	-11,99	-16,58	18,97	20,49	19,62	13,31
10,18 cm	11,41	13,09	12,55	6,79	12,58	15,82	15,48	6,26	35,18	36,09	33,65	25,24
12,22 cm	38,44	39,19	35,92	25,95	48,96	50,54	46,09	31,15	51,54	51,80	47,78	37,27
14,26 cm	67,88	68,12	62,09	46,67	90,23	91,13	82,57	59,23	69,46	69,29	63,67	50,31
16,3 cm	101,53	102,26	93,52	70,21	138,80	140,92	128,40	92,20	90,51	90,58	83,36	65,45
Mês	ABRIL											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
2,04 cm	-80,22	-79,80	-72,75	-59,11	-108,79	-107,85	-97,57	-78,60	-38,22	-38,30	-35,17	-28,66
4,07 cm	-53,69	-51,76	-46,27	-39,88	-71,67	-67,81	-59,55	-52,25	-18,16	-17,13	-15,09	-13,97
6,11 cm	-30,48	-28,04	-24,48	-23,06	-41,10	-36,46	-30,92	-30,63	-1,00	0,49	1,29	-1,31
8,15 cm	-8,62	-6,62	-5,16	-7,25	-13,09	-9,38	-6,91	-10,93	14,40	15,73	15,17	10,10
10,18 cm	12,94	14,24	13,53	8,33	14,92	17,27	16,56	8,70	29,05	29,85	27,90	20,99
12,22 cm	35,46	36,00	33,09	24,55	45,16	46,21	42,24	29,81	43,98	44,21	40,85	32,05
14,26 cm	60,03	60,14	55,00	42,10	79,18	79,63	72,37	53,38	60,38	60,24	55,46	44,07
16,3 cm	88,14	88,63	81,29	62,03	118,99	120,26	109,80	80,84	79,58	79,66	73,45	57,97

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Quadro 11 – Deformação específica no segmento 05 em cada ponto da malha nos meses de maio a agosto ( $\times 10^{-6}$  mm/mm).

Mês	MAIO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
2,04 cm	-59,50	-59,30	-54,32	-44,59	-82,38	-81,85	-74,47	-60,59	-34,69	-34,76	-32,00	-26,30
4,07 cm	-38,75	-37,42	-33,61	-29,32	-53,35	-50,81	-45,00	-39,65	-17,92	-17,09	-15,21	-13,87
6,11 cm	-20,67	-18,92	-16,52	-15,96	-29,09	-25,94	-22,16	-22,13	-3,52	-2,31	-1,45	-3,12
8,15 cm	-3,72	-2,23	-1,37	-3,44	-6,73	-4,11	-2,59	-6,00	9,51	10,59	10,33	6,67
10,18 cm	13,04	13,95	13,21	8,93	15,48	17,06	16,21	9,93	22,06	22,70	21,29	16,10
12,22 cm	30,49	30,83	28,45	21,74	39,24	39,88	36,60	26,91	34,95	35,12	32,54	25,75
14,26 cm	49,58	49,60	45,56	35,63	65,78	65,96	60,22	45,71	49,11	49,00	45,23	36,25
16,3 cm	71,45	71,74	66,06	51,39	96,67	97,37	89,22	67,43	65,60	65,69	60,72	48,31
Mês	JUNHO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
2,04 cm	-46,63	-46,54	-42,79	-35,37	-61,15	-60,91	-55,71	-45,71	-32,13	-32,19	-29,70	-24,58
4,07 cm	-29,55	-28,56	-25,72	-22,66	-38,62	-36,97	-32,97	-29,21	-17,68	-16,98	-15,23	-13,77
6,11 cm	-14,72	-13,38	-11,65	-11,56	-19,56	-17,42	-14,92	-15,18	-5,25	-4,22	-3,34	-4,38
8,15 cm	-0,88	0,28	0,80	-1,18	-1,98	-0,19	0,65	-2,24	6,10	7,01	6,95	4,23
10,18 cm	12,79	13,49	12,75	9,06	15,45	16,52	15,62	10,56	17,13	17,67	16,62	12,60
12,22 cm	27,03	27,27	25,25	19,66	33,86	34,25	31,57	23,99	28,54	28,69	26,64	21,21
14,26 cm	42,63	42,61	39,28	31,17	54,32	54,35	49,87	38,78	41,07	40,99	37,92	30,57
16,3 cm	60,52	60,71	56,09	44,22	78,05	78,43	72,17	55,77	55,59	55,68	51,58	41,27
Mês	JULHO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
2,04 cm	-46,88	-46,80	-43,02	-35,55	-59,06	-58,84	-53,85	-44,22	-32,35	-32,41	-29,90	-24,73
4,07 cm	-29,70	-28,70	-25,85	-22,77	-37,15	-35,58	-31,75	-28,15	-17,75	-17,04	-15,28	-13,82
6,11 cm	-14,78	-13,42	-11,68	-11,60	-18,60	-16,56	-14,18	-14,47	-5,19	-4,16	-3,27	-4,35
8,15 cm	-0,85	0,32	0,84	-1,16	-1,51	0,22	1,00	-1,86	6,26	7,18	7,11	4,34
10,18 cm	12,90	13,60	12,86	9,13	15,44	16,47	15,57	10,62	17,39	17,93	16,87	12,78
12,22 cm	27,23	27,47	25,43	19,80	33,33	33,70	31,08	23,69	28,89	29,04	26,96	21,46
14,26 cm	42,92	42,89	39,54	31,37	53,20	53,22	48,86	38,09	41,53	41,45	38,34	30,90
16,3 cm	60,90	61,10	56,44	44,49	76,23	76,59	70,50	54,61	56,19	56,28	52,13	41,69
Mês	AGOSTO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
2,04 cm	-55,01	-54,85	-50,31	-41,41	-70,50	-70,14	-63,99	-52,30	-32,82	-32,89	-30,32	-25,01
4,07 cm	-35,66	-34,46	-30,99	-27,11	-44,92	-42,87	-38,09	-33,70	-17,42	-16,68	-14,90	-13,54
6,11 cm	-18,79	-17,20	-15,03	-14,58	-23,43	-20,83	-17,79	-18,03	-4,18	-3,09	-2,24	-3,58
8,15 cm	-3,00	-1,64	-0,88	-2,85	-3,67	-1,49	-0,39	-3,62	7,86	8,83	8,66	5,51
10,18 cm	12,63	13,46	12,74	8,74	15,99	17,29	16,37	10,66	19,50	20,08	18,86	14,31
12,22 cm	28,91	29,21	26,98	20,75	36,82	37,32	34,33	25,70	31,49	31,65	29,36	23,33
14,26 cm	46,72	46,72	42,97	33,78	60,09	60,17	55,08	42,36	44,65	44,56	41,18	33,13
16,3 cm	67,11	67,36	62,10	48,54	87,12	87,65	80,48	61,55	59,94	60,02	55,56	44,36

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Quadro 12 – Deformação específica no segmento 05 em cada ponto da malha nos meses de setembro a dezembro ( $\times 10^{-6}$  mm/mm).

Mês	SETEMBRO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
2,04 cm	-69,64	-69,33	-63,36	-51,79	-94,31	-93,57	-84,90	-68,85	-34,25	-34,33	-31,60	-25,93
4,07 cm	-46,44	-44,85	-40,23	-34,82	-62,04	-58,92	-52,00	-45,71	-17,18	-16,35	-14,52	-13,29
6,11 cm	-26,11	-24,08	-21,10	-19,92	-35,26	-31,48	-26,88	-26,54	-2,50	-1,28	-0,50	-2,35
8,15 cm	-6,93	-5,27	-4,08	-5,90	-10,60	-7,58	-5,59	-8,95	10,76	11,85	11,50	7,59
10,18 cm	12,01	13,08	12,42	7,95	14,05	15,94	15,24	8,58	23,49	24,14	22,62	17,15
12,22 cm	31,75	32,17	29,63	22,31	40,58	41,38	37,90	27,34	36,51	36,69	33,98	26,90
14,26 cm	53,29	53,35	48,90	37,86	70,34	70,61	64,34	48,22	50,79	50,68	46,77	37,47
16,3 cm	77,91	78,28	71,95	55,48	105,02	105,94	96,91	72,40	67,44	67,51	62,39	49,64
Mês	OUTUBRO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
2,04 cm	-77,18	-76,79	-70,05	-57,05	-98,11	-97,32	-88,23	-71,39	-36,05	-36,12	-33,21	-27,15
4,07 cm	-51,85	-50,03	-44,79	-38,63	-64,29	-60,95	-53,69	-47,23	-17,50	-16,58	-14,66	-13,50
6,11 cm	-29,65	-27,35	-23,93	-22,47	-36,34	-32,30	-27,47	-27,29	-1,58	-0,24	0,53	-1,70
8,15 cm	-8,70	-6,81	-5,40	-7,26	-10,66	-7,43	-5,35	-9,07	12,76	13,96	13,49	8,99
10,18 cm	11,97	13,19	12,55	7,74	14,98	17,01	16,25	9,09	26,45	27,16	25,42	19,21
12,22 cm	33,59	34,08	31,35	23,35	42,60	43,47	39,79	28,54	40,41	40,60	37,57	29,61
14,26 cm	57,16	57,25	52,39	40,25	73,63	73,98	67,32	50,22	55,72	55,59	51,24	40,89
16,3 cm	84,10	84,55	77,60	59,41	109,87	110,89	101,37	75,40	73,60	73,68	68,01	53,90
Mês	NOVEMBRO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
2,04 cm	-98,99	-98,29	-89,25	-72,04	-127,60	-126,28	-113,81	-91,23	-37,15	-37,25	-34,20	-27,77
4,07 cm	-68,29	-65,84	-58,71	-50,02	-85,23	-80,22	-70,02	-61,40	-16,39	-15,37	-13,45	-12,61
6,11 cm	-41,21	-38,22	-33,43	-30,64	-50,88	-44,99	-37,97	-37,39	1,43	2,93	3,54	0,49
8,15 cm	-15,53	-13,07	-10,86	-12,32	-19,42	-14,77	-11,37	-15,58	17,37	18,72	17,94	12,27
10,18 cm	9,90	11,51	11,10	5,79	12,19	15,15	14,78	6,24	32,44	33,25	31,04	23,44
12,22 cm	36,45	37,17	34,08	24,64	46,74	48,14	43,93	30,03	47,67	47,88	44,23	34,69
14,26 cm	65,33	65,56	59,77	45,01	85,87	86,62	78,54	56,79	64,30	64,14	59,02	46,88
16,3 cm	98,29	98,98	90,55	68,11	131,86	133,69	121,88	88,16	83,80	83,85	77,26	60,98
Mês	DEZEMBRO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
2,04 cm	-113,75	-112,85	-102,17	-81,95	-145,88	-144,24	-129,60	-103,25	-39,80	-39,92	-36,57	-29,51
4,07 cm	-79,11	-76,16	-67,69	-57,34	-97,79	-91,57	-79,45	-69,68	-16,19	-15,00	-12,41	-11,78
6,11 cm	-48,55	-44,98	-39,25	-35,70	-59,31	-52,06	-43,60	-43,10	4,03	5,79	6,30	2,31
8,15 cm	-19,53	-16,60	-13,85	-15,25	-24,20	-18,47	-14,23	-19,09	22,01	23,59	22,49	15,46
10,18 cm	9,22	11,17	10,86	4,98	11,22	14,90	14,78	5,04	38,86	39,81	37,08	27,83
12,22 cm	39,25	40,17	36,76	26,05	49,90	51,74	47,17	31,27	55,76	56,02	51,63	40,21
14,26 cm	71,90	72,26	65,74	48,83	94,14	95,28	86,27	61,16	74,18	73,99	67,94	53,59
16,3 cm	109,19	110,11	100,54	74,72	146,39	148,96	135,69	96,43	95,87	95,90	88,18	69,14

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

A partir dos modelos de fadiga apresentados na Tabela 34, foi estimado o número de solicitações de tráfego para a ruptura ( $N_f$ ) em cada um destes pontos da malha, para cada segmento monitorado. Como as curvas de fadiga consideram apenas a deformação de tração, os pontos da malha que apresentaram compressão foram descartados. Portanto, adotou-se que apenas a deformação de tração estaria causando dano na estrutura. Sabe-se que outros tipos de trincamento podem ocorrer no revestimento, como as trincas do tipo *top-down*, no entanto, não foi possível quantificar este trincamento através do método adotado.

Utilizando a hipótese de Miner foi encontrado o dano ( $N/N_f$ ) em cada ponto, dividindo o número de solicitações de tráfego diário pelo  $N_f$  de cada ponto da malha. O tráfego diário foi adotado conforme apresentado na Tabela 8, sendo obtido a partir da estimativa de tráfego realizada por Luz (2017). Além disso, adotou-se a distribuição de tráfego horária obtida na etapa 5 para a região de Araranguá, conforme apresentado na Tabela 38. Dessa forma, o tráfego diário foi distribuído nos intervalos de análise utilizando a porcentagem do volume de tráfego atuante em cada período.

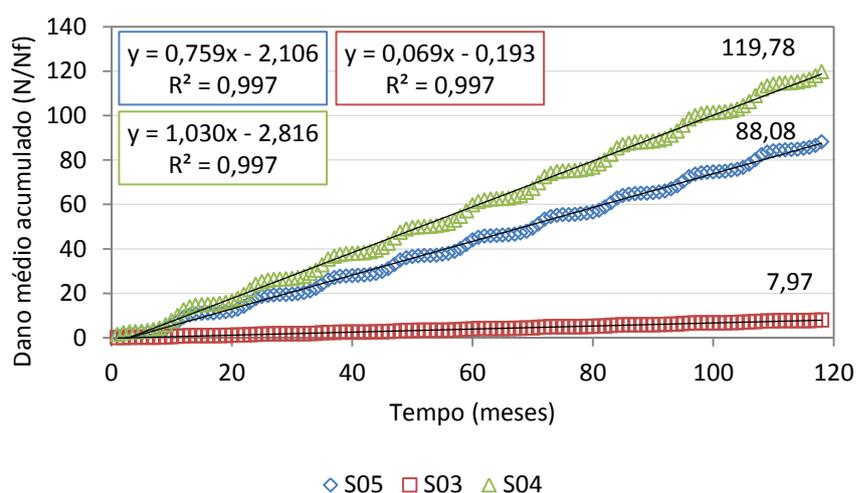
Com o dano em cada ponto da malha, foi calculado o dano médio da seção transversal em cada intervalo de análise de cada mês. Posteriormente, o dano médio foi acumulado ao longo do período de projeto para cada segmento monitorado. Na Figura 135 é apresentado o dano médio acumulado no período de projeto para cada segmento. O dano médio acumulado em cada mês para cada segmento monitorado está disposto no Apêndice I.

Pode-se observar que o dano médio acumulado foi significativamente superior a 1 no período de projeto principalmente para os segmentos 05 e 04. De acordo com a hipótese de Miner, dano igual a 1 indicaria a ruptura da estrutura. No entanto, os dados foram utilizados sem calibração para o campo, ou seja, foi considerado fator campo/laboratório igual a 1.

Vale destacar, ainda, que nas análises realizadas, não se levou em consideração o histórico de dano em cada segmento monitorado, ou seja, não foi considerada a queda de rigidez do material sofrida a cada aplicação de carga. Para que se fosse possível levar em consideração a queda da rigidez nas análises do Viscoroute, os parâmetros reológicos da mistura em campo teriam que ser obtidos periodicamente. Porém, para realizar o ensaio de módulo complexo e caracterizar a queda de rigidez nos parâmetros reológicos, as amostras deveriam ser retiradas da região com trincamento, o que poderia interferir na caracterização do material. O que se tem é apenas a queda do módulo de resiliência obtido a partir da

retroanálise em campo. Dessa forma, neste trabalho, optou-se por avaliar o acúmulo de dano com o uso dos parâmetros reológicos da mistura, porém sem considerar a queda de rigidez do material.

Figura 135 – Dano médio acumulado no período de projeto para os três segmentos monitorados.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Na Tabela 50 é apresentada a porcentagem de área trincada na trilha de roda obtida em cada levantamento através do método de medição de área e o dano médio acumulado calculado para o mesmo período. Na Figura 136 os resultados estão apresentados em um gráfico de dispersão em escala semi-log.

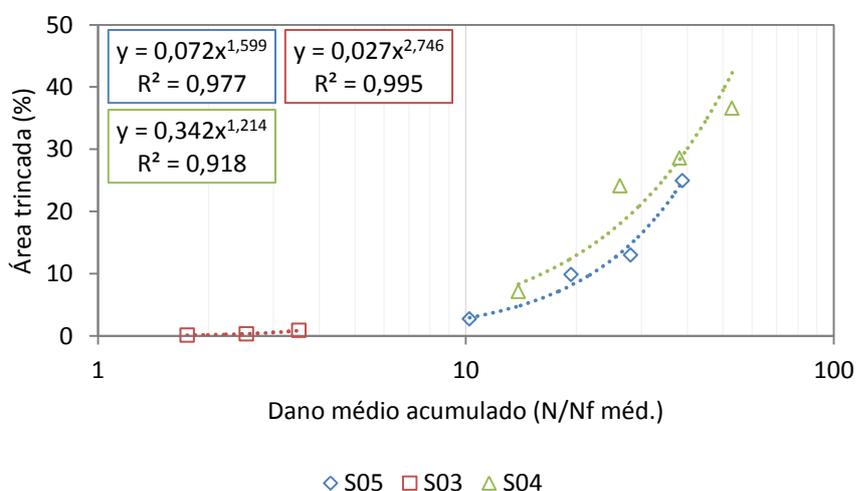
Tabela 50 – Porcentagem de área trincada na trilha de roda e dano médio acumulado até cada levantamento.

Tempo (meses)	$N_{USACE}$	S05		S03		S04	
		AT (%)*	$N/N_f$ méd.	AT (%)*	$N/N_f$ méd.	AT (%)*	$N/N_f$ méd.
13	$9,07 \times 10^6$	2,75	10,24	0,00	0,93	7,14	13,90
27	$1,78 \times 10^7$	9,87	19,34	0,13	1,75	24,17	26,25
41	$2,65 \times 10^7$	13,01	28,08	0,32	2,54	28,60	38,12
57	$3,71 \times 10^7$	24,95	38,82	0,89	3,52	36,60	52,96

\* Porcentagem de área trincada obtida pelo método de medição de área.

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 136 – Porcentagem de área trincada na trilha de roda *versus* dano médio acumulado em escala semi-log.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Pode-se notar que os segmentos monitorados não apresentaram uma única relação entre porcentagem de área trincada medida e dano médio acumulado no revestimento. Porém, observa-se que as curvas apresentam a mesma forma. Com o objetivo de encontrar uma única relação entre porcentagem de área trincada em campo e dano médio acumulado, buscou-se determinar o fator de ajuste para que as curvas coincidissem.

Primeiramente, foi estimado o tempo, em meses, para que o dano médio acumulado fosse igual a 5 ( $T_5$ ) em cada segmento monitorado. Foi adotado este valor pois os três segmentos apresentaram dano acumulado no período de projeto acima deste ponto. Assim, não foi necessário realizar extrapolação para o segmento 03, que apresentou dano médio acumulado de 7,97 no período. Para o segmento 05, 03 e 04, o tempo em meses para atingir o dano médio acumulado igual a 5 ( $T_5$ ) foi de 9,36, 75,59 e 7,59, respectivamente. O tempo foi estimado através dos modelos das linhas de tendência apresentados na Figura 135.

Com o modelo da linha de tendência para porcentagem de área trincada *versus* dano médio acumulado (Figura 136), foi estimado o dano médio para 10% de área trincada em cada segmento. Para o segmento 05, 03 e 04 o dano médio acumulado em 10% de área trincada foi de 21,98, 8,63 e 16,15, respectivamente.

Então, buscou-se o fator multiplicativo necessário para que o dano médio acumulado fosse igual a 5 quando a porcentagem de área trincada atingisse 10%. Assim, foi determinado o valor do fator de ajuste (F) para cada segmento, conforme apresentado na Tabela 51.

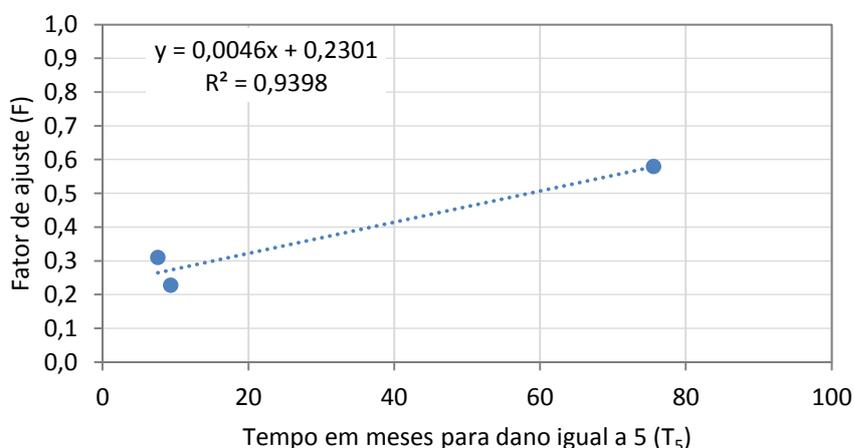
Tabela 51 – Fator de ajuste (F) multiplicativo para que 10% de área trincada corresponda a dano médio acumulado igual a 5.

Seg.	AT (%)	N/N <sub>f</sub> méd.	Fator de ajuste (F)	N/N <sub>f</sub> méd. ajustado
05	10%	21,98	0,228	5,0
03	10%	8,63	0,580	5,0
04	10%	16,15	0,310	5,0

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Na Figura 137 é apresentada a relação entre o fator de ajuste obtido e o tempo em meses para os segmentos monitorado atingirem dano médio acumulado igual a 5. Nota-se que a relação é de apenas três pontos, pois neste trabalho foram analisados apenas três segmentos monitorados. Dessa forma, a relação entre fator de ajuste e T<sub>5</sub> vale apenas para os segmentos ajustados neste trabalho, sendo necessária a calibração da relação com dados de outros segmentos monitorados para a sua validação e utilização em outros trechos.

Figura 137 – Relação entre o fator de ajuste (F) e o tempo em meses para atingir 5 de dano médio acumulado (T<sub>5</sub>).



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Utilizando o modelo de ajuste apresentado na Figura 137, foi obtido o fator de ajuste (F) para cada segmento. O dano médio acumulado ajustado, ou seja, multiplicado pelo fator de ajuste, está apresentado na Tabela 52.

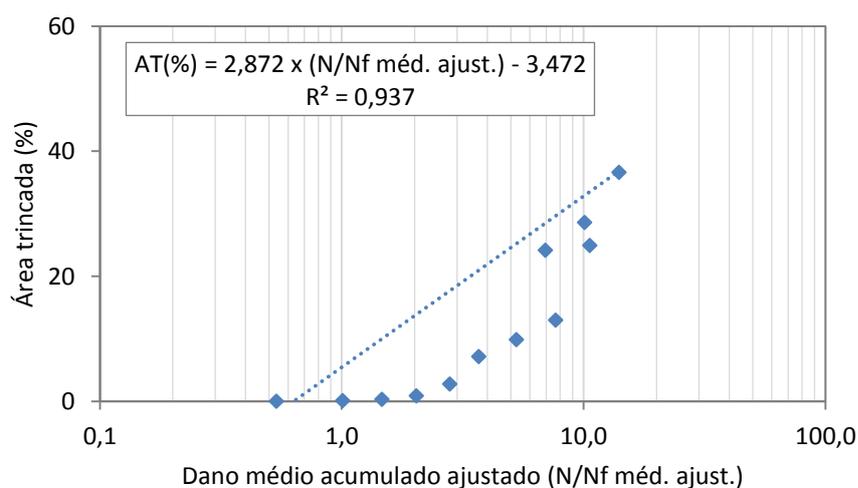
Tabela 52 – Dano médio acumulado ajustado ( $N/N_f$  méd. ajust.) com o fator de ajuste (F).

S05			S03			S04		
AT (%)	$N/N_f$ méd.	$N/N_f$ méd. ajust.	AT (%)	$N/N_f$ méd.	$N/N_f$ méd. ajust.	AT (%)	$N/N_f$ méd.	$N/N_f$ méd. ajust.
2,75	10,24	2,80	0,00	0,93	0,54	7,14	13,90	3,68
9,87	19,34	5,28	0,13	1,75	1,01	24,17	26,25	6,96
13,01	28,08	7,67	0,32	2,54	1,47	28,60	38,12	10,10
24,95	38,82	10,61	0,89	3,52	2,03	36,60	52,96	14,04

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

A Figura 138 apresenta a porcentagem de área trincada e o dano médio acumulado ajustado para os três segmentos monitorados. Nota-se que com o ajuste do dano médio, as três curvas apresentaram uma única relação. O modelo de regressão linear apresentou correlação alta, sendo o  $R^2$  igual a 0,937.

Figura 138 – Relação entre porcentagem de área trincada na trilha de roda e dano médio acumulado ajustado.



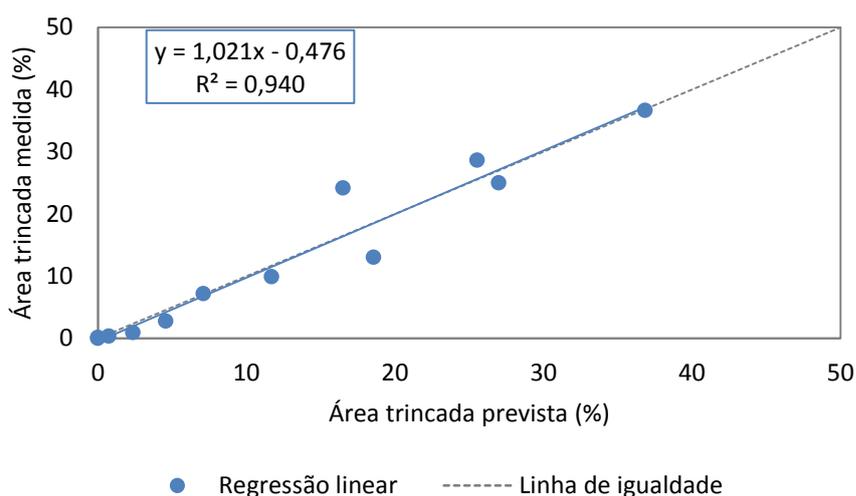
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apesar da relação entre porcentagem de área trincada e dano médio ter sido determinada com os dados de apenas três segmentos monitorados, os trechos possuem revestimentos com espessuras e materiais distintos. Além disso, o desempenho observado em campo destes três segmentos foi distinto, sobretudo para o segmento 03. Ainda assim, ao realizar o ajuste, os dados convergiram para uma única curva, indicando boa correlação para o modelo.

Na Figura 139 é apresentada a comparação entre a porcentagem de área trincada medida e a porcentagem de área trincada prevista a partir do modelo de regressão linear apresentado na Figura 138. Os pontos de porcentagem de área trincada prevista que apresentaram resultado negativo a partir do modelo foram considerados com sendo igual a zero.

Nota-se que os resultados ficaram bem próximos da linha de igualdade e o modelo de regressão linear apresentou alta correlação com  $R^2$  de 0,940. No entanto, ressalta-se que a relação encontrada entre dano médio e porcentagem de área trincada foi ajustada apenas para os dados dos segmentos monitorados de Araranguá, sendo necessária a validação e calibração para uso em outros trechos.

Figura 139 – Comparação entre porcentagem de área trincada medida e prevista através do modelo de dano médio acumulado ajustado.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

#### 4.7 ETAPA 7 – ANÁLISE CONSIDERANDO SAZONALIDADE DE TEMPERATURA NO LVECD

Para verificar a influência da sazonalidade da temperatura na estimativa de vida útil com o uso do *software* LVECD, primeiramente, estimou-se a base de dados horária de temperatura da região.

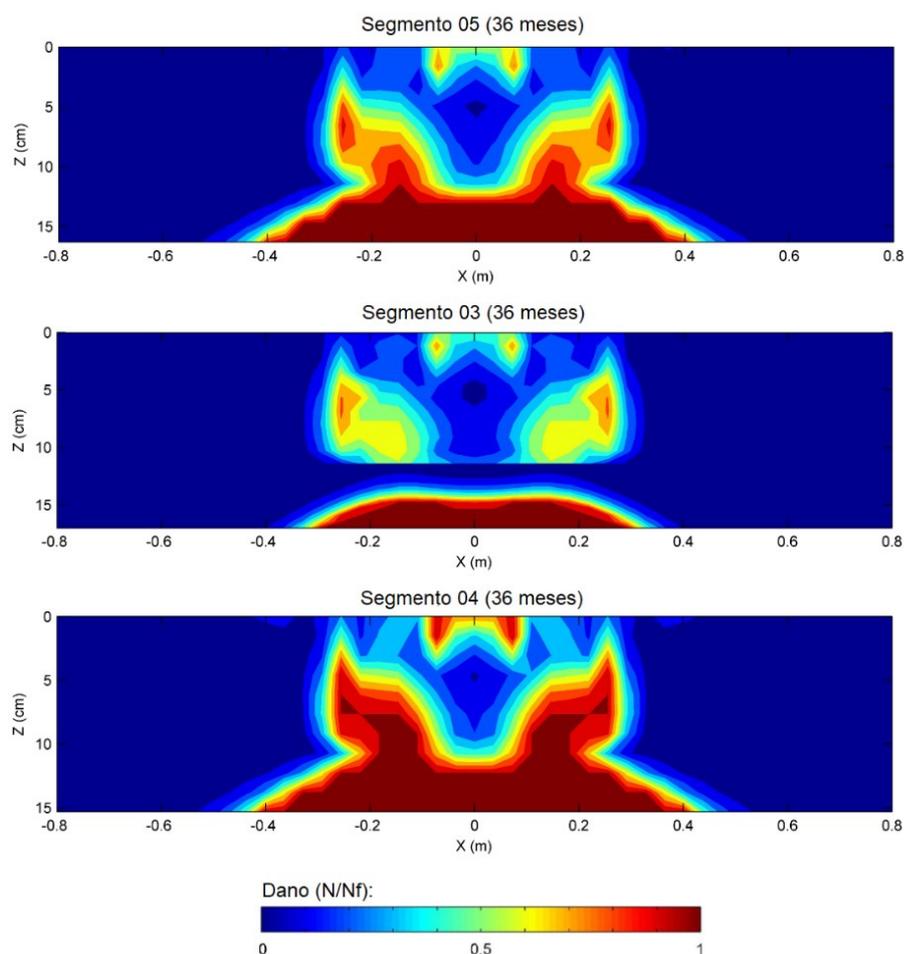
O modelo de Barber (1957) foi adotado para estimar a temperatura no revestimento, tendo como dados de entrada as propriedades físicas da mistura asfáltica e os dados meteorológicos da região. No modelo, foram utilizadas as propriedades apresentadas na Tabela 41, no entanto, considerou-se apenas as propriedades da mistura asfáltica convencional (CAP 50/70) nos três segmentos monitorados. Para os dados meteorológicos, foram utilizados os dados do ano de 2016, pois este ano apresentou menor número de erros de leitura na estação meteorológica automática do que os anos seguintes.

As profundidades de cálculo da temperatura no revestimento foram consideradas de forma que as subcamadas ficassem com espessura de 2 cm. As temperaturas foram estimadas nas profundidades entre 0 e 18 cm.

O *software* LVECD necessita da entrada de uma base de dados horária de temperatura do revestimento, em diferentes profundidades, durante pelo menos um ano. Assim, estimou-se a temperatura para cada hora do dia (24), durante o ano de 2016 (366 dias), em 10 profundidades diferentes. Dessa forma, foram estimadas 87.840 temperaturas no revestimento.

Na Figura 140 são apresentados os contornos de dano dos segmentos monitorados com 36 meses de abertura ao tráfego considerando a sazonalidade de temperatura estimada através do modelo de Barber (1957).

Figura 140 – Contorno de dano para os segmentos de Araranguá com 36 meses considerando a sazonalidade de temperatura.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Pode-se observar que o contorno de dano para 36 meses de abertura ao tráfego indica que o trincamento predominante nos três segmentos monitorados é do tipo *bottom-up*. Nota-se, ainda, que o dano obtido nas análises do LVECD foi significativamente maior para os segmentos 05 e 04 do que para o segmento 03.

Comparando o contorno de dano obtido com sazonalidade de temperatura (Figura 140) com o contorno obtido com temperatura constante de 20°C (Figura 92), verifica-se pela escala de cores que o dano estimado pelo LVECD para 36 meses de abertura ao tráfego foi menor com a inclusão dos dados de temperatura regional nas análises. Notadamente, verifica-

se que houve uma redução na previsão do aparecimento de trincas do tipo *top-down* com a inclusão da sazonalidade da temperatura nas análises.

A partir da função de transferência proposta por Nascimento (2015) foi estimada a porcentagem de área trincada nos segmentos monitorados no período dos levantamentos realizados em campo. A Tabela 53 apresenta os resultados de previsão de porcentagem de área trincada obtidos para 50 % de confiabilidade e para o intervalo de confiança de 85% de confiabilidade. Além disso, são apresentados as porcentagens de área trincada medidas em campo pelo método de mapeamento por células.

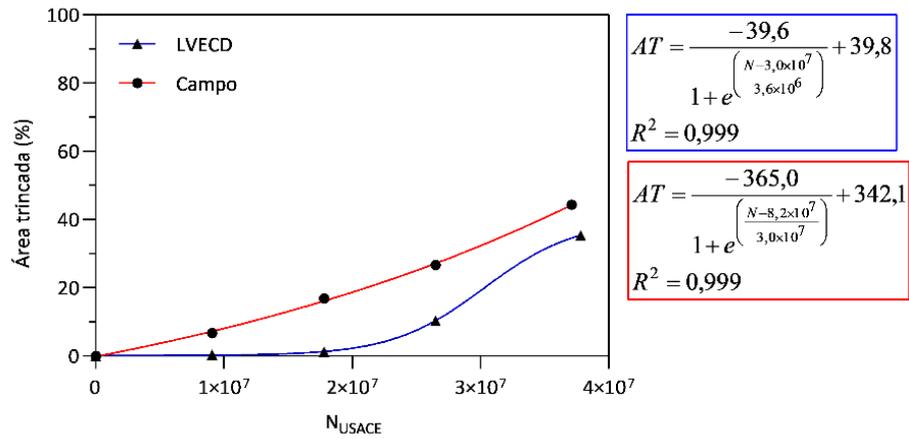
Tabela 53 – Previsão de porcentagem de área trincada com LVECD considerando a sazonalidade da temperatura (%).

Seg.	Tempo (meses)	13	27	41	58
	$N_{atuante}$	$9,07 \times 10^6$	$1,78 \times 10^7$	$2,65 \times 10^7$	$3,78 \times 10^7$
05	Área trincada prevista	0,0	0,8	4,9	16,1
	Área trinc. prev. + conf. 85%	0,4	1,3	10,4	35,4
	Área trinc. prev. - conf. 85%	0,0	0,0	0,0	0,0
	Área trincada medida	6,7	16,9	26,7	44,4
03	Área trincada prevista	0,0	0,1	1,2	8,8
	Área trinc. prev. + conf. 85%	0,0	0,5	1,9	20,8
	Área trinc. prev. - conf. 85%	0,0	0,0	0,0	0,0
	Área trincada medida	0,0	1,1	4,0	12,2
04	Área trincada prevista	0,1	1,9	9,1	22,8
	Área trinc. prev. + conf. 85%	0,5	3,0	21,7	44,7
	Área trinc. prev. - conf. 85%	0,0	0,0	0,0	0,9
	Área trincada medida	17,6	36,2	49,1	59,8

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

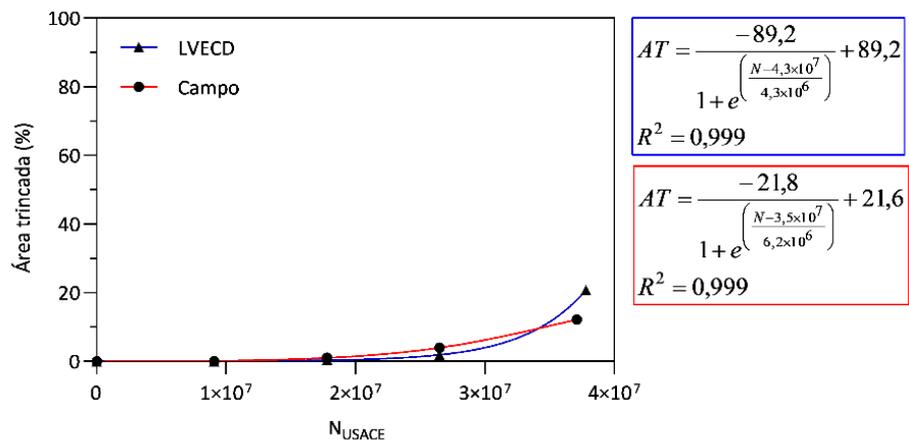
A partir dos resultados da Tabela 53, foram gerados gráficos de evolução de porcentagem de área trincada medida e prevista em função do tráfego. Nas Figuras 141 a 143 são apresentados os resultados para os segmentos 05, 03 e 04, respectivamente. Com relação aos resultados do LVECD, utilizaram-se os valores para previsão com 85% de confiança.

Figura 141 – Linha de tendência para porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD com 85% de confiabilidade para o segmento 05, considerando a sazonalidade de temperatura.



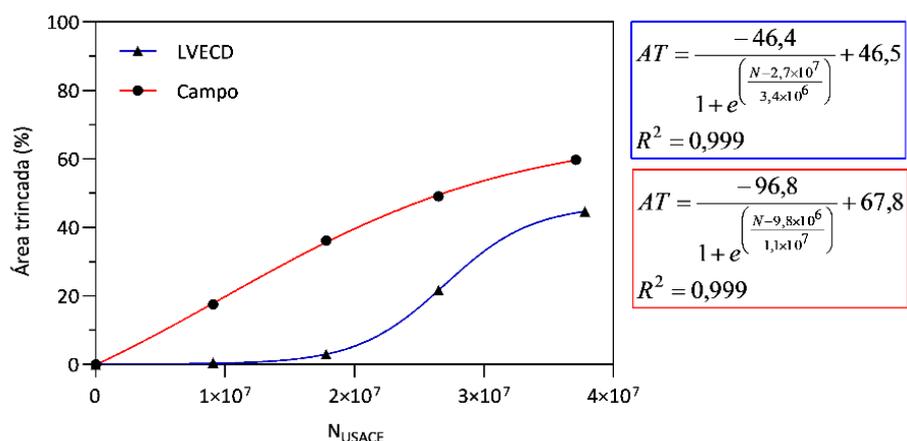
Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 142 – Linha de tendência para porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD com 85% de confiabilidade para o segmento 03, considerando a sazonalidade de temperatura.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Figura 143 – Linha de tendência para porcentagem de área trincada medida e prevista pelo LVECD com 85% de confiabilidade para o segmento 04, considerando a sazonalidade de temperatura.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Para os segmentos 05 e 04, pode-se observar que a previsão de porcentagem de área trincada dada pelo LVECD foi menor do que a medida em campo. Verifica-se, assim, que em campo a porcentagem de área trincada evoluiu mais rapidamente do que esperado pelo *software*. No entanto, para o segmento 03, a evolução da porcentagem de área trincada prevista pelo LVECD com intervalo de confiança de 85% foi bem próxima da medida em campo.

A fim de analisar a influência da consideração da sazonalidade de temperatura da região nas análises do LVECD, buscou-se comparar os resultados obtidos levando em consideração a sazonalidade com os obtidos com temperatura constante de 20°C (Conforme apresentado na etapa 4). Para isto, foi realizado o mesmo procedimento da Etapa 4 para obtenção do número de solicitações de tráfego para 1%, 10% e 20% de área trincada.

A partir dos modelos apresentados nas Figuras 141, 142 e 143, foi estimado o número de solicitações de tráfego para atingir as determinadas porcentagens de área trincada (1%, 10% e 20%). Na Tabela 54 são apresentados os resultados obtidos com o LVECD e com os dados levantados em campo. Vale ressaltar que os dados de campo apresentados na tabela são iguais aos apresentados na Etapa 4, pois referem-se aos mesmos levantamentos porcentagem de área trincada.

Tabela 54 – Número de solicitações de tráfego em campo e previsto pelo LVECD para 1%, 10% e 20% área trincada com 85% de confiabilidade.

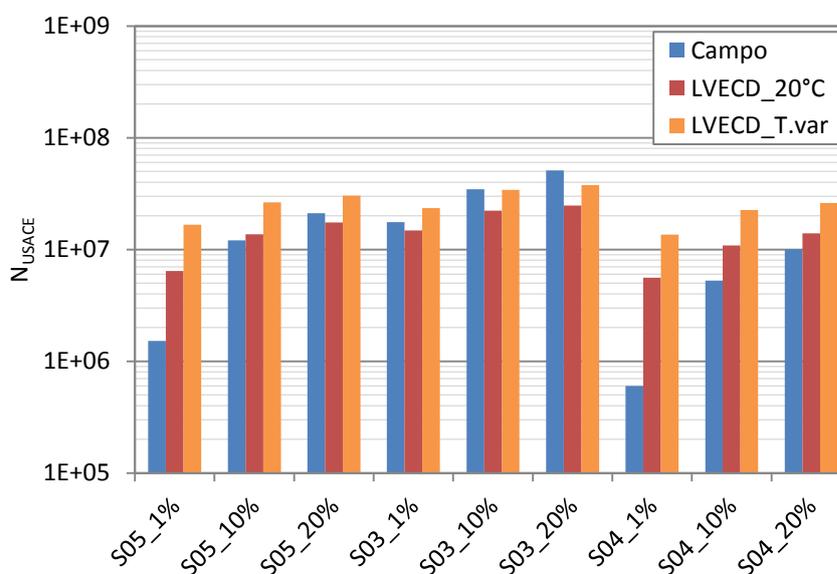
Área trincada (%)	N <sub>USACE</sub> – Campo			N <sub>USACE</sub> – LVECD		
	S05	S03	S04	S05	S03	S04
1	1,52x10 <sup>6</sup>	1,76x10 <sup>7</sup>	6,02x10 <sup>5</sup>	1,66x10 <sup>7</sup>	2,35x10 <sup>7</sup>	1,36x10 <sup>7</sup>
10	1,21x10 <sup>7</sup>	3,46x10 <sup>7</sup>	5,27x10 <sup>6</sup>	2,63x10 <sup>7</sup>	3,40x10 <sup>7</sup>	2,25x10 <sup>7</sup>
20	2,11x10 <sup>7</sup>	5,10x10 <sup>7</sup> *	1,01x10 <sup>7</sup>	3,03x10 <sup>7</sup>	3,76x10 <sup>7</sup>	2,60x10 <sup>7</sup>

\* Extrapolado a partir do modelo.

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Com os resultados da Tabela 54, foi gerado o gráfico de número de solicitações de tráfego para se atingir 1%, 10% e 20% de área trincada em campo e prevista pelo LVECD com sazonalidade de temperatura regional, conforme apresentado na Figura 144. Além disso, para fins comparativos, também são apresentados os resultados encontrados na Etapa 4 para as análises conduzidas no LVECD com temperatura constante de 20°C e 85% de confiabilidade (Tabela 33).

Figura 144 – Número de solicitações de tráfego em campo e previsto pelo LVECD com 20°C e com sazonalidade de temperatura regional.



Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Nota-se que, com a consideração da sazonalidade da temperatura regional, o número de solicitações de tráfego para atingir 1%, 10% e 20% de área trincada foi maior do que com temperatura de 20°C. Para atingir 20% de área trincada, a estimativa de vida útil do segmento 05 considerando a temperatura regional ( $3,03 \times 10^7$ ) foi cerca de 74% maior do que com temperatura constante de 20°C ( $1,74 \times 10^7$ ). Para os segmentos 03 e 04, esta diferença foi de 52% e 86%, respectivamente.

De maneira geral, verifica-se que a inclusão da sazonalidade de temperatura nas análises do *software* LVECD fez com que a estimativa de vida útil dos segmentos monitorados aumentasse. Tal fato é contrário ao observado na Etapa 5, na qual verificou-se uma redução na estimativa de vida útil dos segmentos com a inclusão da sazonalidade de temperatura. Embora os métodos utilizados nas duas etapas (Etapa 5 e 7) sejam baseados em procedimentos distintos, esperava-se que houvesse uma convergência entre as análises.

Conforme visualizado nos contornos de dano, a previsão do aparecimento de trincas do tipo *top-down* foi reduzida com a inclusão da temperatura regional, conseqüentemente, a estimativa de vida útil do pavimento aumentou. No entanto, na Etapa 5 foi considerado apenas o trincamento do tipo *bottom-up* no acúmulo de dano. Tal fato pode ter contribuído para a divergência entre os resultados encontrados.

Além disso, destaca-se que a função de transferência proposta por Nascimento (2015) foi calibrada para dados a nível nacional, podendo ainda ser necessário o ajuste com um fator regional. Nota-se, na Figura 144, que os resultados obtidos com a inclusão da temperatura regional se distanciaram dos valores medidos em campo, se comparados aos resultados das análises com 20°C.

Vale ressaltar que a busca pela idêntica previsão de vida útil por fadiga se trata de uma análise alta complexidade pois, em campo, o processo de fadiga sofre influência de diversos fatores não controláveis. Processos como o envelhecimento (oxidação) do ligante asfáltico e a recuperação das trincas (*healing*) não foram incorporados nas análises. Ainda, o excesso de carga transportado em campo e a distribuição de frequência de carga por eixo (espectros de carga) não foram considerados, sendo utilizada a simplificação de estimativa de vida útil através do número de solicitações do eixo padrão de 8,2t.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A presente pesquisa tratou da avaliação do desempenho de três estruturas de pavimento flexível que fazem parte do Projeto Rede Temática de Tecnologia em Asfalto, construídas na rodovia BR-101/SC, no contorno de Araranguá. Complementarmente, foi analisada a influência da temperatura da região na previsão da evolução do dano por fadiga no pavimento.

Os três segmentos monitorados foram construídos com estrutura similar, diferenciando-se apenas na camada de revestimento asfáltico. Dois segmentos (05 e 04) possuem revestimento com mistura convencional e um segmento (03) possui revestimento composto por duas misturas asfálticas, sendo mistura convencional na camada superior e mistura modificada por borracha na camada inferior.

Após aproximadamente 5 anos de abertura ao tráfego, os resultados obtidos na pesquisa apontam que a estrutura composta por duas misturas asfálticas é significativamente mais eficiente do que a estrutura com apenas mistura convencional, notadamente com relação ao trincamento por fadiga. Conclui-se que a combinação de mistura convencional sobre mistura modificada por borracha apresenta-se como uma boa solução para rodovias com condições de tráfego e clima similares ao trecho estudado.

Com relação à influência da temperatura regional, verificou-se que a inclusão da mesma nas análises de dano por fadiga através do ensaio de flexão 4 pontos corrobora para uma redução significativa na estimativa de vida útil do pavimento em comparação às análises sem inclusão da sazonalidade. Os resultados evidenciam a importância de se levar em consideração a sazonalidade da temperatura da região no projeto de dimensionamento de pavimentos flexíveis.

### 5.1 CONCLUSÕES

- Quanto ao desempenho dos segmentos monitorados:

Foi observado um melhor desempenho ao longo do tempo de serviço no segmento 03 do que nos segmentos 05 e 04. Verificou-se que a composição de mistura convencional sobre

mistura modificada resultou em menor afundamento de trilha de roda, menor irregularidade longitudinal, menor porcentagem de área trincada e menor deflexão máxima do que em pavimentos com apenas mistura convencional.

Apesar dos segmentos monitorados terem sido liberados ao tráfego com nível de afundamento de trilha de roda similar, após quase 5 anos de atuação do tráfego, o afundamento médio no segmento 05 e 04 foi aproximadamente 2,6 e 2,9 vezes maior do que no segmento 03, respectivamente. A maior taxa de crescimento de afundamento nos segmentos 05 e 04 podem estar atreladas à maior porcentagem de área trincada observada nestes segmentos. O trincamento da superfície possibilita a entrada de água nas camadas subjacentes, reduzindo a capacidade de suporte destas camadas e, por consequência, intensificando o processo de afundamento. A entrada de água nas camadas subjacentes pôde ser constatada através do bombeamento de finos observado nos segmentos.

Além disso, no último levantamento, o afundamento de trilha de roda foi maior do que 12 mm em cerca de 20% dos pontos medidos nos segmentos 05 e 04. Nestes pontos, segundo DNIT (BRASIL, 2006), pode-se considerar que há indicativo de comprometimento estrutural. Já o segmento 03 não apresentou profundidade de afundamento maior do que 12 mm em nenhum levantamento realizado.

O aumento da irregularidade longitudinal também ocorreu de forma mais acelerada para os segmentos 05 e 04. Após 46 meses de abertura ao tráfego, a irregularidade nestes segmentos foi cerca de 30% maior do que no segmento 03. Como a irregularidade está diretamente ligada aos defeitos que ocorrem na superfície, relaciona-se o melhor desempenho deste segmento ao menor afundamento e ao menor trincamento medido. Contudo, até o levantamento realizado após 46 meses de abertura ao tráfego, os segmentos ainda se enquadraram em faixas aceitáveis de irregularidade de acordo com DNIT (BRASIL, 2006).

A diferença no desempenho dos três segmentos pôde ser observada de forma mais acentuada quando se verificou a evolução de porcentagem de área trincada. Após quase 5 anos, o segmento 05 apresentou porcentagem de área trincada 28 vezes maior do que o segmento 03. Para o segmento 04 a diferença foi ainda mais significativa, sendo cerca de 40 vezes maior. Conclui-se que a composição de camada de mistura asfáltica convencional sobre mistura modificada por borracha utilizada no segmento 03 tem sido eficiente no controle do

aparecimento de trincas, sendo uma boa solução para retardar o surgimento de trincas por fadiga no revestimento.

Comparando o trincamento medido nos segmentos 05 e 04, pôde-se concluir que o pior desempenho apresentado pelo segmento 04 se deve ao fato de possuir 1 cm a menos na camada de revestimento, reduzindo a resistência da estrutura. Verificou-se que o segmento 04 levou cerca de metade do tempo para atingir 20% de área trincada na trilha de roda do que levaria com 1 cm a mais no revestimento. Dessa forma, conclui-se que a diferença de 1 cm na espessura do revestimento pode resultar em uma perda significativa na vida útil do pavimento em termos de trincamento por fadiga, ressaltando a importância do controle na execução.

Com relação a microtextura e macrotextura, foi observada pouca variação ao longo do tempo de serviço. Os valores medidos nos três segmentos ficaram próximos dos limites estabelecidos por DNIT (BRASIL, 2006). Em todos os levantamentos realizados, desde o ano de abertura até a passagem de quase 50% do tráfego de projeto, o IFI calculado se manteve dentro da classificação “muito bom” e “ótimo”, conforme sugerido por DNIT (BRASIL, 2006).

A deflexão máxima medida no segmento 03 foi menor do que a deflexão máxima medida nos segmentos 05 e 04. No entanto, o elevado nível de trincamento observado nestes dois segmentos pode estar interferindo nos valores medidos de deflexão.

Os módulos de resiliência do revestimento asfáltico obtidos por retroanálise apontaram uma redução ao longo do tempo de serviço. Após 46 meses de abertura ao tráfego, os segmentos 05 e 04 apresentaram uma redução de 40,7% e 43,7% nos módulos de resiliência em relação ao inicial, respectivamente. No segmento 03, a redução foi de 30,5% para a mistura convencional e de 3,7% para a mistura modificada, respectivamente. Conclui-se que a maior redução no módulo dos segmentos 05 e 04 pode estar relacionada ao maior trincamento observado nos mesmos.

- Quanto à estimativa de vida útil pelo LVECD e pelo Viscoroute:

As variações observadas nos resultados do LVECD sem intervalo de confiança e com 85% de confiabilidade, mostraram que quando inseridos os critérios de confiabilidade as

previsões ficaram mais próximas do que foi observado em campo. Neste sentido, ressalta-se a importância de se utilizar critérios de confiabilidade em simulações de pavimentos.

Verificou-se que a previsão de porcentagem de área trincada obtida a partir do LVECD descreveu bem o comportamento observado em campo. Com 85% de confiabilidade, o fator de calibração necessário para a estimativa de 1%, 10% e 20% de área trincada variou entre 0,1 e 1,2 para os segmentos 05 e 04. Para o segmento 03, o fator de calibração variou entre 1 e 2 tanto na avaliação das misturas asfálticas em conjunto quanto na análise das misturas separadamente (mistura convencional e mistura modificada).

O baixo valor do fator de calibração indica que o método foi capaz de prever a estimativa de vida útil em termos de número de solicitações de tráfego para diferentes porcentagens de área trincada, mesmo utilizando temperatura constante de 20°C nas análises. Os resultados coincidem com o observado por Nascimento (2015), em que uma diferença grande entre porcentagem de área trincada prevista e medida, não está necessariamente relacionada a uma grande diferença em termos de número de solicitações de tráfego ou em tempo de serviço, pois o trincamento cresce rapidamente após ser iniciado.

No dimensionamento de pavimentos, se relaciona o tráfego de projeto com o limite aceitável de porcentagem de área trincada no pavimento. Neste contexto, verificou-se que o método de estimativa de vida útil a partir do *software* LVECD com função de transferência proposta por Nascimento (2015) se mostrou promissor, pois foi capaz de prever valores próximos da realidade em campo no que se refere a tráfego atuante e trincamento esperado.

Por outro lado, o método utilizando os resultados do ensaio de flexão alternada 4 pontos e análise no Viscoroute apresentou fator de calibração variando de 0,5 a 12,4. Para os segmentos 05 e 04, o fator ficou próximo a 1 quando comparado ao número de solicitações para atingir 1% de área trincada. Assim, concluiu-se que resultado de estimativa de vida útil obtido a partir do ensaio de flexão 4 pontos e análise no Viscoroute corresponderia a aproximadamente 1% de área trincada em campo, nestes casos.

Para o segmento 03, o fator de calibração com o Viscoroute ficou entre 0,4 e 1,7. Verificou-se que o fator ficou próximo a 1 para 10% de área trincada na mistura convencional e para 20% de área trincada na mistura modificada. No entanto, considerou-se que as duas misturas estariam apresentando a mesma porcentagem de trincamento em campo. Como não

há definição da condição do trincamento na mistura modificada, esta relação trata-se de uma aproximação, partindo da hipótese de que as misturas estão trincando ao mesmo tempo.

Analisando as camadas do segmento 03 individualmente, verificou-se que, pela estimativa dada pelo LVECD, a mistura modificada apresentaria trincas antes do que a mistura convencional. Entretanto, após o início do processo de trincamento, a mistura convencional apresentaria taxa de crescimento mais acelerada do que a modificada. Contrariamente, a estimativa dada pelo Viscoroute indicou que o trincamento se iniciaria na mistura convencional. Contudo, vale destacar que o método de estimativa de vida útil a partir do Viscoroute considerou apenas o dano na fibra inferior de cada camada enquanto que o LVECD considerou o dano ao longo da profundidade da camada.

- Quanto à sazonalidade da temperatura na previsão da evolução do dano por fadiga:

Com o modelo de Barber (1957) foi possível estimar a temperatura no revestimento asfáltico considerando a inversão que ocorre no pavimento durante o dia e a noite.

Através das análises no Viscoroute com a consideração da sazonalidade da temperatura da região, verificou-se que a deformação específica de tração na fibra inferior da camada de revestimento foi aproximadamente duas vezes maior no mês de fevereiro do que no mês de junho. Atribuiu-se esta diferença à distribuição de temperatura do ar que ocorre na região ao longo do ano, sendo fevereiro o mês mais quente e junho, com temperatura similar a julho, o mês mais frio.

Verificou-se, também, que houve variação na deformação da fibra inferior do revestimento asfáltico ao longo do dia. Durante a tarde (13h-20h) a deformação foi em torno de 50% maior do que à noite (20h-06h).

Ao se comparar as deformações obtidas com sazonalidade de temperatura às obtidas com temperatura constante de 15°C, verificou-se que apenas nos meses mais frios do ano (junho e julho) as deformações atingiriam valores próximos. Portanto, conclui-se que, para a região de Araranguá, a deformação seria subestimada quando utilizada temperatura constante de 15°C nas análises computacionais.

Com relação a temperatura de 20°C nas análises, verificou-se que as deformações foram menores do que considerando a sazonalidade na maioria dos períodos analisados.

Apenas o período da manhã (06h-13h) dos meses de junho a agosto e o período da noite (20h-06h) dos meses de maio, agosto e setembro poderiam ser retratados com esta temperatura. Para os demais meses do ano e períodos do dia analisados, a deformação obtida com 20°C não representaria a deformação que ocorre com a consideração da sazonalidade da temperatura da região.

Em consequência das variações observadas na deformação, ao se analisar o número de solicitações admissível a partir dos modelos de fadiga verificou-se que, considerando a sazonalidade, o número admissível é maior nos meses com temperatura mais amena.

Além disso, a fibra inferior do revestimento asfáltico apresentou maior resistência à fadiga no período da noite (20h-06h) e menor no período da tarde (13h-20h). Comparando com a distribuição de tráfego da região, constatou-se que o volume de tráfego foi maior no período do dia em que o revestimento apresentou menor resistência a fadiga, o que pode intensificar o processo de trincamento.

Na mistura convencional do segmento 03 verificou-se que em meses com temperatura mais elevada, a menor resistência a fadiga ocorreu durante à noite (20h-06h) e, em meses com temperatura mais amena, no período da tarde (13h-20h). Tal diferença pode estar relacionada a maior amplitude de variação no gradiente de temperatura que ocorre na camada nos meses mais quentes.

O dano acumulado no período de projeto foi notadamente maior quando considerada a sazonalidade de temperatura do que com temperatura constante de 20°C nas análises. Para os segmentos 05 e 04, o dano acumulado foi cerca de 8 vezes maior. Para a mistura convencional e a modificada do segmento 03 o dano acumulado foi 17 e 6 vezes maior, respectivamente.

Avaliando a influência dos parâmetros adotados na análise do dano, foi verificado que, com a inclusão da sazonalidade da temperatura, a estimativa de vida útil pela hipótese de Miner foi cerca de 85% a 90% menor do que com 20°C. De acordo com as análises realizadas, concluiu-se que, sem a inclusão da sazonalidade de temperatura, o trincamento por fadiga pode ocorrer em campo antes do período previsto em projeto. Deste modo, ressalta-se a importância da consideração deste fator nas análises de dimensionamento de pavimentos, principalmente em regiões com características similares à região de estudo.

Com a inclusão da distribuição de tráfego diário, a estimativa de vida útil na fibra inferior do revestimento foi em torno de 17% menor do que com tráfego uniforme ao longo do dia. Esta redução ocorreu pois cerca de 39% do tráfego diário solicitou a rodovia no período com menor resistência a fadiga na fibra inferior da camada.

Porém, para a mistura convencional do segmento 03, ocorreu um aumento de 11,3% na estimativa de vida útil com a inclusão da distribuição de tráfego. Para esta camada, nos meses de novembro a março, o período com menor resistência a fadiga (20h-06h) correspondeu ao período com menor porcentagem do tráfego. Portanto, durante 5 meses, o período do dia com menor resistência sofreu menor solicitação de tráfego, favorecendo a vida de fadiga nesta camada.

Dessa forma, verificou-se que a variação de temperatura teve maior influência na estimativa de vida útil do que a variação horária de tráfego para a região analisada. Contudo, ressalta-se que o comportamento pode ser distinto para regiões com diferente distribuição de volume de tráfego e de temperatura. Quanto maior a correlação entre os picos de volume de tráfego e temperatura ao longo do dia, maior a influência da inclusão destes dados na estimativa de vida útil.

Ao se utilizar a curva de fadiga de 15°C nos intervalos que possuíam temperatura do revestimento abaixo de 20°C, constatou-se que não houve diferença significativa. A estimativa de vida útil foi em torno de 0,5% a 1,0% maior do que com a curva de fadiga de 20°C apenas. Porém, o pavimento apresentou temperatura menor do que 20°C em apenas 17% das temperaturas calculadas. Logo, em regiões com temperatura mais amena ao longo do ano, a influência de se utilizar a curva de fadiga de 15°C na estimativa de vida útil pode ser mais significativa.

Ao se analisar as duas misturas do segmento 03, verificou-se que, com temperatura constante de 20°C, a mistura convencional teria menor estimativa de vida útil. No entanto, com a sazonalidade da temperatura, a mistura modificada passou a ter menor vida útil do que a convencional. Como em campo ocorrem variações de temperatura, conclui-se que, segundo as análises, a mistura modificada do segmento 03 se romperia primeiro do que a mistura convencional.

- Quanto à relação entre porcentagem de área trincada em campo e o dano médio acumulado calculado:

Verificou-se que as deformações que ocorrem na área da seção transversal embaixo do ponto de aplicação da carga variam ao longo do dia e do ano. No intervalo do dia com temperatura mais quente e nos meses com temperatura mais elevada, ocorre maior concentração da deformação de tração na fibra inferior da camada asfáltica. Por outro lado, em períodos com temperatura mais amena, ocorre maior distribuição da deformação ao longo da camada devido a maior rigidez da mistura asfáltica com a redução da temperatura.

Ao comparar o dano médio acumulado com a porcentagem de área trincada medida em campo, verificou-se que as curvas obtidas para cada segmento monitorado possuíam formato similar. Assim, determinou-se um fator de ajuste multiplicativo para transladar as curvas horizontalmente de forma com que coincidissem para uma única relação entre área trincada e dano médio acumulado.

Apesar de ter sido determinada com dados de apenas três segmentos monitorados, a relação encontrada entre porcentagem de área trincada e dano médio acumulado ajustado apresentou alta correlação. Ressalta-se que os segmentos possuem revestimentos com espessuras e materiais distintos. Ainda assim, a relação obtida foi capaz de estimar a porcentagem de área trincada próxima da medida em campo.

Sabe-se que para um mesmo material, ocorrem variações de resultados em ensaios de fadiga. Assim, se ocorre variação de resultados para a condição controlada de laboratório, é de se esperar que em campo as variações sejam maiores ainda, pois acontece variação das condições climáticas, de carregamento e de execução.

- Quanto à análise considerando a sazonalidade da temperatura no LVECD:

Verificou-se que houve um aumento na estimativa de vida útil dos segmentos monitorados quando inseridos os dados de temperatura regional. Tal fato apresenta um confronto de resultados em relação aos encontrados por meio da análise com ensaio de flexão alternada 4 pontos. Nas análises com *software* LVECD, a estimativa de vida útil foi entre 50% a 90% maior quando a sazonalidade da temperatura foi inserida nas análises. Por outro lado,

com as análises no Viscoroute e o ensaio de flexão alternada 4 pontos, a estimativa de vida útil com sazonalidade foi cerca de 80 a 90% menor do que com 20°C.

Um dos fatores que pode ter contribuído para esta divergência de resultados é com relação a consideração do trincamento do tipo *top-down*. Nas análises realizadas com o Viscoroute este tipo de trincamento não foi considerado no acúmulo de dano, enquanto que no LVECD este tipo de trinca foi considerado.

Além disso, a função de transferência proposta por Nascimento (2015) foi calibrada para dados a nível nacional, podendo ainda ser necessário o ajuste com um fator regional. No entanto, vale ressaltar que, em campo, o processo de fadiga sofre influência de diversos fatores não controláveis, tornando a busca pela idêntica previsão de vida útil por fadiga uma análise alta complexidade. Processos como a oxidação do ligante e a recuperação das trincas também não foram incorporados nas análises. Ainda, o excesso de carga transportado em campo e a distribuição de frequência de carga por eixo não foram considerados, sendo adotada a simplificação por meio do número de solicitações do eixo padrão de 8,2t.

## 5.2 SUGESTÕES

Com base nos resultados apontados na pesquisa, recomenda-se para trabalhos futuros:

- Dar continuidade ao monitoramento dos segmentos a fim de acompanhar a evolução do desempenho funcional e estrutural do trecho, contribuindo para o banco de dados nacional;
- Realizar medições e obter o perfil de temperaturas no revestimento da região através da instrumentação dos segmentos para comparar e aprimorar as simulações feitas;
- Verificar a influência da sazonalidade da temperatura em outras regiões do país buscando aperfeiçoar o método de dimensionamento nacional com a inclusão deste fator;

- Aprimorar, validar e calibrar a relação obtida entre porcentagem de área trincada e dano médio acumulado ajustado a partir do monitoramento de outros trechos experimentais;
- Verificar os motivos que levaram a divergência de resultados obtidos com a inclusão da sazonalidade da temperatura nas análises realizadas por meio do *software* Viscoroute e do LVECD.

## REFERÊNCIAS

- ABOJARADEH, M. **Predictive fatigue models for Arizona asphalt concrete mixtures**. Dissertation, Arizona State University, Arizona, 2003.
- ABU AL-RUB, R. K.; DARABI, M. K.; KIM, S.; LITTLE, D. N.; GLOVER, C. J. **Mechanistic-based constitutive modeling of oxidative aging in aging-susceptible materials and its effect on the damage potential of asphalt concrete**. *Construction and Building Materials*, 41, pp. 439-454, 2013.
- AFNOR. **AFNOR NF P 98-253-1: Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés, partie 1: essai d'orniérage**. França: Association Française de Normalisation, 1991.
- ALMEIDA, A. J. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas com aplicação dos aditivos PR PLAST S e PR FLEX 20 no módulo complexo e na fadiga**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- AL-QADI, I. L.; NASSAR, W. N. **Fatigue shift factors to predict HMA performance**. *The International Journal of Pavement Engineering*, vol. 4 (2), pp. 69-76, 2003.
- APS, M. **Classificação da aderência pneu-pavimento pelo índice combinado IFI – International Friction Index para revestimentos asfálticos**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- ARTESP - Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados de Transporte do Estado de São Paulo. **Contratos de concessão**. Disponível em: <<http://www.artesp.sp.gov.br/Style%20Library/extranet/transparencia/contratos-de-concessao.aspx>>. Acesso em: 01 jul. 2019.
- ASEFZADEH, A.; HASHEMIAN, L.; BAYAT, A. **Development of statistical temperature prediction models for a road in Edmonton, Alberta, Canada**. *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 10, pp. 369-382, 2017.
- ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM E 303: Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester**. USA, 2013.
- \_\_\_\_\_. **ASTM E 965: Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique**. USA, 2015.
- \_\_\_\_\_. **ASTM E 1845: Standard Practice for Calculating Pavement Macrotexture Mean Profile Depth**. USA, 2015.

\_\_\_\_\_. **ASTM E 1960: Standard Practice for calculating International Friction Index of a Pavement Surface.** USA, 2001.

\_\_\_\_\_. **ASTM E 950/E 950M: Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference.** USA, 2009.

\_\_\_\_\_. **ASTM E 1703/E 1703M: Standard Test Method for Measuring Rut-Depth of Pavement Surfaces Using a Straightedge.** USA, 2015.

AYRES, M. **Development of a rational probabilistic approach for flexible pavement analysis.** Dissertação – University of Maryland, College Park, 1997.

AYRES, M.; WITCKZAK, M. W. **AYMA Mechanistic probabilistic system to evaluate flexible pavement performance.** Transportation Research Record, vol. 1629, pp. 137-148, 1998.

BAEK, C. M. **Investigation of top-down cracking mechanisms using the viscoelastic continuum damage finite element program.** Dissertation. North Carolina State University, 2010.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração.** São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BARBER, E. S. **Calculation of maximum pavement temperatures from weather reports.** Boletim nº 168, HRB, 1957.

BARELLA, R. M. **Contribuição para a avaliação da irregularidade longitudinal de pavimentos com perfilômetros inerciais.** Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** Petrobras, ABEDA, Rio de Janeiro. 504 f. 2008.

BOCK, A. L. **Efeitos da incorporação de cal hidratada em concretos asfálticos elaborados com ligante convencional e modificado.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

BOCK, A. L. **Pesagem em movimento de cargas atuantes em rodovias e seu impacto no desempenho de pavimentos da rede temática de asfalto.** Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

BONNAURE, F., GRAVOIS, A.; UDRON, J. **A new method for predicting the fatigue life of bituminous mixes**. Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists – AAPT, 1980.

BORGES, C. B. S. **Estudo comparativo entre medidas de deflexão com viga Benkelman e FWD em pavimentos da malha rodoviária estadual de Santa Catarina**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

BRANCO, F.; PEREIRA, P. A. A.; PICADO-SANTOS, L. G. **Pavimentos rodoviários**. Edições Almedina, S. A., Portugal, 2005.

BRASIL – Departamento Nacional de Estradas de Rodagens (DNER). **DNER – PRO 164/94: Calibração e controle de sistemas medidores de irregularidade de superfícies de pavimentos**. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER PRO 010/79: Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis, procedimento A**. Rio de Janeiro, 1979a.

\_\_\_\_\_. **DNER PRO 011/79: Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis, procedimento B**. Rio de Janeiro, 1979b.

\_\_\_\_\_. **DNER PRO 273/96: Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)”**. Rio de Janeiro, 1996.

BRASIL – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). **DNIT 005/2003 – TER: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semirrígidos**. Rio de Janeiro, 2003a.

\_\_\_\_\_. **DNIT 007/2003 - PRO: Levantamento para avaliação da condição de superfície de subtrecho homogêneo de rodovias de pavimentos flexíveis e semirrígidos para gerência de pavimentos e estudos e projetos**. Rio de Janeiro, 2003b.

\_\_\_\_\_. **DNIT 006/2003 - PRO: Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos**. Rio de Janeiro, 2003c.

\_\_\_\_\_. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. Rio de Janeiro, 2006.

CHABOT, A.; CHUPIN, O.; DELOFFRE, L.; DUHAMEL, D. **ViscoRoute 2.0: A tool for the simulation of moving load effects on asphalt pavement**. Road Materials and Pavement Design, vol. 11, p. 227-250, 2010.

CHONG, W.; TRAMONTINI, R.; SPECHT, L. P. **Application of the Laplace transform and its numerical inversion to temperature profile of a two-layer pavement under site conditions**. Numerical Heat Transfer, Part A, 55, pp. 1004-1018, 2009.

CNT – Confederação Nacional de Transportes. **Pesquisa CNT de Rodovias 2018: relatório gerencial**. Brasília, 2018.

DE MELLO, L. G. R. **A teoria do dano em meio contínuo no estudo da fadiga em misturas asfálticas**. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2008.

DIEFENDERFER, B. K.; AL-QADI, I. L.; DIEFENDERFER, S. D. **Model to predict pavement temperature profile: development and validation**. Journal of Transportation Engineering, vol. 132, n. 2, pp. 162-167, 2006.

DOMEC, V. **Endommagement par fatigue des enrobés bitumineux em condition de trafic simule et de température**. Thèse de doctorat, L'Universite Bordeaux I, 2005.

DPTI – Department of Planning, Transport and Infrastructure. **Safety and service division Pavement Rehabilitation**. A supplement to the Austroads guide to pavement technology part 5: Pavement Evaluation and treatment design, Sydney, 2014.

DRUMM, E. C.; MEIER, R. **LTPP data analysis: daily and seasonal variations in situ material properties**. Prepared for National Cooperative Highway Research Program. Transportation Research Board. The University of Tennessee, Knoxville, TN, 2003.

ESLAMINIA, M.; GUDDATI, M. N. **Fourier-finite element analysis of pavements under moving vehicular loading**. International Journal of Pavement Engineering, 2015.

ESLAMINIA, M.; THIRUNAVUKKARASU, S.; GUDDATI, M. N.; KIM, Y. R. **Accelerated pavement performance modelling using layered viscoelastic analysis**. In: Proceedings of the 7th International RILEM Conference on Cracking in Pavements, Delft, The Netherlands, 2012.

FABRÍCIO, J. M.; DUARTE, J. C.; SILVA, P. D. E. **Correlação entre deflexões características em Pavimentos flexíveis medidos com a viga Benkelman e com o Falling Weight Deflectometer**. 30ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Salvador, 1996.

FERNANDES JÚNIOR, J. L.; BARBOSA, R. E. **Estimativa das cargas dinâmicas dos veículos rodoviários que atuam sobre pavimentos e pontes**. Transportes, São Paulo, v. 8, n. 2, p. 32-50, 2000.

FINN, F.; SARAF, C. L.; KULKARNI, R.; NAIR, K.; SMITH, W.; ABDULLAH, A. **Development of pavement structural subsystems**. NCHRP Report 291, 1986.

FONTES, L. P. T. L.; TRICHÊS, G.; PEREIRA, P.; PAIS, J. C. **Comportamento à fadiga e à deformação permanente de misturas asfálticas confeccionadas com asfalto-borracha brasileiro**. 19º Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro, 2008.

FONTES, L. P. T. L. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos**. Tese (Doutorado) – Universidade do Minho/Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

FRANCO, F. A. C. P. **Um sistema para análise mecânica de pavimentos asfálticos**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

FRITZEN, M. A. **Desenvolvimento e validação de função de transferência para previsão do dano por fadiga em pavimentos asfálticos**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

GONÇALVES, F. P.; CERATTI, J. A. P.; SOMACAL, L. **Desempenho de pavimentos flexíveis em concreto asfáltico**. Revista Estradas, n. 2, pp. 39-45, Porto Alegre, 2002.

GRANICH, A. R. **Efeitos da adição de cales na vida de fadiga de concretos asfálticos com agregados de basalto e ligantes convencionais e modificados**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

GSE – Gerência de Soluções de Engenharia. **Relatório sobre execução de levantamento estrutural e funcional em trechos experimentais monitorados pela UFSC (Itapoá, Jaborá, Joaçaba, Urubici, Orleans e Araranguá)**. 2018.

GTPA – Gerência de Tecnologia de Produtos Asfálticos. **Relatório sobre execução de levantamento estrutural e funcional em trechos experimentais monitorados pela UFSC (Itapoá, Jaborá, Joaçaba, Urubici, Orleans e Araranguá)**. 2016.

GU, F.; LUO, X.; WEST, R. C.; TAYLOR, A. J.; MOORE, N. D. **Energy-based crack initiation model for load-related top-down cracking in asphalt pavement**. Construction and Building Materials, 159, pp. 587-897, 2018.

HAPONIUK, B.; ZBICIAK, A. **Mechanistic-empirical asphalt pavement design considering the effect of seasonal temperature variations**. Archives of Civil Engineering, v. 62, n. 4, pp. 35-50, 2016.

HOU, T. **Fatigue performance prediction of North Carolina mixtures using simplified viscoelastic continuum damage model**. Dissertação (Mestrado) – North Carolina State University, North Carolina, 2009.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Dados Históricos: BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. 2018. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 14/05/2018.

KILPP, R.; SPECHT, L. P.; CAMPOS, M. **Desenvolvimento de modelos para previsão de temperature em pavimentos flexíveis**. 35ª Reunião Anual de Pavimentação, Rio de Janeiro, p. 1-12, 2004.

KIM, Y. R.; LITTLE, D. N. **One-Dimensional Constitutive Modeling of Asphalt Concrete**. ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 116, No. 4, pp. 751-772, 1990.

KIM, D.; NOROUZI, A.; KASS, S.; LISKE, T.; KIM, Y. R. **Mechanistic performance evaluation of pavement sections containing RAP and WMA additives in Manitoba**. Construction and Building Materials, v. 133, pp. 39–50, 2017.

KIM, Y. R. **Modeling of asphalt concrete**. American Society of Civil Engineers, McGraw-Hill Construction, 1ª Ed, 2009.

KERN, C. **Análise de desempenho de pavimentos da Rede Temática de Asfalto no Rio Grande do Sul – A avaliação de um pavimento submetido à oscilação do lençol freático**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

LACROIX, A. T. **Performance prediction of the NCAT test track pavements using mechanistic models**. Dissertation. North Carolina State University, 2013.

LI, Y.; LIU, L.; SUN, L. **Temperature predictions for asphalt pavement with thick asphalt layer**. Construction and Building Materials, 160, pp. 802-809, 2018.

LUZ, L. C. **Desempenho de revestimentos asfálticos executados em camada singular e integradas em rodovias de tráfego pesado: segmentos monitorados de Araranguá**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

MARCON, A. F. **Contribuição ao desenvolvimento de um sistema de gerência de pavimentos para a malha rodoviária estadual de Santa Catarina**. Tese (Doutorado) – Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 1996.

MARCON, M. F. **Estudo e comparação do desempenho mecânico e reológico entre concretos asfálticos modificados por polímero SBS, borracha moída de pneu e nanomateriais**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

MARTINS, A. T. **Contribuição para a validação do ensaio de resistência ao dano por fadiga para ligantes asfálticos**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

MATTOS, J. R. G. **Avaliação da aderência pneu- pavimento e tendências de desempenho para a rodovia BR-290/RS**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

MATTOS, J. R. G. **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 (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

MEDINA, J.; FARAH, H. **Dados sobre a temperatura de um revestimento betuminoso**. Publicação IPR. 1965.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. 3ª Ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

MELO, J. V. S. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

MOMM, L. **Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

MONISMITH, C. L.; SECOR, G. A.; SECOR, K. E. **Temperature induced stresses and deformations in asphalt concrete**. American Association of pavement technologists, vol. 34, 1965.

MOTTA, L. M. G. **O estudo da temperatura em revestimentos betuminosos**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1979.

MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

MOTTA, L. M. G.; MEDINA, J. **Experimental data on climatic factors in pavement and overlay design**. 2º Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projeto de Reforço, Rio de Janeiro, ABPv, 1989.

NASCIMENTO, L. A. H. **Estado da arte no dimensionamento de pavimentos flexíveis e aplicabilidade no cenário nacional.** In: 21º Encontro do Asfalto, Rio de Janeiro, 2014.

NASCIMENTO, L. A. H. **Implementation and validation of the viscoelastic continuum damage theory for asphalt mixture and pavement analysis in Brazil.** Dissertation. North Carolina State University, 2015.

NASCIMENTO, L. A. H. **Novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos.** In: 10º Seminário Nacional Modernas Técnicas Rodoviárias, Florianópolis, 2018.

NASCIMENTO, L. A. H.; ROCHA, S. M. N.; NASCIMENTO, C. E. H.; KIM, Y. R.; CHACUR, M.; MARTINS, A. T. **Uso da mecânica do dano contínuo na caracterização de misturas asfálticas brasileiras.** Submetido ao 21º Encontro de Asfalto do IBP. 2014.

NASCIMENTO, D. M. **Análise comparativa de modelos de previsão de desempenho de pavimentos flexíveis.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

NCHRP. **Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures: Program 1-37A, Final Report.** Disponível em: <<http://www.trb.org/mepdg/guide.htm>>. Acesso em: 16/08/2018.

OLIVEIRA, A. D. **Contribuição à avaliação do desempenho dos pavimentos na região de rochas de embasamento cristalino em Santa Catarina.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

OTTO, G. G. **Misturas asfálticas mornas – verificação de fadiga e módulo complexo.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

PACHECO, L. M. **Análise paramétrica da resistência ao cisalhamento de misturas asfálticas.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

PARK, S. W.; KIM, Y. R.; SCHAPERLY, R. A. **A viscoelastic continuum damage model and its application to uniaxial behavior of asphalt concrete.** Vol. 24, n. 4, pp. 241-255, 1996.

PARK, D.; BUCH, N.; CHATTI, K. **Effective layer temperature prediction model and temperature correction via falling weight deflectometer deflections.** Transportation Research Record 1764, pp. 97-111, 2001.

PATERSON, W. D. O. **Road deterioration and maintenance effects: models for planning and management.** The International Bank for Reconstruction and Development. Washington, 1987.

PÉREZ, J. S. L. **Avaliação do desempenho de pavimentos flexíveis dos segmentos monitorados de Urubici e Itapoá**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

PERRET, J. **Déformation des couches bitumineuses au passage d'une charge de trafic**. Tese (Doutorado) – École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, France, 2003.

PIERCE, L. M.; MCGOVERN, G. **Implementation of the AASHTO Mechanistic Empirical Pavement Design Guide and Software**. Report NCHRP Synthesis 457, 2014.

PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

PNCT – PLANO NACIONAL DE CONTAGEM DE TRÁFEGO. **Dados de Tráfego**. Disponível em: <<http://servicos.dnit.gov.br/dadospnct>>. Acesso em: 20/06/2018.

PREVITERA FILHO, J. **Efeito da temperatura na deformabilidade dos pavimentos asfálticos**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1974.

PROWELL, B. D. **Estimate of Fatigue Shift Factors Between Laboratory Tests and Field Performance**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n. 2181, Washington, D.C., 2010.

QUEIROZ, C. A. **Performance prediction models for pavement management in Brazil**. Tese (Doutorado) – University of Texas, Austin, 1981.

QUINTERO, C. F. Q. **Estudo de misturas asfálticas com ligantes de consistência elevada: formulação e comportamento mecânico**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

QUINTERO, C. F. Q. **Influência da temperatura e da consistência do ligante na fadiga e no módulo complexo de misturas asfálticas**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

RAMADHAN, R. H.; WAHHAB, H. I. A. **Temperature variation of flexible and rigid pavements in Eastern Saudi Arabia**. Building and Environment, vol. 32, n. 4, pp. 367-373, 1997.

RICCI, E. A.; VASCONCELOS, J. F.; DUARTE, C.; DORIGO, D. **Influência da sazonalidade e da temperatura nas medições de deflexão**. Relatório Parcial 02, vol. I, PAEP – Máxima Engenharia – DNER, 1983.

RODRIGUES, A. C. **Avaliação da influência da granulometria na aderência pneu-pavimento**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

ROQUE, R.; ZOU, J.; KIM, Y. R.; BAEK, C.; THIRUNAVUKKARASU, S.; UNDERWOOD, B. S. GUDDATI, M. N. **Top-down cracking for hot-mix asphalt layers: models for initiation and propagation**. Transportation Research Board: Report for NCHRP Project 1-42A. Washington, D.C., 2010.

ROSSATO, F. P. **Avaliação do fenômeno de fadiga e das propriedades elásticas de misturas asfálticas com diferentes ligantes em variadas temperaturas**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

SANTIAGO, L. S.; SOARES, J. B. **Contribuições ao desenvolvimento do novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos no Brasil**. XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transportes da ANPET, Ouro Preto, 2015.

SANTIAGO, L. S.; SILVA, S. A. T.; SOARES, J. B. **Determinação do dano em pavimentos asfálticos por meio da combinação do modelo S-VECD com análises elásticas**. Revista Transportes, v. 26, n. 2, pp. 31-43, 2018.

SANTOS, A. S. **Segmentos monitorados de Araranguá: Construção e previsão de desempenho do revestimento em camadas singulares e integradas**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SCHÜZ, W. **A History of Fatigue**. Engineering Fracture Mechanics, vol. 54(2), pp. 263-300, 1996.

SILVA, B. A. **Análise mecânica de um pavimento rodoviário submetido à oscilação do lençol freático simulada em modelo físico de verdadeira grandeza**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SILVA, H. N. **Caracterização viscoelástica linear de misturas asfálticas: operacionalização computacional e análise pelo método de elementos finitos**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

SOARES, J. B.; MORENO, A. M.; MOTTA, L. M. G. **Aspectos gerais de métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos de vários países e a relação com um novo método brasileiro**. Revista Pavimentação, n. 14, 2009.

SPECHT, L. P.; BORGES, P. A. P.; HELLMANN, L. **Determinação das propriedades térmicas de concretos asfálticos com diferentes tipos de ligantes**. Revista Tecnologia, vol. 29, n. 2, p. 198-210. Fortaleza, 2008.

TAYEBALI, A. A.; DEACON, J. A.; COPLANTZ, J. S.; HARVEY, J. T.; MONISMITH, C. L. **Fatigue response of asphalt-aggregate mixes**. Strategic Highway Research Program – SHRP-A-404, National Research Council, 1994.

TONIAL, I. A. **Influência do envelhecimento do revestimento asfáltico na vida de fadiga de pavimentos**. Tese (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

TRICHÊS, G. **Desenvolvimento de método para dimensionamento de pavimentos asfálticos. Fase I: trechos experimentais e materiais de pavimentação**. Florianópolis, 2014.

TRICHÊS, G. **Relatório técnico nº 4 de acompanhamento de projeto de pesquisa (Rede Temática de Tecnologia em Asfalto)**. Florianópolis, 2016.

UNDERWOOD, B. S.; KIM, Y. R.; GUDDATI, M. N. **Improved calculation method of damage parameter in viscoelastic continuum damage model**. International Journal of Pavement Engineering, Vol. 11, pp. 459-476, 2010.

VILLANI, M. M. **Friction in asphalt concrete mixes: experimental and computational issues**. Dissertação (Doutorado) – Delft University of Technology, 2015.

VITORELLO, T. **Análise de desempenho de estrutura de pavimento flexível da rodovia BR-290/RS no trecho Osório – Porto Alegre**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

WANG, T.; SU, L.; ZHAI, J. **A case study on diurnal and seasonal variation in pavement temperature**. International Journal of Pavement Engineering, vol. 15, n. 5, pp. 402-408, 2014.

WANG, Y.; NOROUZI, A.; KIM, Y. R. **Comparison of fatigue cracking performance of asphalt pavement predicted by Pavement ME and LVECD programs**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, no. 2590, pp. 44–55. Washington, D.C., 2016.

WEATHER SPARK. **Condições meteorológicas de Araranguá**. 2018. Disponível em: <<https://pt.weatherspark.com/y/29887/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Ararangu%C3%A1-Brasil-durante-o-ano#Sections-Sources>>. Acesso em: 28/02/2018.

WITCZACK, M. W. **Simplified approach to determine the annual pavement temperature distribution**. Work Element 7 – Environmental Effects Model, Tech Memo 1. University of Maryland, College Park, 1996.

XU, Q.; SOLAIMANIAN, M. **Modelling linear viscoelastic properties of asphalt concrete by the Huet-Sayegh model**. International Journal of Pavement Engineering, v. 10, n. 6, pp. 401-422, 2009.

YSHIBA, J. K. **Modelo de desempenho de pavimentos: estudo de rodovias do estado do Paraná**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

YUSOFF, N. I. **Modelling the linear viscoelastic rheological properties of bituminous binders**. Tese (Doutorado) – The University of Nottingham, Nottingham, 2012.

ZEIADA, W. **Endurance limit for hma based on healing phenomenon using viscoelastic continuum damage analysis**. Dissertation. Arizona State University, 2012.

ZHENG, Y.; ZHANG, P.; LIU, H. **Correlation between pavement temperature and deflection basin form factors of asphalt pavement**. International Journal of Pavement Engineering, 2017.

ZUO, G.; MEIER, R. W.; DRUMM, E. C. **Effect of temperature averaging on predicted pavement life**. Transportation Research Record 1809, Transportation Research Board, pp. 119-125, Washington, D.C., 2002.

ZUO, G.; DRUMM, E. C.; MEIER, R. W. **Environmental effects on the predicted service life of flexible pavements**. Journal of Transportation Engineering, vol. 133, n. 1, pp. 47-56, 2007.

## APÊNDICE A – Dados do levantamento de 2017

### APÊNDICE A.1 Afundamento de trilha de roda

Apêndice A.1.1 – Afundamento de trilha de roda do segmento monitorado 05.

ESTACA/MARCO	FAIXA ESQUERDA		FAIXA DIREITA	
	TRE (mm)	TRI (mm)	TRE (mm)	TRI (mm)
411+800	1,7	1,8	4,0	1,9
411+820	1,6	1,7	2,8	2,0
411+840	1,7	1,1	4,1	1,2
411+860	1,8	1,0	4,6	1,1
411+880	1,3	1,0	8,1	1,0
411+900	2,0	1,2	6,5	0,7
411+920	2,2	1,6	5,8	0,9
411+940	2,3	1,5	6,7	2,4
411+960	1,7	1,5	4,4	2,0
411+980	1,9	1,3	3,5	3,5
412+000	1,6	1,6	4,9	4,7
412+020	1,6	1,8	4,8	5,8
412+040	2,0	1,9	3,5	7,8
412+060	2,4	1,2	3,6	6,0
412+080	2,3	1,0	4,8	3,1
<b>Média</b>	1,87	1,41	4,81	2,94
<b>Desvio Padrão</b>	0,32	0,32	1,43	2,19

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice A.1.2 – Afundamento de trilha de roda do segmento monitorado 03.

ESTACA/MARCO	FAIXA ESQUERDA		FAIXA DIREITA	
	TRE (mm)	TRI (mm)	TRE (mm)	TRI (mm)
412+100	2,6	1,6	4,4	0,7
412+120	2,2	1,5	4,5	0,6
412+140	2,0	1,4	4,6	0,9
412+160	2,2	1,1	4,4	0,9
412+180	1,6	1,0	3,9	0,9
412+200	1,6	0,9	4,0	1,7
412+220	2,6	0,6	3,0	1,2
412+240	2,3	0,6	3,7	1,7
412+260	3,0	0,5	3,8	1,5
412+280	2,7	0,9	4,6	2,0
412+300	2,7	0,6	4,2	2,1
412+320	1,9	1,0	3,5	1,6
412+340	2,0	0,8	4,1	1,6
412+360	2,4	1,0	5,8	1,0
412+380	2,4	0,6	5,5	0,8
412+400	1,7	0,8	2,9	2,3
<b>Média</b>	2,24	0,93	4,18	1,34
<b>Desvio Padrão</b>	0,42	0,34	0,77	0,54

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## Apêndice A.1.3 – Afundamento de trilha de roda do segmento monitorado 04.

ESTACA/MARCO	FAIXA ESQUERDA		FAIXA DIREITA	
	TRE (mm)	TRI (mm)	TRE (mm)	TRI (mm)
413+000	0,5	1,0	6,8	7,0
413+020	0,6	1,2	6,3	7,0
413+040	0,3	0,8	11,1	8,0
413+060	0,7	0,9	11,0	6,9
413+080	1,2	0,6	11,0	5,5
413+100	1,1	1,3	12,0	3,2
413+120	0,7	1,3	10,9	6,1
413+140	0,7	1,4	9,6	6,0
413+160	0,8	1,3	10,0	6,7
413+180	0,7	1,4	8,4	6,1
413+200	0,6	1,3	7,7	6,7
413+220	0,8	1,2	4,6	5,9
413+240	0,0	1,0	5,4	5,0
413+260	0,8	1,1	6,6	4,3
413+280	0,6	1,0	7,3	4,8
413+300	0,7	0,9	5,6	6,3
<b>Média</b>	0,68	1,11	8,39	5,97
<b>Desvio Padrão</b>	0,28	0,23	2,41	1,19

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## APÊNDICE A.2 Irregularidade longitudinal

### Apêndice A.2.1 – Irregularidade longitudinal do segmento monitorado 05.

ESTACA/MARCO	FAIXA ESQUERDA	FAIXA DIREITA
	IRI (m/km)	IRI (m/km)
411+800	3,95	1,45
411+820	2,08	2,43
411+840	2,32	1,94
411+860	1,00	4,41
411+880	1,51	1,83
411+900	1,29	1,37
411+920	1,83	1,42
411+940	0,98	1,37
411+960	1,20	1,21
411+980	1,11	2,05
412+000	1,19	1,72
412+020	0,75	1,32
412+040	0,68	2,42
412+060	1,29	2,54
412+080	2,26	2,80
<b>Média</b>	1,56	2,02
<b>Desvio Padrão</b>	0,84	0,83

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

### Apêndice A.2.2 – Irregularidade longitudinal do segmento monitorado 03.

ESTACA/MARCO	FAIXA ESQUERDA	FAIXA DIREITA
	IRI (m/km)	IRI (m/km)
412+100	2,00	2,08
412+120	2,51	2,10
412+140	1,15	1,60
412+160	1,62	1,59
412+180	1,40	0,97
412+200	2,32	1,91
412+220	1,77	1,39
412+240	1,43	1,83
412+260	1,20	1,22
412+280	1,44	1,83
412+300	1,09	1,66
412+320	1,70	1,23
412+340	0,98	1,44
412+360	1,59	1,20
412+380	0,84	1,61
412+400	1,63	1,04
<b>Média</b>	1,54	1,54
<b>Desvio Padrão</b>	0,46	0,35

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## Apêndice A.2.3 – Irregularidade longitudinal do segmento monitorado 04.

ESTACA/MARCO	FAIXA ESQUERDA	FAIXA DIREITA
	IRI (m/km)	IRI (m/km)
413+000	1,11	1,91
413+020	1,30	1,54
413+040	1,48	1,83
413+060	1,23	1,95
413+080	1,70	2,42
413+100	3,24	2,30
413+120	1,61	2,22
413+140	1,11	1,59
413+160	1,34	1,46
413+180	0,98	1,44
413+200	1,13	1,11
413+220	1,29	1,28
413+240	2,39	1,26
413+260	2,08	2,62
413+280	2,61	2,47
413+300	2,05	5,74
<b>Média</b>	1,67	2,07
<b>Desvio Padrão</b>	0,64	1,09

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

### APÊNDICE A.3 Levantamento deflectométrico

Apêndice A.3.1 – Levantamento deflectométrico do segmento monitorado 05 – Faixa esquerda.

ESTACA/ MARCO	CARGA APLICADA		DEFLEXÃO RECUPERÁVEL (0,01 mm)							TEMPERATURA (°C)	
			D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6		
	kgf	kN	0	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm	AR	PAV.
411+800	4078,86	40	21,3	14,9	11,6	8,7	6,4	4,1	3,2	28	43
411+820	4068,67	39,9	23,1	16,3	13,2	9,8	7,0	4,4	3,2	28	43
411+840	4068,67	39,9	23,1	16,4	13,1	9,3	6,6	4,0	2,6	28	44
411+860	4078,86	40	23,9	16,8	12,9	9,1	6,4	3,9	2,7	28	44
411+880	4078,86	40	24,5	16,6	12,8	8,9	6,3	4,0	2,9	28	44
411+900	4058,47	39,8	27,6	20,2	15,8	11,4	8,2	5,1	3,6	28	44
411+920	4058,47	39,8	24,8	17,8	14,3	10,7	7,8	4,9	3,4	28	44
411+940	4058,47	39,8	27,6	20,1	15,8	11,5	8,4	5,3	3,7	28	44
411+960	4068,67	39,9	24,1	16,9	13,0	9,0	6,4	4,1	3,0	28	44
411+980	4078,86	40	23,2	16,4	12,8	9,2	6,6	4,3	3,1	28	45
412+000	4078,86	40	24,8	17,7	13,7	9,7	7,0	4,6	3,3	28	46
412+020	4068,67	39,9	22,6	15,5	12,0	8,5	6,2	4,1	3,0	28	45
412+040	4078,86	39,9	24,0	16,4	12,7	8,8	6,2	4,1	2,9	29	46
412+060	4089,06	40	24,2	16,8	12,9	8,9	6,3	4,0	2,9	29	46
412+080	4089,06	40,1	21,6	15,1	11,8	8,4	6,1	4,1	3,0	29	47

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice A.3.2 – Levantamento deflectométrico do segmento monitorado 05 – Faixa direita.

ESTACA/ MARCO	CARGA APLICADA		DEFLEXÃO RECUPERÁVEL (0,01 mm)							TEMPERATURA (°C)	
			D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6		
	kgf	kN	0	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm	AR	PAV.
411+800	4058,47	39,80	20,7	14,6	11,1	7,5	5,1	3,2	2,2	25,0	38
411+820	4078,86	40,00	19,2	13,9	10,9	7,4	5,3	3,1	2,2	25,0	39
411+840	4099,26	40,20	18,8	13,6	10,7	7,2	5,1	3,0	2,1	25,0	39
411+860	4089,06	40,10	17,7	12,8	10,1	6,7	4,8	2,7	1,9	25,0	39
411+880	4099,26	40,20	17,4	12,1	9,5	6,6	4,7	3,0	2,2	25,0	38
411+900	4089,06	40,10	19,7	13,9	10,6	7,5	5,3	3,4	2,5	25,0	38
411+920	4078,86	40,00	19,4	13,5	10,6	7,3	5,2	3,1	2,1	25,0	38
411+940	4078,86	40,00	22,2	15,7	11,8	8,1	5,8	3,8	2,6	24,0	38
411+960	4078,86	40,00	21,9	15,3	11,9	8,2	5,8	3,6	2,5	24,0	39
411+980	4078,86	40,00	22,9	15,8	11,7	7,5	5,2	3,3	2,5	24,0	38
412+000	4058,47	39,80	22,1	15,3	11,5	7,4	4,9	3,1	2,4	24,0	38
412+020	4068,67	39,90	22,2	15,5	11,8	7,6	5,3	3,4	2,5	24,0	37
412+040	4078,86	40,00	21,9	15,2	11,4	7,7	5,2	3,3	2,4	24,0	38
412+060	4078,86	40,00	24,4	16,5	12,1	7,2	5,1	3,1	2,3	24,0	37
412+080	4089,06	40,10	20,8	14,8	11,4	7,6	5,4	3,2	2,3	24,0	37

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## Apêndice A.3.3 – Levantamento deflectométrico do segmento monitorado 03 – Faixa esquerda.

ESTACA/ MARCO	CARGA APLICADA		DEFLEXÃO RECUPERÁVEL (0,01 mm)							TEMPERATURA	
			D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	(°C)	
	kgf	kN	0	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm	AR	PAV.
412+100	4089,06	40,1	18,0	12,8	10,4	8,1	6,0	4,2	3,0	29	46
412+120	4099,26	40,2	19,5	14,0	11,4	8,5	6,4	4,3	3,0	28	45
412+140	4099,26	40,2	17,9	12,9	10,6	7,9	5,9	4,0	2,9	28	44
412+160	4089,06	40,1	18,7	13,6	10,9	8,3	6,2	4,0	2,9	28	45
412+180	4099,26	40,2	19,0	13,8	11,3	8,1	6,0	3,8	2,8	28	46
412+200	4089,06	40,1	18,6	13,5	11,0	8,2	6,1	4,0	2,8	28	45
412+220	4089,06	40,1	20,0	14,5	12,0	9,2	6,7	4,2	2,9	27	45
412+240	4068,67	39,9	21,0	15,4	12,6	9,6	7,1	4,6	3,0	27	43
412+260	4068,67	39,9	21,1	15,7	13,0	9,9	7,2	4,7	3,2	27	42
412+280	4089,06	40,1	21,6	16,0	12,8	9,7	7,0	4,4	3,0	27	43
412+300	4089,06	40,1	19,8	14,6	12,1	9,0	6,7	4,2	2,8	27	43
412+320	4068,67	39,9	20,1	14,9	12,2	9,3	6,8	4,5	3,2	27	43
412+340	4078,86	40	20,2	14,7	12,0	9,1	6,7	4,6	3,1	27	43
412+360	4068,67	39,9	21,3	15,3	12,6	9,4	6,8	4,4	3,2	28	44
412+380	4068,67	39,9	22,6	16,8	13,5	10,3	7,5	4,9	3,3	28	43
412+400	3987,09	39,1	22,0	16,3	13,2	9,9	7,3	4,7	3,3	28	44

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## Apêndice A.3.4 – Levantamento deflectométrico do segmento monitorado 03 – Faixa direita.

ESTACA/ MARCO	CARGA APLICADA		DEFLEXÃO RECUPERÁVEL (0,01 mm)							TEMPERATURA	
			D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	(°C)	
	kgf	kN	0	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm	AR	PAV.
412+100	4089,06	40,10	17,1	12,7	10,4	7,7	5,7	3,6	2,5	23,0	36
412+120	4089,06	40,10	17,5	13,4	11,0	8,3	6,1	3,7	2,4	23,0	36
412+140	4068,67	39,90	16,7	12,1	9,5	6,9	5,0	3,1	2,4	23,0	36
412+160	4058,47	39,80	18,3	13,5	10,7	7,7	5,6	3,5	2,5	23,0	36
412+180	4089,06	40,10	18,3	13,7	11,1	8,2	6,0	3,6	2,7	23,0	35
412+200	4078,86	40,00	18,7	14,0	11,2	8,0	5,8	3,6	2,5	23,0	35
412+220	4089,06	40,10	17,7	13,4	11,2	8,3	6,0	3,6	2,5	23,0	34
412+240	4078,86	40,00	20,7	15,3	12,3	8,8	6,3	3,7	2,6	23,0	35
412+260	4058,47	39,80	20,3	15,4	12,6	9,2	6,5	3,7	2,6	23,0	35
412+280	4078,86	40,00	17,1	13,2	11,1	8,5	6,2	3,8	2,5	23,0	34
412+300	4068,67	39,90	19,3	14,5	11,7	8,6	6,3	3,9	2,8	23,0	36
412+320	4048,27	39,70	19,6	14,5	11,7	8,6	6,1	3,7	2,6	23,0	37
412+340	4068,67	39,90	21,6	16,4	13,4	9,6	6,8	3,9	2,7	23,0	36
412+360	4058,47	39,80	17,2	12,6	10,5	7,8	5,6	3,6	2,4	23,0	37
412+380	4099,26	40,20	19	14,0	11,4	8,4	6,0	3,6	2,5	23,0	36
412+400	4099,26	40,20	17,6	13,4	11,0	8,3	6,1	3,9	2,9	22,0	36

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## Apêndice A.3.5 – Levantamento deflectométrico do segmento monitorado 04 – Faixa esquerda.

ESTACA/ MARCO	CARGA APLICADA		DEFLEXÃO RECUPERÁVEL (0,01 mm)							TEMPERATURA	
			D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	(°C)	
	kgf	kN	0	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm	AR	PAV.
413+000	3997,29	39,2	24,2	18,1	14,6	10,7	7,9	5,4	3,9	29	46
413+020	3987,09	39,1	22,7	16,5	13,4	10,3	7,8	5,5	4,1	29	46
413+040	3987,09	39,1	25,8	19,4	15,6	11,8	8,9	6,0	4,4	29	47
413+060	4007,48	39,3	25,0	18,2	14,5	10,9	8,2	5,7	4,4	29	48
413+080	3987,09	39,1	29,7	22,0	17,4	13,0	9,8	6,4	4,5	28	46
413+100	3997,29	39,2	25,6	18,7	15,2	11,5	8,5	5,5	3,9	28	46
413+120	3987,09	39,1	25,4	19,2	15,7	11,9	8,9	5,7	4,2	28	46
413+140	3997,29	39,2	24,9	19,1	15,8	12,3	9,3	6,3	4,6	28	45
413+160	4017,68	39,4	24,7	19,2	16,2	13,0	10,1	7,3	5,4	28	46
413+180	4007,48	39,3	25,6	19,6	16,1	12,4	9,5	6,5	4,9	28	46
413+200	4017,68	39,4	24,9	19,4	16,2	12,8	9,7	6,9	5,2	28	45
413+220	4017,68	39,4	23,0	17,5	14,4	11,3	8,7	6,2	4,7	28	45
413+240	4027,88	39,5	22,3	17,3	14,6	11,7	9,3	6,5	5,0	28	45
413+260	4038,08	39,6	20,6	15,7	13,6	10,7	8,3	5,8	4,3	28	46
413+280	4048,27	39,7	23,3	17,7	15,0	12,1	9,7	7,1	5,3	27	45
413+300	4068,67	39,9	21,9	16,9	14,4	11,8	9,3	6,9	5,2	27	41

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## Apêndice A.3.6 – Levantamento deflectométrico do segmento monitorado 04 – Faixa direita.

ESTACA/ MARCO	CARGA APLICADA		DEFLEXÃO RECUPERÁVEL (0,01 mm)							TEMPERATURA	
			D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	(°C)	
	kgf	kN	0	20 cm	30 cm	45 cm	60 cm	90 cm	120 cm	AR	PAV.
413+000	4099,26	40,20	21	14,9	11,5	7,9	5,8	4,1	3,2	22,0	33
413+020	4068,67	39,90	24,2	17,3	13,6	9,2	6,5	4,0	2,9	22,0	34
413+040	4058,47	39,80	28,5	20,6	15,8	10,6	7,1	4,6	3,8	22,0	33
413+060	4058,47	39,80	28,4	20,6	15,7	10,9	7,7	4,9	3,5	22,0	33
413+080	4058,47	39,80	28,3	20,9	16,6	11,4	8,0	5,0	3,7	22,0	33
413+100	4078,86	40,00	25,7	18,7	15,0	10,5	7,7	4,8	3,4	22,0	34
413+120	4078,86	40,00	28,3	20,8	16,7	12,5	8,9	5,7	4,1	22,0	34
413+140	4089,06	40,10	27	19,6	15,8	11,6	8,5	5,6	4,1	22,0	33
413+160	4099,26	40,20	25,8	19,4	15,6	11,8	8,8	6,0	4,6	22,0	34
413+180	4068,67	39,90	29,6	22,1	17,2	11,1	7,7	5,3	4,2	22,0	34
413+200	4089,06	40,10	25,5	18,9	15,0	10,7	8,0	5,5	4,4	22,0	34
413+220	4109,46	40,30	23,8	17,3	14,0	10,0	7,2	4,9	4,0	22,0	34
413+240	4129,85	40,50	25,2	18,3	14,8	10,7	7,2	5,2	4,0	22,0	33
413+260	4129,85	40,50	22,1	16,1	12,7	9,4	6,9	5,0	4,0	22,0	32
413+280	4119,65	40,40	21,5	16,3	13,4	10,3	8,1	5,8	4,6	21,0	32
413+300	4058,47	39,80	22,5	16,2	13,4	10,1	7,6	5,3	4,1	21,0	33

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## APÊNDICE B – Dados do levantamento de 2018

### APÊNDICE B.1 Inventário de defeitos de superfície

Apêndice B.1.1 – Inventário de defeitos de superfície do segmento monitorado 05.

RODOVIA: BR-101/SC ARARANGUÁ		OPERADOR: LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO DA UFSC														
TRECHO: SEGMENTO MONITORADO 05		REVESTIMENTO: CONCRETO ASFÁLTICO COM LIGANTE CONVENCIONAL														
DATA: 20/11/2018		ESTACA INICIAL: 0+360				ESTACA FINAL: 0+660				FAIXA: DIREITA						
Estaca/ Marco	TRINCAS			AFUNDAMENTOS				OUTROS DEFEITOS						FLECHA		Observação
	ISOLADAS	INTERLIGADAS	FC-3	PLÁSTICO		CONS.		O	P	E	EX	D	R	TRI (mm)	TRE (mm)	
				FC-1	FC-2	ALP	ATP									
0+360,5	x															Área de 0,5 x 0,2m
0+374,5	x															Área de 0,5 x 0,2m
0+374,5	x															Área de 0,2 x 0,2m
0+376,7	x															Área de 0,2 x 0,3m
0+377,2	x															Área de 0,5 x 1,8m
0+378,8	x															Área de 0,4 x 0,6m
0+379,7	x															Área de 0,6 x 0,2m
0+379,4	x															Área de 0,3 x 0,2m
0+377,3	x															Área de 0,2 x 0,8m
0+381,3	x															Área de 0,8 x 0,2m
0+381,5	x															Área de 0,4 x 0,2m
0+385,1	x															Área de 0,4 x 0,8m
0+386,9	x															Área de 0,2 x 0,6m
0+406,1	x															Área de 0,8 x 0,2m
0+406,5	x															Área de 0,2 x 1,0m
0+407,7	x															Área de 0,2 x 0,4m
0+408,2	x															Área de 0,4 x 0,4m
0+412,4	x															Área de 0,2 x 0,6m
0+413	x															Área de 0,3 x 1,2m
0+414,4	x															Área de 0,2 x 0,7m
0+415,2	x															Área de 1,2 x 0,3m
0+414,4	x															Área de 0,5 x 0,2m
0+414,9	x															Área de 0,5 x 0,2m
0+420,9	x															Área de 0,5 x 0,2m
0+422,2	x															Área de 0,5 x 0,3m
0+424	x															Área de 0,5 x 0,2m
0+425,9	x															Área de 0,4 x 0,2m
0+425,9	x															Área de 0,4 x 0,2m
0+426,8		x														Área de 1,0 x 4,8m
0+431,6			x													Área de 1,0 x 0,5m
0+432,1	x															Área de 0,9 x 1,1m
0+433,4	x															Área de 0,2 x 0,3m
0+433,6	x															Área de 0,2 x 0,3m
0+433,6	x															Área de 0,2 x 0,3m
0+434	x															Área de 0,9 x 0,4m
0+438,8	x															Área de 0,4 x 0,2m
0+439	x															Área de 0,3 x 0,5m
0+421,6	x															Área de 0,8 x 0,2m
0+426,7	x															Área de 0,6 x 0,2m

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## Apêndice B.1.1 – Inventário de defeitos de superfície do segmento monitorado 05 (continuação).

<b>RODOVIA:</b> BR-101/SC ARARANGUÁ		<b>OPERADOR:</b> LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO DA UFSC														
<b>TRECHO:</b> SEGMENTO MONITORADO 05		<b>REVESTIMENTO:</b> CONCRETO ASFÁLTICO COM LIGANTE CONVENCIONAL														
<b>DATA:</b> 20/11/2018		<b>ESTACA INICIAL:</b> 0+360				<b>ESTACA FINAL:</b> 0+660				<b>FAIXA:</b> DIREITA						
Estaca/ Marco	TRINCAS			AFUNDAMENTOS				OUTROS DEFEITOS						FLECHA		Observação
	ISOLADAS	INTERLIGADAS	FC-3	PLÁSTICO		CONS.		O	P	E	EX	D	R	TRI (mm)	TRE (mm)	
				FC-1	FC-2	ALP	ATP									
0+427,1	x															Área de 0,2 x 0,2m
0+430,9	x															Área de 0,6 x 0,2m
0+434,9	x															Área de 0,7 x 0,5m
0+436,2	x															Área de 0,3 x 0,2m
0+445,9	x															Área de 0,2 x 0,4m
0+444,1	x															Área de 0,5 x 0,6m
0+451,7	x															Área de 0,7 x 0,2m
0+454	x															Área de 0,4 x 0,2m
0+454,9	x															Área de 0,4 x 0,3m
0+455,9	x															Área de 1,1 x 0,3m
0+461,7	x															Área de 0,7 x 0,3m
0+466,9	x															Área de 0,4 x 0,4m
0+469,9	x															Área de 0,4 x 0,6m
0+473,2	x															Área de 0,4 x 0,7m
0+476,4	x															Área de 0,5 x 0,3m
0+462,7	x															Área de 0,5 x 0,6m
0+464,7	x															Área de 0,5 x 0,6m
0+469,1	x															Área de 1,0 x 0,5m
0+473,4	x															Área de 0,8 x 0,4m
0+482,7	x															Área de 0,4 x 0,5m
0+486,2	x															Área de 0,6 x 0,2m
0+487,1	x															Área de 0,3 x 0,4m
0+487,9	x															Área de 0,3 x 0,5m
0+489,5	x															Área de 0,3 x 0,8m
0+490,6	x															Área de 0,7 x 0,2m
0+491,2	x															Área de 0,9 x 2,0m
0+493,2		x														Área de 1,1 x 3,8m
0+497,3		x														Área de 0,9 x 2,7m
0+500		x														Área de 0,9 x 1,6m
0+501,6	x															Área de 0,7 x 4,6m
0+506,2	x															Área de 0,8 x 12,8m
0+520	x															Área de 0,5 x 0,2m
0+482,4	x															Área de 0,4 x 1,7m
0+489,1	x															Área de 0,4 x 0,5m
0+490,7	x															Área de 0,2 x 0,5m
0+492,2	x															Área de 0,3 x 0,5m
0+494			x													Área de 0,8 x 0,3m
0+494,3		x														Área de 0,8 x 0,9m
0+495,2	x															Área de 0,8 x 4,8m
0+500		x														Área de 0,6 x 3,3m
0+505	x															Área de 0,6 x 0,2m
0+507,1	x															Área de 0,5 x 0,2 m
0+507,2	x															Área de 0,5 x 0,2 m
0+512	x															Área de 0,5 x 0,4m
0+517,1	x															Área de 0,4 x 0,7m
0+520,6	x															Área de 0,2 x 0,3m

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## Apêndice B.1.1 – Inventário de defeitos de superfície do segmento monitorado 05 (continuação).

RODOVIA: BR-101/SC ARARANGUÁ			OPERADOR: LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO DA UFSC													
TRECHO: SEGMENTO MONITORADO 05			REVESTIMENTO: CONCRETO ASFÁLTICO COM LIGANTE CONVENCIONAL													
DATA: 20/11/2018			ESTACA INICIAL: 0+360				ESTACA FINAL: 0+660				FAIXA: DIREITA					
Estaca/ Marco	TRINCAS			AFUNDAMENTOS				OUTROS DEFEITOS						FLECHA		Observação
	ISOLADAS	INTERLIGADAS	FC-3	PLÁSTICO		CONS.		O	P	E	EX	D	R	TRI (mm)	TRE (mm)	
				FC-1	FC-2	ALP	ATP									
0+521,1	x															Área de 0,2 x 0,3m
0+521,7	x															Área de 0,3 x 0,4m
0+522,4	x															Área de 0,4 x 0,2m
0+522,9	x															Área de 0,4 x 0,2m
0+523,4	x															Área de 0,7 x 0,2m
0+523,7	x															Área de 0,3 x 0,4m
0+524,3	x															Área de 0,4 x 0,2m
0+524,7	x															Área de 0,2 x 0,3m
0+525,5	x															Área de 0,5 x 0,2m
0+527,1	x															Área de 0,4 x 0,2m
0+527,6	x															Área de 0,7 x 2,2m
0+529,7	x															Área de 0,6 x 0,2m
0+534,1	x															Área de 0,8 x 4,9m
0+520,5	x															Área de 0,5 x 0,2m
0+522,9	x															Área de 0,5 x 0,2m
0+530,6	x															Área de 0,6 x 0,5m
0+532,4	x															Área de 0,5 x 0,3m
0+537,5	x															Área de 0,2 x 0,2m
0+537,8	x															Área de 0,2 x 0,3m
0+542,2	x															Área de 0,7 x 0,2m
0+549,6	x															Área de 0,5 x 0,6m
0+552,9	x															Área de 0,5 x 0,4m
0+553,3	x															Área de 0,6 x 3,4m
0+542,7	x															Área de 0,2 x 0,2m
0+547,6	x															Área de 0,5 x 0,2m
0+548,9	x															Área de 0,8 x 1,1m
0+550			x													Área de 1,1 x 4,4m
0+554,4		x														Área de 1,1 x 3,2m
0+557,6	x															Área de 1,1 x 0,4m
0+560		x														Área de 0,9 x 20m
0+560			x													Área de 0,9 x 2,0m
0+562			x													Área de 0,7 x 1,4m
0+563,4		x														Área de 0,7 x 3,5m
0+566,9	x															Área de 0,4 x 1,0m
0+568	x															Área de 0,2 x 0,2m
0+569	x															Área de 0,5 x 0,3m
0+572	x															Área de 0,2 x 0,2m
0+573	x															Área de 0,3 x 0,2m
0+573,5		x														Área de 0,9 x 1,7m
0+575,7	x															Área de 0,9 x 4,3m
0+580			x													Área de 1,0 x 10,0m
0+590		x														Área de 1,0 x 2,8m
0+592,8	x															Área de 0,7 x 4,1m
0+599	x															Área de 0,7 x 1,1m
0+580	x															Área de 0,4 x 1,2m
0+581,2	x															Área de 0,7 x 2,0m

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## Apêndice B.1.1 – Inventário de defeitos de superfície do segmento monitorado 05 (continuação).

RODOVIA: BR-101/SC ARARANGUÁ		OPERADOR: LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO DA UFSC														
TRECHO: SEGMENTO MONITORADO 05		REVESTIMENTO: CONCRETO ASFÁLTICO COM LIGANTE CONVENCIONAL														
DATA: 20/11/2018		ESTACA INICIAL: 0+360				ESTACA FINAL: 0+660				FAIXA: DIREITA						
Estaca/ Marco	TRINCAS			AFUNDAMENTOS				OUTROS DEFEITOS						FLECHA		Observação
	ISOLADAS	INTERLIGADAS	FC-3	PLÁSTICO		CONS.		O	P	E	EX	D	R	TRI (mm)	TRE (mm)	
				FC-1	FC-2	ALP	ATP									
0+584	x															Área de 0,4 x 0,3m
0+584,6	x															Área de 0,2 x 0,5m
0+585,1	x															Área de 0,2 x 0,5m
0+585,5	x															Área de 0,2 x 0,4m
0+586,5	x															Área de 0,4 x 0,2m
0+587,1	x															Área de 0,4 x 0,7m
0+588	x															Área de 0,7 x 0,9m
0+589	x															Área de 0,9 x 2,6m
0+591,7	x															Área de 0,7 x 1,7m
0+594	x															Área de 0,5 x 0,3m
0+595,8	x															Área de 0,2 x 0,5m
0+598,4	x															Área de 0,7 x 0,2m
0+600,5	x															Área de 0,3 x 0,5m
0+601,1	x															Área de 0,5 x 0,2m
0+602	x															Área de 0,8 x 0,2m
0+602,2			x													Área de 1,0 x 10,4m
0+612,6		x														Área de 1,0 x 7,4m
0+620			x													Área de 1,1 x 3,6m
0+623,6		x														Área de 1,1 x 14,8m
0+638,4	x															Área de 1,1 x 1,6m
0+640,2	x															Área de 0,8 x 0,2m
0+642,6	x															Área de 0,6 x 0,2m
0+643,1	x															Área de 0,4 x 0,2m
0+651,5	x															Área de 0,4 x 0,7m
0+654,8	x															Área de 0,4 x 2,8m
0+602,7	x															Área de 0,7 x 1,3m
0+604,2		x														Área de 0,9 x 2,7m
0+607	x															Área de 0,9 x 0,2m
0+607,5	x															Área de 0,9 x 0,3m
0+608	x															Área de 0,5 x 0,7m
0+609	x															Área de 0,4 x 0,3m
0+609,5	x															Área de 0,2 x 0,4m
0+610	x															Área de 0,2 x 0,5m
0+611	x															Área de 0,6 x 0,7m
0+612		x														Área de 0,9 x 4,2m
0+616,5	x															Área de 0,7 x 1,3m
0+618,5	x															Área de 0,7 x 1,0m
0+620	x															Área de 0,7 x 1,1m
0+621	x															Área de 0,3 x 0,2m
0+621,6	x															Área de 0,3 x 0,2m
0+622,4	x															Área de 0,3 x 0,2m
0+623,1	x															Área de 0,4 x 0,5m
0+627,8	x															Área de 0,5 x 0,3m
0+630	x															Área de 0,2 x 0,2m
0+630,4	x															Área de 0,6 x 1,0m
0+631,9	x															Área de 0,5 x 0,2m

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## Apêndice B.1.1 – Inventário de defeitos de superfície do segmento monitorado 05 (continuação).

<b>RODOVIA:</b> BR-101/SC ARARANGUÁ		<b>OPERADOR:</b> LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO DA UFSC														
<b>TRECHO:</b> SEGMENTO MONITORADO 05		<b>REVESTIMENTO:</b> CONCRETO ASFÁLTICO COM LIGANTE CONVENCIONAL														
<b>DATA:</b> 20/11/2018		<b>ESTACA INICIAL:</b> 0+360				<b>ESTACA FINAL:</b> 0+660				<b>FAIXA:</b> DIREITA						
Estaca/ Marco	TRINCAS			AFUNDAMENTOS				OUTROS DEFEITOS						FLECHA		Observação
	ISOLADAS	INTERLIGADAS		PLÁSTICO		CONS.		O	P	E	EX	D	R	TRI (mm)	TRE (mm)	
	FC-1	FC-2	FC-3	ALP	ATP	ALC	ATC									
0+632,2	x															Área de 0,2 x 0,2m
0+632,6	x															Área de 0,7 x 0,2m
0+632,9	x															Área de 0,2 x 0,4m
0+633,7	x															Área de 0,9 x 0,8m
0+635,9	x															Área de 0,2 x 0,3m
0+636,8	x															Área de 0,2 x 0,3m
0+637,6	x															Área de 0,7 x 0,2m
0+638,3	x															Área de 0,6 x 0,2m
0+639,2	x															Área de 0,7 x 0,4m
0+640	x															Área de 0,3 x 0,6m
0+649	x															Área de 0,5 x 1,1m
0+654,9	x															Área de 0,6 x 0,2m
0+656,7	x															Área de 0,5 x 1,8m

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## Apêndice B.1.2 – Inventário de defeitos de superfície do segmento monitorado 03.

<b>RODOVIA:</b> BR-101/SC ARARANGUÁ		<b>OPERADOR:</b> LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO DA UFSC														
<b>TRECHO:</b> SEGMENTO MONITORADO 03		<b>REVESTIMENTO:</b> CONCRETO ASFÁLTICO CONVENCIONAL E MODIFICADO BMP														
<b>DATA:</b> 20/11/2018		<b>ESTACA INICIAL:</b> 0+660				<b>ESTACA FINAL:</b> 0+960				<b>FAIXA:</b> DIREITA						
Estaca/ Marco	TRINCAS			AFUNDAMENTOS				OUTROS DEFEITOS						FLECHA		Observação
	ISOLADAS	INTERLIGADAS		PLÁSTICO		CONS.		O	P	E	EX	D	R	TRI (mm)	TRE (mm)	
	FC-1	FC-2	FC-3	ALP	ATP	ALC	ATC									
708,9	x															Área de 0,4 x 0,2 m
711	x															Área de 0,5 x 0,4 m
717,2	x															Área de 0,6 x 0,5 m
731	x															Área de 0,2 x 0,2 m
740	x															Área de 0,2 x 0,2 m
745,7	x															Área de 0,2 x 0,3 m
748,9	x															Área de 0,5 x 0,6 m
750	x															Área de 0,5 x 0,2 m
755	x															Área de 0,2 x 0,2 m
757	x															Área de 0,3 x 0,2 m
759,6	x															Área de 0,5 x 0,6 m
760	x															Área de 0,4 x 0,2 m
742,1	x															Área de 0,5 x 0,2 m
751,4	x															Área de 0,4 x 0,2 m
779,5	x															Área de 0,5 x 0,2 m
786,7	x															Área de 0,2 x 0,2 m
787,9	x															Área de 0,2 x 0,2 m
795	x															Área de 0,2 x 0,2 m
798,4	x															Área de 0,4 x 0,2 m
799	x															Área de 0,4 x 0,3 m
801,6	x															Área de 0,6 x 0,2 m
802			x													Área de 0,7 x 0,4 m
810	x															Área de 0,5 x 0,2 m

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## Apêndice B.1.2 – Inventário de defeitos de superfície do segmento monitorado 03 (continuação).

<b>RODOVIA:</b> BR-101/SC ARARANGUÁ		<b>OPERADOR:</b> LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO DA UFSC														
<b>TRECHO:</b> SEGMENTO MONITORADO 03		<b>REVESTIMENTO:</b> CONCRETO ASFÁLTICO CONVENCIONAL E MODIFICADO BMP														
<b>DATA:</b> 20/11/2018		<b>ESTACA INICIAL:</b> 0+660				<b>ESTACA FINAL:</b> 0+960				<b>FAIXA:</b> DIREITA						
Estaca/ Marco	TRINCAS			AFUNDAMENTOS				OUTROS DEFEITOS						FLECHA		Observação
	ISOLADAS	INTERLIGADAS		PLÁSTICO		CONS.		O	P	E	EX	D	R	TRI (mm)	TRE (mm)	
		FC-1	FC-2	FC-3	ALP	ATP	ALC									
816	x															Área de 0,5 x 0,2 m
819	x															Área de 0,5 x 0,2 m
821,7	x															Área de 0,7 x 0,2 m
805	x															Área de 0,2 x 0,2 m
808,2	x															Área de 0,2 x 0,2 m
809,3	x															Área de 0,3 x 0,2 m
836,5	x															Área de 0,2 x 0,2 m
834,3	x															Área de 0,2 x 0,2 m
843,3	x															Área de 0,2 x 0,2 m
858,4		x														Área de 0,4 x 0,2 m
857,8	x															Área de 0,3 x 0,2 m
856,5	x															Área de 0,9 x 0,2 m
856,3	x															Área de 0,3 x 0,2 m
856,1	x															Área de 0,2 x 0,2 m
862,4	x															Área de 0,4 x 0,8 m
863,7	x															Área de 0,4 x 0,3 m
879,8	x															Área de 0,4 x 0,3 m
888	x															Área de 0,2 x 0,2 m
899,3	x															Área de 0,2 x 0,2 m
901,3	x															Área de 0,2 x 0,3 m
901,7	x															Área de 0,3 x 0,2 m
903,4	x															Área de 0,3 x 0,2 m
904,5	x															Área de 0,4 x 0,5 m
907,9	x															Área de 0,3 x 0,2 m
908,4	x															Área de 0,2 x 0,2 m
909,8	x															Área de 0,2 x 0,2 m
902,4	x															Área de 0,4 x 0,7 m
908	x															Área de 0,3 x 0,2 m
920	x															Área de 0,2 x 0,2 m
920	x															Área de 0,3 x 0,2 m
920,9	x															Área de 0,3 x 0,4 m
926,3	x															Área de 0,3 x 0,2 m
926,6	x															Área de 0,4 x 0,2 m
944	x															Área de 0,3 x 0,2 m
944,3	x															Área de 0,2 x 0,2 m
944,9	x															Área de 0,3 x 0,2 m
946,2	x															Área de 0,3 x 0,2 m
947,1	x															Área de 0,3 x 0,2 m
947,8		x														Área de 0,4 x 0,9 m
948,7	x															Área de 0,4 x 0,2 m
949,8	x															Área de 0,2 x 0,2 m
953,5	x															Área de 0,4 x 0,2 m

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## Apêndice B.1.3 – Inventário de defeitos de superfície do segmento monitorado 04.

RODOVIA: BR-101/SC ARARANGUÁ			OPERADOR: LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO DA UFSC													
TRECHO: SEGMENTO MONITORADO 04			REVESTIMENTO: CONCRETO ASFÁLTICO COM LIGANTE CONVENCIONAL													
DATA: 20/11/2018			ESTACA INICIAL: 413+000					ESTACA FINAL: 413+300			FAIXA: DIREITA					
Estaca/ Marco	TRINCAS			AFUNDAMENTOS				OUTROS DEFEITOS						FLECHA		Observação
	ISOLADAS FC-1	INTERLIGADAS FC-2	FC-3	PLÁSTICO		CONS.		O	P	E	EX	D	R	TRI (mm)	TRE (mm)	
				ALP	ATP	ALC	ATC									
413+000	x															Área de 0,9 x 2,3 m
413+002,3	x															Área de 0,6 x 2,3 m
413+004,6	x															Área de 0,7 x 5,4 m
413+010		x														Área de 0,7 x 1,8 m
413+011,8	x															Área de 0,8 x 2,1 m
413+013,9	x															Área de 0,2 x 2,1 m
413+016	x															Área de 0,6 x 4,0 m
413+000	x															Área de 0,9 x 3,6 m
413+004	x															Área de 1,0 x 4,1 m
413+008,1		x														Área de 1,0 x 1,0 m
413+009,3	x															Área de 0,7 x 1,3 m
413+010,6	x															Área de 0,9 x 1,2 m
413+011,9	x															Área de 0,7 x 4,6 m
413+016,5	x															Área de 0,8 x 3,6 m
413+020	x															Área de 0,8 x 2,5 m
413+022,5	x															Área de 0,9 x 11,3 m
413+033,8		x														Área de 0,9 x 2,8 m
413+036,6		x														Área de 1,0 x 2,7 m
413+020		x														Área de 1,0 x 6,0 m
413+034			x													Área de 1,0 x 14,0 m
413+040			x													Área de 1,0 x 9,0 m
413+049			x													Área de 1,0 x 6,4 m
413+055,4		x														Área de 0,9 x 0,9 m
413+056,3	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+056,6	x															Área de 0,8 x 1,2 m
413+057,5	x															Área de 0,9 x 1,5 m
413+059	x															Área de 1,0 x 0,7 m
413+040			x													Área de 0,9 x 5,3 m
413+045,3			x													Área de 1,0 x 6,4 m
413+051,7			x													Área de 0,9 x 2,7 m
413+054,4		x														Área de 0,8 x 0,9 m
413+055,3	x															Área de 0,7 x 4,2 m
413+059,5	x															Área de 0,6 x 0,5 m
413+061,6	x															Área de 0,3 x 0,2 m
413+064,5	x															Área de 0,6 x 1,6 m
413+066,1	x															Área de 0,9 x 2,4 m
413+068,5	x															Área de 0,2 x 0,5 m
413+069,2	x															Área de 0,8 x 0,5 m
413+069,7	x															Área de 0,2 x 0,7 m
413+070,4	x															Área de 0,2 x 0,5 m
413+072	x															Área de 0,2 x 0,8 m
413+073	x															Área de 0,6 x 1,3 m
413+075	x															Área de 0,4 x 0,2 m

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## Apêndice B.1.3 – Inventário de defeitos de superfície do segmento monitorado 04 (continuação).

RODOVIA: BR-101/SC ARARANGUÁ			OPERADOR: LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO DA UFSC													
TRECHO: SEGMENTO MONITORADO 04			REVESTIMENTO: CONCRETO ASFÁLTICO COM LIGANTE CONVENCIONAL													
DATA: 20/11/2018			ESTACA INICIAL: 413+000					ESTACA FINAL: 413+300			FAIXA: DIREITA					
Estaca/ Marco	TRINCAS			AFUNDAMENTOS				OUTROS DEFEITOS					FLECHA		Observação	
	ISOLADAS FC-1	INTERLIGADAS FC-2	FC-3	PLÁSTICO		CONS.		O	P	E	EX	D	R	TRI (mm)		TRE (mm)
				ALP	ATP	ALC	ATC									
413+076	x															Área de 0,2 x 0,7 m
413+076,8	x															Área de 0,2 x 0,6 m
413+077,4	x															Área de 0,3 x 0,4 m
413+077,8	x															Área de 0,2 x 0,6 m
413+078,4	x															Área de 0,9 x 1,6 m
413+060	x															Área de 0,7 x 1,0 m
413+061	x															Área de 0,3 x 0,9 m
413+061	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+063	x															Área de 0,3 x 0,2 m
413+063,2	x															Área de 0,5 x 0,2 m
413+065,2	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+066	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+066,2	x															Área de 0,3 x 0,2 m
413+066,5	x															Área de 0,4 x 0,4 m
413+067	x															Área de 0,8 x 0,9 m
413+068	x															Área de 0,5 x 0,2 m
413+068,2	x															Área de 0,2 x 0,3 m
413+068,5	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+068,7	x															Área de 0,5 x 0,2 m
413+068,9	x															Área de 0,7 x 0,2 m
413+069,2	x															Área de 0,2 x 0,8 m
413+069,4	x															Área de 0,2 x 0,5 m
413+069,6	x															Área de 0,2 x 0,3 m
413+069,8	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+070	x															Área de 0,9 x 0,3 m
413+070,3	x															Área de 0,5 x 0,2 m
413+071	x															Área de 0,6 x 0,2 m
413+072	x															Área de 0,6 x 0,2 m
413+075	x															Área de 0,4 x 1,3 m
413+076,5	x															Área de 0,7 x 1,4 m
413+077,9		x														Área de 0,7 x 0,5 m
413+078,4			x													Área de 0,7 x 0,4 m
413+078,8	x															Área de 0,7 x 0,7 m
413+079,5	x															Área de 0,6 x 0,5 m
413+080		x														Área de 1,0 x 2,4 m
413+082,4	x															Área de 0,7 x 1,5 m
413+085	x															Área de 0,5 x 0,4 m
413+087	x															Área de 0,6 x 0,8 m
413+088	x															Área de 0,4 x 0,3 m
413+088,2	x															Área de 0,2 x 0,4 m
413+090	x															Área de 0,8 x 2,0 m
413+092	x															Área de 0,3 x 0,2 m
413+093	x															Área de 0,2 x 0,6 m
413+093	x															Área de 0,7 x 0,5 m
413+093,5	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+094	x															Área de 0,4 x 0,2 m

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## Apêndice B.1.3 – Inventário de defeitos de superfície do segmento monitorado 04 (continuação).

<b>RODOVIA:</b> BR-101/SC ARARANGUÁ		<b>OPERADOR:</b> LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO DA UFSC														
<b>TRECHO:</b> SEGMENTO MONITORADO 04		<b>REVESTIMENTO:</b> CONCRETO ASFÁLTICO COM LIGANTE CONVENCIONAL														
<b>DATA:</b> 20/11/2018		<b>ESTACA INICIAL:</b> 413+000						<b>ESTACA FINAL:</b> 413+300			<b>FAIXA:</b> DIREITA					
Estaca/ Marco	TRINCAS			AFUNDAMENTOS				OUTROS DEFEITOS						FLECHA		Observação
	ISOLADAS	INTERLIGADAS		PLÁSTICO		CONS.		O	P	E	EX	D	R	TRI (mm)	TRE (mm)	
	FC-1	FC-2	FC-3	ALP	ATP	ALC	ATC									
413+094	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+094,2	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+095	x															Área de 0,2 x 0,6 m
413+096	x															Área de 0,7 x 2,1 m
413+098	x															Área de 0,5 x 0,2 m
413+099	x															Área de 0,3 x 0,2 m
413+099,7	x															Área de 0,2 x 0,3 m
413+080	x															Área de 0,7 x 1,2 m
413+081,3	x															Área de 0,7 x 0,6 m
413+082	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+082	x															Área de 0,5 x 0,2 m
413+084,6	x															Área de 0,2 x 0,7 m
413+086,2	x															Área de 0,7 x 0,2 m
413+086,9	x															Área de 0,2 x 0,5 m
413+087,4	x															Área de 0,2 x 0,6 m
413+088	x															Área de 0,7 x 3,0 m
413+091,5	x															Área de 0,3 x 0,4 m
413+094	x															Área de 0,4 x 0,4 m
413+098	x															Área de 0,4 x 0,3 m
413+100	x															Área de 0,7 x 0,2 m
413+101,5	x															Área de 0,2 x 0,5 m
413+102,4	x															Área de 0,2 x 0,3 m
413+102,5	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+105,2	x															Área de 0,2 x 0,6 m
413+106	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+106,2	x															Área de 0,4 x 0,3 m
413+107	x															Área de 0,2 x 0,4 m
413+107,5	x															Área de 0,7 x 0,5 m
413+108,5	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+108,8	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+109	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+109,5	x															Área de 0,4 x 0,3 m
413+110	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+111	x															Área de 0,4 x 0,5 m
413+111,5	x															Área de 0,9 x 0,8 m
413+112,3			x													Área de 0,8 x 1,0 m
413+113,3	x															Área de 0,7 x 1,6 m
413+114,9			x													Área de 0,7 x 0,5 m
413+115,4		x														Área de 0,9 x 3,5 m
413+118,9		x														Área de 0,7 x 0,6 m
413+119,5	x															Área de 0,5 x 0,9 m
413+100	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+103,3	x															Área de 0,6 x 0,2 m
413+103,5	x															Área de 0,6 x 0,2 m
413+104,6	x															Área de 0,6 x 0,2 m
413+105,6			x													Área de 0,5 x 2,1 m

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## Apêndice B.1.3 – Inventário de defeitos de superfície do segmento monitorado 04 (continuação).

RODOVIA: BR-101/SC ARARANGUÁ			OPERADOR: LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO DA UFSC													
TRECHO: SEGMENTO MONITORADO 04			REVESTIMENTO: CONCRETO ASFÁLTICO COM LIGANTE CONVENCIONAL													
DATA: 20/11/2018			ESTACA INICIAL: 413+000				ESTACA FINAL: 413+300				FAIXA: DIREITA					
Estaca/ Marco	TRINCAS			AFUNDAMENTOS				OUTROS DEFEITOS						FLECHA		Observação
	ISOLADAS FC-1	INTERLIGADAS FC-2	FC-3	PLÁSTICO		CONS.		O	P	E	EX	D	R	TRI (mm)	TRE (mm)	
				ALP	ATP	ALC	ATC									
413+107			x													Área de 0,8 x 2,3 m
413+109,3		x														Área de 0,8 x 3,5 m
413+109	x															Área de 0,3 x 0,2 m
413+112,8	x															Área de 0,8 x 1,4 m
413+114,3	x															Área de 0,9 x 0,6 m
413+114,9		x														Área de 0,9 x 1,2 m
413+116,1			x													Área de 0,9 x 1,2 m
413+118,3	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+122	x															Área de 0,2 x 0,4 m
413+124	x															Área de 0,4 x 0,4 m
413+130	x															Área de 0,5 x 0,5 m
413+131	x															Área de 0,6 x 0,2 m
413+132	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+132,5	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+133	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+133,2	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+133,5	x															Área de 0,3 x 0,2 m
413+130	x															Área de 0,2 x 4,5 m
413+138	x															Área de 0,5 x 0,2 m
413+138,3	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+138,8	x															Área de 0,7 x 0,2 m
413+136	x															Área de 0,2 x 3,3 m
413+122	x															Área de 0,2 x 0,3 m
413+124	x															Área de 0,5 x 0,2 m
413+124,3	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+124,5	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+125	x															Área de 0,6 x 0,2 m
413+125,3	x															Área de 0,5 x 0,2 m
413+125,5	x															Área de 0,3 x 0,2 m
413+128	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+132	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+133	x															Área de 0,5 x 0,2 m
413+133,5	x															Área de 0,2 x 0,3 m
413+134	x															Área de 0,3 x 0,2 m
413+134,5	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+135	x															Área de 0,3 x 0,7 m
413+135,3	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+135,5	x															Área de 0,5 x 0,2 m
413+136	x															Área de 0,3 x 0,2 m
413+136,3	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+136,5	x															Área de 0,6 x 0,2 m
413+137	x															Área de 0,5 x 0,4 m
413+137,5	x															Área de 0,2 x 0,8 m
413+138	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+138,5	x															Área de 0,3 x 0,2 m
413+139,8	x															Área de 0,4 x 0,2 m

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## Apêndice B.1.3 – Inventário de defeitos de superfície do segmento monitorado 04 (continuação).

RODOVIA: BR-101/SC ARARANGUÁ			OPERADOR: LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO DA UFSC													
TRECHO: SEGMENTO MONITORADO 04			REVESTIMENTO: CONCRETO ASFÁLTICO COM LIGANTE CONVENCIONAL													
DATA: 20/11/2018			ESTACA INICIAL: 413+000					ESTACA FINAL: 413+300			FAIXA: DIREITA					
Estaca/ Marco	TRINCAS			AFUNDAMENTOS				OUTROS DEFEITOS						FLECHA		Observação
	ISOLADAS	INTERLIGADAS		PLÁSTICO		CONS.		O	P	E	EX	D	R	TRI (mm)	TRE (mm)	
	FC-1	FC-2	FC-3	ALP	ATP	ALC	ATC									
413+140	x															Área de 0,3 x 0,2 m
413+144,5	x															Área de 0,5 x 0,2 m
413+147,7	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+148	x															Área de 0,3 x 0,2 m
413+149,3	x															Área de 0,2 x 0,3 m
413+140,5	x															Área de 0,2 x 9,3 m
413+150	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+154	x															Área de 0,5 x 0,2 m
413+154,5	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+153	x															Área de 0,2 x 2,0 m
413+155	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+155,6	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+155,8	x															Área de 0,5 x 0,2 m
413+156	x															Área de 0,6 x 0,2 m
413+156,2	x															Área de 0,6 x 0,2 m
413+156,5	x															Área de 0,7 x 0,2 m
413+157,2	x															Área de 0,6 x 0,2 m
413+155,5	x															Área de 0,2 x 2,9 m
413+158	x															Área de 0,7 x 1,6 m
413+158,3	x															Área de 0,3 x 0,2 m
413+158,4	x															Área de 0,3 x 0,2 m
413+158,6	x															Área de 0,6 x 0,2 m
413+159,7	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+140	x															Área de 0,4 x 0,4 m
413+141	x															Área de 0,2 x 0,3 m
413+142	x															Área de 0,4 x 0,4 m
413+142,3	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+143	x															Área de 0,2 x 0,3 m
413+144	x															Área de 0,2 x 0,7 m
413+145,5	x															Área de 0,5 x 1,1 m
413+146,6	x															Área de 0,8 x 1,4 m
413+148		x														Área de 0,9 x 1,4 m
413+149,5	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+150	x															Área de 0,7 x 1,2 m
413+151,2		x														Área de 0,4 x 0,8 m
413+152	x															Área de 0,3 x 0,8 m
413+153	x															Área de 0,2 x 0,8 m
413+154	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+154,5	x															Área de 0,2 x 0,3 m
413+155	x															Área de 0,7 x 0,5 m
413+155,8	x															Área de 0,2 x 0,5 m
413+156	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+156,5	x															Área de 0,9 x 0,2 m
413+157,7	x															Área de 0,9 x 0,2 m
413+158	x															Área de 0,7 x 0,2 m
413+158,5	x															Área de 0,2 x 0,3 m

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## Apêndice B.1.3 – Inventário de defeitos de superfície do segmento monitorado 04 (continuação).

RODOVIA: BR-101/SC ARARANGUÁ			OPERADOR: LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO DA UFSC													
TRECHO: SEGMENTO MONITORADO 04			REVESTIMENTO: CONCRETO ASFÁLTICO COM LIGANTE CONVENCIONAL													
DATA: 20/11/2018			ESTACA INICIAL: 413+000				ESTACA FINAL: 413+300				FAIXA: DIREITA					
Estaca/ Marco	TRINCAS			AFUNDAMENTOS				OUTROS DEFEITOS						FLECHA		Observação
	ISOLADAS FC-1	INTERLIGADAS FC-2	FC-3	PLÁSTICO		CONS.		O	P	E	EX	D	R	TRI (mm)	TRE (mm)	
				ALP	ATP	ALC	ATC									
413+159	x															Área de 0,3 x 0,8 m
413+159,5	x															Área de 0,5 x 0,2 m
413+159,7	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+160	x															Área de 0,8 x 0,2 m
413+161	x															Área de 0,5 x 0,2 m
413+162	x															Área de 0,8 x 2,8 m
413+165	x															Área de 0,3 x 0,2 m
413+166	x															Área de 0,5 x 0,2 m
413+166,5	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+167	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+166,5	x															Área de 0,2 x 1,4 m
413+167,9	x															Área de 0,7 x 4,0 m
413+168,5	x															Área de 0,8 x 0,2 m
413+171,9	x															Área de 0,8 x 2,3 m
413+174,2		x														Área de 1,0 x 2,7 m
413+176,9			x													Área de 1,0 x 3,1 m
413+160	x															Área de 0,2 x 0,3 m
413+161,3		x														Área de 0,7 x 0,8 m
413+162,1	x															Área de 0,7 x 1,1 m
413+163,2	x															Área de 0,5 x 1,2 m
413+164,5	x															Área de 0,5 x 0,4 m
413+165	x															Área de 0,7 x 0,2 m
413+166	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+166,5	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+167	x															Área de 0,6 x 0,2 m
413+167,3	x															Área de 0,4 x 0,3 m
413+167,5	x															Área de 0,7 x 0,2 m
413+168		x														Área de 0,9 x 6,0 m
413+174			x													Área de 1,1 x 6,0 m
413+180			x													Área de 1,1 x 5,1 m
413+185,1		x														Área de 1,1 x 1,3 m
413+186,4			x													Área de 1,0 x 2,2 m
413+188,6		x														Área de 0,9 x 1,4 m
413+190	x															Área de 0,9 x 1,0 m
413+191	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+192	x															Área de 0,7 x 0,2 m
413+192,8	x															Área de 0,9 x 5,2 m
413+198,2	x															Área de 0,9 x 0,2 m
413+198,6	x															Área de 0,9 x 0,2 m
413+199	x															Área de 0,9 x 0,2 m
413+199,5	x															Área de 0,2 x 0,8 m
413+180			x													Área de 1,0 x 5,8 m
413+185,8		x														Área de 1,0 x 0,6 m
413+186,4	x															Área de 0,6 x 1,1 m
413+187,5	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+188	x															Área de 0,2 x 0,2 m

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## Apêndice B.1.3 – Inventário de defeitos de superfície do segmento monitorado 04 (continuação).

RODOVIA: BR-101/SC ARARANGUÁ			OPERADOR: LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO DA UFSC													
TRECHO: SEGMENTO MONITORADO 04			REVESTIMENTO: CONCRETO ASFÁLTICO COM LIGANTE CONVENCIONAL													
DATA: 20/11/2018			ESTACA INICIAL: 413+000					ESTACA FINAL: 413+300			FAIXA: DIREITA					
Estaca/ Marco	TRINCAS			AFUNDAMENTOS				OUTROS DEFEITOS					FLECHA		Observação	
	ISOLADAS FC-1	INTERLIGADAS FC-2	FC-3	PLÁSTICO		CONS.		O	P	E	EX	D	R	TRI (mm)		TRE (mm)
				ALP	ATP	ALC	ATC									
413+188,6	x														Área de 0,2 x 0,6 m	
413+189	x														Área de 0,2 x 0,2 m	
413+194	x														Área de 0,3 x 0,4 m	
413+197,5	x														Área de 0,4 x 0,2 m	
413+198,5	x														Área de 0,2 x 0,2 m	
413+201	x														Área de 0,9 x 0,2 m	
413+201,5	x														Área de 0,8 x 0,2 m	
413+202	x														Área de 1,3 x 0,2 m	
413+202,2	x														Área de 0,6 x 0,2 m	
413+202,5	x														Área de 0,2 x 0,2 m	
413+202,8	x														Área de 0,6 x 0,2 m	
413+203	x														Área de 0,5 x 0,2 m	
413+203,2	x														Área de 0,9 x 0,2 m	
413+204	x														Área de 0,8 x 1,0 m	
413+205,5	x														Área de 1,0 x 0,2 m	
413+206	x														Área de 0,6 x 0,2 m	
413+207	x														Área de 0,7 x 0,2 m	
413+208	x														Área de 0,6 x 0,2 m	
413+209	x														Área de 1,1 x 0,2 m	
413+210	x														Área de 0,7 x 0,2 m	
413+211	x														Área de 0,8 x 1,5 m	
413+212,5	x														Área de 0,9 x 1,2 m	
413+214	x														Área de 0,9 x 0,2 m	
413+214	x														Área de 0,2 x 0,2 m	
413+214,6	x														Área de 0,2 x 0,2 m	
413+215	x														Área de 0,7 x 0,2 m	
413+215,5	x														Área de 0,6 x 0,2 m	
413+216,4	x														Área de 0,3 x 0,2 m	
413+216,7	x														Área de 0,4 x 0,3 m	
413+217	x														Área de 0,3 x 0,4 m	
413+217,3	x														Área de 1,1 x 0,2 m	
413+217,7	x														Área de 1,1 x 0,2 m	
413+218	x														Área de 0,2 x 0,2 m	
413+218,2	x														Área de 0,3 x 1,2 m	
413+220	x														Área de 0,4 x 0,4 m	
413+203,2	x														Área de 0,4 x 0,2 m	
413+204	x														Área de 0,5 x 0,2 m	
413+208	x														Área de 0,3 x 0,2 m	
413+210	x														Área de 0,4 x 0,2 m	
413+212	x														Área de 0,7 x 3,5 m	
413+216	x														Área de 0,5 x 0,2 m	
413+217,2	x														Área de 0,7 x 0,2 m	
413+217,5	x														Área de 0,3 x 0,2 m	
413+218	x														Área de 0,2 x 0,2 m	
413+218,7	x														Área de 0,3 x 0,2 m	
413+219	x														Área de 0,4 x 0,2 m	

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## Apêndice B.1.3 – Inventário de defeitos de superfície do segmento monitorado 04 (continuação).

RODOVIA: BR-101/SC ARARANGUÁ			OPERADOR: LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO DA UFSC													
TRECHO: SEGMENTO MONITORADO 04			REVESTIMENTO: CONCRETO ASFÁLTICO COM LIGANTE CONVENCIONAL													
DATA: 20/11/2018			ESTACA INICIAL: 413+000					ESTACA FINAL: 413+300			FAIXA: DIREITA					
Estaca/ Marco	TRINCAS			AFUNDAMENTOS				OUTROS DEFEITOS						FLECHA		Observação
	ISOLADAS FC-1	INTERLIGADAS FC-2	FC-3	PLÁSTICO		CONS.		O	P	E	EX	D	R	TRI (mm)	TRE (mm)	
				ALP	ATP	ALC	ATC									
413+219,5	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+219,8	x															Área de 0,5 x 0,2 m
413+220,2	x															Área de 0,4 x 0,4 m
413+223	x															Área de 0,5 x 0,2 m
413+223,2	x															Área de 0,3 x 0,2 m
413+223,5	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+223,7	x															Área de 0,6 x 3,3 m
413+227			x													Área de 0,9 x 1,0 m
413+228		x														Área de 0,9 x 1,0 m
413+229	x															Área de 0,9 x 0,6 m
413+229,6			x													Área de 1,1 x 1,0 m
413+230,6		x														Área de 1,1 x 1,7 m
413+232,3	x															Área de 1,1 x 0,6 m
413+232,9		x														Área de 1,0 x 3,7 m
413+236,8	x															Área de 1,0 x 2,4 m
413+239,2	x															Área de 0,5 x 0,2 m
413+239,5	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+239,8	x															Área de 0,2 x 0,3 m
413+220,2	x															Área de 0,5 x 0,2 m
413+227	x															Área de 0,2 x 0,3 m
413+227,5	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+229	x															Área de 1,2 x 0,2 m
413+230		x														Área de 0,6 x 0,5 m
413+230,5	x															Área de 0,6 x 2,2 m
413+233	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+233,2	x															Área de 0,2 x 0,3 m
413+233,5	x															Área de 0,3 x 0,4 m
413+234	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+234,3	x															Área de 0,2 x 0,5 m
413+235	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+236	x															Área de 0,2 x 1,2 m
413+239	x															Área de 0,9 x 0,2 m
413+240	x															Área de 0,8 x 3,6 m
413+244	x															Área de 0,5 x 0,2 m
413+245	x															Área de 0,3 x 0,2 m
413+247	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+242,6	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+243	x															Área de 0,3 x 0,2 m
413+248	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+251	x															Área de 0,6 x 0,2 m
413+266,5	x															Área de 0,3 x 0,2 m
413+267	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+271	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+276	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+277	x															Área de 0,3 x 0,2 m
413+267,5	x															Área de 0,6 x 0,2 m

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## Apêndice B.1.3 – Inventário de defeitos de superfície do segmento monitorado 04 (continuação).

RODOVIA: BR-101/SC ARARANGUÁ			OPERADOR: LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO DA UFSC													
TRECHO: SEGMENTO MONITORADO 04			REVESTIMENTO: CONCRETO ASFÁLTICO COM LIGANTE CONVENCIONAL													
DATA: 20/11/2018			ESTACA INICIAL: 413+000				ESTACA FINAL: 413+300				FAIXA: DIREITA					
Estaca/ Marco	TRINCAS			AFUNDAMENTOS				OUTROS DEFEITOS						FLECHA		Observação
	ISOLADAS FC-1	INTERLIGADAS FC-2	FC-3	PLÁSTICO		CONS.		O	P	E	EX	D	R	TRI (mm)	TRE (mm)	
				ALP	ATP	ALC	ATC									
413+268	x															Área de 0,2 x 0,2 m
413+268,5	x															Área de 0,3 x 0,2 m
413+269	x															Área de 0,5 x 0,2 m
413+272,5	x															Área de 0,3 x 0,2 m
413+274	x															Área de 0,3 x 0,2 m
413+284	x															Área de 0,5 x 1,3 m
413+285,5	x															Área de 1,0 x 1,0 m
413+286,7	x															Área de 0,6 x 0,2 m
413+286,9	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+287,2	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+287,5			x													Área de 0,4 x 0,4 m
413+287,5	x															Área de 0,8 x 0,2 m
413+287,8	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+288	x															Área de 0,7 x 1,4 m
413+289,5			x													Área de 0,9 x 0,3 m
413+289,8		x														Área de 0,9 x 3,7 m
413+293,5	x															Área de 0,9 x 1,0 m
413+294,5	x															Área de 0,6 x 0,2 m
413+295	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+283,7	x															Área de 0,2 x 0,3 m
413+285,5		x														Área de 0,4 x 0,9 m
413+286,7	x															Área de 0,6 x 0,9 m
413+287	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+287,2	x															Área de 0,6 x 0,9 m
413+289			x													Área de 0,8 x 0,6 m
413+289,6		x														Área de 0,8 x 0,3 m
413+289,9	x															Área de 0,8 x 0,4 m
413+290,5	x															Área de 0,9 x 0,2 m
413+290,8	x															Área de 0,2 x 0,3 m
413+291			x													Área de 0,8 x 0,6 m
413+291,6		x														Área de 0,8 x 0,4 m
413+292	x															Área de 0,8 x 0,3 m
413+291,5	x															Área de 0,5 x 0,2 m
413+292,5	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+294	x															Área de 0,4 x 0,2 m
413+295	x															Área de 0,3 x 0,2 m
413+296	x															Área de 0,3 x 0,5 m

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## APÊNDICE B.2 Afundamento de trilha de roda

Apêndice B.2.1 – Afundamento de trilha de roda do segmento monitorado 05.

ESTACA/MARCO	FAIXA DIREITA
	TRE (mm)
411+790	6,0
411+810	5,0
411+830	4,0
411+850	6,0
411+870	8,0
411+890	8,0
411+910	7,0
411+930	13,0
411+950	9,0
411+970	8,0
411+990	14,0
412+010	11,0
412+030	11,0
412+050	12,0
412+070	8,0
<b>Média</b>	8,67
<b>Desvio Padrão</b>	2,97

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice B.2.1 – Afundamento de trilha de roda do segmento monitorado 03.

ESTACA/MARCO	FAIXA DIREITA
	TRE (mm)
412+090	4,0
412+110	3,0
412+130	4,0
412+150	4,0
412+170	3,0
412+190	3,0
412+210	2,0
412+230	2,0
412+250	3,0
412+270	1,0
412+290	5,0
412+310	3,0
412+330	5,0
412+350	3,0
412+370	5,0
412+390	2,0
<b>Média</b>	3,25
<b>Desvio Padrão</b>	1,18

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## Apêndice B.2.1 – Afundamento de trilha de roda do segmento monitorado 04.

ESTACA/MARCO	FAIXA DIREITA
	TRE (mm)
413+000	11,0
413+020	13,0
413+040	15,0
413+060	11,0
413+080	14,0
413+100	10,0
413+120	10,0
413+140	9,0
413+160	8,0
413+180	10,0
413+200	9,0
413+220	6,0
413+240	6,0
413+260	9,0
413+280	7,0
413+300	4,0
<b>Média</b>	9,50
<b>Desvio Padrão</b>	2,97

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## APÊNDICE B.3 Microtextura

Apêndice B.3.1 – Microtextura do segmento monitorado 03.

ESTACA/MARCO	FAIXA DIREITA	CLASSIFICAÇÃO
	VRD	
412+090	53,0	Medianamente Rugosa
412+110	49,8	Medianamente Rugosa
412+130	50,3	Medianamente Rugosa
412+150	59,0	Rugosa
412+170	48,5	Medianamente Rugosa
412+190	53,3	Medianamente Rugosa
412+210	56,5	Rugosa
412+290	53,3	Medianamente Rugosa
412+310	51,0	Medianamente Rugosa
<b>Média</b>	52,72	
<b>Desvio Padrão</b>	3,36	

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## APÊNDICE B.4 Macrotextura

Apêndice B.4.1 – Macrotextura do segmento monitorado 03.

ESTACA/MARCO	FAIXA DIREITA	CLASSIFICAÇÃO
	HS (mm)	
412+090	0,87	Grosseira ou Aberta
412+110	0,84	Grosseira ou Aberta
412+130	0,91	Grosseira ou Aberta
412+150	0,82	Grosseira ou Aberta
412+170	0,95	Grosseira ou Aberta
412+190	1,13	Grosseira ou Aberta
412+270	1,07	Grosseira ou Aberta
412+290	1,09	Grosseira ou Aberta
412+310	0,95	Grosseira ou Aberta
412+330	0,95	Grosseira ou Aberta
412+350	0,82	Grosseira ou Aberta
412+370	0,95	Grosseira ou Aberta
412+390	0,79	Média
<b>Média</b>	0,93	
<b>Desvio Padrão</b>	0,11	

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## APÊNDICE B.5 IFI

Apêndice B.4.1 – IFI do segmento monitorado 03.

ESTACA/MARCO	Sp	FR(60)	F(60)	CLASSIFICAÇÃO
412+090	87,26	29,88	0,30	Muito bom
412+110	83,98	27,43	0,28	Muito bom
412+130	91,81	29,15	0,29	Muito bom
412+150	81,57	31,96	0,31	Muito bom
412+170	96,67	28,91	0,29	Muito bom
412+190	116,52	34,67	0,33	Muito bom
412+290	112,79	34,18	0,33	Muito bom
412+310	96,38	30,36	0,30	Muito bom
		<b>Média</b>	0,30	Muito bom

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## APÊNDICE C – Temperatura média do ar e desvio padrão

### APÊNDICE C.1 Temperatura média do ar horária e desvio padrão em Araranguá com base nos dados do INMET de 2008 a 2017

Apêndice C.1.1 – Temperatura média do ar horária e desvio padrão.

Hora	JAN		FEV		MAR		ABR		MAI		JUN	
	Média	DP										
0	22,56	1,7	22,74	1,6	20,89	2,0	18,86	2,9	15,77	3,0	12,89	3,6
1	22,28	1,7	22,51	1,6	20,57	2,0	18,55	3,0	15,37	3,0	12,63	3,6
2	22,02	1,7	22,29	1,6	20,28	2,1	18,20	3,1	15,04	3,1	12,33	3,6
3	21,81	1,8	22,02	1,6	19,94	2,2	17,89	3,2	14,71	3,2	12,12	3,8
4	21,61	1,8	21,83	1,7	19,68	2,2	17,62	3,3	14,41	3,4	11,80	3,8
5	21,44	1,9	21,62	1,7	19,45	2,4	17,39	3,4	14,18	3,5	11,62	3,9
6	21,35	1,9	21,46	1,8	19,20	2,4	17,14	3,5	14,00	3,5	11,48	4,1
7	22,10	1,9	22,03	1,8	19,44	2,4	17,02	3,5	13,83	3,6	11,37	4,1
8	23,36	2,0	23,23	1,9	20,73	2,1	18,38	3,0	14,89	3,0	12,02	3,7
9	24,82	2,3	24,66	2,0	22,34	2,0	20,16	2,7	16,51	2,6	13,41	3,1
10	26,10	2,6	26,08	2,3	23,95	2,1	22,00	2,6	18,35	2,4	15,20	2,8
11	27,03	3,0	27,11	2,7	25,11	2,4	23,43	2,9	19,90	2,7	16,85	2,9
12	27,45	3,1	27,60	3,0	25,78	2,7	24,29	3,2	20,99	2,9	18,19	3,3
13	27,52	3,1	27,84	3,0	25,95	2,7	24,62	3,4	21,49	3,1	18,97	3,5
14	27,34	3,1	27,71	3,0	25,93	2,6	24,57	3,4	21,57	3,1	19,22	3,6
15	26,94	2,9	27,36	3,0	25,54	2,5	24,28	3,3	21,34	3,1	18,99	3,6
16	26,37	2,8	26,80	2,9	25,09	2,4	23,69	3,1	20,84	2,9	18,41	3,3
17	25,75	2,5	26,13	2,7	24,52	2,3	22,98	3,0	19,99	2,6	17,56	3,0
18	25,22	2,3	25,33	2,3	23,77	2,0	22,03	2,8	18,91	2,5	16,46	2,8
19	24,50	2,0	24,57	2,0	22,98	1,8	21,18	2,8	18,16	2,5	15,55	2,9
20	23,87	1,8	23,93	1,8	22,42	1,9	20,53	2,9	17,42	2,6	14,78	3,1
21	23,47	1,7	23,55	1,6	21,97	1,9	20,14	2,8	17,06	2,7	14,23	3,2
22	23,14	1,7	23,23	1,6	21,58	1,9	19,69	2,8	16,56	2,7	13,68	3,3
23	22,83	1,7	22,97	1,6	21,19	1,9	19,24	2,9	16,14	2,9	13,27	3,4

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice C.1.2 – Temperatura média do ar horária e desvio padrão (continuação).

Hora	JUL		AGO		SET		OUT		NOV		DEZ	
	Média	DP										
0	12,85	3,5	14,61	3,2	16,31	2,5	18,15	1,8	19,73	2,0	21,46	2,0
1	12,49	3,6	14,30	3,3	16,04	2,7	17,93	1,9	19,42	2,1	21,20	2,0
2	12,19	3,6	13,95	3,4	15,79	2,7	17,67	1,9	19,15	2,2	20,92	2,1
3	11,90	3,7	13,69	3,5	15,50	2,9	17,44	2,0	18,86	2,2	20,71	2,1
4	11,60	3,9	13,37	3,6	15,28	3,0	17,27	2,0	18,63	2,3	20,51	2,2
5	11,37	4,0	13,14	3,7	15,08	3,0	17,04	2,1	18,44	2,4	20,29	2,3
6	11,24	4,1	12,96	3,6	14,91	3,2	16,96	2,1	18,60	2,3	20,42	2,2
7	11,12	4,2	12,81	3,7	15,15	3,1	17,65	2,0	19,57	2,2	21,31	2,2
8	11,77	3,8	13,94	3,4	16,35	2,7	18,78	2,0	20,87	2,2	22,62	2,3
9	13,28	3,4	15,57	3,6	17,74	2,6	19,94	1,9	22,25	2,4	23,91	2,4
10	15,08	3,2	17,43	3,9	19,07	2,9	20,99	2,2	23,46	2,8	25,02	2,9
11	16,81	3,5	19,05	4,5	20,11	3,4	21,74	2,5	24,28	3,1	25,73	3,1
12	18,11	4,0	20,27	4,9	20,80	3,7	22,19	2,7	24,55	3,2	26,15	3,4
13	18,87	4,3	20,86	5,1	21,11	3,8	22,40	2,8	24,62	3,2	26,27	3,4
14	19,07	4,5	21,04	5,2	21,06	3,8	22,39	2,8	24,41	3,1	26,17	3,3
15	18,94	4,5	20,77	5,0	20,91	3,8	22,13	2,7	23,98	2,9	25,74	3,0
16	18,40	4,2	20,10	4,8	20,41	3,5	21,66	2,5	23,56	2,8	25,30	2,9
17	17,51	3,8	19,26	4,3	19,73	3,2	21,09	2,2	22,97	2,7	24,63	2,6
18	16,27	3,4	18,01	3,8	18,86	2,8	20,37	2,0	22,30	2,4	24,00	2,5
19	15,32	3,3	17,08	3,4	18,14	2,5	19,72	1,8	21,54	2,1	23,32	2,2
20	14,62	3,3	16,35	3,3	17,67	2,4	19,30	1,7	21,06	1,9	22,80	2,1
21	14,06	3,3	15,75	3,2	17,29	2,4	18,94	1,7	20,63	1,9	22,38	2,0
22	13,59	3,3	15,31	3,2	16,95	2,4	18,68	1,7	20,32	1,9	22,09	1,9
23	13,21	3,4	14,91	3,2	16,62	2,4	18,39	1,7	20,02	2,0	21,76	1,9

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## APÊNDICE D – Volume horário médio e o desvio padrão

### APÊNDICE D.1 Volume horário médio de tráfego e o desvio padrão em Araranguá com base nos dados do PNCT do DNIT de 2017

Apêndice D.1.1 – Volume horário médio de tráfego e o desvio padrão.

HORA	JAN		FEV		MAR		ABR		MAI		JUN	
	VHméd.	DP										
0	63	22	65	25	49	20	62	18	55	16	59	19
1	52	16	52	16	37	16	46	19	43	14	45	16
2	50	19	51	18	36	11	43	15	42	14	43	15
3	71	24	70	26	60	18	71	26	71	20	71	19
4	70	25	80	28	61	19	72	23	63	18	65	18
5	67	22	82	19	56	23	74	23	62	14	67	16
6	111	36	126	36	84	40	119	43	101	26	108	25
7	169	55	175	51	128	61	178	60	166	44	170	42
8	195	57	208	57	149	65	193	46	183	47	188	44
9	207	58	218	63	162	71	197	51	192	44	192	43
10	206	64	221	55	177	70	205	54	196	54	188	40
11	193	59	197	60	167	65	187	62	184	43	165	43
12	145	47	138	43	128	47	142	46	144	26	127	30
13	164	47	165	47	155	45	167	45	173	35	149	27
14	181	54	184	55	181	59	193	57	195	40	169	26
15	187	60	190	58	188	66	206	65	209	49	175	35
16	186	63	208	70	179	74	217	62	217	41	179	42
17	186	65	198	65	165	71	215	62	207	38	192	41
18	180	58	183	53	149	70	199	59	187	36	173	33
19	175	39	163	43	127	57	172	45	160	31	152	32
20	158	38	152	37	108	49	153	45	140	34	135	36
21	139	30	128	34	82	39	126	37	119	30	112	30
22	122	31	114	28	74	34	99	34	97	22	95	26
23	92	28	92	26	61	23	81	27	83	23	77	22

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice D.1.2 – Volume horário médio de tráfego e o desvio padrão (continuação).

HORA	JUL		AGO		SET		OUT		NOV		DEZ	
	VHméd.	DP										
0	56	15	57	16	57	20	56	21	55	21	79	27
1	40	13	44	12	39	14	43	14	39	15	51	19
2	39	13	40	11	39	14	42	13	38	14	55	22
3	68	20	67	15	61	20	71	19	62	23	79	27
4	59	12	61	12	60	16	63	16	61	20	83	28
5	64	15	62	11	64	16	57	19	53	19	84	31
6	95	19	96	21	101	28	95	31	90	31	136	50
7	144	30	153	32	147	40	147	35	136	44	191	70
8	175	35	164	33	153	35	160	43	139	51	208	67
9	174	33	166	28	158	30	164	31	148	47	219	71
10	178	32	174	35	170	35	172	29	155	45	221	67
11	165	24	159	24	149	26	155	22	136	42	205	66
12	129	20	118	19	115	22	120	16	101	24	157	50
13	145	22	137	24	130	28	142	15	120	29	176	55
14	170	21	155	27	148	22	154	20	130	30	193	64
15	182	34	168	28	157	25	165	20	143	34	206	69
16	187	33	179	34	167	39	180	26	152	35	211	78
17	178	30	176	35	170	41	171	37	158	36	208	77
18	157	26	154	28	153	37	162	33	160	33	202	69
19	139	24	136	32	126	22	140	29	137	28	178	56
20	123	32	128	23	116	25	126	28	102	33	157	52
21	106	27	103	20	97	24	106	27	90	27	139	46
22	90	18	91	21	79	22	90	19	78	24	117	45
23	73	21	76	16	71	21	78	22	64	25	95	36

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## APÊNDICE E – $N_f$ calculado para cada segmento monitorado

### APÊNDICE E.1 Número de solicitações para a ruptura com sazonalidade de temperatura

Apêndice E.1.1 –  $N_f$  calculado para cada período do dia ao longo do ano na fibra inferior do revestimento asfáltico do segmento 05.

JAN			FEV		
06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h	06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h
1,55E+05	4,22E+04	2,56E+05	1,12E+05	3,70E+04	1,75E+05
MAR			ABR		
06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h	06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h
2,70E+05	7,54E+04	4,31E+05	4,80E+05	1,41E+05	7,28E+05
MAI			JUN		
06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h	06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h
1,13E+06	3,30E+05	1,60E+06	2,22E+06	7,89E+05	3,14E+06
JUL			AGO		
06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h	06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h
2,17E+06	8,68E+05	3,01E+06	1,46E+06	5,04E+05	2,31E+06
SET			OUT		
06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h	06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h
7,94E+05	2,35E+05	1,43E+06	5,82E+05	1,96E+05	1,00E+06
NOV			DEZ		
06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h	06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h
3,08E+05	9,30E+04	5,90E+05	2,01E+05	6,07E+04	3,41E+05

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice E.1.2 –  $N_f$  calculado para cada período do dia ao longo do ano na fibra inferior da mistura asfáltica convencional do segmento 03.

JAN			FEV		
06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h	06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h
6,16E+06	2,17E+06	1,34E+06	5,56E+06	2,15E+06	8,51E+05
MAR			ABR		
06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h	06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h
8,77E+06	2,61E+06	2,52E+06	1,35E+07	3,68E+06	5,02E+06
MAI			JUN		
06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h	06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h
3,12E+07	7,34E+06	1,52E+07	6,12E+07	1,67E+07	4,40E+07
JUL			AGO		
06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h	06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h
5,89E+07	1,82E+07	4,11E+07	4,21E+07	1,04E+07	2,61E+07
SET			OUT		
06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h	06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h
2,47E+07	6,02E+06	1,23E+07	1,80E+07	4,80E+06	7,48E+06
NOV			DEZ		
06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h	06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h
9,98E+06	3,05E+06	2,45E+06	7,82E+06	2,44E+06	1,84E+06

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice E.1.3 –  $N_f$  calculado para cada período do dia ao longo do ano na fibra inferior da mistura asfáltica modificada do segmento 03.

JAN			FEV		
06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h	06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h
2,01E+06	5,26E+05	4,38E+06	1,37E+06	4,65E+05	3,01E+06
MAR			ABR		
06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h	06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h
3,94E+06	9,38E+05	7,71E+06	8,30E+06	1,86E+06	1,44E+07
MAI			JUN		
06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h	06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h
2,67E+07	5,15E+06	4,08E+07	6,92E+07	1,62E+07	1,07E+08
JUL			AGO		
06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h	06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h
6,66E+07	1,85E+07	1,00E+08	3,83E+07	8,90E+06	6,84E+07
SET			OUT		
06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h	06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h
1,64E+07	3,39E+06	3,48E+07	1,07E+07	2,72E+06	2,16E+07
NOV			DEZ		
06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h	06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h
3,71E+06	8,88E+05	8,04E+06	2,73E+06	7,51E+05	5,99E+06

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice E.1.4 –  $N_f$  calculado para cada período do dia ao longo do ano na fibra inferior do revestimento asfáltico do segmento 04.

JAN			FEV		
06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h	06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h
1,22E+05	3,26E+04	2,18E+05	8,90E+04	2,87E+04	1,52E+05
MAR			ABR		
06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h	06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h
2,09E+05	5,72E+04	3,57E+05	3,67E+05	1,06E+05	5,87E+05
MAI			JUN		
06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h	06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h
8,46E+05	2,43E+05	1,25E+06	1,64E+06	5,78E+05	2,38E+06
JUL			AGO		
06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h	06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h
1,60E+06	6,36E+05	2,28E+06	1,08E+06	3,70E+05	1,78E+06
SET			OUT		
06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h	06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h
5,98E+05	1,73E+05	1,13E+06	4,41E+05	1,45E+05	8,01E+05
NOV			DEZ		
06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h	06h - 13h	13h - 20h	20h - 06h
1,99E+05	5,43E+04	3,70E+05	1,56E+05	4,62E+04	2,87E+05

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## APÊNDICE F – Dano acumulado

### APÊNDICE F.1 Dano acumulado considerando a sazonalidade de temperatura e distribuição de tráfego horária

Apêndice F.1.1 – Dano acumulado na fibra inferior do revestimento asfáltico do segmento 05.

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Soma	Acum.
2014	0,00	0,00	5,16	2,72	1,21	0,52	0,51	0,82	1,61	2,08	4,08	6,52	25,23	25,23
2015	8,13	8,89	4,60	2,42	1,08	0,46	0,45	0,73	1,44	1,86	3,63	5,81	39,50	64,73
2016	7,55	8,56	4,27	2,25	1,00	0,43	0,42	0,68	1,33	1,73	3,38	5,40	37,00	101,73
2017	8,33	9,12	4,71	2,48	1,10	0,47	0,46	0,75	1,47	1,90	3,72	5,95	40,48	142,21
2018	8,49	9,29	4,80	2,53	1,12	0,48	0,47	0,77	1,50	1,94	3,80	6,07	41,25	183,46
2019	8,66	9,48	4,90	2,58	1,15	0,49	0,48	0,78	1,53	1,98	3,87	6,19	42,08	225,55
2020	8,84	10,02	5,00	2,63	1,17	0,50	0,49	0,80	1,56	2,02	3,95	6,31	43,29	268,84
2021	9,01	9,86	5,10	2,68	1,19	0,51	0,50	0,81	1,59	2,06	4,03	6,44	43,79	312,63
2022	9,19	10,06	5,20	2,74	1,22	0,52	0,51	0,83	1,62	2,10	4,11	6,57	44,67	357,29
2023	9,37	10,26	5,30	2,79	1,24	0,53	0,52	0,85	1,66	2,14	4,19	6,70	45,55	402,84

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice F.1.2 – Dano acumulado na fibra inferior da mistura asfáltica convencional do segmento 03.

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Soma	Acum.
2014	0,00	0,00	0,21	0,13	0,06	0,02	0,02	0,04	0,07	0,10	0,19	0,25	1,09	1,09
2015	0,28	0,32	0,19	0,11	0,05	0,02	0,02	0,04	0,06	0,09	0,17	0,22	1,57	2,66
2016	0,26	0,30	0,17	0,11	0,05	0,02	0,02	0,03	0,06	0,08	0,16	0,21	1,47	4,13
2017	0,28	0,32	0,19	0,12	0,05	0,02	0,02	0,04	0,06	0,09	0,17	0,23	1,60	5,73
2018	0,29	0,33	0,20	0,12	0,05	0,02	0,02	0,04	0,07	0,09	0,17	0,23	1,64	7,37
2019	0,29	0,34	0,20	0,12	0,06	0,02	0,02	0,04	0,07	0,09	0,18	0,24	1,67	9,03
2020	0,30	0,36	0,20	0,12	0,06	0,02	0,02	0,04	0,07	0,10	0,18	0,24	1,71	10,75
2021	0,31	0,35	0,21	0,13	0,06	0,02	0,02	0,04	0,07	0,10	0,19	0,25	1,74	12,49
2022	0,31	0,36	0,21	0,13	0,06	0,02	0,02	0,04	0,07	0,10	0,19	0,25	1,77	14,26
2023	0,32	0,36	0,22	0,13	0,06	0,03	0,03	0,04	0,07	0,10	0,19	0,26	1,81	16,06

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice F.1.3 – Dano acumulado na fibra inferior da mistura asfáltica modificada do segmento 03.

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Soma	Acum.
2014	0,00	0,00	0,39	0,19	0,07	0,02	0,02	0,04	0,10	0,14	0,40	0,50	1,88	1,88
2015	0,63	0,69	0,35	0,17	0,06	0,02	0,02	0,04	0,09	0,12	0,36	0,45	3,00	4,89
2016	0,59	0,67	0,33	0,16	0,06	0,02	0,02	0,03	0,08	0,11	0,33	0,42	2,81	7,70
2017	0,65	0,71	0,36	0,17	0,06	0,02	0,02	0,04	0,09	0,13	0,36	0,46	3,08	10,78
2018	0,66	0,72	0,37	0,18	0,06	0,02	0,02	0,04	0,09	0,13	0,37	0,47	3,14	13,92
2019	0,68	0,74	0,37	0,18	0,07	0,02	0,02	0,04	0,10	0,13	0,38	0,48	3,20	17,12
2020	0,69	0,78	0,38	0,18	0,07	0,02	0,02	0,04	0,10	0,13	0,39	0,49	3,29	20,41
2021	0,70	0,77	0,39	0,19	0,07	0,02	0,02	0,04	0,10	0,14	0,39	0,50	3,33	23,74
2022	0,72	0,78	0,40	0,19	0,07	0,02	0,02	0,04	0,10	0,14	0,40	0,51	3,40	27,14
2023	0,73	0,80	0,40	0,20	0,07	0,02	0,02	0,04	0,10	0,14	0,41	0,52	3,46	30,60

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice F.1.4 – Dano acumulado na fibra inferior do revestimento asfáltico do segmento 04.

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Soma	Acum.
2014	0,00	0,00	6,73	3,59	1,62	0,70	0,69	1,11	2,17	2,78	6,82	8,46	34,68	34,68
2015	10,43	11,31	6,00	3,20	1,45	0,63	0,61	0,99	1,93	2,48	6,07	7,54	52,63	87,32
2016	9,69	10,89	5,58	2,98	1,34	0,58	0,57	0,92	1,79	2,30	5,64	7,00	49,29	136,61
2017	10,69	11,59	6,15	3,28	1,48	0,64	0,63	1,02	1,98	2,54	6,22	7,72	53,94	190,55
2018	10,89	11,81	6,27	3,34	1,51	0,66	0,64	1,03	2,02	2,59	6,34	7,87	54,98	245,53
2019	11,11	12,05	6,39	3,41	1,54	0,67	0,65	1,06	2,06	2,64	6,47	8,03	56,08	301,61
2020	11,34	12,74	6,52	3,48	1,57	0,68	0,67	1,08	2,10	2,70	6,60	8,19	57,67	359,27
2021	11,56	12,54	6,65	3,55	1,60	0,70	0,68	1,10	2,14	2,75	6,73	8,36	58,35	417,63
2022	11,79	12,79	6,78	3,62	1,64	0,71	0,70	1,12	2,18	2,80	6,87	8,52	59,52	477,15
2023	12,02	13,04	6,92	3,69	1,67	0,72	0,71	1,14	2,23	2,86	7,00	8,69	60,69	537,84

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## APÊNDICE F.2 Dano acumulado com temperatura constante de 20°C e distribuição de tráfego horária

Apêndice F.2.1 – Dano acumulado na fibra inferior do revestimento asfáltico do segmento 05.

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Soma	Acum.
2014	0,00	0,00	0,43	0,42	0,43	0,42	0,43	0,43	0,42	0,43	0,42	0,43	4,24	4,24
2015	0,38	0,35	0,38	0,37	0,38	0,37	0,38	0,38	0,37	0,38	0,37	0,38	4,51	8,75
2016	0,36	0,33	0,36	0,34	0,36	0,34	0,36	0,36	0,34	0,36	0,34	0,36	4,20	12,94
2017	0,39	0,35	0,39	0,38	0,39	0,38	0,39	0,39	0,38	0,39	0,38	0,39	4,62	17,56
2018	0,40	0,36	0,40	0,39	0,40	0,39	0,40	0,40	0,39	0,40	0,39	0,40	4,71	22,27
2019	0,41	0,37	0,41	0,39	0,41	0,39	0,41	0,41	0,39	0,41	0,39	0,41	4,80	27,07
2020	0,42	0,39	0,42	0,40	0,42	0,40	0,42	0,42	0,40	0,42	0,40	0,42	4,91	31,98
2021	0,42	0,38	0,42	0,41	0,42	0,41	0,42	0,42	0,41	0,42	0,41	0,42	4,99	36,98
2022	0,43	0,39	0,43	0,42	0,43	0,42	0,43	0,43	0,42	0,43	0,42	0,43	5,10	42,07
2023	0,44	0,40	0,44	0,43	0,44	0,43	0,44	0,44	0,43	0,44	0,43	0,44	5,20	47,27

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice F.2.2 – Dano acumulado na fibra inferior da mistura asfáltica convencional do segmento 03.

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Soma	Acum.
2014	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,25	0,25
2015	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,26	0,51
2016	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,24	0,75
2017	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,27	1,02
2018	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,27	1,29
2019	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,28	1,56
2020	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,28	1,85
2021	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,29	2,14
2022	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,29	2,43
2023	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,30	2,73

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice F.2.3 – Dano acumulado na fibra inferior da mistura asfáltica modificada do segmento 03.

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Soma	Acum.
2014	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,16	0,16
2015	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,17	0,32
2016	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,16	0,48
2017	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,17	0,65
2018	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,17	0,82
2019	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,18	1,00
2020	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,18	1,18
2021	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,18	1,37
2022	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,19	1,55
2023	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,19	1,75

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice F.2.4 – Dano acumulado na fibra inferior do revestimento asfáltico do segmento 04.

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Soma	Acum.
2014	0,00	0,00	0,58	0,56	0,58	0,56	0,58	0,58	0,56	0,58	0,56	0,58	5,68	5,68
2015	0,51	0,46	0,51	0,50	0,51	0,50	0,51	0,51	0,50	0,51	0,50	0,51	6,04	11,72
2016	0,48	0,45	0,48	0,46	0,48	0,46	0,48	0,48	0,46	0,48	0,46	0,48	5,63	17,35
2017	0,53	0,47	0,53	0,51	0,53	0,51	0,53	0,53	0,51	0,53	0,51	0,53	6,19	23,54
2018	0,54	0,48	0,54	0,52	0,54	0,52	0,54	0,54	0,52	0,54	0,52	0,54	6,31	29,85
2019	0,55	0,49	0,55	0,53	0,55	0,53	0,55	0,55	0,53	0,55	0,53	0,55	6,43	36,28
2020	0,56	0,52	0,56	0,54	0,56	0,54	0,56	0,56	0,54	0,56	0,54	0,56	6,58	42,87
2021	0,57	0,51	0,57	0,55	0,57	0,55	0,57	0,57	0,55	0,57	0,55	0,57	6,70	49,56
2022	0,58	0,52	0,58	0,56	0,58	0,56	0,58	0,58	0,56	0,58	0,56	0,58	6,83	56,39
2023	0,59	0,53	0,59	0,57	0,59	0,57	0,59	0,59	0,57	0,59	0,57	0,59	6,96	63,35

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## APÊNDICE G – Estimativa de vida útil em cada combinação

### APÊNDICE G.1 Combinação 1: $N_f$ considerando temperatura constante (20°C), curva de fadiga de 20°C e distribuição de tráfego constante

Apêndice G.1.1 – Estimativa de vida útil para o segmento 05.

Mês	JAN a DEZ		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h
$N_f$	1,70E+06		
Tráfego diário (%)	100%		
(% tráfego)/( $N_f$ )	5,9E-07		
Estimativa de vida útil *	<b>1,70E+06</b>		

\*Estimativa de vida útil igual ao  $N_f$ , pois foi considerada constante a distribuição de tráfego nesta combinação.

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice G.1.2 – Estimativa de vida útil para a mistura convencional do segmento 03.

Mês	JAN a DEZ		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h
$N_f$	2,93E+07		
Tráfego diário (%)	100%		
(% tráfego)/( $N_f$ )	3,4E-08		
Estimativa de vida útil *	<b>2,93E+07</b>		

\*Estimativa de vida útil igual ao  $N_f$ , pois foi considerada constante a distribuição de tráfego nesta combinação.

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice G.1.3 – Estimativa de vida útil para a mistura modificada do segmento 03.

Mês	JAN a DEZ		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	4,59E+07		
Tráfego diário (%)	100%		
(% tráfego)/(Nf)	2,2E-08		
Estimativa de vida útil *	<b>4,59E+07</b>		

\*Estimativa de vida útil igual ao  $N_f$ , pois foi considerada constante a distribuição de tráfego nesta combinação.

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice G.1.4 – Estimativa de vida útil para o segmento 04.

Mês	JAN a DEZ		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	1,27E+06		
Tráfego diário (%)	100%		
(% tráfego)/(Nf)	7,9E-07		
Estimativa de vida útil *	<b>1,27E+06</b>		

\*Estimativa de vida útil igual ao  $N_f$ , pois foi considerada constante a distribuição de tráfego nesta combinação.

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## APÊNDICE G.2 Combinação 2: $N_f$ considerando distribuição de temperatura regional, curva de fadiga de 20°C e distribuição de tráfego constante

Apêndice G.2.1 – Estimativa de vida útil para o segmento 05.

Mês	JAN			FEV			MAR		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	1,6E+05	4,2E+04	2,6E+05	1,1E+05	3,7E+04	1,8E+05	2,7E+05	7,5E+04	4,3E+05
Tráfego diário (%)*	29%	29%	42%	29%	29%	42%	29%	29%	42%
Tráfego anual (%)**	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%
(Tráf. anual %)/(Nf)	1,6E-07	5,7E-07	1,4E-07	2,2E-07	6,5E-07	2,0E-07	9,0E-08	3,2E-07	8,1E-08
Mês	ABR			MAI			JUN		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	4,8E+05	1,4E+05	7,3E+05	1,1E+06	3,3E+05	1,6E+06	2,2E+06	7,9E+05	3,1E+06
Tráfego diário (%)*	29%	29%	42%	29%	29%	42%	29%	29%	42%
Tráfego anual (%)**	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%
(% Tráf. anual)/(Nf)	5,0E-08	1,7E-07	4,8E-08	2,1E-08	7,3E-08	2,2E-08	1,1E-08	3,1E-08	1,1E-08
Mês	JUL			AGO			SET		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	2,2E+06	8,7E+05	3,0E+06	1,5E+06	5,0E+05	2,3E+06	7,9E+05	2,4E+05	1,4E+06
Tráfego diário (%)*	29%	29%	42%	29%	29%	42%	29%	29%	42%
Tráfego anual (%)**	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%
(% Tráf. anual)/(Nf)	1,1E-08	2,8E-08	1,2E-08	1,7E-08	4,8E-08	1,5E-08	3,0E-08	1,0E-07	2,4E-08
Mês	OUT			NOV			DEZ		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	5,8E+05	2,0E+05	1,0E+06	3,1E+05	9,3E+04	5,9E+05	2,0E+05	6,1E+04	3,4E+05
Tráfego diário (%)*	29%	29%	42%	29%	29%	42%	29%	29%	42%
Tráfego anual (%)**	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%
(% Tráf. anual)/(Nf)	4,2E-08	1,2E-07	3,5E-08	7,8E-08	2,6E-07	5,9E-08	1,2E-07	4,0E-07	1,0E-07
SOMA ((% tráfego anual)/(Nf))							4,37E-06		
Estimativa de vida útil							<b>2,29E+05</b>		

\*Tráfego diário: constante ao longo do dia, porém foram utilizadas as porcentagens indicadas porque os dois primeiros períodos possuem 7 horas de duração (29% do dia) e o último período 10 horas (42% do dia).

\*\*Tráfego anual: quanto a porcentagem do tráfego diário representa do tráfego anual. Dentro do mês, considerou-se a mesma condição todos os dias. Assim, dividiu-se a porcentagem diária por 12 para encontrar a porcentagem do tráfego anual que passa em cada período de análise.

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice G.2.2 – Estimativa de vida útil para a mistura convencional do segmento 03.

Mês	JAN			FEV			MAR		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	6,2E+06	2,2E+06	1,3E+06	5,6E+06	2,2E+06	8,5E+05	8,8E+06	2,6E+06	2,5E+06
Tráfego diário (%)*	29%	29%	42%	29%	29%	42%	29%	29%	42%
Tráfego anual (%)**	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%
(Tráf. anual %)/(Nf)	3,9E-09	1,1E-08	2,6E-08	4,3E-09	1,1E-08	4,1E-08	2,8E-09	9,3E-09	1,4E-08
Mês	ABR			MAI			JUN		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	1,3E+07	3,7E+06	5,0E+06	3,1E+07	7,3E+06	1,5E+07	6,1E+07	1,7E+07	4,4E+07
Tráfego diário (%)*	29%	29%	42%	29%	29%	42%	29%	29%	42%
Tráfego anual (%)**	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%
(% Tráf. anual)/(Nf)	1,8E-09	6,6E-09	7,0E-09	7,7E-10	3,3E-09	2,3E-09	3,9E-10	1,5E-09	8,0E-10
Mês	JUL			AGO			SET		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	5,9E+07	1,8E+07	4,1E+07	4,2E+07	1,0E+07	2,6E+07	2,5E+07	6,0E+06	1,2E+07
Tráfego diário (%)*	29%	29%	42%	29%	29%	42%	29%	29%	42%
Tráfego anual (%)**	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%
(% Tráf. anual)/(Nf)	4,1E-10	1,3E-09	8,5E-10	5,7E-10	2,3E-09	1,3E-09	9,8E-10	4,0E-09	2,9E-09
Mês	OUT			NOV			DEZ		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	1,8E+07	4,8E+06	7,5E+06	1,0E+07	3,0E+06	2,5E+06	7,8E+06	2,4E+06	1,8E+06
Tráfego diário (%)*	29%	29%	42%	29%	29%	42%	29%	29%	42%
Tráfego anual (%)**	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%
(% Tráf. anual)/(Nf)	1,3E-09	5,0E-09	4,7E-09	2,4E-09	7,9E-09	1,4E-08	3,1E-09	9,9E-09	1,9E-08
SOMA ((% tráfego anual)/(Nf))								2,31E-07	
Estimativa de vida útil								<b>4,34E+06</b>	

\*Tráfego diário: constante ao longo do dia, porém foram utilizadas as porcentagens indicadas porque os dois primeiros períodos possuem 7 horas de duração (29% do dia) e o último período 10 horas (42% do dia).

\*\*Tráfego anual: quanto a porcentagem do tráfego diário representa do tráfego anual. Dentro do mês, considerou-se a mesma condição todos os dias. Assim, dividiu-se a porcentagem diária por 12 para encontrar a porcentagem do tráfego anual que passa em cada período de análise.

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice G.2.3 – Estimativa de vida útil para a mistura modificada do segmento 03.

Mês	JAN			FEV			MAR		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	2,0E+06	5,3E+05	4,4E+06	1,4E+06	4,7E+05	3,0E+06	3,9E+06	9,4E+05	7,7E+06
Tráfego diário (%)*	29%	29%	42%	29%	29%	42%	29%	29%	42%
Tráfego anual (%)**	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%
(Tráf. anual %)/(Nf)	1,2E-08	4,6E-08	8,0E-09	1,8E-08	5,2E-08	1,2E-08	6,1E-09	2,6E-08	4,5E-09
Mês	ABR			MAI			JUN		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	8,3E+06	1,9E+06	1,4E+07	2,7E+07	5,2E+06	4,1E+07	6,9E+07	1,6E+07	1,1E+08
Tráfego diário (%)*	29%	29%	42%	29%	29%	42%	29%	29%	42%
Tráfego anual (%)**	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%
(% Tráf. anual)/(Nf)	2,9E-09	1,3E-08	2,4E-09	9,1E-10	4,7E-09	8,6E-10	3,5E-10	1,5E-09	3,3E-10
Mês	JUL			AGO			SET		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	6,7E+07	1,9E+07	1,0E+08	3,8E+07	8,9E+06	6,8E+07	1,6E+07	3,4E+06	3,5E+07
Tráfego diário (%)*	29%	29%	42%	29%	29%	42%	29%	29%	42%
Tráfego anual (%)**	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%
(% Tráf. anual)/(Nf)	3,6E-10	1,3E-09	3,5E-10	6,3E-10	2,7E-09	5,1E-10	1,5E-09	7,1E-09	1,0E-09
Mês	OUT			NOV			DEZ		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	1,1E+07	2,7E+06	2,2E+07	3,7E+06	8,9E+05	8,0E+06	2,7E+06	7,5E+05	6,0E+06
Tráfego diário (%)*	29%	29%	42%	29%	29%	42%	29%	29%	42%
Tráfego anual (%)**	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%
(% Tráf. anual)/(Nf)	2,2E-09	8,9E-09	1,6E-09	6,5E-09	2,7E-08	4,4E-09	8,9E-09	3,2E-08	5,8E-09
SOMA ((% tráfego anual)/(Nf))								3,24E-07	
Estimativa de vida útil								<b>3,09E+06</b>	

\*Tráfego diário: constante ao longo do dia, porém foram utilizadas as porcentagens indicadas porque os dois primeiros períodos possuem 7 horas de duração (29% do dia) e o último período 10 horas (42% do dia).

\*\*Tráfego anual: quanto a porcentagem do tráfego diário representa do tráfego anual. Dentro do mês, considerou-se a mesma condição todos os dias. Assim, dividiu-se a porcentagem diária por 12 para encontrar a porcentagem do tráfego anual que passa em cada período de análise.

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice G.2.4 – Estimativa de vida útil para o segmento 04.

Mês	JAN			FEV			MAR		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	1,2E+05	3,3E+04	2,2E+05	8,9E+04	2,9E+04	1,5E+05	2,1E+05	5,7E+04	3,6E+05
Tráfego diário (%)*	29%	29%	42%	29%	29%	42%	29%	29%	42%
Tráfego anual (%)**	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%
(Tráf. anual %)/(Nf)	2,0E-07	7,4E-07	1,6E-07	2,7E-07	8,4E-07	2,3E-07	1,2E-07	4,2E-07	9,8E-08
Mês	ABR			MAI			JUN		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	3,7E+05	1,1E+05	5,9E+05	8,5E+05	2,4E+05	1,2E+06	1,6E+06	5,8E+05	2,4E+06
Tráfego diário (%)*	29%	29%	42%	29%	29%	42%	29%	29%	42%
Tráfego anual (%)**	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%
(% Tráf. anual)/(Nf)	6,6E-08	2,3E-07	6,0E-08	2,9E-08	9,9E-08	2,8E-08	1,5E-08	4,2E-08	1,5E-08
Mês	JUL			AGO			SET		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	1,6E+06	6,4E+05	2,3E+06	1,1E+06	3,7E+05	1,8E+06	6,0E+05	1,7E+05	1,1E+06
Tráfego diário (%)*	29%	29%	42%	29%	29%	42%	29%	29%	42%
Tráfego anual (%)**	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%
(% Tráf. anual)/(Nf)	1,5E-08	3,8E-08	1,5E-08	2,2E-08	6,5E-08	2,0E-08	4,0E-08	1,4E-07	3,1E-08
Mês	OUT			NOV			DEZ		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	4,4E+05	1,4E+05	8,0E+05	2,0E+05	5,4E+04	3,7E+05	1,6E+05	4,6E+04	2,9E+05
Tráfego diário (%)*	29%	29%	42%	29%	29%	42%	29%	29%	42%
Tráfego anual (%)**	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%	2,4%	2,4%	3,5%
(% Tráf. anual)/(Nf)	5,5E-08	1,7E-07	4,4E-08	1,2E-07	4,5E-07	9,5E-08	1,5E-07	5,2E-07	1,2E-07
SOMA ((% tráfego anual)/(Nf))								5,78E-06	
Estimativa de vida útil								<b>1,73E+05</b>	

\*Tráfego diário: constante ao longo do dia, porém foram utilizadas as porcentagens indicadas porque os dois primeiros períodos possuem 7 horas de duração (29% do dia) e o último período 10 horas (42% do dia).

\*\*Tráfego anual: quanto a porcentagem do tráfego diário representa do tráfego anual. Dentro do mês, considerou-se a mesma condição todos os dias. Assim, dividiu-se a porcentagem diária por 12 para encontrar a porcentagem do tráfego anual que passa em cada período de análise.

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

### APÊNDICE G.3 Combinação 3: $N_f$ considerando distribuição de temperatura regional, curva de fadiga de 20°C e distribuição de tráfego local

Apêndice G.3.1 – Estimativa de vida útil para o segmento 05.

Mês	JAN			FEV			MAR		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	1,6E+05	4,2E+04	2,6E+05	1,1E+05	3,7E+04	1,8E+05	2,7E+05	7,5E+04	4,3E+05
Tráfego diário (%)*	36%	39%	25%	36%	39%	25%	36%	39%	25%
Tráfego anual (%)**	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%
(Tráf. anual %)/(Nf)	1,9E-07	7,7E-07	8,1E-08	2,7E-07	8,8E-07	1,2E-07	1,1E-07	4,3E-07	4,8E-08
Mês	ABR			MAI			JUN		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	4,8E+05	1,4E+05	7,3E+05	1,1E+06	3,3E+05	1,6E+06	2,2E+06	7,9E+05	3,1E+06
Tráfego diário (%)*	36%	39%	25%	36%	39%	25%	36%	39%	25%
Tráfego anual (%)**	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%
(% Tráf. anual)/(Nf)	6,2E-08	2,3E-07	2,9E-08	2,7E-08	9,9E-08	1,3E-08	1,3E-08	4,1E-08	6,6E-09
Mês	JUL			AGO			SET		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	2,2E+06	8,7E+05	3,0E+06	1,5E+06	5,0E+05	2,3E+06	7,9E+05	2,4E+05	1,4E+06
Tráfego diário (%)*	36%	39%	25%	36%	39%	25%	36%	39%	25%
Tráfego anual (%)**	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%
(% Tráf. anual)/(Nf)	1,4E-08	3,7E-08	6,9E-09	2,1E-08	6,5E-08	9,0E-09	3,8E-08	1,4E-07	1,5E-08
Mês	OUT			NOV			DEZ		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	5,8E+05	2,0E+05	1,0E+06	3,1E+05	9,3E+04	5,9E+05	2,0E+05	6,1E+04	3,4E+05
Tráfego diário (%)*	36%	39%	25%	36%	39%	25%	36%	39%	25%
Tráfego anual (%)**	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%
(% Tráf. anual)/(Nf)	5,2E-08	1,7E-07	2,1E-08	9,7E-08	3,5E-07	3,5E-08	1,5E-07	5,4E-07	6,1E-08
SOMA ((% tráfego anual)/(Nf))								5,23E-06	
Estimativa de vida útil								<b>1,91E+05</b>	

\*Tráfego diário: distribuído ao longo do dia com base nos dados locais.

\*\*Tráfego anual: quanto a porcentagem do tráfego diário representa do tráfego anual. Dentro do mês, considerou-se a mesma condição todos os dias. Assim, dividiu-se a porcentagem diária por 12 para encontrar a porcentagem do tráfego anual que passa em cada período de análise.

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice G.3.2 – Estimativa de vida útil para a mistura convencional do segmento 03.

Mês	JAN			FEV			MAR		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	6,2E+06	2,2E+06	1,3E+06	5,6E+06	2,2E+06	8,5E+05	8,8E+06	2,6E+06	2,5E+06
Tráfego diário (%)*	36%	39%	25%	36%	39%	25%	36%	39%	25%
Tráfego anual (%)**	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%
(Tráf. anual %)/(Nf)	4,9E-09	1,5E-08	1,6E-08	5,4E-09	1,5E-08	2,4E-08	3,4E-09	1,2E-08	8,3E-09
Mês	ABR			MAI			JUN		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	1,3E+07	3,7E+06	5,0E+06	3,1E+07	7,3E+06	1,5E+07	6,1E+07	1,7E+07	4,4E+07
Tráfego diário (%)*	36%	39%	25%	36%	39%	25%	36%	39%	25%
Tráfego anual (%)**	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%
(% Tráf. anual)/(Nf)	2,2E-09	8,8E-09	4,2E-09	9,6E-10	4,4E-09	1,4E-09	4,9E-10	2,0E-09	4,7E-10
Mês	JUL			AGO			SET		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	5,9E+07	1,8E+07	4,1E+07	4,2E+07	1,0E+07	2,6E+07	2,5E+07	6,0E+06	1,2E+07
Tráfego diário (%)*	36%	39%	25%	36%	39%	25%	36%	39%	25%
Tráfego anual (%)**	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%
(% Tráf. anual)/(Nf)	5,1E-10	1,8E-09	5,1E-10	7,1E-10	3,1E-09	8,0E-10	1,2E-09	5,4E-09	1,7E-09
Mês	OUT			NOV			DEZ		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	1,8E+07	4,8E+06	7,5E+06	1,0E+07	3,0E+06	2,5E+06	7,8E+06	2,4E+06	1,8E+06
Tráfego diário (%)*	36%	39%	25%	36%	39%	25%	36%	39%	25%
Tráfego anual (%)**	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%
(% Tráf. anual)/(Nf)	1,7E-09	6,8E-09	2,8E-09	3,0E-09	1,1E-08	8,5E-09	3,8E-09	1,3E-08	1,1E-08
SOMA ((% tráfego anual)/(Nf))								2,07E-07	
Estimativa de vida útil								<b>4,83E+06</b>	

\*Tráfego diário: distribuído ao longo do dia com base nos dados locais.

\*\*Tráfego anual: quanto a porcentagem do tráfego diário representa do tráfego anual. Dentro do mês, considerou-se a mesma condição todos os dias. Assim, dividiu-se a porcentagem diária por 12 para encontrar a porcentagem do tráfego anual que passa em cada período de análise.

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice G.3.3 – Estimativa de vida útil para a mistura modificada do segmento 03.

Mês	JAN			FEV			MAR		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	2,0E+06	5,3E+05	4,4E+06	1,4E+06	4,7E+05	3,0E+06	3,9E+06	9,4E+05	7,7E+06
Tráfego diário (%)*	36%	39%	25%	36%	39%	25%	36%	39%	25%
Tráfego anual (%)**	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%
(Tráf. anual %)/(Nf)	1,5E-08	6,2E-08	4,8E-09	2,2E-08	7,0E-08	6,9E-09	7,6E-09	3,5E-08	2,7E-09
Mês	ABR			MAI			JUN		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	8,3E+06	1,9E+06	1,4E+07	2,7E+07	5,2E+06	4,1E+07	6,9E+07	1,6E+07	1,1E+08
Tráfego diário (%)*	36%	39%	25%	36%	39%	25%	36%	39%	25%
Tráfego anual (%)**	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%
(% Tráf. anual)/(Nf)	3,6E-09	1,7E-08	1,4E-09	1,1E-09	6,3E-09	5,1E-10	4,3E-10	2,0E-09	1,9E-10
Mês	JUL			AGO			SET		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	6,7E+07	1,9E+07	1,0E+08	3,8E+07	8,9E+06	6,8E+07	1,6E+07	3,4E+06	3,5E+07
Tráfego diário (%)*	36%	39%	25%	36%	39%	25%	36%	39%	25%
Tráfego anual (%)**	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%
(% Tráf. anual)/(Nf)	4,5E-10	1,8E-09	2,1E-10	7,8E-10	3,7E-09	3,0E-10	1,8E-09	9,6E-09	6,0E-10
Mês	OUT			NOV			DEZ		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	1,1E+07	2,7E+06	2,2E+07	3,7E+06	8,9E+05	8,0E+06	2,7E+06	7,5E+05	6,0E+06
Tráfego diário (%)*	36%	39%	25%	36%	39%	25%	36%	39%	25%
Tráfego anual (%)**	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%
(% Tráf. anual)/(Nf)	2,8E-09	1,2E-08	9,6E-10	8,1E-09	3,7E-08	2,6E-09	1,1E-08	4,3E-08	3,5E-09
SOMA ((% tráfego anual)/(Nf))								3,98E-07	
Estimativa de vida útil								<b>2,51E+06</b>	

\*Tráfego diário: distribuído ao longo do dia com base nos dados locais.

\*\*Tráfego anual: quanto a porcentagem do tráfego diário representa do tráfego anual. Dentro do mês, considerou-se a mesma condição todos os dias. Assim, dividiu-se a porcentagem diária por 12 para encontrar a porcentagem do tráfego anual que passa em cada período de análise.

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice G.3.4 – Estimativa de vida útil para o segmento 04.

Mês	JAN			FEV			MAR		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	1,2E+05	3,3E+04	2,2E+05	8,9E+04	2,9E+04	1,5E+05	2,1E+05	5,7E+04	3,6E+05
Tráfego diário (%)*	36%	39%	25%	36%	39%	25%	36%	39%	25%
Tráfego anual (%)**	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%
(Tráf. anual %)/(Nf)	2,5E-07	1,0E-06	9,6E-08	3,4E-07	1,1E-06	1,4E-07	1,4E-07	5,7E-07	5,8E-08
Mês	ABR			MAI			JUN		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	3,7E+05	1,1E+05	5,9E+05	8,5E+05	2,4E+05	1,2E+06	1,6E+06	5,8E+05	2,4E+06
Tráfego diário (%)*	36%	39%	25%	36%	39%	25%	36%	39%	25%
Tráfego anual (%)**	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%
(% Tráf. anual)/(Nf)	8,2E-08	3,1E-07	3,5E-08	3,5E-08	1,3E-07	1,7E-08	1,8E-08	5,6E-08	8,7E-09
Mês	JUL			AGO			SET		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	1,6E+06	6,4E+05	2,3E+06	1,1E+06	3,7E+05	1,8E+06	6,0E+05	1,7E+05	1,1E+06
Tráfego diário (%)*	36%	39%	25%	36%	39%	25%	36%	39%	25%
Tráfego anual (%)**	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%
(% Tráf. anual)/(Nf)	1,9E-08	5,1E-08	9,1E-09	2,8E-08	8,8E-08	1,2E-08	5,0E-08	1,9E-07	1,8E-08
Mês	OUT			NOV			DEZ		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	4,4E+05	1,4E+05	8,0E+05	2,0E+05	5,4E+04	3,7E+05	1,6E+05	4,6E+04	2,9E+05
Tráfego diário (%)*	36%	39%	25%	36%	39%	25%	36%	39%	25%
Tráfego anual (%)**	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%
(% Tráf. anual)/(Nf)	6,8E-08	2,2E-07	2,6E-08	1,5E-07	6,0E-07	5,6E-08	1,9E-07	7,0E-07	7,2E-08
SOMA ((% tráfego anual)/(Nf))								6,97E-06	
Estimativa de vida útil								<b>1,44E+05</b>	

\*Tráfego diário: distribuído ao longo do dia com base nos dados locais.

\*\*Tráfego anual: quanto a porcentagem do tráfego diário representa do tráfego anual. Dentro do mês, considerou-se a mesma condição todos os dias. Assim, dividiu-se a porcentagem diária por 12 para encontrar a porcentagem do tráfego anual que passa em cada período de análise.

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

**APÊNDICE G.4 Combinação 4:  $N_f$  considerando distribuição de temperatura regional, curvas de fadiga de 15°C e de 20°C e distribuição de tráfego local**

Apêndice G.4.1 – Estimativa de vida útil para o segmento 05.

Mês	JAN			FEV			MAR		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	1,6E+05	4,2E+04	2,6E+05	1,1E+05	3,7E+04	1,8E+05	2,7E+05	7,5E+04	4,3E+05
Tráfego diário (%)*	36%	39%	25%	36%	39%	25%	36%	39%	25%
Tráfego anual (%)**	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%
(Tráf. anual %)/(Nf)	1,9E-07	7,7E-07	8,1E-08	2,7E-07	8,8E-07	1,2E-07	1,1E-07	4,3E-07	4,8E-08
Mês	ABR			MAI			JUN		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	4,8E+05	1,4E+05	7,3E+05	1,1E+06	3,3E+05	1,6E+06	3,5E+06	7,9E+05	5,2E+06
Tráfego diário (%)*	36%	39%	25%	36%	39%	25%	36%	39%	25%
Tráfego anual (%)**	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%
(% Tráf. anual)/(Nf)	6,2E-08	2,3E-07	2,9E-08	2,7E-08	9,9E-08	1,3E-08	8,7E-09	4,1E-08	4,0E-09
Mês	JUL			AGO			SET		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	3,4E+06	8,7E+05	4,9E+06	2,1E+06	5,0E+05	3,6E+06	7,9E+05	2,4E+05	1,4E+06
Tráfego diário (%)*	36%	39%	25%	36%	39%	25%	36%	39%	25%
Tráfego anual (%)**	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%
(% Tráf. anual)/(Nf)	9,0E-09	3,7E-08	4,2E-09	1,4E-08	6,5E-08	5,8E-09	3,8E-08	1,4E-07	1,5E-08
Mês	OUT			NOV			DEZ		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	5,8E+05	2,0E+05	1,0E+06	3,1E+05	9,3E+04	5,9E+05	2,0E+05	6,1E+04	3,4E+05
Tráfego diário (%)*	36%	39%	25%	36%	39%	25%	36%	39%	25%
Tráfego anual (%)**	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%
(% Tráf. anual)/(Nf)	5,2E-08	1,7E-07	2,1E-08	9,7E-08	3,5E-07	3,5E-08	1,5E-07	5,4E-07	6,1E-08
SOMA ((% tráfego anual)/(Nf))								5,20E-06	
Estimativa de vida útil								<b>1,92E+05</b>	

\*Tráfego diário: distribuído ao longo do dia com base nos dados locais.

\*\*Tráfego anual: quanto a porcentagem do tráfego diário representa do tráfego anual. Dentro do mês, considerou-se a mesma condição todos os dias. Assim, dividiu-se a porcentagem diária por 12 para encontrar a porcentagem do tráfego anual que passa em cada período de análise.

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice G.4.2 – Estimativa de vida útil para a mistura convencional do segmento 03.

Mês	JAN			FEV			MAR		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	6,2E+06	2,2E+06	1,3E+06	5,6E+06	2,2E+06	8,5E+05	8,8E+06	2,6E+06	2,5E+06
Tráfego diário (%)*	36%	39%	25%	36%	39%	25%	36%	39%	25%
Tráfego anual (%)**	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%
(Tráf. anual %)/(Nf)	4,9E-09	1,5E-08	1,6E-08	5,4E-09	1,5E-08	2,4E-08	3,4E-09	1,2E-08	8,3E-09
Mês	ABR			MAI			JUN		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	1,3E+07	3,7E+06	5,0E+06	3,1E+07	7,3E+06	1,5E+07	1,6E+08	1,7E+07	1,1E+08
Tráfego diário (%)*	36%	39%	25%	36%	39%	25%	36%	39%	25%
Tráfego anual (%)**	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%
(% Tráf. anual)/(Nf)	2,2E-09	8,8E-09	4,2E-09	9,6E-10	4,4E-09	1,4E-09	1,8E-10	2,0E-09	1,9E-10
Mês	JUL			AGO			SET		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	1,6E+08	1,8E+07	1,0E+08	1,1E+08	1,0E+07	6,1E+07	2,5E+07	6,0E+06	1,2E+07
Tráfego diário (%)*	36%	39%	25%	36%	39%	25%	36%	39%	25%
Tráfego anual (%)**	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%
(% Tráf. anual)/(Nf)	1,9E-10	1,8E-09	2,0E-10	2,8E-10	3,1E-09	3,4E-10	1,2E-09	5,4E-09	1,7E-09
Mês	OUT			NOV			DEZ		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	1,8E+07	4,8E+06	7,5E+06	1,0E+07	3,0E+06	2,5E+06	7,8E+06	2,4E+06	1,8E+06
Tráfego diário (%)*	36%	39%	25%	36%	39%	25%	36%	39%	25%
Tráfego anual (%)**	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%
(% Tráf. anual)/(Nf)	1,7E-09	6,8E-09	2,8E-09	3,0E-09	1,1E-08	8,5E-09	3,8E-09	1,3E-08	1,1E-08
SOMA ((% tráfego anual)/(Nf))								2,05E-07	
Estimativa de vida útil								<b>4,88E+06</b>	

\*Tráfego diário: distribuído ao longo do dia com base nos dados locais.

\*\*Tráfego anual: quanto a porcentagem do tráfego diário representa do tráfego anual. Dentro do mês, considerou-se a mesma condição todos os dias. Assim, dividiu-se a porcentagem diária por 12 para encontrar a porcentagem do tráfego anual que passa em cada período de análise.

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice G.4.3 – Estimativa de vida útil para o segmento 04.

Mês	JAN			FEV			MAR		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	1,2E+05	3,3E+04	2,2E+05	8,9E+04	2,9E+04	1,5E+05	2,1E+05	5,7E+04	3,6E+05
Tráfego diário (%)*	36%	39%	25%	36%	39%	25%	36%	39%	25%
Tráfego anual (%)**	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%
(Tráf. anual %)/(Nf)	2,5E-07	1,0E-06	9,6E-08	3,4E-07	1,1E-06	1,4E-07	1,4E-07	5,7E-07	5,8E-08
Mês	ABR			MAI			JUN		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	3,7E+05	1,1E+05	5,9E+05	8,5E+05	2,4E+05	1,2E+06	2,4E+06	5,8E+05	3,7E+06
Tráfego diário (%)*	36%	39%	25%	36%	39%	25%	36%	39%	25%
Tráfego anual (%)**	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%
(% Tráf. anual)/(Nf)	8,2E-08	3,1E-07	3,5E-08	3,5E-08	1,3E-07	1,7E-08	1,2E-08	5,6E-08	5,6E-09
Mês	JUL			AGO			SET		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	2,4E+06	6,4E+05	3,6E+06	1,5E+06	3,7E+05	2,7E+06	6,0E+05	1,7E+05	1,1E+06
Tráfego diário (%)*	36%	39%	25%	36%	39%	25%	36%	39%	25%
Tráfego anual (%)**	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%
(% Tráf. anual)/(Nf)	1,3E-08	5,1E-08	5,8E-09	2,0E-08	8,8E-08	7,8E-09	5,0E-08	1,9E-07	1,8E-08
Mês	OUT			NOV			DEZ		
Período	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h	06h-13h	13h-20h	20h-06h
Nf	4,4E+05	1,4E+05	8,0E+05	2,0E+05	5,4E+04	3,7E+05	1,6E+05	4,6E+04	2,9E+05
Tráfego diário (%)*	36%	39%	25%	36%	39%	25%	36%	39%	25%
Tráfego anual (%)**	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%	3,0%	3,3%	2,1%
(% Tráf. anual)/(Nf)	6,8E-08	2,2E-07	2,6E-08	1,5E-07	6,0E-07	5,6E-08	1,9E-07	7,0E-07	7,2E-08
SOMA ((% tráfego anual)/(Nf))								6,94E-06	
Estimativa de vida útil								<b>1,44E+05</b>	

\*Tráfego diário: distribuído ao longo do dia com base nos dados locais.

\*\*Tráfego anual: quanto a porcentagem do tráfego diário representa do tráfego anual. Dentro do mês, considerou-se a mesma condição todos os dias. Assim, dividiu-se a porcentagem diária por 12 para encontrar a porcentagem do tráfego anual que passa em cada período de análise.

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## APÊNDICE H – Distribuição de deformação no revestimento

### APÊNDICE H.1 Distribuição de deformação na camada asfáltica considerando sazonalidade de temperatura

Apêndice H.1.1 – Deformação específica no segmento 03 em cada ponto da malha nos meses de janeiro a março ( $\times 10^{-6}$  mm/mm).

Mês	JANEIRO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
1,90 cm	-126,93	-126,61	-114,70	-90,19	-169,45	-169,01	-152,36	-118,61	-44,20	-44,52	-40,79	-32,24
3,80 cm	-88,18	-85,54	-76,13	-63,12	-113,47	-107,11	-93,16	-80,14	-17,44	-16,39	-14,24	-13,18
5,70 cm	-53,66	-50,07	-43,72	-39,16	-68,27	-59,96	-50,11	-49,56	5,95	7,69	8,05	3,53
7,60 cm	-20,61	-17,16	-14,13	-16,30	-26,95	-19,30	-14,15	-21,90	27,21	28,97	27,43	18,74
9,50 cm	12,44	15,30	14,95	6,46	15,05	21,37	21,69	6,11	47,62	49,00	45,54	33,36
11,40 cm	47,14	49,77	46,12	30,41	60,85	66,95	62,71	36,74	68,50	69,67	64,35	48,31
13,27 cm	74,89	75,92	69,07	49,66	94,69	97,79	88,96	59,32	84,15	84,28	77,25	59,72
15,13 cm	106,61	106,88	96,85	71,53	136,49	138,57	125,31	87,20	101,82	101,33	92,58	72,46
17,00 cm	143,85	144,70	131,54	97,08	188,10	191,87	174,44	121,68	123,14	122,76	112,30	87,60
Mês	FEVEREIRO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
1,90 cm	-145,48	-145,03	-131,06	-102,41	-177,18	-176,70	-159,17	-123,71	-44,48	-44,85	-41,07	-32,28
3,80 cm	-102,67	-99,60	-88,47	-72,75	-118,84	-111,87	-97,04	-83,67	-15,61	-14,48	-12,43	-11,84
5,70 cm	-64,33	-60,21	-52,58	-46,41	-72,13	-63,05	-52,47	-52,17	9,66	11,55	11,65	6,09
7,60 cm	-27,40	-23,61	-19,78	-21,19	-29,62	-21,27	-15,61	-23,82	32,55	34,47	32,51	22,36
9,50 cm	9,56	12,93	12,94	4,05	13,69	20,58	21,21	4,94	54,38	55,91	51,88	37,89
11,40 cm	48,34	51,53	47,83	30,53	61,01	67,68	63,57	36,47	76,59	77,91	71,88	53,70
13,27 cm	79,07	80,46	73,13	51,60	95,93	99,43	90,53	59,67	92,69	92,86	85,02	65,38
15,13 cm	114,13	114,70	103,79	75,54	139,21	141,67	128,16	88,43	110,79	110,25	100,61	78,37
17,00 cm	155,32	156,59	142,19	103,55	192,78	197,11	179,31	124,13	132,71	132,28	120,82	93,87
Mês	MARÇO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
1,90 cm	-103,41	-103,21	-93,83	-74,49	-138,82	-138,45	-125,20	-98,31	-42,30	-42,57	-39,04	-31,09
3,80 cm	-70,56	-68,49	-61,17	-51,24	-91,84	-87,33	-76,57	-65,74	-18,44	-17,50	-15,36	-13,94
5,70 cm	-41,37	-38,51	-33,68	-30,66	-53,01	-47,04	-39,73	-39,10	2,42	3,95	4,52	1,09
7,60 cm	-13,55	-10,82	-8,68	-11,09	-17,11	-11,79	-8,39	-14,67	21,46	22,99	21,89	14,86
9,50 cm	14,16	16,36	15,74	8,32	18,99	23,48	22,93	9,85	39,82	41,01	38,21	28,14
11,40 cm	43,22	45,14	41,81	28,70	58,20	62,42	58,02	36,49	58,69	59,65	55,19	41,77
13,27 cm	67,00	67,62	61,67	45,49	87,65	89,49	81,31	56,55	73,40	73,48	67,47	52,58
15,13 cm	94,07	94,07	85,48	64,46	123,59	124,52	112,61	80,91	90,05	89,59	82,03	64,67
17,00 cm	125,78	126,19	114,99	86,50	167,58	169,62	154,10	110,65	109,99	109,67	100,53	78,93

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice H.1.2 – Deformação específica no segmento 03 em cada ponto da malha nos meses de abril a julho ( $\times 10^{-6}$  mm/mm).

Mês	ABRIL											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
1,90 cm	-82,83	-82,74	-75,50	-60,51	-111,97	-111,73	-101,37	-80,29	-40,21	-40,43	-37,14	-29,80
3,80 cm	-55,35	-53,75	-48,16	-40,80	-72,98	-69,76	-61,56	-52,95	-19,06	-18,23	-16,13	-14,46
5,70 cm	-31,02	-28,76	-25,15	-23,37	-40,21	-35,88	-30,49	-30,10	-0,59	0,78	1,51	-1,01
7,60 cm	-7,97	-5,81	-4,35	-6,87	-9,81	-5,96	-3,74	-9,05	16,33	17,68	16,95	11,34
9,50 cm	14,93	16,62	15,87	9,45	20,64	23,84	22,86	12,03	32,71	33,74	31,52	23,31
11,40 cm	38,90	40,30	37,36	26,54	53,50	56,38	52,25	34,75	49,56	50,36	46,69	35,61
13,27 cm	58,97	59,34	54,29	40,96	78,77	79,81	72,61	52,33	63,23	63,27	58,21	45,73
15,13 cm	81,77	81,63	74,43	57,19	109,24	109,51	99,24	73,35	78,69	78,29	71,83	57,04
17,00 cm	108,40	108,56	99,24	75,97	146,15	147,16	133,87	98,66	97,09	96,83	88,95	70,30
Mês	MAIO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
1,90 cm	-61,13	-61,14	-56,05	-45,48	-84,75	-84,63	-77,12	-61,78	-36,17	-36,35	-33,47	-27,16
3,80 cm	-39,98	-38,87	-34,97	-30,04	-54,38	-52,25	-46,42	-40,12	-18,80	-18,12	-16,19	-14,39
5,70 cm	-21,35	-19,72	-17,26	-16,40	-28,51	-25,56	-21,85	-21,69	-3,63	-2,51	-1,65	-3,17
7,60 cm	-3,81	-2,25	-1,33	-3,57	-4,47	-1,73	-0,36	-4,61	10,29	11,40	11,09	7,16
9,50 cm	13,58	14,78	14,09	9,14	19,52	21,64	20,59	12,37	23,83	24,66	23,16	17,21
11,40 cm	31,66	32,57	30,29	22,31	45,15	46,94	43,51	30,50	37,76	38,35	35,67	27,52
13,27 cm	47,39	47,57	43,73	33,86	65,71	66,20	60,46	45,18	49,64	49,66	45,84	36,44
15,13 cm	65,16	64,97	59,55	46,77	90,07	89,97	81,89	62,37	63,06	62,74	57,76	46,36
17,00 cm	85,82	85,85	78,85	61,62	119,22	119,58	109,18	82,75	78,86	78,69	72,53	57,88
Mês	JUNHO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
1,90 cm	-47,73	-47,78	-43,97	-35,99	-62,83	-62,83	-57,52	-46,57	-33,18	-33,33	-30,77	-25,20
3,80 cm	-30,58	-29,75	-26,85	-23,31	-39,55	-38,16	-34,11	-29,68	-18,56	-17,99	-16,18	-14,34
5,70 cm	-15,55	-14,28	-12,48	-12,14	-19,54	-17,54	-15,04	-15,12	-5,82	-4,86	-3,93	-4,79
7,60 cm	-1,47	-0,25	0,36	-1,67	-0,97	0,92	1,72	-1,61	5,91	6,86	6,83	4,02
9,50 cm	12,42	13,34	12,72	8,65	17,50	18,92	17,97	11,79	17,34	18,05	17,04	12,62
11,40 cm	26,83	27,49	25,63	19,32	36,92	38,04	35,34	25,84	29,10	29,59	27,60	21,44
13,27 cm	39,68	39,78	36,71	28,92	53,29	53,50	49,11	37,80	39,54	39,56	36,62	29,34
15,13 cm	54,16	53,98	49,67	39,59	72,30	72,09	65,97	51,51	51,30	51,07	47,15	38,12
17,00 cm	70,95	70,94	65,40	51,81	94,80	94,88	87,03	67,56	65,04	64,94	60,03	48,23
Mês	JULHO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
1,90 cm	-48,01	-48,07	-44,23	-36,19	-60,66	-60,67	-55,58	-45,04	-33,43	-33,58	-30,99	-25,37
3,80 cm	-30,74	-29,91	-26,99	-23,42	-38,07	-36,75	-32,87	-28,62	-18,63	-18,05	-16,23	-14,38
5,70 cm	-15,60	-14,33	-12,52	-12,18	-18,65	-16,73	-14,35	-14,46	-5,74	-4,77	-3,84	-4,73
7,60 cm	-1,43	-0,19	0,42	-1,64	-0,61	1,20	1,95	-1,31	6,12	7,08	7,05	4,18
9,50 cm	12,57	13,50	12,86	8,76	17,29	18,66	17,71	11,72	17,68	18,40	17,37	12,86
11,40 cm	27,08	27,75	25,87	19,49	36,11	37,17	34,55	25,36	29,58	30,07	28,05	21,78
13,27 cm	40,02	40,12	37,01	29,14	52,04	52,23	47,97	37,03	40,12	40,14	37,14	29,75
15,13 cm	54,59	54,40	50,05	39,88	70,51	70,29	64,36	50,38	51,99	51,75	47,77	38,60
17,00 cm	71,48	71,47	65,88	52,17	92,34	92,41	84,81	65,99	65,87	65,77	60,78	48,81

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice H.1.3 – Deformação específica no segmento 03 em cada ponto da malha nos meses de agosto a novembro ( $\times 10^{-6}$  mm/mm).

Mês	AGOSTO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
1,90 cm	-56,41	-56,43	-51,80	-42,18	-72,51	-72,46	-66,19	-53,31	-34,07	-34,24	-31,58	-25,74
3,80 cm	-36,81	-35,80	-32,25	-27,80	-45,86	-44,14	-39,33	-34,14	-18,31	-17,70	-15,87	-14,08
5,70 cm	-19,56	-18,07	-15,82	-15,10	-23,08	-20,65	-17,65	-17,74	-4,54	-3,53	-2,66	-3,83
7,60 cm	-3,34	-1,90	-1,08	-3,16	-1,94	0,33	1,34	-2,53	8,11	9,12	8,95	5,63
9,50 cm	12,73	13,82	13,19	8,66	19,13	20,88	19,82	12,58	20,43	21,17	19,93	14,83
11,40 cm	29,41	30,22	28,13	20,88	41,43	42,84	39,75	28,52	33,08	33,61	31,31	24,28
13,27 cm	44,09	44,24	40,72	31,73	59,74	60,06	54,99	41,75	44,12	44,13	40,80	32,60
15,13 cm	60,65	60,46	55,49	43,82	81,25	81,07	73,99	57,11	56,54	56,27	51,89	41,84
17,00 cm	79,86	79,88	73,46	57,70	106,88	107,07	97,97	75,21	71,12	70,98	65,53	52,53
Mês	SETEMBRO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
1,90 cm	-71,63	-71,57	-65,46	-52,86	-96,95	-96,74	-87,96	-70,18	-35,83	-36,01	-33,16	-26,84
3,80 cm	-47,85	-46,53	-41,81	-35,63	-63,12	-60,51	-53,60	-46,22	-18,07	-17,39	-15,51	-13,81
5,70 cm	-26,81	-24,92	-21,87	-20,36	-34,51	-30,98	-26,48	-26,02	-2,53	-1,41	-0,63	-2,35
7,60 cm	-6,88	-5,08	-3,83	-5,92	-7,90	-4,64	-2,80	-7,29	11,75	12,85	12,44	8,22
9,50 cm	12,91	14,31	13,69	8,39	18,75	21,30	20,38	11,37	25,59	26,42	24,78	18,48
11,40 cm	33,52	34,62	32,15	23,25	47,40	49,61	45,98	31,44	39,81	40,42	37,57	28,99
13,27 cm	51,24	51,49	47,23	36,14	70,03	70,71	64,46	47,42	51,85	51,86	47,85	38,01
15,13 cm	71,28	71,10	65,02	50,57	97,08	97,10	88,20	66,31	65,40	65,06	59,88	48,03
17,00 cm	94,56	94,64	86,74	67,16	129,62	130,21	118,68	88,87	81,38	81,17	74,79	59,67
Mês	OUTUBRO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
1,90 cm	-79,56	-79,46	-72,56	-58,32	-100,93	-100,72	-91,52	-72,84	-37,85	-38,06	-35,00	-28,19
3,80 cm	-53,43	-51,91	-46,56	-39,50	-65,42	-62,63	-55,40	-47,78	-18,40	-17,65	-15,68	-14,01
5,70 cm	-30,29	-28,15	-24,68	-22,85	-35,46	-31,69	-26,99	-26,72	-1,37	-0,14	0,59	-1,53
7,60 cm	-8,35	-6,31	-4,86	-7,08	-7,67	-4,18	-2,29	-7,25	14,25	15,46	14,87	9,95
9,50 cm	13,45	15,04	14,40	8,53	20,15	22,90	21,88	12,14	29,38	30,30	28,36	21,08
11,40 cm	36,25	37,54	34,83	24,85	50,11	52,52	48,67	33,04	44,94	45,63	42,36	32,51
13,27 cm	55,55	55,88	51,16	38,78	73,50	74,28	67,67	49,48	57,82	57,84	53,29	42,10
15,13 cm	77,44	77,28	70,54	54,42	101,58	101,66	92,27	69,01	72,32	71,95	66,11	52,76
17,00 cm	102,94	103,08	94,31	72,47	135,47	136,17	124,02	92,42	89,51	89,27	82,12	65,21
Mês	NOVEMBRO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
1,90 cm	-109,31	-109,03	-99,03	-78,51	-145,99	-145,50	-131,42	-103,14	-40,21	-40,48	-37,14	-29,55
3,80 cm	-75,66	-73,49	-65,63	-54,75	-97,77	-92,85	-81,29	-69,75	-16,77	-15,89	-13,93	-12,71
5,70 cm	-45,61	-42,65	-37,38	-33,61	-58,15	-51,74	-43,73	-42,62	3,77	5,23	5,66	2,12
7,60 cm	-16,86	-14,04	-11,57	-13,45	-21,55	-15,67	-11,70	-17,75	22,53	23,99	22,78	15,69
9,50 cm	11,82	14,10	13,70	6,59	15,60	20,36	20,20	7,37	40,59	41,72	38,85	28,77
11,40 cm	41,87	43,87	40,65	27,60	56,03	60,51	56,36	34,76	59,09	60,00	55,52	42,15
13,27 cm	66,52	67,19	61,25	44,95	86,43	88,43	80,35	55,39	73,50	73,55	67,56	52,77
15,13 cm	94,54	94,57	85,89	64,53	123,74	124,82	112,86	80,60	89,70	89,22	81,72	64,55
17,00 cm	127,28	127,74	116,35	87,25	169,40	171,70	156,00	111,40	109,08	108,72	99,68	78,44

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice H.1.4 – Deformação específica no segmento 03 em cada ponto da malha no mês de dezembro ( $\times 10^{-6}$  mm/mm).

Mês	DEZEMBRO											
	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Período												
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
1,90 cm	-117,75	-117,44	-106,53	-84,12	-149,75	-149,33	-134,87	-105,60	-42,21	-42,50	-38,97	-30,91
3,80 cm	-81,63	-79,23	-70,63	-58,76	-99,54	-94,37	-82,48	-70,91	-17,22	-16,26	-14,20	-13,03
5,70 cm	-49,43	-46,16	-40,38	-36,25	-58,46	-51,66	-43,45	-42,87	4,66	6,25	6,65	2,69
7,60 cm	-18,62	-15,50	-12,77	-14,80	20,69	-14,43	-10,40	-17,31	24,59	26,19	24,83	17,03
9,50 cm	12,16	14,72	14,33	6,56	17,57	22,68	22,42	8,48	43,77	45,01	41,88	30,85
11,40 cm	44,46	46,75	43,32	29,00	59,18	64,03	59,66	36,58	63,41	64,44	59,57	44,98
13,27 cm	70,62	71,46	65,06	47,28	90,21	92,46	84,02	57,55	78,44	78,52	72,05	56,00
15,13 cm	100,45	100,59	91,24	67,99	128,35	129,64	117,20	83,24	95,37	94,88	86,80	68,26
17,00 cm	135,39	136,03	123,77	92,09	175,19	177,79	161,53	114,75	115,70	115,33	105,62	82,77

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice H.1.5 – Deformação específica no segmento 04 em cada ponto da malha nos meses de janeiro a abril ( $\times 10^{-6}$  mm/mm).

Mês	JANEIRO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
1,91 cm	-133,47	-132,65	-119,87	-94,47	-177,69	-176,46	-158,44	-123,33	-45,06	-45,27	-41,45	-32,98
3,82 cm	-93,93	-90,95	-80,81	-66,82	-120,39	-113,56	-98,55	-84,02	-18,96	-17,82	-15,53	-14,29
5,74 cm	-58,76	-55,04	-48,11	-42,38	-74,31	-65,95	-55,88	-52,88	3,66	5,44	6,02	1,97
7,65 cm	-25,25	-21,96	-18,52	-19,19	-32,34	-25,27	-19,71	-24,84	23,97	25,66	24,40	16,62
9,56 cm	8,14	10,37	10,21	3,82	10,08	14,80	15,01	3,31	43,10	44,20	41,07	30,44
11,47 cm	42,93	44,20	40,40	27,78	56,12	59,04	53,91	33,79	62,26	62,70	57,68	44,26
13,38 cm	80,61	81,49	74,08	53,62	108,77	111,43	101,09	68,73	82,97	83,00	76,10	59,09
15,30 cm	123,29	125,11	114,21	82,84	170,58	175,82	160,67	109,88	107,02	107,41	98,66	76,17
Mês	FEVEREIRO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
1,91 cm	-152,96	-151,88	-136,83	-107,16	-185,75	-184,46	-165,48	-128,55	-45,20	-45,45	-41,58	-32,90
3,82 cm	-109,25	-105,75	-93,72	-76,87	-125,92	-118,47	-102,54	-87,58	-17,04	-15,83	-13,63	-12,86
5,74 cm	-70,16	-65,87	-57,53	-49,99	-78,23	-69,13	-57,78	-55,47	7,39	9,31	9,63	4,59
7,65 cm	-32,72	-28,93	-24,57	-24,38	-34,96	-27,28	-21,24	-26,70	29,21	31,05	29,40	20,23
9,56 cm	4,68	7,30	7,54	1,11	8,88	14,01	14,45	2,25	49,61	50,83	47,15	34,87
11,47 cm	43,58	45,15	41,25	27,60	56,64	59,88	54,73	33,75	69,85	70,34	64,64	49,38
13,38 cm	85,67	86,85	78,85	56,18	111,45	114,48	103,90	69,97	91,59	91,63	83,90	64,88
15,30 cm	133,29	135,59	123,66	88,49	176,00	181,91	166,36	112,84	116,87	117,27	107,56	82,75
Mês	MARÇO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
1,91 cm	-108,98	-108,44	-98,38	-78,25	-145,66	-144,69	-130,39	-102,49	-43,32	-43,49	-39,87	-31,94
3,82 cm	-75,34	-73,05	-65,17	-54,43	-97,81	-92,92	-81,31	-69,32	-19,93	-18,92	-16,65	-15,06
5,74 cm	-45,50	-42,56	-37,29	-33,36	-58,46	-52,40	-44,42	-42,28	0,35	1,91	2,67	-0,35
7,65 cm	-17,15	-14,55	-12,11	-13,40	-22,33	-17,18	-13,31	-17,66	18,65	20,12	19,25	12,97
9,56 cm	11,00	12,72	12,22	6,33	13,87	17,25	16,79	6,83	36,05	36,99	34,45	25,65
11,47 cm	40,32	41,23	37,76	26,85	53,05	54,99	50,16	33,33	53,62	53,99	49,75	38,42
13,38 cm	72,10	72,66	66,21	48,98	97,15	98,71	89,56	63,05	72,69	72,72	66,79	52,19
15,30 cm	108,11	109,37	100,05	73,96	148,58	151,82	138,59	97,72	94,79	95,15	87,56	67,99
Mês	ABRIL											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
1,91 cm	-87,54	-87,21	-79,43	-63,73	-117,62	-116,94	-105,81	-83,96	-41,46	-41,59	-38,18	-30,79
3,82 cm	-59,19	-57,44	-51,42	-43,41	-77,98	-74,49	-65,65	-56,14	-20,49	-19,60	-17,37	-15,54
5,74 cm	-34,13	-31,83	-27,91	-25,45	-44,83	-40,44	-34,53	-32,98	-2,30	-0,92	-0,04	-2,23
7,65 cm	-10,44	-8,40	-6,76	-8,49	-14,26	-10,50	-7,87	-11,71	14,21	15,50	14,93	9,89
9,56 cm	13,04	14,37	13,64	8,25	16,22	18,65	17,81	9,34	30,03	30,84	28,78	21,51
11,47 cm	37,52	38,17	35,04	25,65	48,93	50,22	45,88	31,90	46,12	46,43	42,86	33,30
13,38 cm	64,07	64,42	58,88	44,42	85,46	86,36	78,52	56,95	63,65	63,67	58,57	46,03
15,30 cm	94,18	95,07	87,19	65,59	127,78	129,82	118,63	85,92	83,90	84,23	77,64	60,60

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice H.1.6 – Deformação específica no segmento 04 em cada ponto da malha nos meses de abril a julho ( $\times 10^{-6}$  mm/mm).

Mês	MAIO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
1,91 cm	-65,05	-64,90	-59,39	-48,18	-89,33	-88,94	-80,88	-64,90	-37,74	-37,85	-34,82	-28,33
3,82 cm	-42,82	-41,62	-37,43	-31,99	-58,27	-55,97	-49,70	-42,73	-20,06	-19,33	-17,29	-15,32
5,74 cm	-23,23	-21,59	-18,96	-17,67	-31,91	-28,93	-24,88	-23,93	-4,66	-3,54	-2,61	-3,92
7,65 cm	-4,77	-3,31	-2,36	-4,18	-7,50	-4,93	-3,33	-6,55	9,41	10,45	10,18	6,54
9,56 cm	13,53	14,45	13,65	9,15	16,75	18,37	17,39	10,62	23,03	23,68	22,17	16,67
11,47 cm	32,55	32,96	30,38	22,95	42,56	43,35	39,74	28,85	37,00	37,23	34,45	27,01
13,38 cm	53,24	53,40	49,03	37,85	71,17	71,62	65,38	48,90	52,22	52,23	48,17	38,19
15,30 cm	76,70	77,26	71,13	54,63	104,14	105,33	96,53	71,90	69,72	70,00	64,68	50,91
Mês	JUNHO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
1,91 cm	-51,04	-50,99	-46,83	-38,28	-66,55	-66,38	-60,67	-49,15	-35,07	-35,15	-32,41	-26,55
3,82 cm	-32,72	-31,83	-28,71	-24,77	-42,41	-40,92	-36,57	-31,64	-19,71	-19,10	-17,19	-15,15
5,74 cm	-16,62	-15,36	-13,46	-12,84	-21,68	-19,68	-16,98	-16,57	-6,32	-5,38	-4,41	-5,14
7,65 cm	-1,50	-0,38	0,20	-1,63	-2,45	-0,70	0,18	-2,59	6,02	6,89	6,83	4,13
9,56 cm	13,47	14,17	13,36	9,44	16,63	17,72	16,70	11,24	18,06	18,59	17,46	13,17
11,47 cm	29,02	29,31	27,10	20,89	36,68	37,16	34,21	25,71	30,47	30,66	28,43	22,44
13,38 cm	45,96	46,05	42,41	33,27	58,82	59,03	54,13	41,55	44,01	44,02	40,68	32,46
15,30 cm	65,18	65,58	60,55	47,19	84,23	84,94	78,13	59,61	59,50	59,75	55,32	43,81
Mês	JULHO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
1,91 cm	-51,31	-51,26	-47,07	-38,46	-64,28	-64,14	-58,65	-47,56	-35,30	-35,39	-32,62	-26,71
3,82 cm	-32,89	-31,99	-28,85	-24,89	-40,81	-39,39	-35,23	-30,51	-19,79	-19,17	-17,24	-15,21
5,74 cm	-16,68	-15,42	-13,51	-12,89	-20,64	-18,72	-16,16	-15,81	-6,27	-5,31	-4,34	-5,09
7,65 cm	-1,48	-0,35	0,23	-1,62	-1,93	-0,26	0,56	-2,17	6,18	7,06	6,99	4,24
9,56 cm	13,58	14,28	13,47	9,51	16,62	17,66	16,65	11,30	18,32	18,86	17,71	13,35
11,47 cm	29,22	29,51	27,28	21,02	36,11	36,56	33,68	25,39	30,84	31,03	28,77	22,70
13,38 cm	46,24	46,33	42,67	33,46	57,61	57,80	53,03	40,82	44,49	44,50	41,12	32,80
15,30 cm	65,57	65,97	60,91	47,45	82,27	82,94	76,33	58,38	60,13	60,38	55,90	44,25
Mês	AGOSTO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
1,91 cm	-60,19	-60,07	-55,04	-44,78	-76,57	-76,32	-69,59	-56,11	-35,77	-35,87	-33,04	-26,98
3,82 cm	-39,43	-38,34	-34,53	-29,59	-49,18	-47,33	-42,16	-36,41	-19,48	-18,83	-16,89	-14,93
5,74 cm	-21,14	-19,64	-17,26	-16,15	-25,82	-23,37	-20,11	-19,57	-5,27	-4,26	-3,34	-4,35
7,65 cm	-3,90	-2,58	-1,74	-3,49	-4,21	-2,08	-0,92	-4,01	7,77	8,70	8,52	5,39
9,56 cm	13,18	14,01	13,24	9,02	17,28	18,61	17,56	11,39	20,43	21,01	19,70	14,86
11,47 cm	30,94	31,30	28,88	21,97	39,96	40,57	37,27	27,57	33,45	33,65	31,18	24,55
13,38 cm	50,26	50,40	46,32	35,96	65,08	65,39	59,82	45,37	47,62	47,63	43,98	35,02
15,30 cm	72,17	72,67	66,97	51,70	93,98	94,90	87,13	65,73	63,88	64,14	59,34	46,89

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice H.1.7 – Deformação específica no segmento 04 em cada ponto da malha nos meses de agosto a novembro ( $\times 10^{-6}$  mm/mm).

Mês	SETEMBRO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
1,91 cm	-76,15	-75,90	-69,29	-55,95	-102,17	-101,62	-92,18	-73,66	-37,25	-37,36	-34,37	-27,92
3,82 cm	-51,29	-49,85	-44,77	-37,97	-67,61	-64,79	-57,34	-49,17	-19,29	-18,57	-16,58	-14,73
5,74 cm	-29,28	-27,37	-24,08	-22,02	-38,50	-34,92	-30,00	-28,58	-3,65	-2,53	-1,67	-3,16
7,65 cm	-8,45	-6,75	-5,41	-6,94	-11,54	-8,48	-6,35	-9,57	10,64	11,68	11,32	7,44
9,56 cm	12,24	13,33	12,64	7,98	15,37	17,31	16,49	9,28	24,42	25,07	23,45	17,68
11,47 cm	33,75	34,25	31,51	23,43	44,16	45,13	41,30	29,39	38,50	38,73	35,84	28,10
13,38 cm	57,09	57,33	52,52	40,11	76,19	76,81	69,98	51,64	53,82	53,83	49,64	39,35
15,30 cm	83,53	84,22	77,39	58,87	113,19	114,70	104,98	77,23	71,45	71,72	66,26	52,16
Mês	OUTUBRO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
1,91 cm	-84,32	-84,00	-76,55	-61,57	-106,16	-105,59	-95,71	-76,31	-39,15	-39,27	-36,09	-29,20
3,82 cm	-57,20	-55,55	-49,79	-42,07	-69,99	-66,98	-59,18	-50,76	-19,72	-18,92	-16,83	-15,00
5,74 cm	-33,19	-31,02	-27,26	-24,80	-39,62	-35,80	-30,65	-29,36	-2,81	-1,57	-0,72	-2,57
7,65 cm	-10,45	-8,53	-6,94	-8,46	-11,58	-8,30	-6,10	-9,68	12,58	13,74	13,27	8,79
9,56 cm	12,11	13,35	12,69	7,68	16,37	18,46	17,57	9,81	27,38	28,10	26,26	19,72
11,47 cm	35,62	36,22	33,28	24,46	46,30	47,36	43,32	30,64	42,45	42,72	39,48	30,82
13,38 cm	61,13	61,44	56,20	42,56	79,66	80,36	73,16	53,72	58,84	58,85	54,20	42,79
15,30 cm	90,03	90,84	83,37	62,94	118,26	119,92	109,70	80,32	77,73	78,03	72,00	56,45
Mês	NOVEMBRO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
1,91 cm	-115,40	-114,75	-103,98	-82,58	-153,41	-152,27	-137,04	-107,62	-41,09	-41,26	-37,84	-30,31
3,82 cm	-80,83	-78,41	-69,93	-58,16	-104,16	-98,84	-86,35	-73,52	-18,17	-17,22	-15,13	-13,75
5,74 cm	-49,98	-46,94	-41,19	-36,45	-63,88	-57,38	-48,67	-45,93	1,76	3,24	3,85	0,71
7,65 cm	-20,58	-17,90	-15,11	-15,81	-26,85	-21,37	-16,95	-20,77	19,75	21,15	20,18	13,82
9,56 cm	8,65	10,44	10,15	4,60	10,59	14,16	14,06	4,48	36,80	37,70	35,10	26,26
11,47 cm	39,13	40,10	36,71	25,87	51,10	53,16	48,50	31,75	53,95	54,29	50,05	38,76
13,38 cm	72,10	72,70	66,22	48,77	96,98	98,69	89,52	62,57	72,51	72,51	66,62	52,18
15,30 cm	109,37	110,70	101,22	74,56	150,49	154,03	140,62	98,56	93,99	94,30	86,79	67,56
Mês	DEZEMBRO											
Período	06h - 13h				13h - 20h				20h - 06h			
Posição	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm	0 cm	9,8 cm	19,6 cm	29,4 cm
1,91 cm	-124,05	-123,31	-111,59	-88,29	-157,12	-156,03	-140,39	-109,99	-43,07	-43,26	-39,64	-31,66
3,82 cm	-87,08	-84,39	-75,12	-62,31	-105,89	-100,30	-87,48	-74,61	-18,68	-17,65	-15,45	-14,11
5,74 cm	-54,17	-50,79	-44,48	-39,28	-64,16	-57,29	-48,38	-46,13	2,49	4,11	4,72	1,92
7,65 cm	-22,81	-19,84	-16,74	-17,43	-25,98	-20,15	-15,68	-20,29	21,56	23,09	22,00	15,02
9,56 cm	8,43	10,42	10,19	4,24	12,42	16,25	16,03	5,49	39,59	40,58	37,75	28,11
11,47 cm	40,99	42,09	38,50	26,81	54,11	56,36	51,42	33,47	57,70	58,08	53,49	41,24
13,38 cm	76,22	76,95	70,02	51,14	101,32	103,22	93,62	65,08	77,27	77,29	70,94	55,34
15,30 cm	116,11	117,66	107,50	78,59	156,54	160,43	146,47	102,13	99,97	100,32	92,24	71,52

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## APÊNDICE I – Dano médio acumulado no revestimento

### APÊNDICE I.1 Dano médio acumulado na camada asfáltica durante o período de projeto considerando sazonalidade de temperatura e distribuição horária de tráfego

Apêndice I.1.1 – Dano médio acumulado no segmento 05.

Ano	Mês											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
2014	0,00	0,00	1,13	1,73	2,01	2,12	2,23	2,42	2,78	3,25	4,14	5,56
2015	7,32	9,24	10,24	10,78	11,03	11,13	11,22	11,39	11,72	12,14	12,93	14,19
2016	15,83	17,68	18,61	19,11	19,34	19,43	19,52	19,68	19,98	20,37	21,10	22,28
2017	24,08	26,05	27,08	27,63	27,88	27,99	28,08	28,26	28,59	29,02	29,83	31,12
2018	32,96	34,97	36,02	36,58	36,84	36,94	37,04	37,22	37,56	37,99	38,82	40,14
2019	42,02	44,06	45,13	45,70	45,97	46,07	46,18	46,36	46,70	47,15	47,99	49,34
2020	51,25	53,41	54,51	55,09	55,36	55,47	55,57	55,76	56,11	56,56	57,43	58,80
2021	60,75	62,88	63,99	64,59	64,86	64,97	65,08	65,27	65,63	66,09	66,97	68,37
2022	70,36	72,53	73,67	74,27	74,55	74,67	74,78	74,97	75,33	75,81	76,70	78,13
2023	80,16	82,38	83,53	84,15	84,44	84,55	84,66	84,86	85,23	85,72	86,63	88,08

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

Apêndice I.1.2 – Dano médio acumulado no segmento 03.

Ano	Mês											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
2014	0,00	0,00	0,10	0,16	0,18	0,19	0,20	0,21	0,24	0,28	0,38	0,51
2015	0,66	0,84	0,93	0,98	1,00	1,00	1,01	1,02	1,05	1,09	1,17	1,29
2016	1,43	1,60	1,69	1,73	1,75	1,76	1,76	1,77	1,80	1,83	1,91	2,02
2017	2,18	2,36	2,45	2,50	2,52	2,53	2,54	2,55	2,58	2,61	2,70	2,82
2018	2,98	3,16	3,26	3,31	3,33	3,34	3,35	3,36	3,39	3,42	3,52	3,63
2019	3,80	3,99	4,09	4,14	4,16	4,17	4,17	4,19	4,21	4,25	4,35	4,47
2020	4,64	4,83	4,93	4,99	5,01	5,02	5,02	5,04	5,06	5,10	5,20	5,32
2021	5,50	5,69	5,79	5,85	5,87	5,88	5,88	5,90	5,93	5,97	6,06	6,19
2022	6,37	6,56	6,67	6,72	6,74	6,75	6,76	6,77	6,80	6,84	6,95	7,07
2023	7,25	7,45	7,56	7,62	7,64	7,65	7,65	7,67	7,70	7,74	7,84	7,97

Fonte: Elaborada pela autora (2019).

## Apêndice I.1.3 – Dano médio acumulado no segmento 04.

Ano	Mês											
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
2014	0,00	0,00	1,50	2,31	2,69	2,84	3,00	3,26	3,75	4,39	5,89	7,76
2015	10,07	12,57	13,90	14,63	14,96	15,10	15,24	15,47	15,91	16,47	17,81	19,48
2016	21,62	24,03	25,27	25,94	26,25	26,38	26,51	26,73	27,13	27,66	28,90	30,45
2017	32,82	35,38	36,75	37,49	37,83	37,97	38,12	38,35	38,80	39,38	40,75	42,46
2018	44,87	47,48	48,88	49,63	49,98	50,13	50,27	50,51	50,97	51,56	52,96	54,70
2019	57,16	59,82	61,24	62,02	62,37	62,52	62,67	62,92	63,39	63,99	65,41	67,19
2020	69,70	72,51	73,96	74,75	75,11	75,27	75,42	75,67	76,15	76,76	78,22	80,03
2021	82,59	85,36	86,83	87,64	88,01	88,17	88,32	88,57	89,06	89,69	91,17	93,02
2022	95,63	98,46	99,96	100,78	101,16	101,32	101,48	101,74	102,24	102,87	104,39	106,27
2023	108,93	111,81	113,35	114,19	114,57	114,74	114,89	115,16	115,67	116,32	117,86	119,78

Fonte: Elaborada pela autora (2019).