



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS DE FLORIANÓPOLIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Francieli Schoenhals Delavy

**Desempenho de revestimento em terceira faixa executados com ligante HiMA e
SBS: estudo de caso de segmentos monitorados na SC-114.**

FLORIANÓPOLIS

2021

Francieli Schoenhals Delavy

**Desempenho de revestimento em terceira faixa executados com ligante HiMA e
SBS: estudo de caso de segmentos monitorados na SC-114.**

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

Florianópolis

2021

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

Delavy, Francieli Schoenhals

Desempenho de revestimento em terceira faixa executados
com ligante HiMA e SBS : estudo de caso de segmentos
monitorados na SC-114 / Francieli Schoenhals Delavy ;
orientador, Glicério Trichês, 2021.

163 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Florianópolis, 2021.

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.

Francieli Schoenhals Delavy

Desempenho de revestimento em terceira faixa executados com ligante HiMA e SBS: estudo de caso de segmentos monitorados na SC-114.

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

Prof.(a) Luciano Pivoto Specht, Dr.(a)
Universidade Federal de Santa Maria

Prof.(a) Liseane Padilha Thives, Dr.(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Luciana Rohde, Dr.(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

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. Philippe Jean Paul Gleize, Dr.
Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Glicério Trichês, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2021.

Este trabalho é dedicado aos meus amados pais Marinês e Geraldo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, pelas oportunidades que me foram concedidas, por me mostrar que com paciência é possível conquistar todos os nossos objetivos.

Aos meus pais, Marinês Schoenhals Gabriel e Geraldo Gabriel, que desde sempre me incentivaram a estudar, que se privaram de muitas coisas para que eu pudesse conquistar meu sonho, que me ouviram chorar pela distância milhares de vezes e sempre souberam quais palavras de conforto usar, muito obrigada, eu amo vocês!

Ao André, meu companheiro de vida, meu parceiro, que não mediu esforços para me ajudar e ver o fim dos meus ensaios de campo, que me ajudou a evoluir como pessoa e como profissional.

Ao meu orientador, Prof. Glicério Trichês, pela oportunidade e confiança, por todo conhecimento compartilhado. Meu eterno reconhecimento e admiração.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Liseane, João Victor e Gracieli. Em especial, agradeço a professora Luciana, por me ajudar a conseguir a autorização para utilizar os equipamentos da universidade para finalizar a pesquisa.

Agradeço aos meus colegas do mestrado, pela parceria e pela colaboração no decorrer desse trabalho. Em especial à Renata, que me acolheu quando cheguei em Floripa, que me apresentou toda universidade, e a Tamile que dividiu comigo os melhores momentos dessa jornada.

À Rede de Tecnologia em Asfalto/PETROBRAS, pelos investimentos realizados no Laboratório de Pavimentação da UFSC.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudos durante o período de mestrado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

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

Muito obrigada!

RESUMO

Grande parte das rodovias brasileiras estão em condições péssimas e ruins de conservação, o trincamento por fadiga e a deformação permanente são os principais defeitos encontrados no pavimento. A necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias é imprescindível para recuperação e maior desempenho das rodovias. Dentre as mais variadas causas, a formação e propagação de trincas no revestimento asfáltico pode ocorrer em consequência das repetidas solicitações do tráfego, que, com o tempo, reduzem a vida de serviço do pavimento. Com isso, surge no mercado ligantes modificados de alto desempenho como o ligante altamente modificado por polímero, o *Highly Modified Asphalt* – HiMA. Esta pesquisa teve por objetivo analisar comparativamente a evolução da condição funcional e estrutural dos revestimentos com os dois tipos de ligantes, HiMA e SBS, comparar o desempenho em laboratório e em campo quanto à deformação permanente e analisar a influência da temperatura, na previsão da vida útil do revestimento, de um trecho da rodovia SC-114, na cidade de São Joaquim, no estado de Santa Catarina, Brasil. Em 2020 foi também realizada uma contagem quantitativa e classificatória dos veículos com intuito de se atualizar o número de solicitações equivalentes ao eixo padrão de 8,2 tf que solicitam a rodovia no período de projeto (pela metodologia AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials* e USACE – *United State Army Corps of Engineers*). Foram realizados levantamentos principalmente quanto a deformação permanente e análises de sua evolução temporal desde abertura ao tráfego. A partir de análises de desempenho do pavimento os resultados apontam que a rodovia encontra-se até o momento com 0% de área trincada, e o afundamento médio por trilha de roda está entre 2 e 3mm, fazendo-se entender a qualidade dos materiais empregados, principalmente quanto ao ligante. O efeito da inclusão da variação de temperatura no desempenho do pavimento apresentou uma estimativa de vida útil com aumento média de 15% em ambas misturas. A mistura com ligante HiMA apresenta melhores resultados quanto a vida de fadiga, porém a mistura com ligante SBS apresenta valores menores em relação à deformação permanente.

Palavras-chave: Pavimentação. Ligantes. Deformação Permanente. Segmentos Monitorados. Desempenho.

ABSTRACT

Most of the Brazilian highways are in poor condition, the fatigue cracking and permanent deformation are the main defects found in the pavement. The need to develop new technologies is essential for the recovery and greater performance of the highways. Among the most varied causes, the formation and propagation of cracks in the asphalt lining can occur as a result of the repeated causes of traffic, which, over time, lead to a service life of the pavement. As a result, there is no market for modified high-performance binders such as the polymer-modified binder, the Highly Modified Asphalt - HiMA. This research aimed to analyze comparatively the evolution of the functional and structural condition of the coatings with the two types of binders, HiMA and SBS, to compare the performance in the laboratory and in the field regarding permanent deformation and to analyze the influence of temperature, in the prediction of life useful coating, of a stretch of highway SC-114, in the city of São Joaquim, in the state of Santa Catarina, Brazil. In 2020, a quantitative and classificatory count of vehicles was also carried out in order to update the number of requests equivalent to the standard axis of 8.2 tf that request the highway in the project period (using the AASHTO - American Association of State Highway and Transportation methodology Officials and USACE - United State Army Corps of Engineers). Surveys were carried out mainly regarding permanent deformation and analyzes of its temporal evolution since opening to traffic. Based on the performance analysis of the pavement, the results show that the road is currently with 0% cracked area, and the average sinking per wheel track is between 2 and 3mm, making it possible to understand the quality of the materials used, mainly regarding the ligand. The effect of including temperature variation on pavement performance showed an estimated useful life with an average increase of 15% in both mixtures. The mixture with HiMA ligand shows better results in terms of fatigue life, however the mixture with SBS ligand shows lower values in relation to permanent deformation.

Keywords: Paving. Binders. Permanent Deformation. Monitored Segments. Performance

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Defasagem entre tensão e deformação.....	23
Figura 2 – Representação do módulo complexo.....	24
Figura 3 – Plano Cole-Cole de uma mistura asfáltica.	25
Figura 4 – Espaço de Black de uma mistura asfáltica.....	25
Figura 5 – Modelo reológico de Huet-Sayegh.	26
Figura 6 – Determinação do módulo infinito no espaço Black.	27
Figura 7 – Modelo de Huet-Sayegh no plano Cole-Cole.	27
Figura 8 – Exemplo de deformação permanente estrutural em pavimentos (a) e deformação permanente não estrutural da camada asfáltica (b).	29
Figura 9 – Deformação devido à aplicação de carga dinâmica.	30
Figura 10 – Simulador de tráfego LCPC para ensaios de deformação permanente em laboratório.	34
Figura 11 – Trincamento por fadiga no estágio inicial (a), estágio intermediário (b) e estágio final (c).	36
Figura 12 – Tensões induzidas pelo tráfego (a) sentido transversal ao carregamento; (b) sentido longitudinal ao carregamento.	37
Figura 13 – Efeito do aumento dos teores de polímero SBS na morfologia do polímero/asfalto.....	40
Figura 14 – Curvas de fadiga com ligantes Orbiton 25/55-80 HiMA e Orbiton 45/80-80 HiMA.	41
Figura 15 – Curvas de resistência à fadiga para as misturas dosadas na metodologia SUPERPAVE.....	42
Figura 16 – Curvas de Wöhler para as misturas dosadas na metodologia Marshall.	42
Figura 17 – Curvas de fadiga obtidas com equipamentos de tração indireta e velocidade controlada, (a) pedreira Jambeiro (b) pedreira Pombal.	43
Figura 18 – Curvas de fadiga obtidas com equipamentos de flexão alternada, (a) pedreira Jambeiro (b) pedreira Pombal.	45
Figura 19 – Relação entre desempenho à fadiga e temperatura do revestimento asfáltico para os meses do ano, modelos propostos por Rossato (2015).	48
Figura 20 – Relação entre desempenho à fadiga e temperatura do revestimento asfáltico para os meses do ano, modelos propostos por Franco (2007).....	48

Figura 21 – Dano médio em função do tráfego com variação de temperatura.	50
Figura 22 – Dano acumulado com a sazonalidade de temperatura no período de projeto.....	51
Figura 23 – Dano acumulado no período de projeto com temperatura de 20°C.	51
Figura 24 – Treliça metálica para medida dos afundamentos de trilha de roda.	58
Figura 25 – Fases da vida de um pavimento.	60
Figura 26 – Fluxograma das etapas desta pesquisa.	64
Figura 27 – Levantamento em 2019: (a) e (b) afundamento de trilha de roda e (c) e (d) inventário de defeitos.	66
Figura 28 – Contagem de tráfego realizada em 2020.	67
Figura 29 – Levantamentos em 2020: (a) mancha de areia (b) afundamento de trilha de roda e (c) inventário de defeitos.	70
Figura 30 – Configuração do carregamento (semieixo de roda dupla).	73
Figura 31 – Média horária de temperatura do ar nos meses de janeiro (2008-2019).	75
Figura 32 – Esquema de revestimento asfáltico dividido em subcamadas com as profundidades de cálculo de temperatura.	76
Figura 33 – Mapa de localização da área de estudo.	83
Figura 34 – Desenho esquemático dos segmentos experimentais.....	85
Figura 35 – Perfil das estruturas dos segmentos monitorados.	87
Figura 36 – Intervalo entre as faixas C DNIT e a proposta para SAMI.	92
Figura 37 – Curva granulométrica da mistura com a faixa VI	92
Figura 38 – Comparação das duas curvas de fadiga das duas misturas.	94
Figura 39 – Deformação permanente das misturas asfálticas.....	95
Figura 40 – Afundamento de trilha de roda na terceira faixa do Segmento HiMA.	97
Figura 41 – Afundamento de trilha de roda na terceira faixa do Segmento SBS.	97
Figura 42 – Representatividade de ATR terceira faixa.....	98
Figura 43 – Volume médio de veículos referente aos horários de contagem do tráfego em 2020 para os dois sentidos de rolamento.	100
Figura 44 – Perfil do tráfego nos segmentos monitorados a partir da contagem de 2020.	100
Figura 45 – Evolução do número $N_{8,2tf}$ (USACE) para 10 anos de projeto.	106
Figura 46 – Afundamento de trilha de roda na terceira faixa do Segmento HiMA. ..	107
Figura 47 – Afundamento de trilha de roda na terceira faixa do Segmento SBS.	108

Figura 48 – Representatividade de ATR terceira faixa.....	109
Figura 49 – Inventário de defeitos.	110
Figura 50 – Evolução do afundamento médio de trilha de roda externa (TER) em função do tempo (meses).....	111
Figura 51 – Evolução de ATR médio em função do tráfego.....	112
Figura 52 – Ponto de máxima inflexão de deformação em diferentes temperaturas.	115
Figura 53 – Média horária de temperatura do ar em cada mês (2008 a 2019).....	116
Figura 54 – Gradiente de temperatura ao longo do dia no revestimento, nos meses de fevereiro e julho do segmento HiMA.	122
Figura 55 – Gradiente de temperatura ao longo do dia no revestimento, nos meses de fevereiro e julho do segmento SBS.	122
Figura 56 – Deformação específica de tração no período das 09h – 16h.	127
Figura 57 – Deformação específica de tração no período das 17h – 00h.	128
Figura 58 – Deformação específica de tração no período das 01h – 08h.	128
Figura 59 – Variação do N_f admissível ao longo do ano no segmento SBS.	129
Figura 60 – Variação do N_f admissível ao longo do ano no segmento HiMA.....	130
Figura 61 – Dano acumulado com variação de temperatura no período de projeto.	131
Figura 62 – Dano acumulado com variação de temperatura nos 12 meses iniciais.	132
Figura 63 – Dano acumulado com temperatura de 20°C.	133
Figura 64 – Estimativa de vida útil a partir do dano acumulado.	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros que influenciam a resistência à deformação permanente.	32
Tabela 2 – Taxas de crescimento anuais de tráfego.	68
Tabela 3 – Fatores de correção utilizados.	68
Tabela 4 – Parâmetros viscoelásticos de Huet-Sayegh.	71
Tabela 5 – Parâmetros das camadas remanescentes.	72
Tabela 6 – Informações da estação meteorológica de São Joaquim.	74
Tabela 7 – Espessura das subcamadas dos segmentos monitorados.	76
Tabela 8 – Modelos de fadiga das misturas dos segmentos de São Joaquim.	77
Tabela 9 – Tráfego anual de projeto e tráfego considerado por dia.	78
Tabela 10 – Localização dos segmentos experimentais.	84
Tabela 11 – Temperaturas médias ao longo do ano (1961-2016).	86
Tabela 12 – Número N previsto para os dez anos de projeto.	88
Tabela 13 – Resultados do ligante CAP 60/85-E.	89
Tabela 14 – Temperatura de usinagem e compactação do CAP 60/85-E (Recomendado pela fornecedora).	89
Tabela 15 – Resultados do ligante CAP HiMA.	90
Tabela 16 – Temperatura de usinagem e compactação do CAP HiMA (Recomendado pela fornecedora).	91
Tabela 17 – Módulos resilientes das misturas empregadas.	93
Tabela 18 – Resumo das deflexões características ($x10^{-2}$ mm), na faixa da esquerda e terceira faixa.	96
Tabela 19 – Média e desvio padrão de ATR (mm) em 2019.	98
Tabela 20 – Resumo do VMDA (ambos sentidos) para os segmentos monitorados em 2020.	101
Tabela 21 – Relação de veículos identificados com eixos suspensos em ambos sentidos.	102
Tabela 22 – Crescimento do tráfego no ano de 2020 em relação a contagem de 2011.	103
Tabela 23 – Cargas por eixo para veículos vazios (tf).	104
Tabela 24 – Cargas máximas legais (CML).	104
Tabela 25 – Número $N_{8,2tf}$ acumulado obtido pela metodologia USACE para as diferentes hipóteses de carregamento.	106

Tabela 26 – Média e desvio padrão de ATR (mm) em 2020.....	108
Tabela 27 – Valores médios e desvio padrão da macrotextura.....	110
Tabela 28 – Evolução de ATR (mm) médio.....	112
Tabela 29 – Estrutura do pavimento utilizada no <i>software</i>	114
Tabela 30 – Deformação específica de tração ($\times 10^{-6}$).....	114
Tabela 31 – Temperatura média do ar e velocidade média do vento nos três períodos do dia para cada mês.....	117
Tabela 32 – Média da amplitude de variação de temperatura e radiação solar durante o dia em cada mês.....	118
Tabela 33 – Propriedades físicas das misturas asfálticas encontradas na literatura.....	119
Tabela 34 – Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) nas camadas do segmento HiMA.....	120
Tabela 35 – Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) das camadas do segmento SBS.....	121
Tabela 36 – Deformação específica de tração no segmento SBS com sazonalidade.....	124
Tabela 37 – Deformação específica de tração no segmento HiMA com sazonalidade de temperatura ($\times 10^{-6}$).....	124
Tabela 38 – Deformação específica de tração no segmento SBS com sazonalidade.....	125
Tabela 39 – Deformação específica de tração no segmento HiMA com sazonalidade de temperatura ($\times 10^{-6}$).....	126
Tabela 40 – Deformação específica de tração com temperatura constante.....	127

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMP – Asfalto modificado por polímero
ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres
ASTM – *American Society for Testing and Materials*
ATR – Afundamento na Trilha de Roda
CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo
CNT – Confederação Nacional do Transporte
Cp – Corpo de prova
DEINFRA – Departamento Estadual de Infraestrutura
DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FWD – *Falling Weight Deflectometer*
HiMA – *Highly Modified Asphalt*
HS – Altura média de mancha de areia
IDOT – Illinois Department of Transportation
IFI – *International Friction Index*
IGG – Índice de Gravidade Global
IRI – *International Roughness Index*
LCPC – *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*
Máx. – Máximo
ME – Método de ensaio
Mín. – Mínimo
mm – Milímetro
MPa – Megapascal
MR – Módulo resiliente
NBR – Norma Brasileira Regulamentadora
NCAT – *Nacional Center for Asphalt Technology*
SBS – *Styrene butadiene styrene*
SIE – Secretaria de Estado da Infraestrutura e Mobilidade
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
USACE – *United States Army Corps of Engineers*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS.....	20
1.1.1	Objetivo Geral	20
1.1.2	Objetivos Específicos	20
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	21
2	REVISÃO DE LITERATURA	22
2.1	COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS	22
2.1.1	Comportamento reológico	22
2.1.2	Deformação permanente nas misturas asfálticas	28
2.1.2.1	Fatores que afetam a deformação permanente	30
2.1.2.2	Ensaio para avaliação da deformação permanente	33
2.1.2.2.1	<i>Ensaio com simuladores de tráfego em laboratório</i>	33
2.1.3	Fadiga em revestimentos asfálticos	35
2.2	LIGANTES MODIFICADOS.....	38
2.2.1	Ligantes altamente modificado por polímero - HiMA	39
2.3	TEMPERATURA NO REVESTIMENTO	46
2.3.1	Influência da temperatura no desempenho à fadiga	46
2.3.2	Modelos de previsão de temperatura em revestimentos	52
2.4	AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS.....	57
2.4.1	Avaliação funcional	57
2.4.1.1	Afundamento de trilha de roda	57
2.4.2	Avaliação Estrutural	59
2.4.3	Parâmetros de análise na avaliação estrutural	61
2.5	RESUMO DA REVISÃO DE LITERATURA	62
3	MÉTODO DA PESQUISA	64
3.1	ETAPA 1 – INFORMAÇÕES DOS SEGMENTOS MONITORADOS	65

3.2	ETAPA 2 – CONDIÇÕES DO PAVIMENTO NO ANO ZERO.....	65
3.3	ETAPA 3 – AVALIAÇÃO EM 2019	65
3.4	ETAPA 4 – ATUALIZAÇÃO DO TRÁFEGO.....	66
3.5	ETAPA 5 – AVALIAÇÃO EM 2020	69
3.6	ETAPA 6 – AVALIAÇÃO TEMPORAL DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE	70
3.7	ETAPA 7 – ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL CONSIDERANDO A TEMPERATURA DE 20° E A TEMPERATURA DA REGIÃO.....	71
3.7.1	Variação da temperatura do ar durante o dia	74
3.7.2	Cálculo da temperatura do revestimento	75
3.7.3	Influência da temperatura na deformação de tração no revestimento... 76	
3.7.4	Variação da estimativa de vida útil ao longo do ano em função da variação da temperatura.....	77
3.7.5	Estimativa do dano acumulado no período de projeto.....	78
3.7.6	Estimativa de vida útil para o dano acumulado igual a 1.....	79
3.8	ETAPA 8 – FATOR CAMPO/LABORATÓRIO.....	80
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	82
4.1	ETAPA 1 – INFORMAÇÕES DOS SEGMENTOS MONITORADOS	82
4.1.1	Localização e identificação dos segmentos monitorados.....	82
4.1.2	Informações Gerais.....	83
4.1.3	Características da região	85
4.1.3.1	Topografia.....	85
4.1.3.2	Temperatura do ar.....	86
4.2	ETAPA 2 – CONDIÇÕES DO PAVIMENTO NO ANO ZERO.....	86
4.2.1	Projeto de restauração.....	86
4.2.1.1	Tráfego Previsto em projeto.....	88
4.2.2	Caracterização dos ligantes	88
4.2.3	Projeto das misturas asfálticas	91
4.2.3.1	Mistura asfáltica tipo SAMI.....	91

4.2.3.2	Misturas asfálticas para camada de rolamento	92
4.2.4	Caracterização das misturas asfálticas	93
4.2.4.1	Módulos resilientes obtidos em laboratório	93
4.2.4.2	Determinação da resistência à fadiga das misturas asfálticas	94
4.2.4.3	Determinação da resistência à deformação permanente	94
4.2.5	Controle tecnológico da execução	95
4.2.5.1	Controle deflectométrico.....	95
4.2.5.2	Macrotextura superficial	96
4.3	ETAPA 3 – AVALIAÇÃO EM 2019	96
4.3.1	Afundamento de trilha de roda	97
4.3.2	Inventário de defeitos.....	99
4.4	ETAPA 4 – ATUALIZAÇÃO DO TRÁFEGO.....	99
4.4.1	Contagem de tráfego realizada em 2020	99
4.4.2	Comparativo da contagem de tráfego realizada em 2011 e 2020.....	102
4.4.3	Hipóteses de carregamento	103
4.4.4	Estimativa do número N	105
4.5	ETAPA 5 – AVALIAÇÃO EM 2020	107
4.5.1	Afundamento de trilha de roda.....	107
4.5.2	Inventário de defeitos superficiais	109
4.5.3	Macrotextura.....	110
4.6	ETAPA 6 – AVALIAÇÃO TEMPORAL DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE 111	
4.7	ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO REVESTIMENTO E TEMPERATURA CONSTANTE	113
4.8	ETAPA 7 – ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL CONSIDERANDO A TEMPERATURA DA REGIÃO.....	116
4.8.1	Variação da temperatura do ar durante o dia	116
4.8.2	Cálculo da temperatura do revestimento	117

4.8.3	Influência da temperatura na deformação de tração no revestimento.	123
4.8.4	Variação da estimativa de vida útil ao longo do ano em função da variação da temperatura.....	129
4.8.5	Estimativa do dano acumulado no período de projeto.....	130
4.8.6	Estimativa de vida útil para o dano acumulado igual a 1.....	133
4.9	ETAPA 8 – FATOR CAMPO/LABORATÓRIO.....	135
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	136
5.1	CONCLUSÕES.....	136
5.2	SUGESTÕES.....	139
	REFERÊNCIAS	140
	APÊNDICE A – Dados do levantamento de 2019	148
	APÊNDICE B – Dados do levantamento de 2020	150
	APÊNDICE C – Dados da contagem de tráfego	154
	APÊNDICE D – Temperatura média do ar e desvio padrão	155
	APÊNDICE E – N_f calculado para cada segmento monitorado	157
	APÊNDICE F – Dano acumulado	159
	APÊNDICE G – Estimativa de vida útil em cada combinação	161

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2020), o bom desempenho das atividades econômicas e sociais depende do adequado dimensionamento e do estado de conservação das infraestruturas de transporte.

Existe no Brasil um total de 213.453 km de rodovias pavimentadas e 1.507.248 km de rodovias não pavimentadas, que corresponde a 12,4% da extensão total. Dos 12,4% de km de rodovias pavimentadas aproximadamente 50% estão em condições péssimas e ruins, levando à necessidade de muitos recursos para recuperação da malha viária. Essa distribuição tem impactos na segurança, conforto dos usuários, desgaste dos veículos, velocidade e tempo de viagem (CNT, 2020).

Os dois principais grupos de defeitos observados nas rodovias brasileiras que levam à esta condição péssima ruim são os trincamentos e as deformações plásticas que, quando alcançam elevados níveis de severidade, requerem recursos vultuosos para a sua recuperação.

O aumento considerável de tráfego de caminhões nas rodovias brasileiras, somado as altas temperaturas no verão, influenciam diretamente no aparecimento precoce dos defeitos de deformação permanente e no trincamento por fadiga do revestimento asfáltico, bem como na maior utilização de ligantes modificados por polímeros.

As condições de restrições orçamentárias têm obrigado os órgãos gestores de malha viária a buscarem alternativas de recuperação das rodovias que resultem em menor investimento, tempo de execução e, principalmente, maior desempenho e segurança para o usuário.

A indústria de produtos asfálticos tem disponibilizado ligantes asfálticos modificados que prometem um alto desempenho quantos aos principais defeitos dos pavimentos flexíveis, que são o trincamento por fadiga e a deformação permanente. Um dos ligantes que tem essas características é o ligante altamente modificado por polímero *Highly Modified Asphalt* – HiMA (BLAZEJOWSKI *et al.*, 2015).

A utilização do ligante HiMA é pouco difundida no Brasil, por ser considerado de alto custo de aquisição e pela falta de conhecimento em relação a sua real

capacidade de desempenho, Desta forma, para que a aplicação destes novos produtos seja feita de forma científica e econômica, é necessário a realização de ensaios de laboratório que possibilitem avaliar o desempenho destes produtos e selecionar a melhor mistura dos componentes que irão formar o Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ). Na sequência, é necessário a execução de segmentos experimentais que devem ser monitorados de forma sistemática para que possam gerar banco de dados que subsidiem a obtenção das funções transferência campo e laboratório para desenvolvimento e calibração de métodos de dimensionamento de restauração de pavimentos.

Segundo Silva (2018) o trecho na Rodovia SC-114, localizada entre os municípios de Paineira e São Joaquim, é o primeiro do Estado de Santa Catarina a utilizar a tecnologia de ligante altamente modificado por polímero, HiMA, no qual toda a extensão da rodovia (52 km) foram executados com o ligante.

Na rodovia em estudo, foi executado um trecho com ligante HiMA e um trecho com ligante SBS 60/85-E, com o objetivo de comparar o desempenho das duas misturas asfálticas, principalmente com relação à deformação permanente do pavimento. Também foi avaliado neste trecho a influência da temperatura no revestimento asfáltico quando a sua vida útil.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Essa pesquisa tem o objetivo de avaliar o desempenho funcional e estrutural de revestimentos executados com ligantes HiMA e SBS aplicados na restauração da Rodovia SC-114, em trecho de forte afluência.

1.1.2 Objetivos Específicos

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

- Analisar comparativamente a evolução das condições funcional e estrutural dos revestimentos com os dois tipos de ligantes;

- Avaliar comparativamente o desempenho em laboratório e em campo quanto à deformação permanente;
- Analisar a influência da temperatura na região em estudo na previsão da vida útil.
- Buscar a primeira aproximação da função transferência campo laboratório para este tipo de aplicação do ligante HiMA.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A organização da presente dissertação é a seguinte:

- Capítulo 1 – INTRODUÇÃO, onde são abordados o tema e objetivos da pesquisa, geral e específico.
- Capítulo 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA, aborda os aspectos da literatura referentes ao tema de pesquisa. Para análise dos resultados obtidos a bibliografia consultada serve como embasamento da mesma.
- Capítulo 3 – MÉTODO DA PESQUISA, onde é definido e descrito o método utilizado para atingir os objetivos que foram propostos no trabalho.
- Capítulo 4 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS, onde descrevem-se os resultados obtidos por esta pesquisa com o desempenho do segmento monitorado.
- Capítulo 5 – CONCLUSÕES, onde apresenta as conclusões da pesquisa e aborda sugestões para pesquisas futuras de modo a dar continuidade no tema de estudo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

2.1.1 Comportamento reológico

A reologia, de um modo geral, pode ser definida como uma ciência que estuda a deformabilidade dos materiais quando estes forem submetidos a um carregamento qualquer, considerando o tempo e a intensidade de aplicação da carga. O objetivo do estudo do comportamento reológico de materiais betuminosos é encontrar a relação entre deformação, tensão, tempo de aplicação de carga e temperatura (PINTO, 1991).

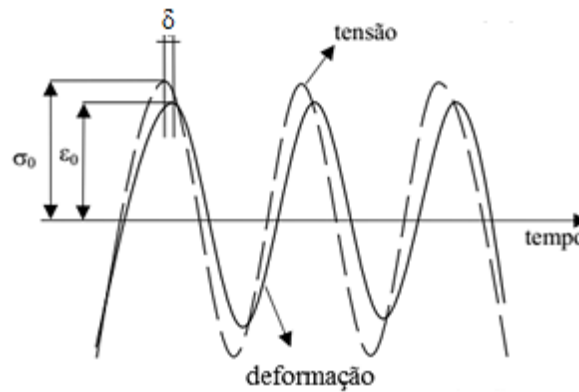
O ligante asfáltico apresenta características viscosas e elásticas, suas principais características são a susceptibilidade térmica e a velocidade do carregamento. Quando está submetido a altas temperaturas tem comportamento viscoso e em baixas temperaturas se comporta como um sólido quase elástico. Porém, em campo as misturas asfálticas estão submetidas a temperaturas intermediárias o que leva ao comportamento viscoelástico do material (SHRP, 1994 *apud* FONTES, 2009).

O tempo de carregamento também influencia no comportamento da mistura asfáltica. De acordo com Momm (1998), se a carga é aplicada rapidamente, o comportamento do concreto asfáltico é quase elástico e em condições de carregamento lento, o comportamento é viscoso. Entre os dois extremos, o comportamento é viscoelástico.

O módulo complexo é uma propriedade de rigidez que consente contabilizar os efeitos causados pela temperatura e pela frequência da carga aplicada, assim como considerar o comportamento viscoelástico do material por meio da análise de suas componentes elásticas e viscosas (MARCON, 2016).

O módulo complexo (E^*) é definido como a razão entre a amplitude de uma tensão sinusoidal a uma pulsação aplicada a um material e amplitude de uma deformação sinusoidal de resposta ao carregamento. Devido às características viscoelásticas do material, quando uma tensão é aplicada, a deformação em resposta ao carregamento é defasada, originando um ângulo de fase ou defasagem entre os dois sinais, como mostra a Figura 1 (FONTES, 2009).

Figura 1 – Defasagem entre tensão e deformação.



Fonte: Adaptado de Fontes (2009).

A tensão aplicada, a deformação resultante e o módulo complexo podem ser expressos através da matemática complexa pelas Equações 1, 2 e 3, respectivamente.

$$\sigma^* = \sigma_0 e^{i\omega t} \quad (1)$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 e^{i(\omega t - \delta)} \quad (2)$$

$$\frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = E^*(i\omega) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} e^{i\delta} = |E^*| e^{i\delta} \quad (3)$$

Onde:

σ^* e ε^* - valores complexos da tensão e da deformação, no tempo t ;

σ e ε - valores das amplitudes de tensão e deformação, no tempo t ;

ω - velocidade angular ($2\pi f$, sendo f a frequência da solitação);

i - número complexo ($i = \sqrt{-1}$);

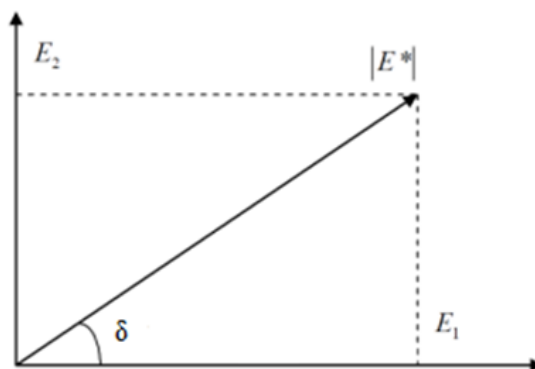
δ - ângulo de fase;

E^* - módulo complexo ou de rigidez.

A parcela real do módulo complexo é denominada módulo de armazenamento ou módulo elástico (E_1), enquanto que a parcela imaginária é chamada de módulo de

perda ou módulo viscoso (E_2), conforme apresenta a Figura 2. O módulo complexo pode ser expresso na Equação 4 (OTTO, 2009; MARCON, 2016).

Figura 2 – Representação do módulo complexo.



Fonte: Adaptado de Almeida (2013).

$$E^*(i\omega) = E_1 + iE_2 \quad (4)$$

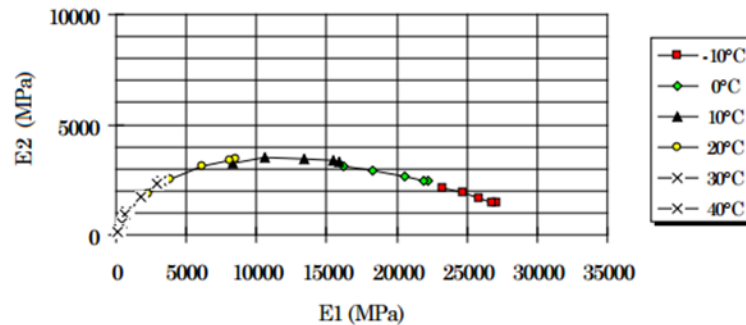
O ângulo de fase (δ) é o parâmetro que fornece indicativos da predominância viscosa ou elástica do material. Quando o ângulo de fase é igual a 0° tem-se um material com características elásticas e quando o ângulo de fase é igual a 90° , tem-se um material totalmente viscoso. Nas temperaturas de operação das rodovias, as misturas asfálticas estão situadas no intervalo entre os dois extremos citados (De La ROCHE, 1996; RIVIÈRE, 1996).

Segundo Almeida (2013), o comportamento reológico pode ser representado por meio de diferentes formas, em função da variação da frequência, da solicitação e da temperatura, levando em consideração as partes reais (E_1) e imaginárias (E_2), assim como o módulo complexo (E^*) e o ângulo de fase (δ).

As representações gráficas são as curvas isotérmicas, curvas isócronas, curvas no Espaço de Black e Plano Cole-Cole.

O plano Cole-Cole (Figura 3) consiste em relacionar a parte real do módulo complexo (E_1), com a parte imaginária (E_2). Esta curva se assemelha a um arco de círculo e não depende da temperatura e frequência (BAAJ, 2002).

Figura 3 – Plano Cole-Cole de uma mistura asfáltica.

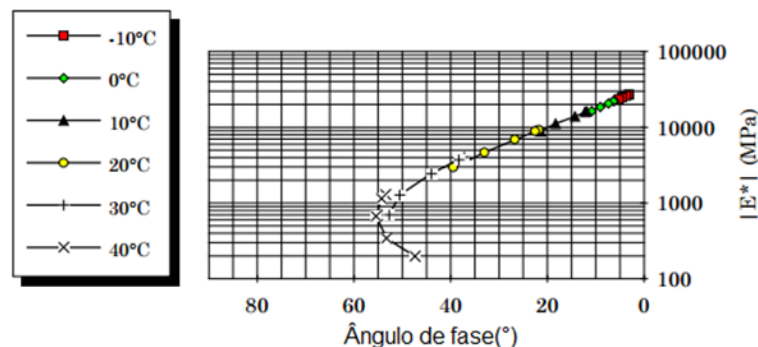


Fonte: Adaptado de Baaj (2002).

Essa curva é característica do material e descreve a evolução viscoelástica no domínio linear, podendo ser usada para calibrar um dos modelos de comportamento reológico das misturas asfálticas, sendo este o modelo de Huet-Sayegh (BAAJ, 2002).

O Espaço de Black relaciona o módulo complexo (E^*) com o ângulo de fase (δ), conforme ilustrado na Figura 4. A curva permite visualizar a região dos módulos de valores pequenos e, em particular, a diminuição do ângulo de fase em condições de altas temperaturas (BAAJ, 2002).

Figura 4 – Espaço de Black de uma mistura asfáltica.



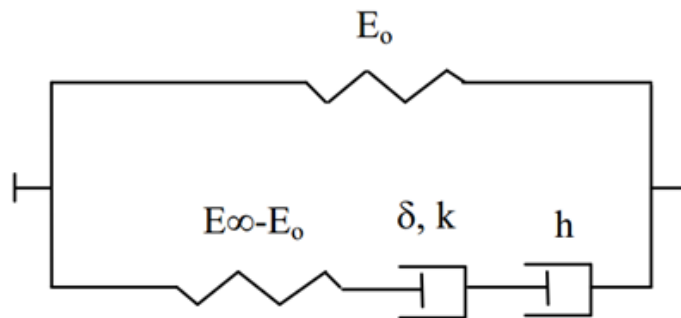
Fonte: Adaptado de Baaj (2002).

Diversos modelos físico-matemáticos são empregados para representar os efeitos viscosos e elásticos presentes nos materiais viscoelásticos. Geralmente eles são constituídos de arranjos geométricos de molas, a qual representa a parte elástica,

e de amortecedores, representando a parte viscosa. A mola representa a elasticidade do material no momento do carregamento e descarregamento. O amortecedor representa a dependência no tempo do material, no carregamento e no descarregamento (MELO, 2014).

O modelo de é um dos modelos utilizados para representar o comportamento das misturas asfálticas é o de Huet-Sayegh. A formação do modelo se dá por dois ramos paralelos (Figura 5), onde um dos ramos é composto por uma mola e dois amortecedores e o outro, é constituído por uma mola.

Figura 5 – Modelo reológico de Huet-Sayegh.



Fonte: Quintero (2011).

O módulo complexo do modelo de Huet-Sayegh é dado pela Equação 5.

$$|E^*(i\omega\tau(\theta))| = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau(\theta))^{-k} + (i\omega\tau(\theta))^{-h}} \quad (5)$$

Onde:

$|E^*|$ - módulo complexo;

E_∞ - módulo complexo infinito;

E_0 - módulo elástico;

i - número complexo definido por $i^2 = -1$;

τ - tempo de relaxação em função da temperatura (Θ);

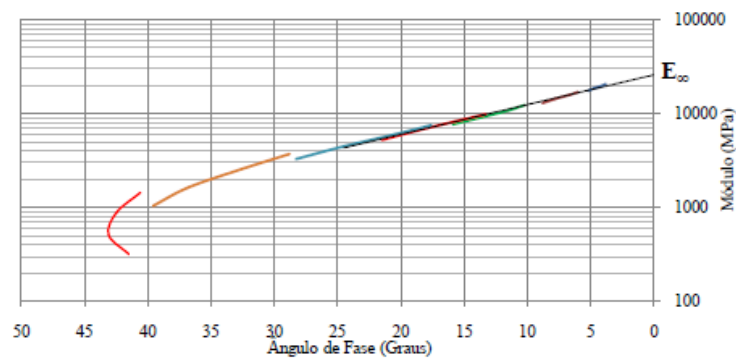
Θ - temperatura, °C;

ω - frequência angular da solitação, $\omega = 2\pi f$;

f - frequência de carregamento.

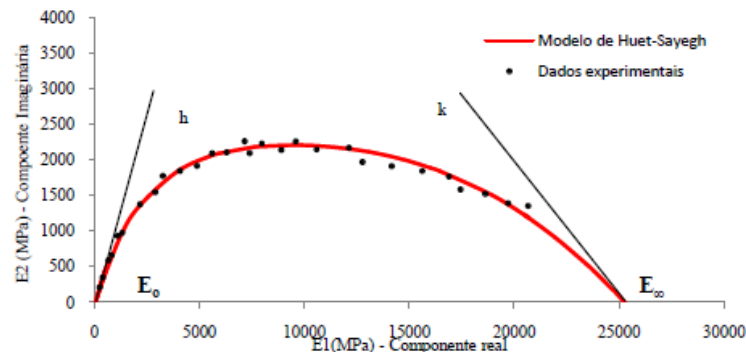
Assim, a fim de avaliar o comportamento viscoelástico de misturas asfálticas são necessárias 5 constantes: E_∞ , E_0 , k , h e δ . O E_0 representa o módulo estático para quando o material é solicitado em altas temperaturas e baixas frequências. É definido por uma extrapolação no plano Cole-Cole. E_∞ representa o módulo elástico do material para quando o mesmo é solicitado à elevada frequência e temperaturas baixas. O módulo infinito se define por extrapolação no espaço Black, ilustrado na Figura 6. Os parâmetros k e h representam os coeficientes parabólicos do modelo. São determinados a partir da tangente com a interseção dos extremos com E_0 e E_∞ , conforme Figura 7. O parâmetro δ , determina a altura do modelo. Os parâmetros podem ser determinados manualmente através dos dados experimentais do módulo complexo no plano Cole-Cole e espaço Black (QUINTERO, 2011; ALMEIDA, 2013).

Figura 6 – Determinação do módulo infinito no espaço Black.



Fonte: Quintero (2011).

Figura 7 – Modelo de Huet-Sayegh no plano Cole-Cole.



Fonte: Quintero (2011).

2.1.2 Deformação permanente nas misturas asfálticas

A deformação permanente pode ocorrer em todas as camadas do pavimento. Ela é resultante do acúmulo da deformação não recuperável provocada pela repetição carga de tráfego com a interação de fatores ambientais e de comportamento dos materiais. Em pavimentos adequadamente dimensionados, temperatura é grande responsável da deformação permanente em materiais betuminosos, aliado ao tempo de carregamento (BELL, 1978 *apud* BARROS, 2007), enquanto que a deficiência na compactação, seria o fator preponderante para as demais camadas da estrutura.

A temperatura é um dos mais importantes fatores que afetam o revestimento asfáltico quanto à deformação permanente. Tendo em conta que o Brasil é um país predominantemente com clima tropical, em que na maior parte do ano as temperaturas são elevadas, tem-se uma sensibilidade maior a esse defeito nas rodovias brasileiras.

A deformação permanente é caracterizada por uma seção transversal de uma superfície que não está mais em sua posição original. É assim chamada porque apresenta um acúmulo de pequenas quantidades de deformação que ocorrem cada vez que uma carga é aplicada. A deformação das trilhas de roda são as formas mais comuns. Existem diversas causas que contribuem para o seu aparecimento, como por exemplo, misturas asfálticas enfraquecidas por danos de umidade, abrasão e tráfego intenso, temperatura da região e ligantes sensíveis a temperatura (FHWA, 1995).

Segundo Nascimento (2008), dependendo da intensidade das cargas, do tráfego e da resistência relativa das camadas do pavimento, a deformação permanente pode ocorrer em todas as camadas da estrutura do pavimento, inclusive no subleito. A vulnerabilidade dessas camadas varia nas diferentes épocas do ano. Nos meses quentes do verão a deformação permanente nas camadas de revestimento é mais comum, enquanto que as camadas granulares e subleito estão mais expostos a esse fenômeno em época chuvosas.

Existem dois mecanismos de ocorrência da deformação permanente

- Com variação de volume;
- Sem variação de volume.

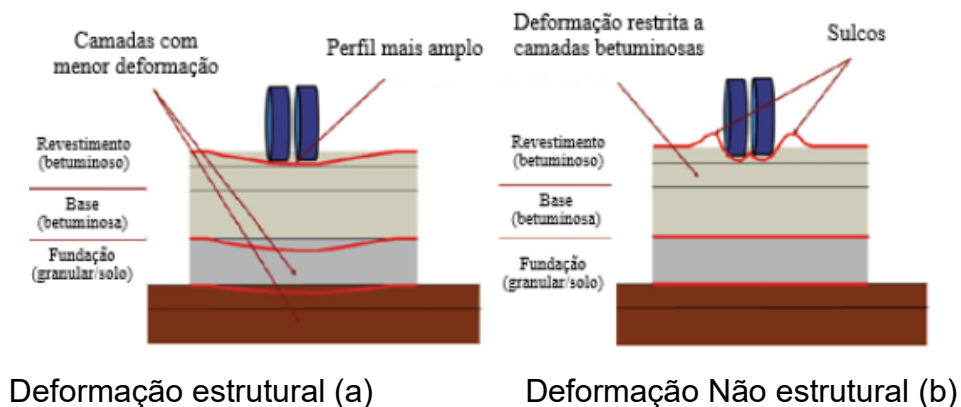
A deformação permanente com variação de volume ocorre devido à densificação dos materiais que integram as camadas do pavimento, inclusive com a contribuição do subleito. Ela se dá pelo deslocamento relativo entre os grãos em

decorrência de elevados níveis de tensões aplicado pelo tráfego, combinado com a má compactação das camadas e aumento de umidade na estrutura.

A deformação permanente sem variação de volume ocorre devido a baixa resistência ao cisalhamento de uma ou mais camadas da estrutura do pavimento, inclusive do subleito. Neste mecanismo, se tem o deslocamento de material devido a sua baixa sua resistência ao cisalhamento. Devido a não variação de volume, tem-se o solevamento do material nos bordos da trilha de rodagem.

A Figura 8 evidencia os dois tipos de mecanismos de deformação permanente. Ressalta-se que em campo dificilmente se tem dos dois mecanismos atuando de forma individualizada, sendo o mais recorrente uma interação entre eles. No caso de recuperação de pavimentos em que predomina este tipo de defeito é de fundamental importância definir o mecanismo predominante e pois isto irá nortear a seleção da intervenção a ser implementada.

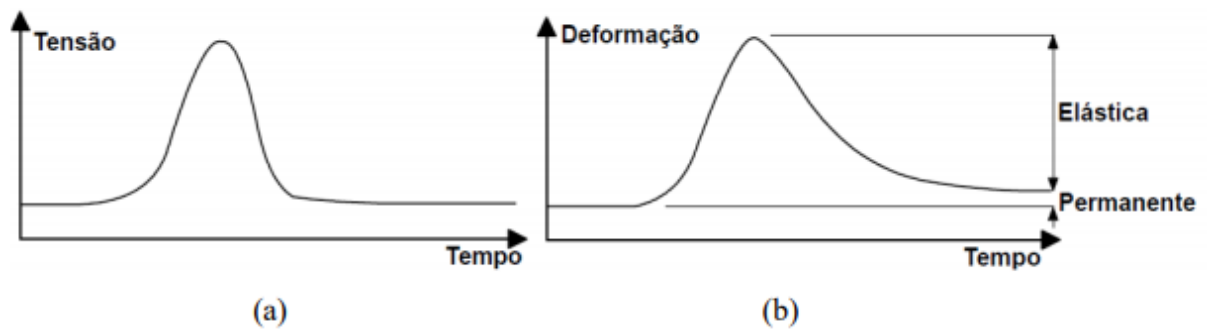
Figura 8 – Exemplo de deformação permanente estrutural em pavimentos (a) e deformação permanente não estrutural da camada asfáltica (b).



Fonte: Adaptado de Partl *et al.* (2013).

A resposta da deformação do pavimento devido a um carregamento pulsante (veículo em movimento) Figura 9 (a), encontra-se ilustrado na Figura 9 (b). É notável que ao fim do carregamento houve uma deformação não recuperável, que por menor que pareça para um único pulso, mas que pode aumentar com milhões de aplicações de carga no pavimento (BORGES, 2014).

Figura 9 – Deformação devido à aplicação de carga dinâmica.



Fonte: Adaptado de Whiteoak (1990) *apud* Borges (2014).

Eisenmann & Hilmer (1987), *apud* Fontes (2009), concluíram que a deformação permanente era causada principalmente pela deformação de fluência sem mudança de volume. Na fase inicial, ou seja, quando ocorre a abertura ao tráfego, a compactação das camadas do pavimento pelo tráfego tem uma grande importância na deformação permanente, após esta fase o volume do material deslocado pelos pneus é aproximadamente igual ao volume das zonas de irrompimento adjacentes.

2.1.2.1 Fatores que afetam a deformação permanente

De acordo com Nascimento (2008) dentre os fatores que afetam a deformação permanente em pavimentos pode-se citar:

- Granulometria dos agregados;
- Teor de asfalto;
- Temperatura da região;
- Baixas velocidades de deslocamento.

Segundo Borges (2014), a influência dos agregados não está somente ligado à origem mineralógica destes. As propriedades físicas como a forma, angularidade e a textura também ajudam na resistência do pavimento quanto à deformação.

Analisando-se a importância da estrutura granulométrica para o desempenho das misturas asfálticas relacionado a deformação permanente, visto que as especificações brasileiras (faixas granulométricas do DNIT) não propõem uma metodologia de escolha da composição, servindo apenas como instrumento de

verificação final da curva granulométrica, cabe ao projetista e conhecimentos empíricos determinar uma composição adequada quanto à resistência a deformação permanente. A literatura aponta algumas alternativas para seleção de curvas granulométricas, como o método de Bailey (Vavrik, 2000) e *Dominant Aggregate Size Range (DASR) model* (Kim, 2006), ambos métodos que se baseiam essencialmente à prevenção de deformação permanente em misturas asfálticas (FERREIRA *et al.* 2015).

O Método Bailey de seleção de agregados para uso em pavimentos foi desenvolvido na década de 1980, pelo engenheiro Robert Bailey, do Departamento de Transportes de Illinois (IDOT). O método tem como objetivo de combinar os agregados, possibilitando o seu intertravamento, transformando-os no esqueleto da estrutura, além de utilizar uma graduação contínua e balanceada (VAVRIK *et al.* 2002).

O método DASR, proposto por Kim (2006), apresenta a curva granulométrica em função de um ou mais diâmetros de agregados que interagem entre si, formando um esqueleto pétreo mais resistente, sendo a principal proposta do método avaliar a estrutura formada por agregados graúdos (BOEIRA, 2018).

O emprego de quantidades excessivas de ligante asfáltico é um dos grandes causadores do afundamento em trilha de roda. Isso se deve ao fato de que o maior volume de asfalto irá agir como lubrificante e reduzir o atrito interno e o intertravamento do esqueleto pétreo da mistura. A deformação no concreto asfáltico é maior próximo a superfície solicitada e gradualmente se reduz com a profundidade (HOSTRA e KLOMP, 1972 *apud* NASCIMENTO, 2008).

Esses fatores podem ser a causa ou contribuir para a ocorrência de afundamento em trilha de roda (ATR) no revestimento asfáltico. Porém, outro fator que causa esse defeito é a má compactação da camada, o que resulta em volume de vazios elevado, propiciando a ocorrência prematura de deformação permanente (BOEIRA, 2018).

Bernucci *et al.* (2010) relacionam a grande dependência da resistência à deformação plástica em materiais asfálticos ao esqueleto pétreo. Considerando que a

temperatura também é um fator determinante nesta propriedade, então fica evidente a participação do ligante asfáltico devido seu comportamento sensível a temperatura.

A Tabela 1 apresenta a influência dos principais parâmetros que envolvem a mistura asfáltica quanto à resistência à deformação permanente.

Tabela 1 – Parâmetros que influenciam a resistência à deformação permanente.

Parâmetro	Fator	Mudança do Fator	Efeito na resistência à deformação permanente
Agregado	Textura Superficial	Lisa para rugosa	Aumenta
	Granulometria	Descontínua para contínua	Aumenta
	Forma	Redonda para angular	Aumenta
	Tamanho	Aumento do tamanho máximo	Aumenta
Asfalto	Rigidez ^a	Aumento	Aumenta
Mistura	Teor de asfalto	Aumento	Diminui
	Volume de vazios ^b	Aumento	Diminui
	Vazios do agregado mineral	Aumento	Diminui ^c
	Método de compactação	x ^d	x ^d
Condições locais	Temperatura	Aumento	Diminui
	Estado de tensão/deformação	Aumento na área de contato	Diminui
	Repetições de carga	Diminui	Diminui
	Água	Seco para molhado	Diminui se a mistura é sensível a água

^a Refere-se à rigidez e à temperatura no qual a propensão a deformação está sendo determinada. Utilizado para aumentar a rigidez a temperaturas críticas, reduzindo assim o potencial de deformação.

^b Quando o volume de vazios de ar são inferiores a 3%, o potencial de deformação das misturas aumenta.

^c É aconselhado que VMA muito baixa (menos de 10%) deve ser evitado.

^d O método de compactação, laboratorial ou de campo, pode influenciar a estrutura do sistema e a propensão para deformação.

Fonte: Adaptado de Sousa *et al.* (1991).

Segundo Medina e Motta (2015), medir o afundamento de trilha de roda em campo é uma tarefa relativamente fácil. Porém, fazer a sua previsão é bastante complexo, especialmente para as misturas asfálticas, pois o problema não se resume apenas na caracterização dos materiais mas, também, na avaliação do impacto das

condições ambientais no material. Além do cálculo das tensões durante toda a vida de serviço do pavimento, também haverá influência do envelhecimento do ligante.

2.1.2.2 Ensaio para avaliação da deformação permanente

Segundo Boeira (2018), os principais ensaios utilizados para caracterizar o comportamento das misturas asfálticas quanto à deformação permanente são:

- Ensaio fundamental (triaxial com carregamento repetido e compressão uniaxial)
- Ensaio de simulação, em laboratório.

2.1.2.2.1 Ensaio com simuladores de tráfego em laboratório

Segundo Bernucci et al. (2010), os simuladores são equipamentos que permitem uma investigação mais próxima da realidade, porém, necessitam o uso de fatores campo-laboratório para previsões de deformação permanente em laboratório por análises empíricas de resultados em campo.

A recomendação francesa para o ensaio com simulador de tráfego em laboratório é utilizada devido à falta de normas nacionais.

Os ensaios que utilizam cargas rolantes são conhecidos como ensaios “*wheel tracking*” e foram desenvolvidos para simular a sucessiva passagem dos rodados dos veículos para avaliação do comportamento das misturas betuminosas em relação à deformação permanente. O ensaio com equipamento LCPC – *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, é realizado primeiramente com a compactação através de amassamento por roda de pneu com cargas e pressão de inflação regulável, por um equipamento denominado mesa compactadora, seguindo a normativa francesa NF P 98-250-2, em seguida submete-se os corpos de prova moldados nas dimensões de 50 cm de comprimento, 18 cm de largura e 5 ou 10 cm de espessura, a um número de ciclos à ação da roda do simulador de tráfego a uma frequência de 1 Hz e a temperatura de 60°C. Normalmente o número de ciclos atinge os 30000 e o afundamento é determinado pela média de 15 pontos de leitura, sendo seu limite 10%

a altura do corpo de prova para tráfego pesado (NASCIMENTO, 2008; FONTES, 2009).

A Figura 10 apresenta o equipamento *orniereur* – simulador de tráfego da Universidade Federal de Santa Catarina.

Figura 10 – Simulador de tráfego LCPC para ensaios de deformação permanente em laboratório.



Fonte: Elaborado pela Autora (2021).

Segundo Moura (2010), a pressão de inflagem dos pneus é de 0,6 MPa, a carga de ensaio é de 5kN aplicada em cada placa. Esses parâmetros estão especificados na norma francesa de ensaio, porém podem ser variados para estudos e pesquisas.

O afundamento de trilha de roda é medido em diversos pontos da placa, geralmente em 1000, 10000 e 30000 aplicação dos ciclos. O resultado do ensaio é dado em termos de afundamento em milímetros ou em percentual de altura da placa.

O ensaio se encerra quando a placa é submetida a um número de 30000 ciclos ou quando a mistura asfáltica se deforma de modo excessivo prejudicando as leituras de afundamento.

De acordo com LCP (2007), os limites aceitáveis pelas diretrizes francesas é de 10% para camadas de concreto asfáltico utilizados como revestimentos que possuem espessuras de 6 a 8 cm.

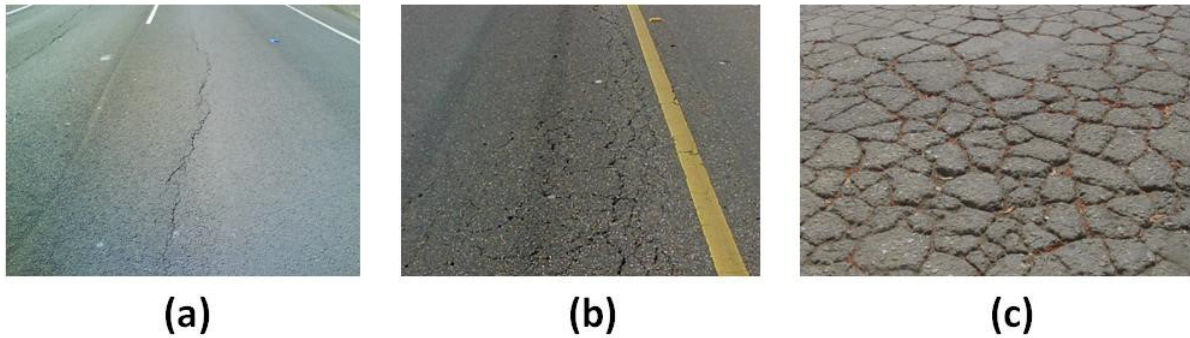
2.1.3 Fadiga em revestimentos asfálticos

Segundo Nuñez (2013), a fadiga é um processo caracterizado pela deterioração progressiva dos materiais quando são submetidos a tensões ou deformações repetidas. Nos materiais asfálticos usados em pavimentação rodoviária, estas tensões ou deformações são causadas pelo carregamento cíclico, devido ao tráfego dos veículos. Estas solicitações, apesar de serem inferiores à resistência última do material, causam o seu dano progressivo com o tempo.

O trincamento por fadiga associada à repetição das cargas provocadas pela atuação do tráfego é um dos modos mais significativos da redução da vida útil de pavimentos flexíveis.

Segundo Zeiada (2012), o trincamento por fadiga pode ser distinguido em três estágios diferentes. O estágio inicial consiste em fissuras longitudinais intermitentes da trajetória da roda. O estágio intermediário do trincamento por fadiga é chamado de trinca de jacaré, porque se tem a interligação das trincas isoladas. Em alguns casos extremos, o estágio final da trinca por fadiga é a desintegração quando os buracos se formam, os três estágios descritos acima podem ser vistos na Figura 11.

Figura 11 – Trincamento por fadiga no estágio inicial (a), estágio intermediário (b) e estágio final (c).

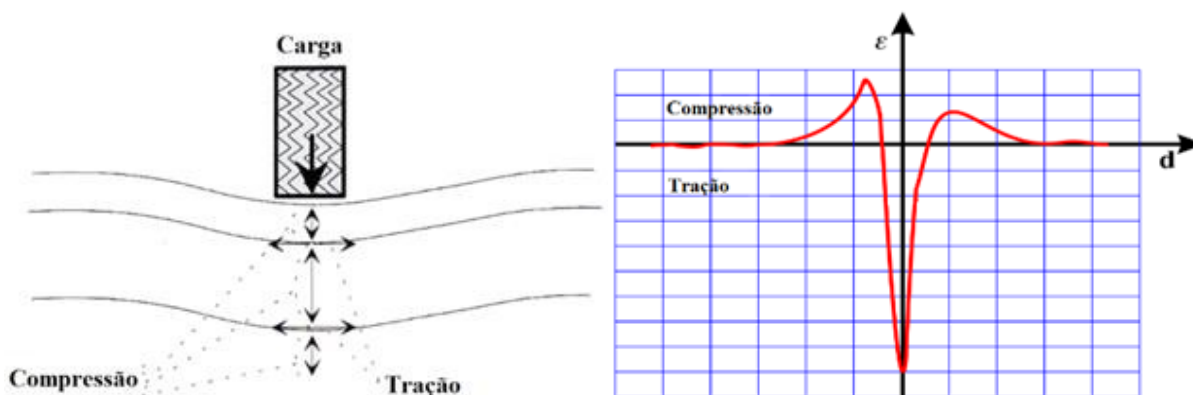


Fonte: Klinsky *et al.* (2015).

Segundo Di Benedetto (2004), existem duas fases do processo de fissuração por fadiga. A primeira corresponde à degradação resultante do dano uniformemente distribuído no material. Assim, essa fase se manifesta pela iniciação e propagação de uma rede de microfissuras, resultando em uma diminuição na rigidez do módulo. Na segunda fase, a partir das microfissuras ocorrem macrofissuras que se propagam dentro do material.

A passagem de um veículo gera tensões de tração e compressão nas diferentes direções das camadas de um pavimento. Cada camada é comparada a um feixe que sofre uma curvatura sob o efeito do tráfego (Figura 12a). Compressões repetidas podem induzir deformações permanentes e recuperáveis. As repetidas aplicações de tensões na camada do pavimento, sob o efeito da passagem dos veículos, geram “micro” degradações que se acumulam e podem causar a ruína do material pela fadiga. Na Figura 12b é possível observar que ao se aproximar da carga o ponto é submetido à compressão e em seguida, à tração, e quando a carga é removida está novamente submetida à compressão (BAAJ, 2002).

Figura 12 – Tensões induzidas pelo tráfego (a) sentido transversal ao carregamento; (b) sentido longitudinal ao carregamento.



Fonte: (a) Adaptado de Baaj (2002); (b) Adaptado de Di Benedetto (1998) *apud* Baaj (2002).

Ao longo das últimas décadas tem sido comum supor que o trincamento por fadiga normalmente inicia no fundo da camada asfáltica e se propaga para a superfície (conhecido como *bottom-up cracking*). Porém, novos estudos demonstram que o trincamento por fadiga também pode ser iniciado a partir do topo e se propagar para baixo (*top-down cracking*). Em geral é a hipótese de que as tensões de tração e cisalhamento desenvolvem-se na superfície e causam pressões de contato extremamente grandes na interface borda-borda do pneu, juntamente com camadas de superfície fina altamente rígida (ABOJARADEH, 2003 *apud* ZEIADA 2012).

Segundo Fontes (2009), as leis de fadiga são, em geral, estabelecidas a partir de ensaios de laboratório de cargas repetidas, que são conduzidas a diferentes níveis de tensão ou de deformação, devendo reproduzir o mais próximo possível das condições das misturas asfálticas implementadas em campo. As principais formas de carregamento utilizadas em ensaios de fadiga são as seguintes: (i) sinusoidal; (ii) pulsatório; (iii) cíclica.

Os dois principais fatores que afetam à resistência a fadiga das misturas asfálticas são a porcentagem de asfalto e a porosidade da mistura asfáltica. O tipo de agregado tem menor influência comparativamente às outras variáveis. Assim, quanto maior a porcentagem de asfalto maior é a capacidade da mistura em resistir à fadiga (FONTES, 2009).

Ainda segundo Fontes (2009), outros fatores que influenciam na resistência à fadiga são:

- As misturas asfálticas produzidas com asfaltos mais duros são menos susceptíveis às variações de temperatura e por consequência, possuem uma maior vida de fadiga;
- Em ensaios que a forma de carregamento permite períodos de repouso, ocorre o fenômeno da auto reparação que pode ser traduzido como um ganho de vida de fadiga;
- A forma dos agregados possui uma influência indireta sobre a duração da vida das misturas asfálticas, sendo a porosidade o fator mais influente;
- A porcentagem de fíler tem influência na rigidez da mistura betuminosa, para um teor de fíler ótimo, a vida de fadiga é maior;
- Em ensaios à deformação controlada e realizados a temperaturas de 0°C a 25°C, a duração da vida de fadiga aumenta com o aumento da temperatura, enquanto que em ensaios de tensão controlada, a vida diminui com o aumento da temperatura.

2.2 LIGANTES MODIFICADOS

A modificação de ligantes asfálticos é uma prática cada vez mais comum em vias de elevado volume de tráfego e tem como objetivo a melhoria das características reológicas desses materiais, principalmente em temperaturas extremas e tráfego lento.

Os asfaltos convencionais tem um comportamento satisfatório para maioria das aplicações rodoviárias, satisfazendo os requisitos mínimos das ações do tráfego e ações climáticas. Porém, com o crescente volume de veículos comerciais e peso por eixo, o uso de modificadores se faz necessário para melhoria das propriedades mecânicas e reológicas do revestimento (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Os modificadores mais utilizados em ligantes são os polímeros e estes, segundo Mano (1985, 1991) e Leite (1999), se classificam em:

- Termorrígidos: não se fundem, sofrem degradação em uma temperatura limite e endurem irreversivelmente quando aquecidos a uma determinada temperatura. São exemplos: resina epóxi, poliéster, poliuretano;

- Termoplásticos: se fundem e tornam-se maleáveis reversivelmente quando aquecidos. São incorporados ao asfalto em altas temperaturas. Exemplos: polietileno, polipropileno, PVC (policloreto de vinila);
- Elastômeros: quando aquecidos se decompõem antes de amolecer, com propriedades elásticas. Exemplo: SBR (*styrene butadiene rubber*);
- Elastômeros termoplásticos: em baixas temperatura tem comportamento elástico, porém conforme a temperatura aumenta passa a apresentar comportamento termoplástico. Exemplo: SBS (*styrene butadiene styrene*) e EVA (etileno acetado de vinila).

A norma do DNIT 129/2011 – EM Cimento Asfáltico de Petróleo modificado por polímero elastomérico, apresenta as especificações para o uso desse modificante no Brasil.

Os ligantes altamente modificados por polímero – HiMA, ainda não possuem especificações brasileiras, sobre seus parâmetros reológicos. Devido a este fato é importante realizar experimentos e acompanhar o desempenho da aplicação deste ligante.

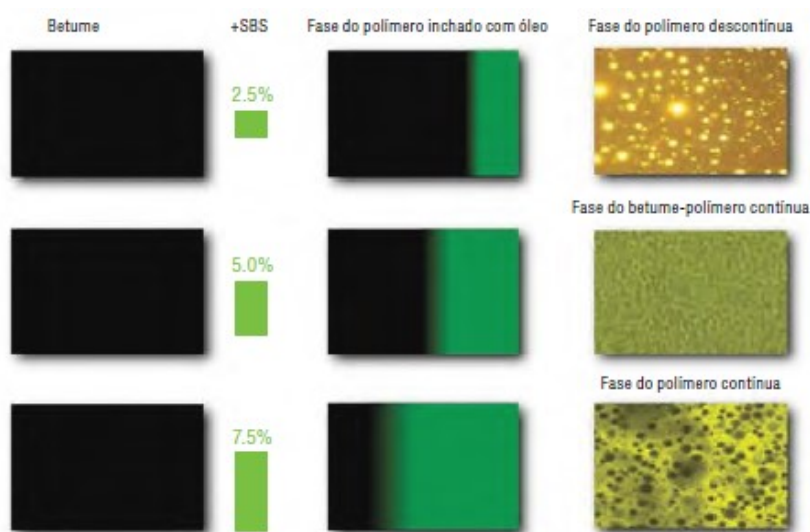
2.2.1 Ligantes altamente modificado por polímero - HiMA

Segundo Kraton® (2012), o HiMA é uma altíssima modificação no ligante asfáltico convencional através do uso de SBS modificado, denominado pela empresa de D0243 Kraton®. Para aquele ano, ele apresentaria uma carga de polímeros duas vezes maior que a dos asfaltos modificados do mercado. O objetivo deste elevado teor de polímero é propiciar um ligante em que o polímero forma uma fase continua aumentado desta forma significativamente a resistência da mistura asfáltica quanto à deformação permanente e a vida de fadiga.

A Figura 13 ilustra como se dá a interação morfológica entre o ligante e o polímero SBS na medida em que vai se aumentando o teor de polímero. Nela é possível observar que para ligantes pouco modificados, tem-se uma fase descontinua e por conta desta descontinuidade, o aumento nas propriedades de desempenho não é tão marcante. Na medida em que se aumenta o teor de polímero, tem-se uma fase

continua entre ligante e o polímero e o produto final tende a se comportar como uma borracha. Isto melhora significativamente a resistência à fadiga da mistura por conta dela ser capaz de suportar um maior número de solicitações em níveis de deformação. Em relação à deformação permanente, a elevada recuperação elástica conferida à mistura reduz significativamente o acúmulo da deformação permanente.

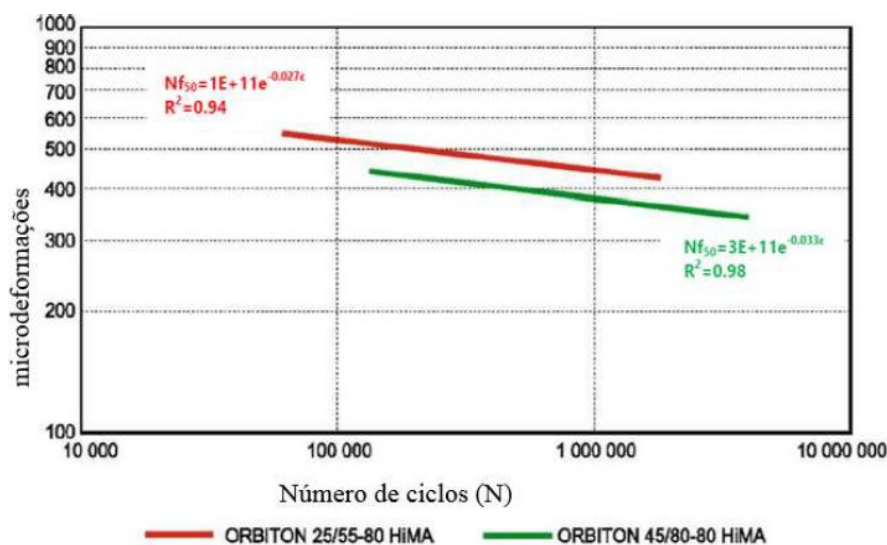
Figura 13 – Efeito do aumento dos teores de polímero SBS na morfologia do polímero/asfalto.



Fonte: Kraton (2012).

Blazejowski *et al.* (2015) utilizaram dois ligantes asfálticos modificados com polímero SBS, sendo o primeiro nomeado ORBITON 25/55-80 HiMA e o segundo ORBITON 45/80-80 HiMA para analisar o ganho de resistência à fadiga. Os ensaios de fadiga foram executados no equipamento de flexão em viga de quatro pontos, com temperatura de 10°C e frequência de 10 Hz. A Figura 14 apresenta os resultados obtidos pelos autores.

Figura 14 – Curvas de fadiga com ligantes Orbiton 25/55-80 HiMA e Orbiton 45/80-80 HiMA.



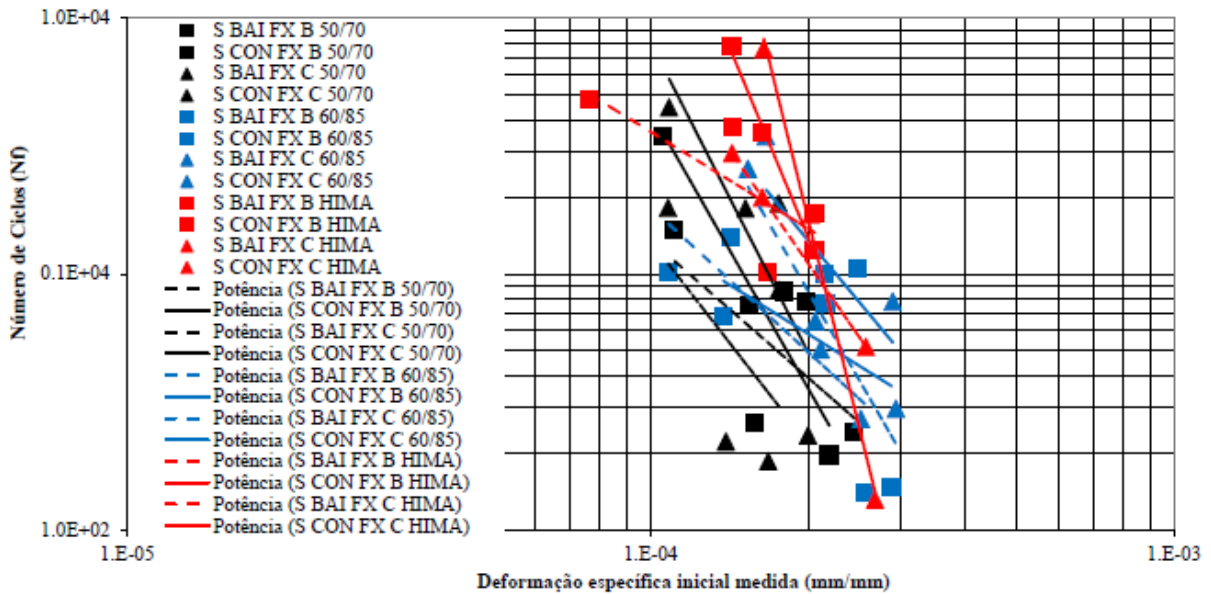
Fonte: Blazejowski *et al.* (2015).

Os autores afirmam que para pavimentos rodoviários típicos, em que as deformações na fibra inferior do revestimento asfáltico estão dentro de um intervalo de $80-150\mu\varepsilon$, o uso de ligantes HiMA pode fornecer ao pavimento uma vida de fadiga de até 50 anos.

Boeira (2018) estudou o comportamento de misturas asfálticas quanto a influência do tipo de ligante asfáltico utilizado (CAP 50/70, ligante modificado por polímero AMP 60/85 e ligante altamente modificado por polímero HiMA) variando o método de dosagem, utilizando Marshall e SUPERPAVE, a granulometria, utilizando as faixas B e C da especificação DNIT 031/2006-ES da mistura, o método de composição de agregados e o método Bailey.

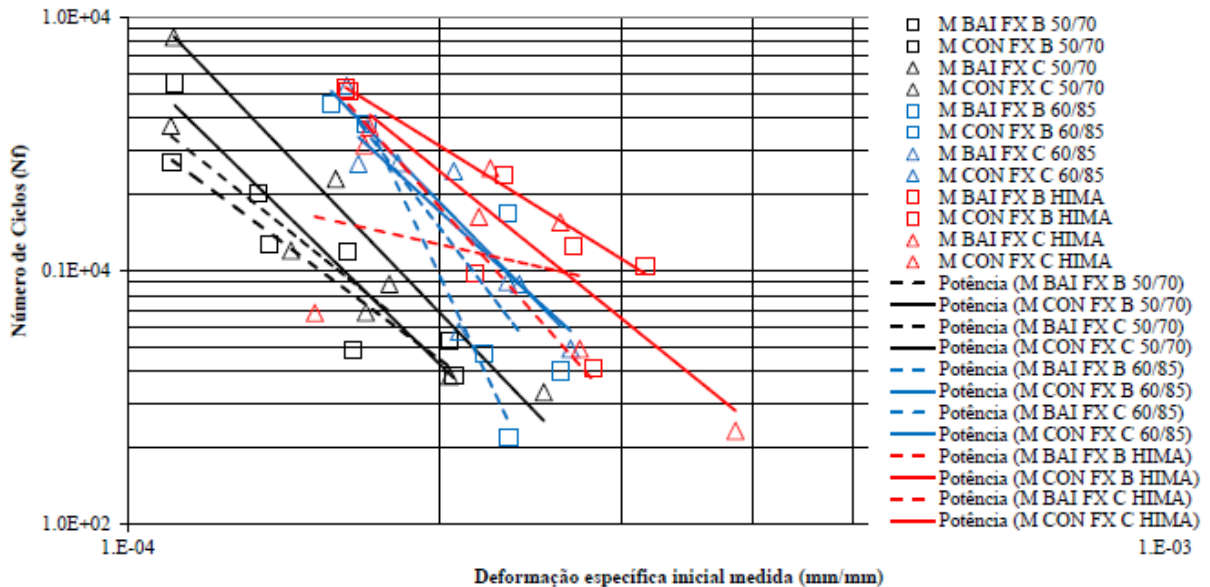
Na Figura 15 e na Figura 16 são mostrados os resultados dos ensaios de fadiga para as misturas dosadas através da metodologia SUPERPAVE e Marshall, respectivamente.

Figura 15 – Curvas de resistência à fadiga para as misturas dosadas na metodologia SUPERPAVE.



Fonte: Boeira (2018).

Figura 16 – Curvas de Wöhler para as misturas dosadas na metodologia Marshall.



Fonte: Boeira (2018).

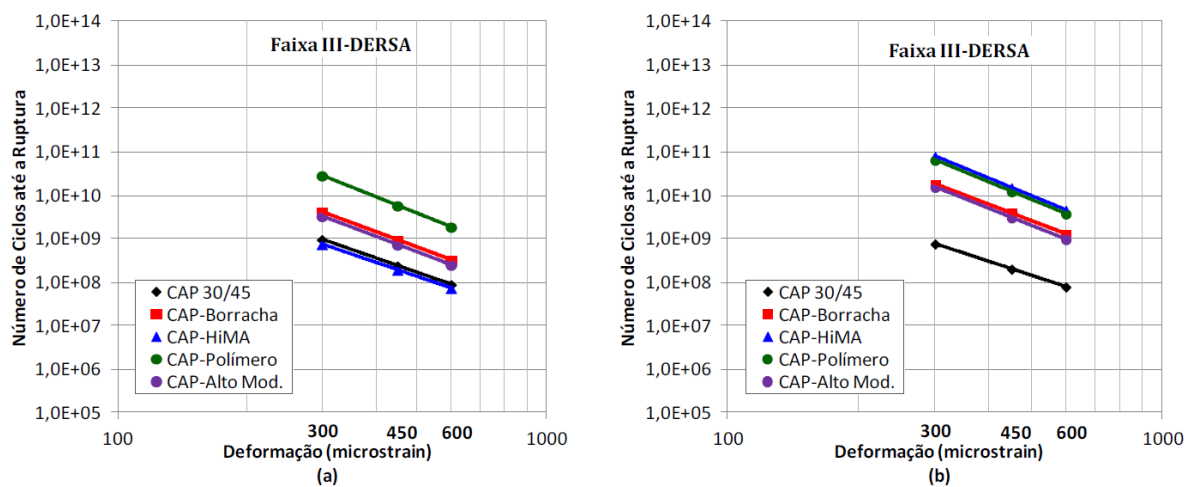
Através da análise das Figura 15 e Figura 16 o autor observou que as misturas dosadas segundo a metodologia Marshall apresentaram desempenho superior em relação às dosadas pela metodologia SUPERPAVE. Segundo o autor, tal comportamento estaria ligado ao fato que misturas com pouco teor de ligante

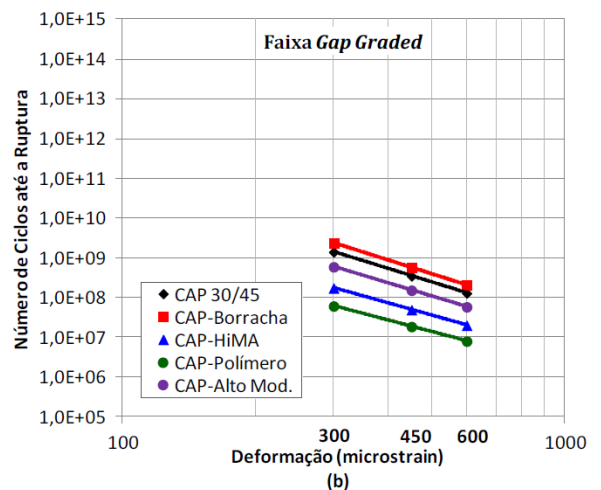
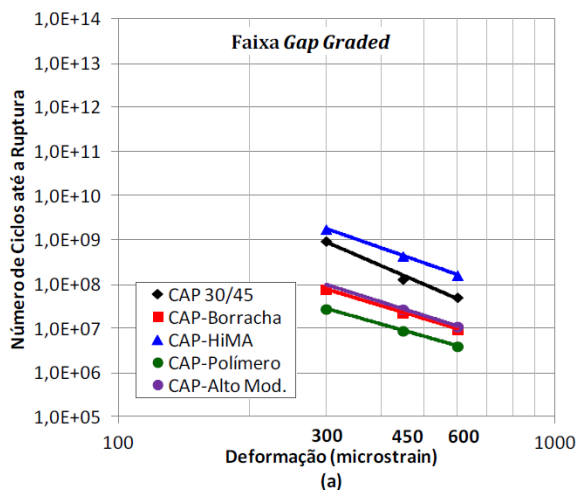
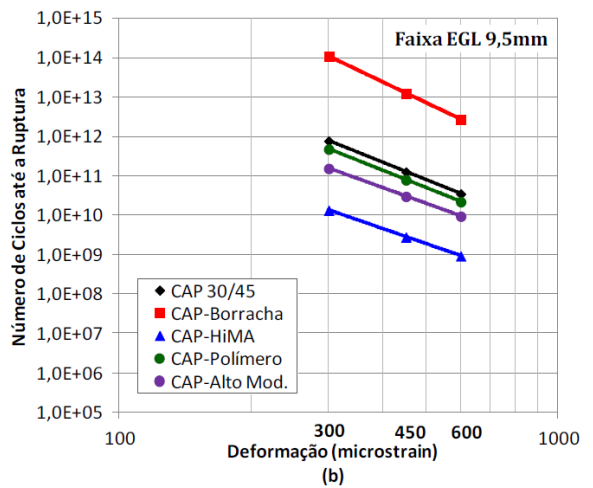
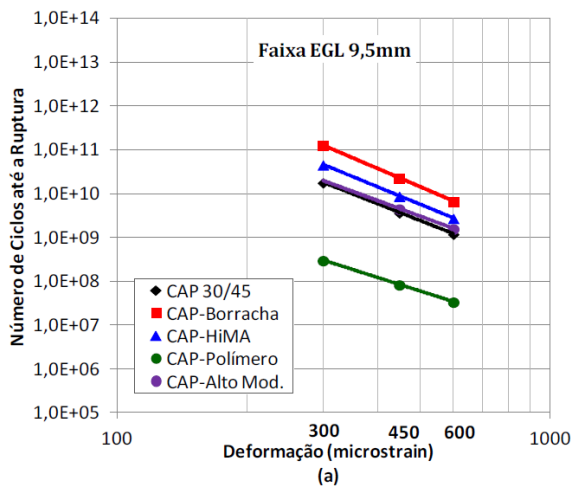
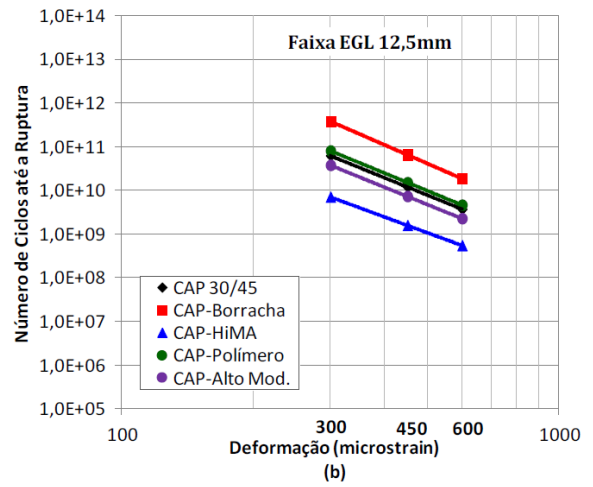
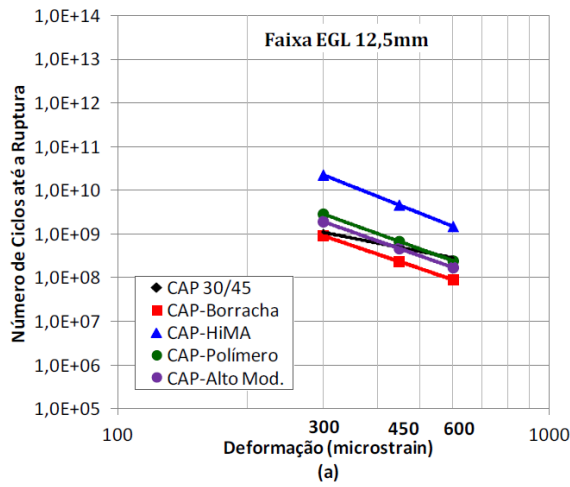
(dosadas no SUPERPAVE) e muito rígidas, tendem a ser mais suscetíveis ao trincamento por fadiga.

Klinsky *et al.* (2015), avaliaram a influência de cinco tipos de ligantes asfálticos na vida de fadiga das misturas asfálticas. Os ligantes asfálticos utilizados foram um CAP 30/45, um CAP borracha, dois ligantes asfálticos modificados por polímero (CAP polímero e CAP HiMA) e um ligante asfáltico de alto módulo (CAP Alto módulo). Os autores utilizaram agregados de duas pedreiras (ambos agregados foram caracterizados como granitos), para atender as especificações de quatro faixas granulométricas, sendo estas: 1 – Faixa III (Dersa); 2 – EGL 12,5mm; 3 – EGL 9,5mm; e 4 – Gap Graded.

Os ensaios de fadiga foram realizados no ensaio de tração indireta, com tensão controlada. Os resultados obtidos, estão apresentadas na Figura 17.

Figura 17 – Curvas de fadiga obtidas com equipamentos de tração indireta e velocidade controlada, (a) pedreira Jambeiro (b) pedreira Pombal.





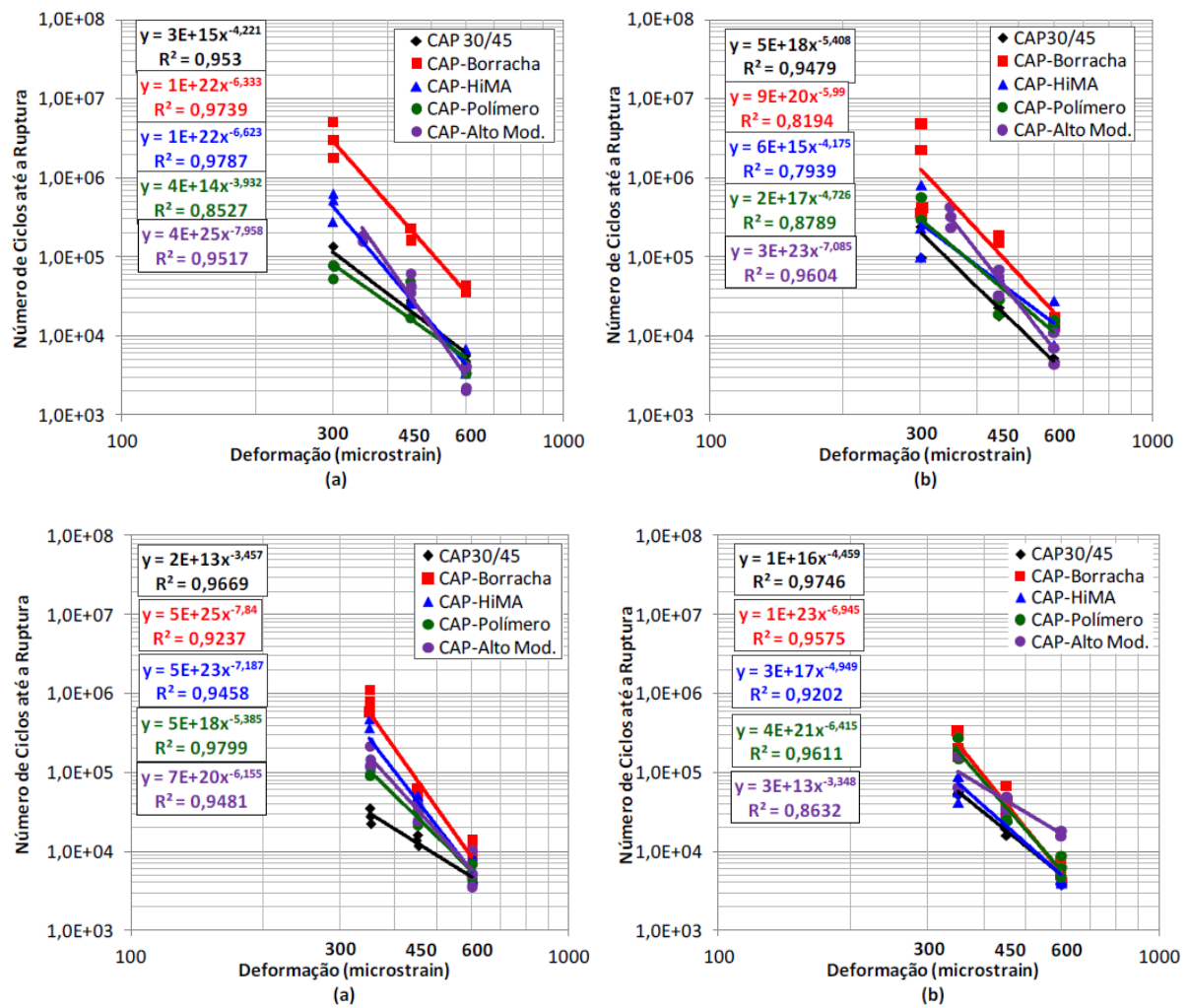
Fonte: Klinsky et al. (2015).

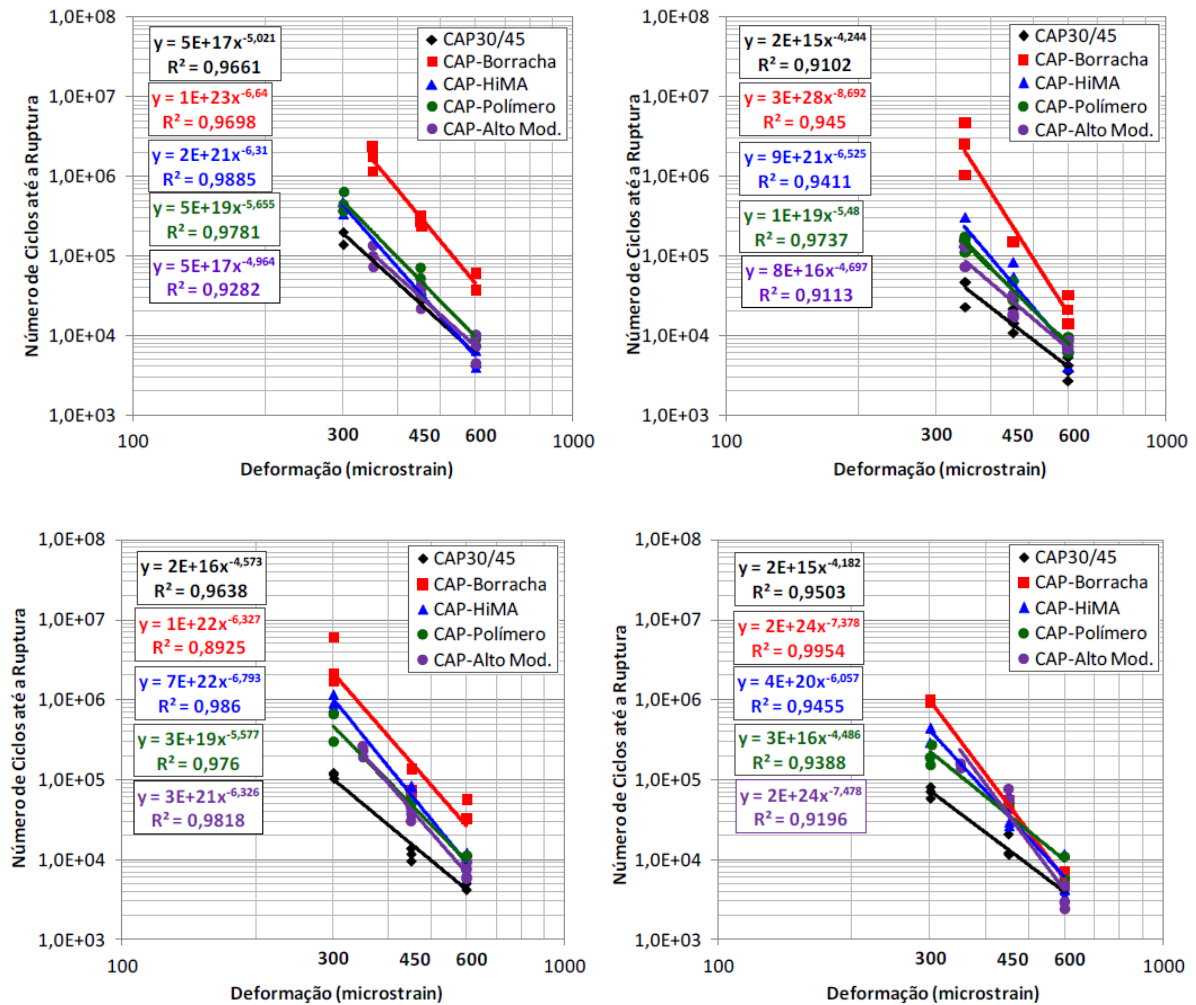
De um modo geral, observa-se que as misturas asfálticas com CAP-HiIMA e com CAP-Borracha foram as que apresentaram maior resistência à fadiga nas quatro

faixas granulométricas, com exceção da mistura com Faixa III-DERSA, e agregados da pedraira Jambeiro.

Na Figura 18 são apresentados os resultados obtidos pelo autor com ensaio de flexão alternada em viga de quatro pontos.

Figura 18 – Curvas de fadiga obtidas com equipamentos de flexão alternada, (a) pedraira Jambeiro (b) pedraira Pombal.





Fonte: Klinsky *et al.* (2015).

De um modo geral as misturas compostas pelo ligante asfáltico modificado por pó de borracha apresentam maiores vidas de fadiga, independente da faixa granulométrica e da fonte de agregados.

2.3 TEMPERATURA NO REVESTIMENTO

2.3.1 Influência da temperatura no desempenho à fadiga

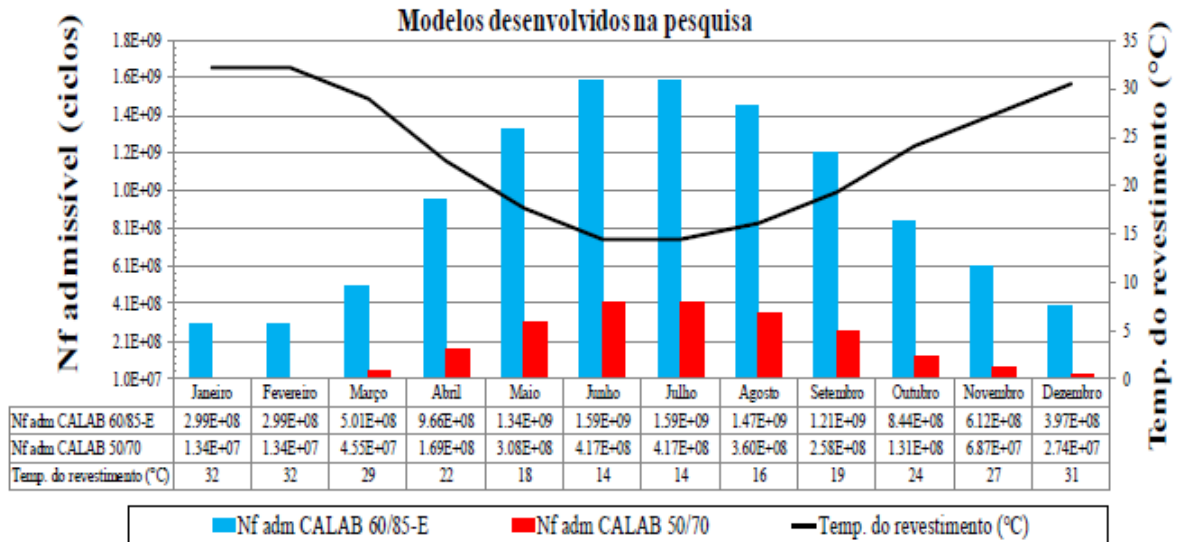
O comportamento mecânico das misturas asfálticas é diretamente influenciado pela temperatura. Em consequência, a temperatura que se utiliza para realização dos ensaios, afeta a vida de fadiga obtida para a mistura asfáltica.

De forma geral, com o aumento da temperatura tem-se uma redução na rigidez da mistura. Porém, essa relação pode ser influenciada pelo modo de carregamento adotado no ensaios, podendo aumentar ou diminuir a vida de fadiga (LOPES, 2019).

Rossato (2015), analisou a influência da temperatura no desempenho à fadiga de mistura asfáltica convencional (CAP 50/70) e modificada por polímero (CAP 60/85-E), na cidade de Santa Maria – RS. A partir do modelo de conversão proposto por Medina e Motta (1989) foi calculada a temperatura do revestimento no centro da camada.

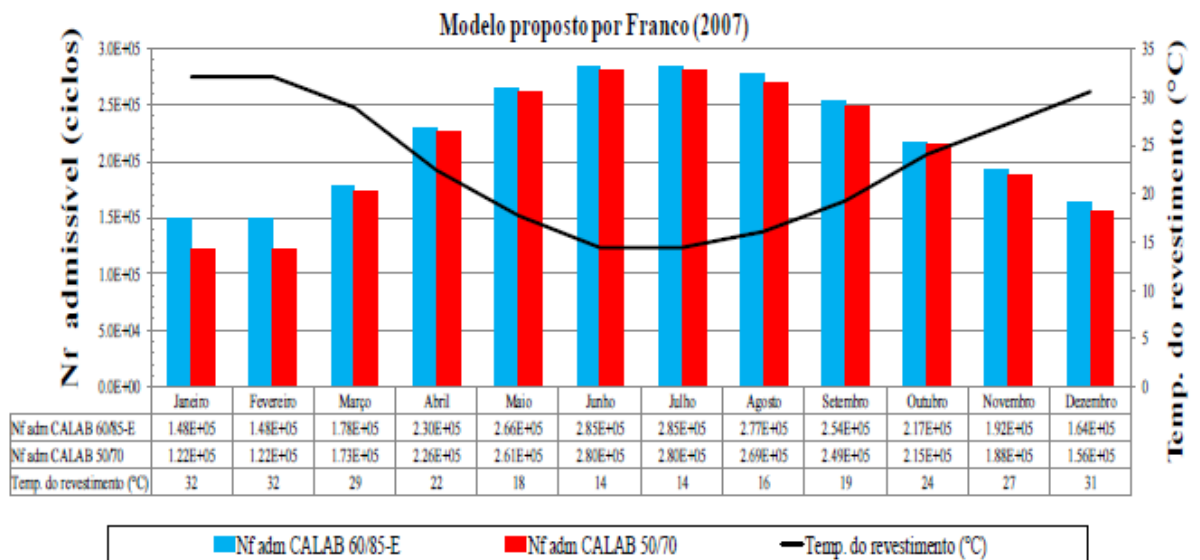
O autor utilizou o *software* AEMC/SisPavBR desenvolvido por Franco (2007), onde foi determinada a deformação de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico para cada mês do ano. A estrutura do pavimento e os respectivos valores de Módulo de Resiliência foram mantidos constantes em cada análise, variando apenas o valor de módulo da camada de revestimento de acordo com a temperatura correspondente a cada mês do ano. O modelo de fadiga proposto foi determinado através do ensaio de tração indireta com tensão controlada. Nas Figura 19 e Figura 20 são apresentados os resultados com os modelos de fadiga desenvolvidos pelo autor e com o modelo proposto por Franco (2007), respectivamente.

Figura 19 – Relação entre desempenho à fadiga e temperatura do revestimento asfáltico para os meses do ano, modelos propostos por Rossato (2015).



Fonte: Adaptado de Rossato (2015).

Figura 20 – Relação entre desempenho à fadiga e temperatura do revestimento asfáltico para os meses do ano, modelos propostos por Franco (2007).



Fonte: Adaptado de Rossato (2015).

Nos meses de verão, o desempenho à fadiga é menor do que em meses de inverno. Além disso, pode observar que o modelo proposto por Franco (2007) é mais conservador, chegando a valores de ordem de grandeza de 10^5 enquanto que, o

modelo de Rossato (2015) teve valores de 10^9 . Atenta-se para a mistura modificada por polímero que apresentou maior estimativa de vida útil em todas as análises.

O autor ainda analisou a influência da temperatura no revestimento quanto ao dano produzido no pavimento. Foi utilizada a teoria do Dano Cumulativo Linear de Miner. Para isto, o tráfego anual previsto em projeto foi dividido em 12 obtendo o valor mensal de $4,62 \times 10^6$.

O autor ressalta que ao utilizar os modelos propostos pela sua pesquisa, os resultados de consumo de resistência à fadiga mostraram-se condizentes com a realidade apresentada em campo. Porém, os resultados apontam o quão restritivo e dependente das peculiaridades de cada trecho monitorado são os modelos de desempenho à fadiga.

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 e outra no Nordeste do Brasil. Para determinação da temperatura considerou-se o revestimento dividido em três subpartes, nas quais a temperatura foi calculada em seu centro com auxílio da Equação 6.

$$T(x) = T_{sup} + (T_{sup} - T_{ar})(1 - e^{(0,06855 - 0,002633x)x}) \quad (6)$$

Onde:

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

T_{sup} – temperatura da superfície do revestimento;

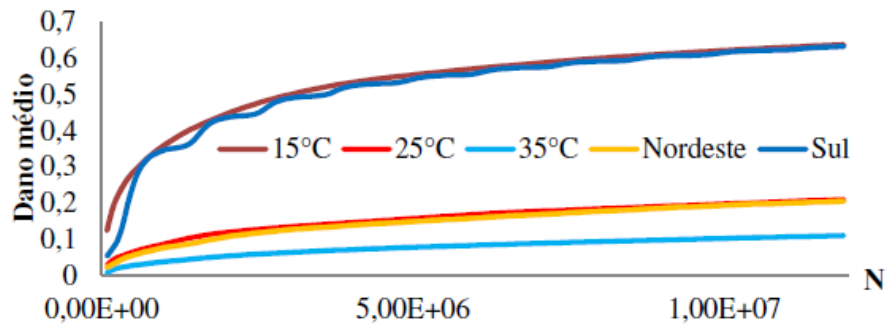
T_{ar} – temperatura do ar próxima ao pavimento.

As análises foram divididas em três turnos do dia, manhã, tarde e noite e nos meses do ano.

A análise estrutural elástica-linear foi realizada no programa de elementos finitos CAP 3D-D. O dano médio foi determinado aplicando a lei de Miner, sendo calculada a média para cada subperíodo de análise. A curva de fadiga utilizada para determinar o dano médio foi obtida a partir do ensaio de tração direta. A espessura do revestimento da estrutura analisada era de 5,1 cm.

Na Figura 21 são apresentados os resultados de dano médio em função do tráfego com variação de temperatura nas cidades do Sul e Nordeste, e os resultados obtidos com temperatura constante de 15°C, 25°C e 35°C.

Figura 21 – Dano médio em função do tráfego com variação de temperatura.



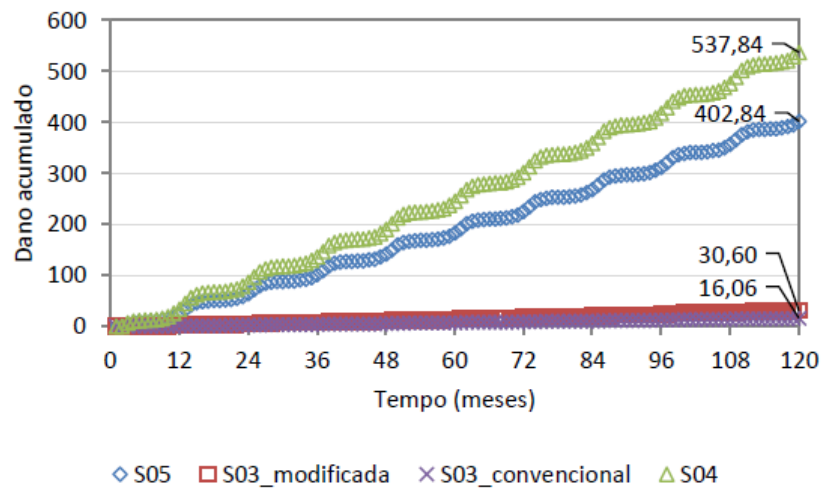
Fonte: Santiago *et al.* (2018).

Pode-se observar que o dano médio para a cidade do Nordeste foi menor em relação ao cidade do sul, além disso, para a cidade da região Sul houveram oscilações ao longo do tempo. De acordo com o autor 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. O autor ainda ressalta a importância de se incluir a variação de temperatura regional nas análises, principalmente quando se considera usar uma mesma mistura em diferentes regiões. O dano provocado ao pavimento em uma cidade do Nordeste é diferente de um cidade do Sul do Brasil.

Lopes (2019), avaliou o desempenho funcional e estrutural de três segmentos monitorados construídos em Araranguá – SC, a autora considerou o efeito da sazonalidade da temperatura no desempenho do pavimento. Os segmentos diferem entre si apenas na espessura do revestimento, e o segmento 03 possui a camada inferior do revestimento executada com mistura asfáltica modificada por borracha e a camada superior executada com mistura convencional.

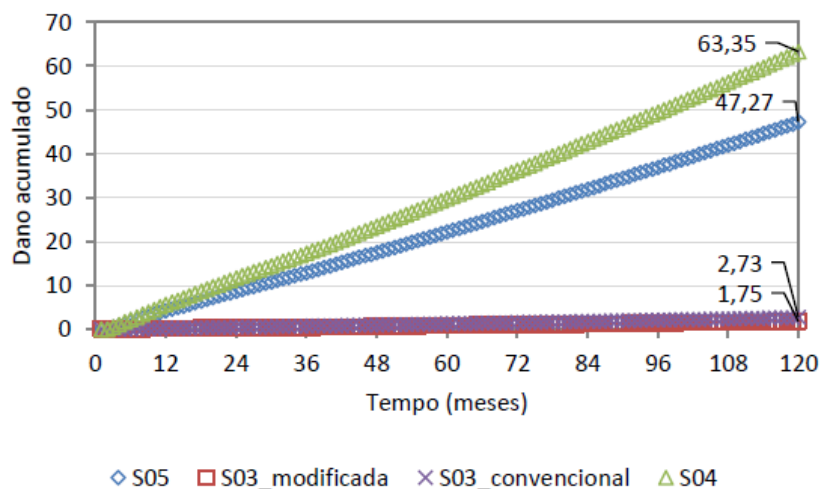
A Figura 22 apresenta o dano acumulado considerando a sazonalidade de temperatura no período de projeto e na Figura 23 o dano acumulado considerando a temperatura constante de 20°C. O dano foi calculado na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico e acumulado ao longo do período de projeto.

Figura 22 – Dano acumulado com a sazonalidade de temperatura no período de projeto.



Fonte: Lopes (2019).

Figura 23 – Dano acumulado no período de projeto com temperatura de 20°C.



Fonte: Lopes (2019).

Comparando as Figura 22 e Figura 23, observa-se que o dano acumulado considerando a variação de temperatura da região é maior. Nos segmentos 05 e 04 o dano acumulado é cerca de 8 vezes maior do que com a temperatura constante de 20°C. Para o segmento 03 o dano acumulado com sazonalidade é ainda maior do que com temperatura constante.

2.3.2 Modelos de previsão de temperatura em revestimentos

A temperatura no pavimento pode ser obtida por medições em campo através da instrumentação da rodovia. Embora a temperatura medida em campo possa fornecer a temperatura real do pavimento a qualquer momento, essa não é uma opção viável em todas as rodovias devido a elevados custos relacionados a instalação e manutenção dos sensores e sistema de coleta de dados. O desenvolvimento de equações empíricas de temperatura pode fornecer uma alternativa econômica e rápida para se obter uma estimativa da temperatura real do pavimento (ASEFZADEH *et al.*, 2017).

Segundo Li *et al.* (2018) as abordagens para previsões de temperatura no pavimento asfáltico foram propostas por vários pesquisadores e podem ser divididas em duas categorias. A primeira é a abordagem analítica, baseada nas teorias de transferência de calor e propriedades de temperatura do pavimento. A segunda é o método estatístico, que usa modelos de regressão para obter relação entre a temperatura medida no pavimento e dados climáticos.

Barber (1957) fez um dos primeiros esforços para prever a temperatura máxima do pavimento com base nas condições climáticas e dados meteorológicos. A Equação 7 apresenta o modelo de Barber.

$$T = T_m + T_p \times \left\{ \frac{H \times e^{-xC}}{\sqrt{(H + C)^2 + C^2}} \right\} \times \text{sen} \left[0,262 \times t - xC - \text{arctg} \left(\frac{C}{H + C} \right) \right] \quad (7)$$

Onde:

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

T_m – temperatura do pavimento à profundidade média do ar junto à superfície, em °C;

T_v – amplitude ou variação máxima a 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 $J/(m^2 \cdot h \cdot ^\circ C)$;

k – condutividade térmica, em $J/(m^2 \cdot h \cdot ^\circ C)$;

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

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

c – capacidade calorífica específica, em $J/(kg \cdot ^\circ C)$;

w – massa específica ou densidade, em kg/m^3 .

O coeficiente de transmissão térmica (h) é obtido através da Equação 8.

$$h = 6,35 + 2,11 \times v^{3/4} \quad (8)$$

Onde:

h – coeficiente de transmissão térmica, em $kcal/m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$;

v – velocidade do vento, em km/h .

Devido à radiação solar incidente, a temperatura do ar em contato com a superfície do pavimento difere da temperatura do ar medida segundo as normas meteorológicas (um metro acima do solo e na sombra) (MOTTA, 1979). Assim, a temperatura média efetiva do ar é dada pela Equação 9, onde considera-se o efeito da radiação solar sobre a superfície.

$$T_m = T_A + R \quad (9)$$

Onde:

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

$R = p \times b \times (I/h)$, 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;

I – radiação solar, em $J/m^2.h$;

h – coeficiente de transmissão térmica, em $J/(m^2.h.^{\circ}C)$.

A amplitude máxima de temperatura do ar em relação a média (T_v) é dada pela Equação 10.

$$T_v = 0,5T_R + 3R \quad (10)$$

Onde:

T_R – amplitude da variação senoidal de temperatura do ar com o tempo, em $^{\circ}C$;

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

Ramadhan e Wahhab (1997) desenvolveram modelos de previsão de temperatura para pavimentos a partir de dados coletados em dois locais que representam o típico ambiente árido da Arábia Saudita. Esses locais representam a maioria das estruturas de pavimentos local. 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. As medidas foram realizadas durante 2 anos, seis vezes ao dia e cinco dias na semana.

A partir dos dados da temperatura os autores apresentaram a Equação 11 como modelo para estimar a máxima temperatura do pavimento a 2 cm de profundidade. Os autores ressaltam que o modelo pode ser utilizados na região da Arábia Saudita oriental.

$$PAV = 1,692 \times (AR) + 12,670 \quad (11)$$

Onde:

PAV – temperatura do pavimento a 2 cm de profundidade, em $^{\circ}C$;

AR – temperatura do ar, em $^{\circ}C$.

Park *et al.* (2011) desenvolveram um modelo estatístico de previsão de temperatura em função da profundidade. Os dados foram coletados de três seções

teste na cidade de Michigan. O principal objetivo do modelo é prever a temperatura no pavimento a qualquer hora do dia e ajustar as propriedades com retroanálise a partir do FWD. O modelo é apresentado na Equação 12.

$$T_z = T_{surf} + (-0,3451z - 0,0432z^2 + 0,00196z^3) \times \text{sen}(-6,3252t + 5,0967) \quad (12)$$

Onde:

T_z – temperatura do pavimento na profundidade z , em °C;

T_{surf} – temperatura na superfície do pavimento, em °C;

z – profundidade na qual a temperatura será determinada, em cm;

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, com dados coletados na pista experimental na cidade de Virginia, nos Estados Unidos. A temperatura do pavimento foi monitorada com auxílio de termopares, instalados em diversas profundidades, variando de 0,038 a 1,12 m. os autores consideraram a análise da radiação solar que pode ser determinada a partir da latitude e do dia do ano para que o modelo pudesse ser utilizados em outras localidades. A Equação 13 e 14 apresenta a previsão para temperatura máxima e mínima, respectivamente.

$$T_{p\ máx} = 2,78752 + 0,6861T_{a\ máx} + 5,6736 \times 10^{-4}R_s - 27,8739P_d \quad (13)$$

$$T_{p\ mín} = -1,2097 + 0,6754T_{a\ mín} + 3,7642 \times 10^{-4}R_s - 7,2043P_d \quad (14)$$

Onde:

$T_{p\ máx}$ – temperatura máxima do pavimento prevista, em °C;

$T_{a\ máx}$ – temperatura máxima diária do ambiente, em °C;

R_s – radiação solar diária calculada, em (kJ/m² dia);

P_d – profundidade, em m;

$T_{p\text{ mín}}$ – temperatura mínima do pavimento prevista, em °C;

$T_{a\text{ mín}}$ – temperatura mínima diária do ambiente, em °C.

Asefzadeh *et al.* (2017) desenvolveram modelos empírico estatísticos para previsão de temperatura do pavimento, com dados referente a 2 anos de um trecho experimental, localizado na cidade de Edmonton, no Canadá. A profundidade de coleta da temperatura foi de 2, 9, 17 e 25 cm, na camada de revestimento. Foram desenvolvidos modelos para a estação quente (abril a setembro) e para a estação fria (outubro a março) da região, apresentados nas Equações 15 e 16, respectivamente.

$$T_{\text{média diária}} = 3,9832 + 1,1288 (T_{ar}) + 2,68 \times 10^{-5}(SR) \quad (15)$$

$$T_{\text{média diária}} = -1,7853 + 0,6510(T_{ar}) + 3,37 \times 10^{-4}(SR) + 2,0326 \times D \quad (16)$$

Onde:

$T_{\text{média diária}}$ – temperatura média diária do revestimento asfáltico, em °C;

T_{ar} – temperatura do ar, em °C;

SR – radiação solar diária, em kJ/m²;

D – profundidade, em m.

Motta (1979) realizou medidas de temperatura no período de um ano, em um painel experimental na COPPE. A autora realizou medições em várias profundidades, limitadas pela espessura de 20 cm do revestimento asfáltico.

A partir de dados deste painel experimental, Régis M. Rodrigues desenvolveu a Equação 17, para determinar a temperatura do pavimento.

$$T(x) = T_{sup} + (T_{sup} - T_{ar})[1 - e^{(0,06855x - 0,002633x^2)}] \quad (17)$$

Onde:

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

T_{sup} – temperatura da superfície do pavimento;

T_{ar} – Temperatura do ar próxima ao pavimento.

Gonçalves *et al.* (2002), realizaram medições de temperatura com termômetro digital em 3 profundidades do revestimento, 3, 5 e 9 cm, trecho localizado na pista experimental da Área de Pesquisas e Testes de Pavimentos – UFRGS/DAER-RS. Através das leituras os autores obtiveram relações entre a temperatura do ar e do revestimento, conforme apresentado nas Equações 18 e 19.

$$T_{pav}(5cm) = 1,0469T_{ar} + 4,9618 \quad (18)$$

$$T_{pav}(9cm) = 0,9898T_{ar} + 4,0849 \quad (19)$$

2.4 AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXIVEIS

A avaliação das condições do pavimento compreende na avaliação funcional e estrutural. As avaliações são constituídas por um conjunto de atividades que visam descrever qualitativamente ou quantitativamente a condição do pavimento.

2.4.1 Avaliação funcional

Segundo Brasil (2006a), o desempenho funcional refere-se a capacidade do pavimento de satisfazer sua função principal, que é de fornecer superfície com serventia adequada em termos de qualidade de rolamento.

As análises da superfície de um pavimento envolvem informações a respeito de defeitos de superfície, irregularidades, aderência existente entre a interface pneu-pavimento.

2.4.1.1 Afundamento de trilha de roda

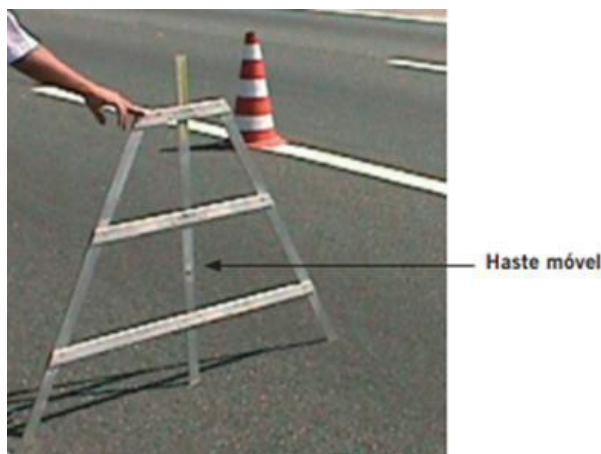
Os afundamentos de trilha de roda no pavimento estão diretamente relacionados a dois aspectos funcionais do pavimento, segurança e ao desconforto. A segurança está ligada ao risco de hidroplanagem em função do acúmulo de água

na trilha de roda do pavimento, o desconforto resulta em um aumento da irregularidade.

O afundamento de trilha de roda (ATR), ou flecha na trilha de roda, corresponde a depressão na superfície do pavimento ao longo da trilha dos pneus dos veículos. A causa desse defeito pode ser a fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento. Pode também ocorrer devido a consolidação diferencial das camadas do pavimento, denominado de afundamento de consolidação da trilha (BRASIL, 2003c).

O método de ensaio é de acordo com a norma DNIT 007/2003 – TER (BRASIL, 2003c), que estabelece que as medidas dos afundamentos de trilha de roda sejam executadas através de uma treliça metálica (Figura 24), padronizada, com 1,20 m de comprimento na base e dotada de uma régua móvel instalada em seu ponto médio. Essas medidas devem ser realizadas em milímetros nas trilhas de roda externa (TRE) e trilha de roda interna (TRI) da pista de rolamento.

Figura 24 – Treliça metálica para medida dos afundamentos de trilha de roda.



Fonte: Bernucci *et al.* (2010).

O Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (BRASIL, 2006a), define como limite o afundamento de trilha de roda máximo de 12mm, quando este valor é ultrapassado indica um comprometimento estrutural.

De acordo com Silva (2008), os valores críticos de ATR em relação a hidroplanagem são de 12 mm e 15 mm para velocidade de 120 km/h e 80km/h, respectivamente. O valor máximo de 10 mm para ATR em alguns países são

admitidos para autoestradas e para rodovias com menor volume de tráfego o limite é de 16 mm (MEDINA E MOTTA, 2015).

Segundo Hafeez (2009) a *Federal Highway Administration* classifica o ATR em três níveis de gravidade:

- Baixa: 6 a 12,5 mm;
- Média: 12,5 a 25 mm;
- Alta: mais de 25 mm.

O limite estabelecido pela ARTESP é um afundamento máximo de 7 mm, quando tem-se valores maiores é necessário uma intervenção na rodovia.

Segundo Faccin (2018), nos trechos concedidos no estado do Rio Grande do Sul, a ANTT especifica o limite de 5,0 mm como valor máximo da flecha admissível para a rodovia BR-290, sob concessão da CONCEPA, e para as rodovias BR-116 e BR-392, os limites são de 7,0 mm, sob concessão da Ecosul. Caso esses limites sejam ultrapassados é necessário uma intervenção na pista.

2.4.2 Avaliação Estrutural

Segundo Balbo (2007), a avaliação estrutural é um processo de caracterização dos elementos e variáveis estruturais, cujo objetivo é verificar o comportamento do pavimento perante as solicitações do tráfego e efeitos climáticos.

A avaliação estrutural do pavimento é a determinação da capacidade de desempenho estrutural, ou seja, é a capacidade do pavimento de manter sua integridade estrutural. É construída de análises das medidas de deslocamentos verticais recuperáveis da superfície do pavimento, quando submetido a um determinado carregamento (BRASIL, 2006a).

A avaliação estrutural do pavimento permite caracterizar os elementos e suas variáveis estruturais. Caracterizar a estrutura do pavimento implica a determinação dos materiais e espessuras que constituem cada camada do pavimento, incluindo solos e subleito, bem como a verificação em particular da medida de deformações.

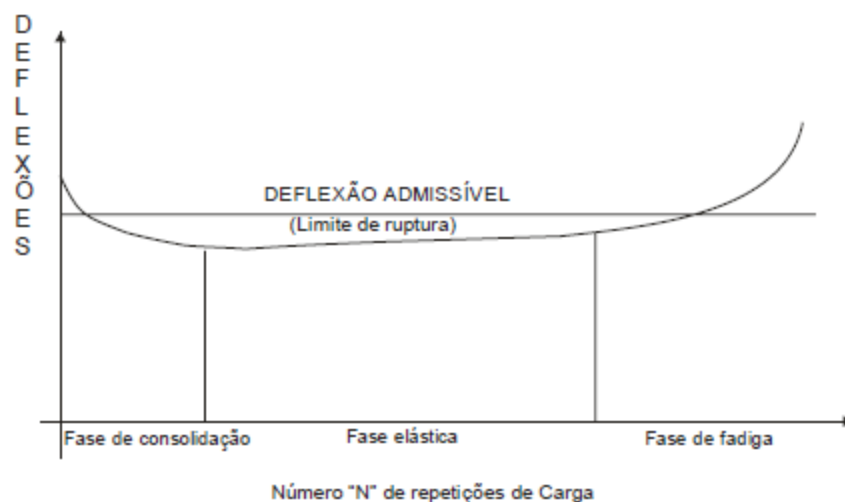
A avaliação estrutural está associada ao conceito de capacidade de carga, que pode ser vinculado diretamente ao projeto do pavimento e ao seu dimensionamento. Os defeitos estruturais resultam especialmente da repetição das cargas e vinculam-se às deformações elásticas ou recuperáveis e plásticas ou permanentes (BERNUCCI *et al.*, 2010).

De acordo com Bernucci *et al.* (2010), as deformações elásticas são responsáveis pelo surgimento da maior área de trincamento ao longo da vida do pavimento, podendo leva-lo a fadiga do revestimento. As deformações plásticas são acumulativas durante os anos de vida do pavimento e resultam em defeitos do tipo afundamento localizado normalmente nas trilhas de roda.

A ação das cargas de tráfego sobre os pavimentos asfálticos provoca deformações de dois tipos: permanentes e recuperáveis. As deformações permanentes são aquelas que permanecem mesmo após cessar o efeito da atuação da carga, são residuais. Tem-se como exemplo as deformações geradas nas trilhas de roda. As deformações recuperáveis são responsáveis pela parcela elástica do material, deixam de existir logo após a retirada da carga. Essas deformações provocam o arqueamento das camadas do pavimento, e sua repetição é responsável pelo fenômeno de fadiga das camadas betuminosas (BRASIL, 2006a).

A evolução das deflexões recuperáveis ao longo da vida de um pavimento pode se dar em três fases, como visto na Figura 25.

Figura 25 – Fases da vida de um pavimento.



Fonte: Adaptado de Brasil (2006a).

- a) Fase de consolidação: a deflexão decresce devido a consolidação adicional provocada pela ação do tráfego;
- b) Fase elástica: a deflexão permanece com valores praticamente constantes;
- c) Fase de Fadiga: caracteriza-se por um acelerado crescimento do valor da deflexão, devido à perda de capacidade estrutural das camadas do pavimento.

Segundo Bernucci *et al.* (2010) a avaliação estrutural pode ser feita por métodos destrutivo, semidestruutivo ou não destrutivo.

- O método destrutivo é aquele que investida a condição estrutural de cada camada que compõe o pavimento por abertura de trincheiras ou poços de sondagem, permitindo recolher amostras de cada material até o subleito e realizar ensaios de capacidade de carga in situ.
- O método semidestruutivo é aquele que se vale de aberturas menores de janelas no pavimento que permitem utilizar um instrumento portátil de pequenas dimensões.
- O método não-destrutivo é o mais adequado em grandes extensões de pistas pois acompanha a variação da capacidade de carga com o tempo.

2.4.3 Parâmetros de análise na avaliação estrutural

São obtidos a partir dos levantamentos deflectométrico parâmetros para a caracterização do comportamento estrutural do pavimento, dentre eles pode-se citar: deflexão máxima, raio de curvatura e os módulos de resiliência.

Segundo Bernucci *et al.* (2010), a deflexão máxima é o deslocamento sob o centro da carga (FWD) ou sob o centro das rodas duplas de um eixo simples (viga Benkelman). O seu valor está aliado com a deformabilidade elástica das camadas que arranjam o pavimento. De acordo com Brasil (2006a) quanto maior for a deflexão máxima, mais elástica é a estrutura, logo, maior é o comprometimento estrutural do pavimento.

O raio de curvatura mostra o arqueamento da deformada na sua porção mais crítica, geralmente considerada a 25 cm (d_{25}) do centro da carga, ele é um dos

parâmetros mais conhecidos relacionados a bacia de deformação, que de acordo com Bernucci *et al.* (2010), é composta pelas medidas dos deslocamentos recuperáveis em vários pontos a partir do centro do carregamento (d_0 , d_{25} , d_{50}). Borges (2001), salienta que sua forma é um importante fator que deve ser considerado na avaliação estrutural, pois é um indicativo da capacidade de cada camada do pavimento em distribuir as cargas para suas camadas subjacentes.

Através da retroanálise é possível obter outro fator importante da avaliação estrutural que é o módulo de resiliência. Por meio desta, é possível estimar por tentativas sucessivas os módulos das camadas do pavimento que reproduzem a bacia de deformação levantada em campo. Segundo Kakuda (2010) a retroanálise tem a finalidade de resolver o problema inverso em relação ao dimensionamento de um pavimento novo.

Bernucci *et al.* (2010), defende algumas vantagens da retroanálise em relação a outros métodos de avaliação, como a redução do número de sondagens para a determinação da espessuras e parâmetros desejados, ensaios mais rápidos e menos onerosos e a possibilidade de estimar os módulos nas condições de campo. Porém, existem também algumas desvantagens no método, dependendo do software utilizado os módulos podem variar, os módulos de elasticidade retroanalisados não são exatamente os módulos reais dos materiais das camadas e sim “módulos equivalentes” e a confiabilidade dos instrumentos e dos procedimentos operacionais de medição das deflexões deve ser continuamente verificada.

2.5 RESUMO DA REVISÃO DE LITERATURA

Os principais pontos para o desenvolvimento da presente pesquisa são:

- A modificação de ligantes asfálticos, principalmente com uso de polímeros, como o CAP HiMA, podem trazer ganhos no desempenho. Espera-se que ocorra um aumento significativo nas propriedades elásticas dos ligantes e aumento na resistência à fadiga e à deformação permanente. A adição de outros materiais como SBS, borracha de pneu moída também agregam resistência ao ligante. Assim, é importante que haja comparação de desempenhos dos diferentes materiais.

- No dimensionamento, é buscado uma estrutura que suporte os esforços causados pelo tráfego, clima durante o período de projeto. Porém, sabe-se que em

campo as condições são diferentes das condições enfrentadas em laboratório, assim é necessário o uso de um fator campo/laboratório para prever o desempenho do pavimento. O que faz com que avaliações periódicas em campo sejam de grande importância.

- A avaliação funcional está relacionada principalmente com o conforto e segurança ao rolamento, pode ser realizada através de levantamento de defeitos, irregularidade, afundamento de trilha de roda. A avaliação estrutural está relacionada a capacidade de suporte de carga, o principal levantamento a ser realizado são as deflexões.

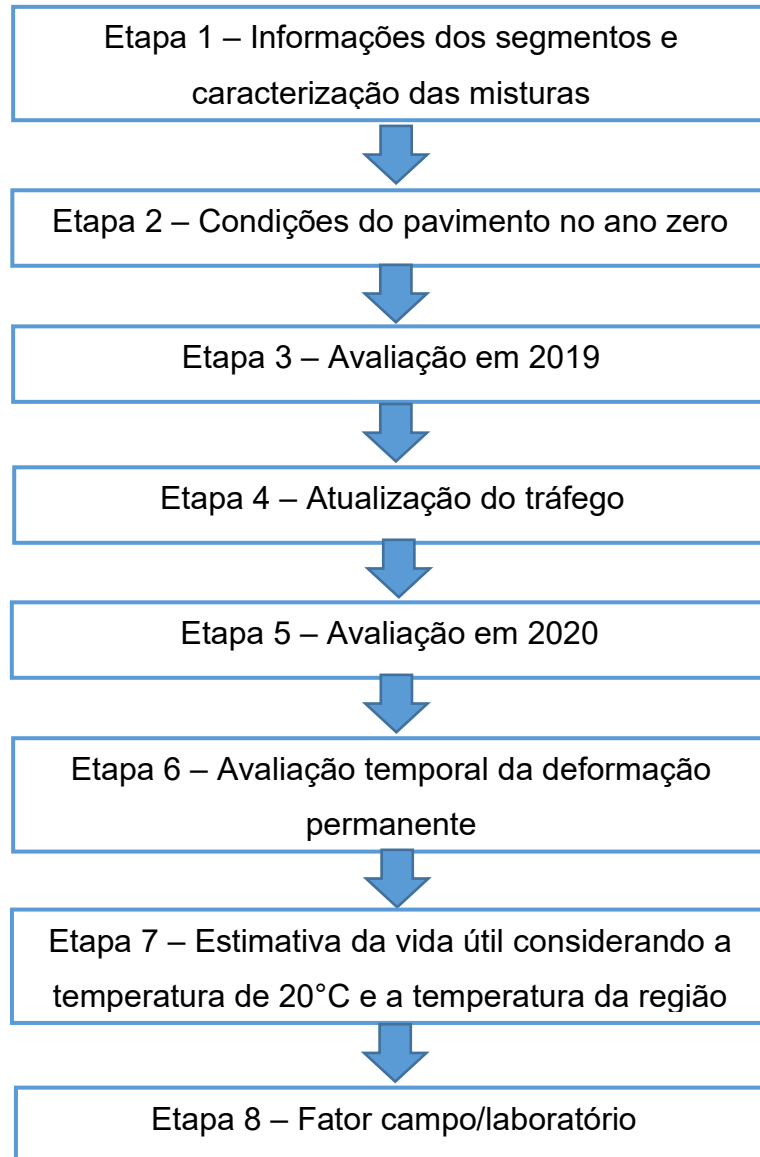
- A deformação permanente e o trincamento por fadiga são os principais defeitos encontrados em pavimentos. Assim, vê-se a importância de novos estudos e monitoramentos, para melhorar as misturas e diminuir a ocorrência desses defeitos.

- Considerar a temperatura do revestimentos nos projetos, pode levar a dimensionamentos mais precisos e pavimentos mais duráveis.

3 MÉTODO DA PESQUISA

Para alcançar os objetivos propostos a pesquisa foi dividida em 8 etapas, descritas no fluxograma da Figura 26.

Figura 26 – Fluxograma das etapas desta pesquisa.



Fonte: Elaboração da autora (2021).

3.1 ETAPA 1 – INFORMAÇÕES DOS SEGMENTOS MONITORADOS

Os segmentos monitorados estão localizados entre os municípios de São Joaquim e Painel – SC. Nesta etapa, são apresentadas informações sobre a localização e características da região. Os dados foram obtidos de Silva (2018).

3.2 ETAPA 2 – CONDIÇÕES DO PAVIMENTO NO ANO ZERO

Nesta etapa foram apresentados resultados referentes ao projeto de restauração da rodovia SC-114 que interliga os municípios de São Joaquim e Painel. No projeto de restauração está apresentado o tráfego previsto para a região, as características dos ligantes e o projeto das misturas asfálticas.

Na caracterização das misturas asfálticas, Silva (2018) realizou ensaios de módulos resilientes, determinação da resistência a fadiga das misturas asfálticas e a determinação da resistência a deformação permanente. Também é apresentado nesta etapa o controle tecnológico da execução, o controle deflectométrico e a macrotextura superficial do pavimento.

3.3 ETAPA 3 – AVALIAÇÃO EM 2019

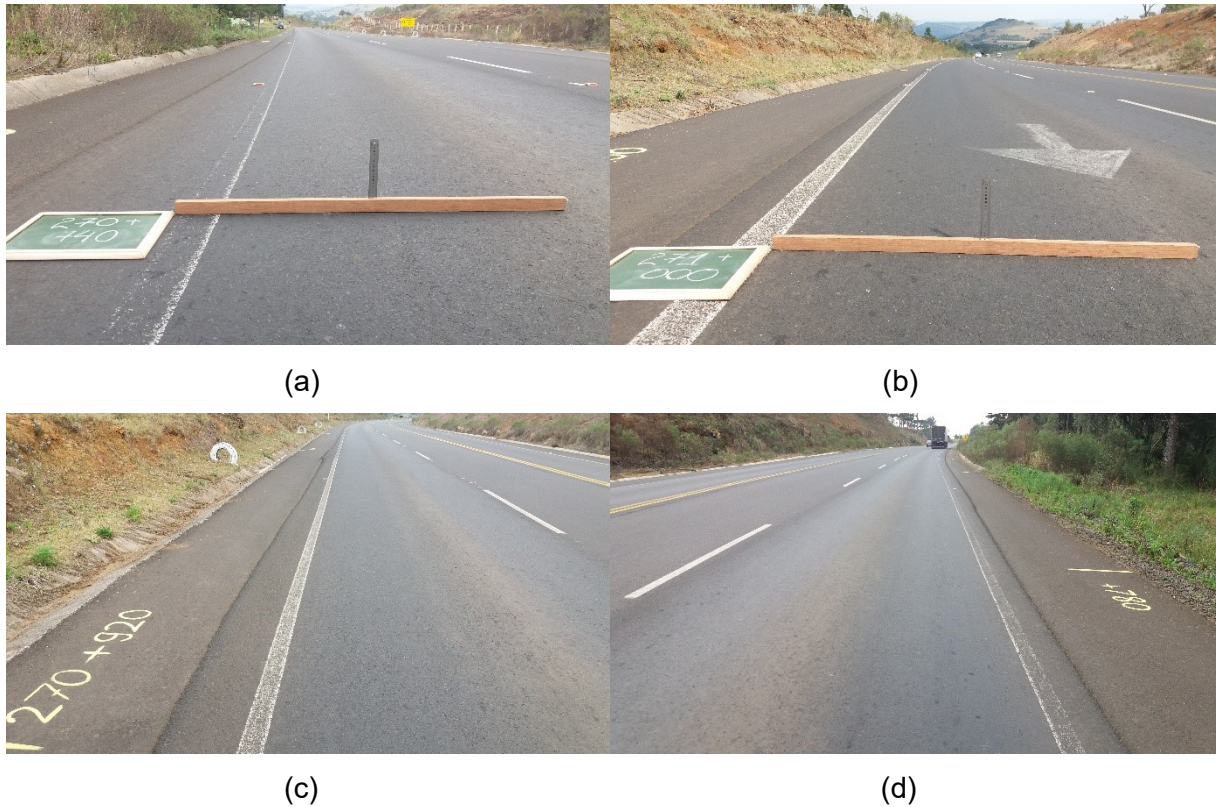
Em setembro de 2019, realizou-se o levantamento do afundamento de trilha de roda (ATR) e do inventário de defeitos de superfície, correspondente a 50 meses após a abertura ao tráfego. Os dados deste levantamento estão apresentados no Apêndice A.

Os procedimentos executados seguem as normas descritas abaixo:

- Inventário de defeitos: DNIT 006/2003 – Avaliação objetiva de pavimentos flexíveis e semirrígidos – 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*;

A Figura 27 apresenta os levantamentos realizados.

Figura 27 – Levantamento em 2019: (a) e (b) afundamento de trilha de roda e (c) e (d) inventário de defeitos.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

O levantamento de defeitos foi realizado na terceira faixa. Os afundamentos de trilha de roda (ATR) foram medidos na trilha de rodagem externa, a cada 20 m. Posteriormente, foi calculado o afundamento médio e o desvio padrão para cada segmento. Os dados do levantamento foram divididos em cinco categorias: $ATR < 2$ mm; $2 \text{ mm} \leq ATR < 4$ mm; $4 \text{ mm} \leq ATR < 7$ mm; $7 \text{ mm} \leq ATR < 12$ mm; $12 \text{ mm} \leq ATR < 20$ mm; na sequência, foi calculada a porcentagem representativa de afundamento em cada categoria.

3.4 ETAPA 4 – ATUALIZAÇÃO DO TRÁFEGO

Nesta etapa foi realizada uma atualização do tráfego previsto no projeto de restauração da rodovia. A partir de uma nova contagem, empregando as taxas de crescimento foi possível fazer uma caracterização dos veículos e estimar o número

de solicitações do eixo padrão ($N_{8,2tf}$), no qual o pavimento estará submetido até do fim do período de projeto no ano de 2024.

A contagem volumétrica do tráfego foi realizada de acordo com o procedimento indicado no Manual de Estudo de Tráfego do DNIT (DNIT, 2006c). A contagem foi realizada em setembro de 2020, teve caráter quantitativo e classificatório dos veículos, foi realizada durante três dias consecutivos (terça, quarta e quinta feira), das 06:00 horas da manhã as 19:00 horas de cada dia em ambos sentidos de rolamento, conforme Figura 28.

Figura 28 – Contagem de tráfego realizada em 2020.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

A determinação do número $N_{8,2t}$ foi feita também contemplando as metodologias da USACE (Corpo de Engenheiros do Exército Americano) e da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*). A Tabela 2 demonstra as taxas de crescimento adotadas no Projeto de reabilitação da SC-114.

Tabela 2 – Taxas de crescimento anuais de tráfego.

Categoria dos Veículos	Taxa de Crescimento % aa		
	2007/2011	2012/2015	2016/2023
Carros	4,7	3,2	1,5
Ônibus	1,4	1,5	1,8
Veículos de carga 1 (Pequenos e Médios)	4,7	4,3	4,4
Veículos de carga 2 (Grandes)	4,8	4,3	4,5

Fonte: Adaptado de Projeto de reabilitação da SC-114, trecho Painel-São Joaquim (2012).

Para estimar os volumes médios diários (VMD) foram utilizados fatores de correção horária, diária e mensal adotados pelo Projeto de Reabilitação da Rodovia SC-114, com dados fornecidos pelo DEINFRA, atual SIE (Secretaria de Estado da Infraestrutura e Mobilidade). O fator de expansão horária tem como objetivo corrigir a contagem nos dias em que ela é realizada somente para 13 horas. Os fatores de correção diária e mensal buscam eliminar os fatores de sazonalidade que ocorrem durante a semana e ao longo do ano, na Tabela 3 estão apresentados os fatores utilizados nesta pesquisa.

Tabela 3 – Fatores de correção utilizados.

Fator de expansão horária (FEH)		
1,31		
Fator diário (FD)		
Terça	Quarta	Quinta
0,88	1,03	1,04
Fator Mensal (FM)		
Setembro	0,96	
Outubro	0,99	

Fonte: Adaptado de Projeto de reabilitação da SC-114, trecho Painel-São Joaquim (2012).

Os métodos da Associação Norte-Americana de Especialistas Rodoviários e de Transporte (AASHTO) e do Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE), foram utilizados para calcular os fatores de veículo para estimar o número de solicitações do eixo padrão no ano de 2020, considerando as cargas para cada eixo apresentadas no Manual de Estudo de Tráfego do DNIT (DNIT, 2006c).

Durante a contagem de tráfego foram feitas duas considerações, a primeira de que os veículos observados que trafegavam com eixos suspensos fossem considerados descarregados, classificando-os como caminhões vazios, e a segunda

considerando que os veículos que não trafegavam com os eixos suspensos estavam trafegando com a carga máxima legal por eixo.

3.5 ETAPA 5 – AVALIAÇÃO EM 2020

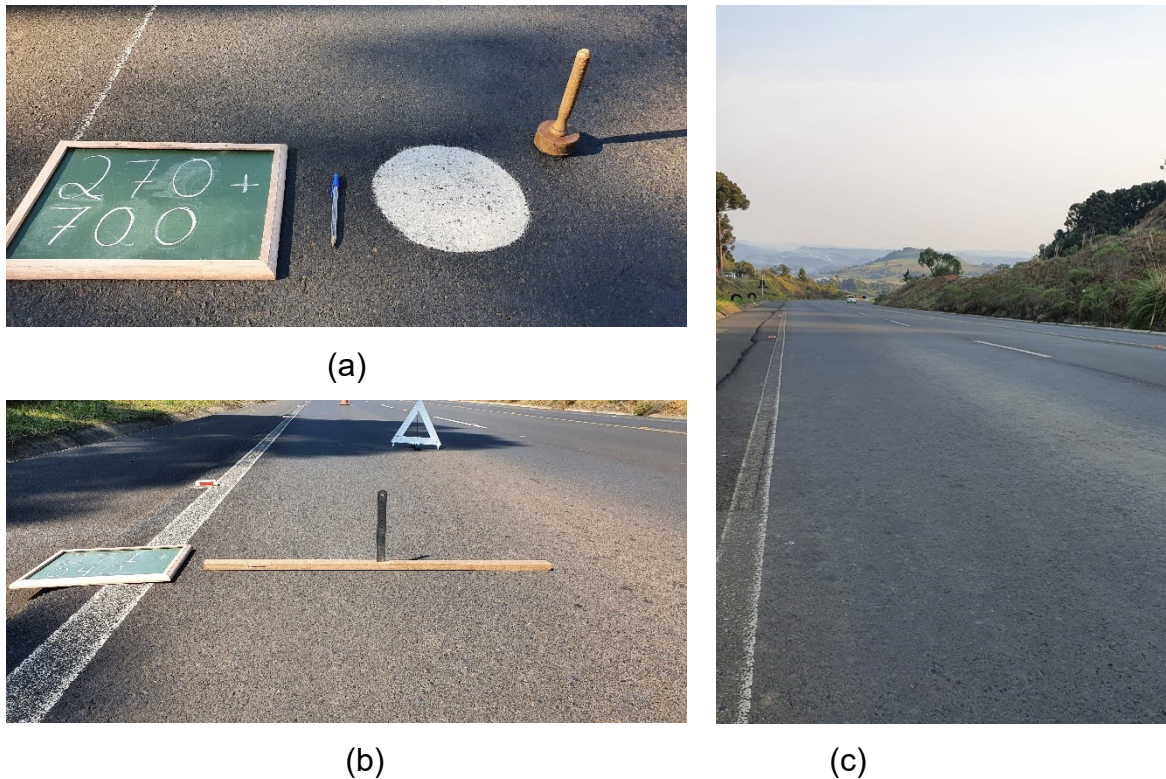
Em outubro de 2020, foi realizado o levantamento do afundamento de trilha de roda (ATR), inventário de defeitos de superfície e medida da macrotextura do revestimento, correspondente a 62 meses após a abertura ao tráfego. Todos os levantamentos e medidas foram realizados somente na terceira faixa que é objeto de avaliação nesta pesquisa.

Os procedimentos foram executados segundo as seguintes normas:

- Inventário de defeitos: DNIT 006/2003 – Avaliação objetiva de pavimentos flexíveis e semirrígidos – Procedimentos.
- Afundamento de trilha de roda: ASTM E 1703/E 1703M (2015) – *Standart Test Method for Measuring Rut-Depth of Pavement Surfaces Using a Straightedge*;
- Macrotextura: ASTM E 965 (2015) – *Standart Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique*;

A Figura 29 mostra os levantamentos sendo realizados.

Figura 29 – Levantamentos em 2020: (a) mancha de areia (b) afundamento de trilha de roda e (c) inventário de defeitos.



(a)

(b)

(c)

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

O levantamento de defeitos foi realizado na terceira faixa em seções a cada 20 metros assim como os levantamentos anteriores.

Os afundamentos de trilha de roda (ATR) foram medidos na trilha externa, a cada 20 m, e calculado o afundamento médio e o desvio padrão para cada segmento.

Os ensaios de Mancha de Areia, foram realizados distantes 20 m entre si. Com os dados levantados em campo, foi calculado o valor médio de altura de mancha de areia (HS).

3.6 ETAPA 6 – AVALIAÇÃO TEMPORAL DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Na Etapa 6 desta pesquisa foi analisada a evolução ao longo do tempo e em função do tráfego acumulado, de parâmetros como afundamento de trilha de roda. Foi comparado aos limites estabelecidos pelo DNIT. Nesta avaliação foram considerados levantamentos realizados em 2016, 2019 e 2020.

3.7 ETAPA 7 – ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL CONSIDERANDO A TEMPERATURA DE 20°C E A TEMPERATURA DA REGIÃO

Esta etapa teve a finalidade de prever o número de solicitações do eixo padrão de 8,2 tf necessárias para que ocorra a ruptura por fadiga do revestimento asfáltico. As simulações numéricas desta etapa foram conduzidas com auxílio do *software* ViscoRoute. O *software* considera o comportamento viscoelástico das misturas asfálticas através dos parâmetros reológicos do modelo de Huet-Sayegh.

As deformações de tração obtidas foram aplicadas nas curvas de desempenho a fadiga das misturas HiMA-6,0% e SBS-6,0% para comparar com o número $N_{8,2t}$, obtido do Projeto de Reabilitação da Rodovia SC-114.

O comportamento reológico das misturas na simulação numérica foi representado pelo modelo físico de Huet-Sayegh. Este modelo descreve o comportamento de misturas asfálticas para baixos níveis de deformação em qualquer faixa de frequência e temperatura. O modelo é descrito de acordo com a Equação 5 e os parâmetros utilizados nesta pesquisa foram ajustados pela autora a partir de dados de Silva (2018) e podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros viscoelásticos de Huet-Sayegh.

Parâmetros	Mistura asfáltica	
	SBS-6,0%	HiMA-6,0%
E_0 (MPa)	38,27	19,44
E_∞ (MPa)	38733,90	33910,20
delta	1,55258	1,46235
k	0,13534	0,11789
h	0,54342	0,48876
A0	2,26107	2,44267
A1	-0,468853	-0,456046
A2	0,0032889	0,0031102

Fonte: Silva (2018).

Os parâmetros elásticos adotados para as camadas de base, sub-base e subleito são aqueles apresentados no Projeto de Reabilitação da Rodovia SC-114 e no trabalho realizado por Silva (2018), e estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros das camadas remanescentes.

Camada	Comportamento da camada	Espessura (cm)	Módulo resiliente (MPa)	Poisson
Capa de rolamento	viscoelástico	4,0	*	0,30
Camada de SAMI	elástico	2,0	1897**	0,30
Revestimento antigo	elástico	1,0	3103	0,32
Base de BGS	elástico	12,0	269	0,35
Sub-base	elástico	23,0	209	0,35
Subleito	elástico	∞	165	0,45

*Módulo complexo da camada viscoelástica.

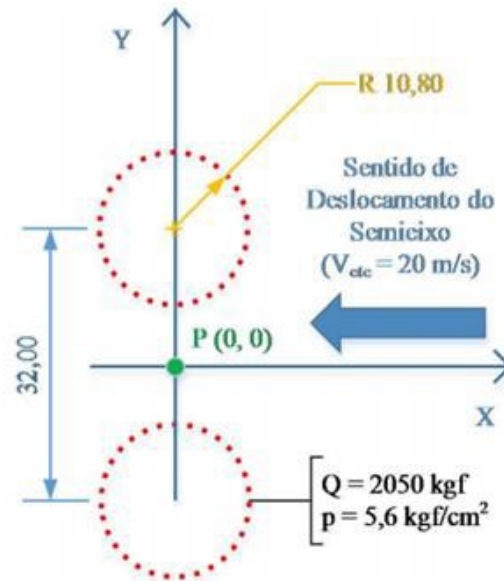
**Resultado de ensaios realizados pela empresa executora na UFPR.

Fonte: Adaptado de Projeto de Reabilitação da SC-114 (2012).

Nesta estimativa, a temperatura de referência na simulação numérica é de 20°C, e para as simulações considerando a temperatura variável, a mesma foi calculada conforme descrito a seguir utilizando o modelo de Barber, no qual foi calculado a temperatura na camada inferior do revestimento asfáltico. Em relação ao carregamento foi considerado o eixo padrão de 8,2 tf, aplicado a uma frequência de 10 Hz, equivalente a velocidade de 72 km/h em campo.

A Figura 30 ilustra que para o carregamento foi considerado o semieixo do padrão rodoviário (8,2 tf), com distância entre as rodas de 32 cm, carga por roda de 2050 kgf e pressão de enchimento dos pneus de 5,6 kgf/cm².

Figura 30 – Configuração do carregamento (semieixo de roda dupla).



Fonte: Melo (2014).

Em cada simulação numérica foi determinada uma deformação específica de tração na fibra inferior da camada de revestimento (ϵ_t). Estas deformações foram aplicadas nos modelos de fadiga, para estimar a vida útil do revestimento. Nesta etapa foi considerado um fator campo/laboratório igual a 1.

Foi avaliado nesta etapa o efeito da variação de temperatura no desempenho a fadiga dos segmentos monitorados do trecho da SC-114 entre Painel e São Joaquim – SC.

Primeiramente foram determinados os segmentos de análise durante o dia, onde aqui será chamado de “intervalo de análise”. Esses intervalos foram determinados com base na distribuição horária de temperatura. Para cada intervalo, foi calculada a temperatura média do ar e estimada a temperatura no revestimento. Em seguida, foram realizadas simulações das estruturas com variação de temperatura ao longo do ano e com temperatura constante de 20°C (temperatura em que foram realizados os ensaios de fadiga em laboratório). A deformação específica de tração em cada simulação foi determinada e utilizada nos modelos de fadiga das misturas para estimar o número de solicitações de tráfego para a ruptura. Com a distribuição

de tráfego e o número de solicitações para a ruptura foram realizados o cálculo do acúmulo de dano ao longo o período de projeto.

O dano acumulado foi calculado considerando a variação de temperatura do revestimento asfáltico e também para a temperatura constante de 20°C, com objetivo de verificar a influência a temperatura no desempenho dos dois segmentos.

3.7.1 Variação da temperatura do ar durante o dia

Os dados históricos de temperatura do ar de 2008 a 2019 foram obtidos da estação meteorológica automática de São Joaquim. Na Tabela 6 estão apresentadas informações quanto a sua localização.

Tabela 6 – Informações da estação meteorológica de São Joaquim.

Altitude	1410 m
Latitude	28°16'S
Longitude	49°56'W

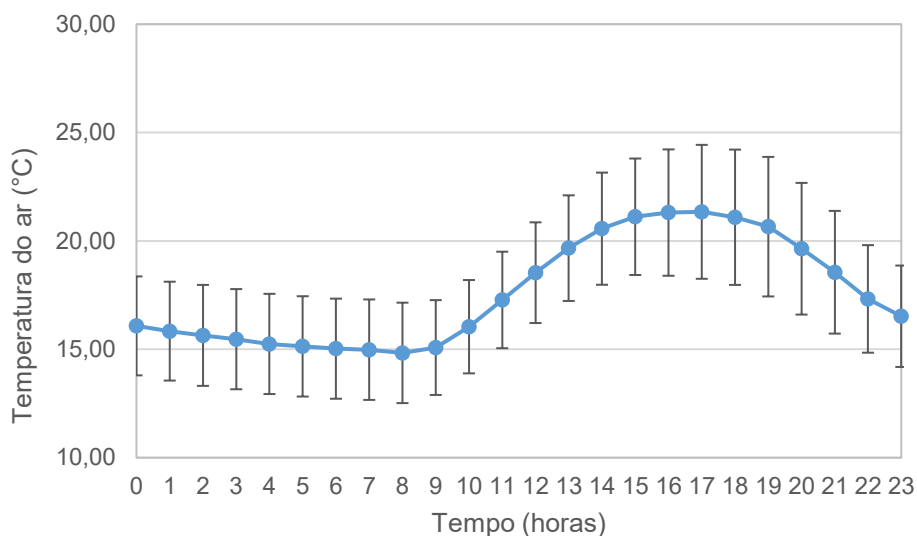
Fonte: Elaborado pela Autora (2021) com dados de INMET (2019).

De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a região de São Joaquim é uma das mais frias do Brasil, com temperaturas que chegam a -9°C e não ultrapassa os 35°C e sua média anual fica em torno de 14°C.

Com os dados de temperatura do ar obtidos pelo banco de dados do INMET, foi calculado a média horária de temperatura do ar para cada mês do ano. Os dados brutos primeiramente foram separados por mês, por exemplo, todos os meses de janeiro desde 2008 até 2019, foram agrupados para serem analisados com conjunto, em seguida o mesmo procedimento foi realizado para os doze meses do ano.

Em seguida foi calculada a temperatura média do ar e o desvio padrão para cada hora do dia, como visto na Figura 31, a média horária de temperatura e desvio padrão para todos os meses de janeiro.

Figura 31 – Média horária de temperatura do ar nos meses de janeiro (2008-2019).



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

O Apêndice C apresenta o mesmo procedimento realizado para os demais meses do ano, onde foi calculada a temperatura média do ar e o desvio padrão.

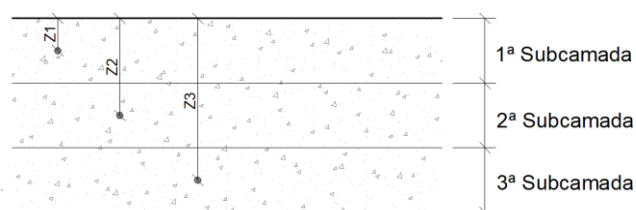
3.7.2 Cálculo da temperatura do revestimento

Dentre os modelos apresentados no item 2.3.2 nesta pesquisa o modelo escolhido para o cálculo da temperatura do revestimento foi o modelo de Barber, visto que o modelo permite utilizar dados meteorológicos como dados de entrada, devido a necessidade de se calcular a temperatura em diferentes profundidades do pavimento. O modelo apresentado na Equação 7, prevê 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 durante a noite ocorre o inverso, a temperatura aumenta com a profundidade.

A princípio para se calcular a temperatura no pavimento foi calculada a temperatura média do ar em cada intervalo de análise para os doze meses do ano, desde o ano de 2008 até 2019.

A temperatura no revestimento asfáltico varia com a profundidade, então o revestimento foi dividido em subcamadas, como pode ser visto na Figura 32, a temperatura foi calculada com a profundidade do centro de cada subcamada, sendo considerada constante dentro da mesma, a espessura adotada foi de 2 cm, totalizando três subcamadas. A Tabela 7 apresenta a espessura das subcamadas consideradas.

Figura 32 – Esquema de revestimento asfáltico dividido em subcamadas com as profundidades de cálculo de temperatura.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Tabela 7 – Espessura das subcamadas dos segmentos monitorados.

	Espessura da camada (cm)	Espessura das subcamadas (cm)		
		1ª	2ª	3ª
HiMA	6,00	2,00	2,00	2,00
SBS	6,00	2,00	2,00	2,00

Fonte: Elaborado pela Autora (2021).

A temperatura foi calculada no centro de cada subcamada do revestimento asfáltico em cada intervalo de análise ou seja nos três períodos do dia, em cada mês do ano. Devido à falta de dados como condutividade térmica e capacidade calorífica específica do ligante HiMA, foram utilizados dados do ligante CAP 50/70, para realização dos cálculos de temperatura do revestimento.

3.7.3 Influência da temperatura na deformação de tração no revestimento

O *software* ViscoRoute foi utilizado para verificar a influência da temperatura na deformação do revestimento, pois leva em consideração as características viscoelásticas da mistura asfáltica por meio de parâmetros reológicos. O *software* considera o módulo da mistura asfáltica de acordo com a temperatura determinada

nos dados de entrada da simulação. Cada subcamada do revestimento foi lançada na estrutura da simulação computacional com a sua respectiva temperatura calculada no final da camada de revestimento.

Foi verificada a deformação na fibra inferior da camada asfáltica para ambos segmentos para cada configuração de temperatura. Foi também realizado a simulação numérica do pavimento com apenas uma temperatura. A modelagem da estrutura dos segmentos no *software* Viscoroute, se deu com os mesmo parâmetros adotados anteriormente, porém, com a temperatura constante de 20°C.

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

As deformações obtidas no *software* Viscoroute foram aplicadas nos modelos de fadiga determinados em laboratório. Os ensaios foram realizados por Silva (2018) e seu modelo está apresentado na Tabela 8

Tabela 8 – Modelos de fadiga das misturas dos segmentos de São Joaquim.

Mistura asfáltica	Temperatura	Equação de fadiga	R ²
HiMA-6,0%	20°C	$N=6,81 \times 10^{17} \cdot \epsilon^{-4,99}$	0,89
SBS-6,0%	20°C	$N=2,60 \times 10^{18} \cdot \epsilon^{-5,54}$	0,97

Fonte: Elaborado pela Autora (2021) com dados de Silva (2018).

Existem apenas modelos de fadiga para a temperatura de 20°C e não para cada temperatura calculada no revestimento, então para alcançar o objetivo desta etapa que é verificar a influência da temperatura, foram utilizados os modelos disponíveis com o propósito de comparar os resultados considerando a variação da temperatura com os resultados de uma temperatura fixa.

3.7.5 Estimativa do dano acumulado no período de projeto

Para se calcular o dano acumulado o volume de tráfego obtido pelo Projeto de reabilitação da SC-114, trecho Painel-São Joaquim (2012) foi primeiramente dividido pelo número de dias do ano, para se encontrar uma estimativa de tráfego por dia, como visto na Tabela 9. Vale ressaltar que os valores até o ano 2019 são do Projeto de reabilitação da rodovia, a partir de 2020 foram utilizados os dados da contagem realizada em 2020.

Tabela 9 – Tráfego anual de projeto e tráfego considerado por dia.

Ano	Valores do Número "N"	
	USACE	
	Anual	Tráfego por dia
2015	$8,80 \times 10^5$	$2,41 \times 10^3$
2016	$9,18 \times 10^5$	$2,51 \times 10^3$
2017	$9,57 \times 10^5$	$2,62 \times 10^3$
2018	$9,98 \times 10^5$	$2,73 \times 10^3$
2019	$1,04 \times 10^6$	$2,85 \times 10^3$
2020	$7,04 \times 10^5$	$1,92 \times 10^3$
2021	$7,35 \times 10^5$	$2,01 \times 10^3$
2022	$7,66 \times 10^5$	$2,10 \times 10^3$
2023	$8,00 \times 10^5$	$2,19 \times 10^3$
2024	$8,34 \times 10^5$	$2,28 \times 10^3$

Fonte: Elaborado pela Autora (2021) com dados de Projeto de reabilitação da SC-114, trecho Painel-São Joaquim (2012).

Como não se tem dados de contagem de tráfego horária, o mesmo foi dividido em três partes iguais, conforme foram divididos os períodos do dia para o cálculo da temperatura do pavimento. Desta forma com o volume de tráfego e o número de repetições para atingir a ruptura referente a cada período do dia, foi estimado o dano acumulado utilizando a hipótese de Miner, apresentado na Equação 20. O procedimento foi o mesmo para a temperatura constante e para a variação de temperatura.

$$D = \sum_{i=1}^M \frac{N_i}{N_{fi}} \quad (20)$$

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 .

3.7.6 Estimativa de vida útil para o dano acumulado igual a 1

Foram realizadas duas combinações de acúmulo de dano para comparar a influência dos parâmetros adotados na estimativa de vida útil do pavimento.

A primeira combinação (Combinação 1), considerou-se: - a curva de fadiga obtida em ensaio realizado à 20°C; o tráfego com distribuição constante ao longo do dia, por não ter uma distribuição horária; temperatura a constante de 20°C.

Para a Combinação 2, considerou-se: - a curva de fadiga obtida em ensaio realizado à 20°C; - tráfego constante durante o dia; temperatura no pavimento com variação sazonal, conforme apresentado na seção 3.8.1, onde foi calculada a temperatura em cada subcamada do revestimento asfáltico para cada mês do ano.

As simulações numéricas (com temperatura constante e temperatura variável no revestimento), foram conduzidas conforme descrito na seção 3.8.3. A deformação específica de tração calculada com *software* Viscoroute foi utilizada na curva de fadiga para se estimar o número de solicitações para ruptura (N_f).

Com o objetivo de encontrar o número de solicitações do eixo padrão que levaria à ruptura considerando o N_f e a porcentagem de tráfego adotada nas Combinações 1 e 2, foi utilizada a hipótese de Miner do dano acumulado (Equação 20), porém considerando as condições de porcentagem de tráfego analisadas nesta etapa, conforme Equação 21.

$$D = \sum_{i=1}^M \frac{p_i N}{N_{fi}} \quad (21)$$

Onde:

D – dano;

M – número total de períodos;

P_i – porcentagem de passagens de tráfego que ocorrem quando pavimento está na temperatura i ;

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 .

Igualando-se o dano acumulado a 1, tem-se a Equação 22.

$$N = \frac{1}{\sum_{i=1}^M \frac{p_i}{N_{fi}}} \quad (22)$$

Onde:

N – número total de passagens de tráfego (para dano acumulado igual a 1).

Desta forma foi verificada a influência da alteração de cada parâmetro na estimativa de vida útil do pavimento.

3.8 ETAPA 8 – FATOR CAMPO/LABORATÓRIO

Esta etapa consiste em estabelecer uma tentativa de relacionar a estimativa de vida útil obtida por ensaios em laboratório com desempenho que é observado em campo em segmentos monitorados. O parâmetro de desempenho adotado é a porcentagem de área trincada no segmento monitorado. A partir da porcentagem de área trincada obtida em campo e o respectivo tráfego acumulado na data da sua determinação, procedeu-se à modelação dos resultados definindo-se a relação entre

a estimativa da vida útil obtida na simulação numérica e o tráfego atuante para a respectiva porcentagem de área medida.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1 ETAPA 1 – INFORMAÇÕES DOS SEGMENTOS MONITORADOS

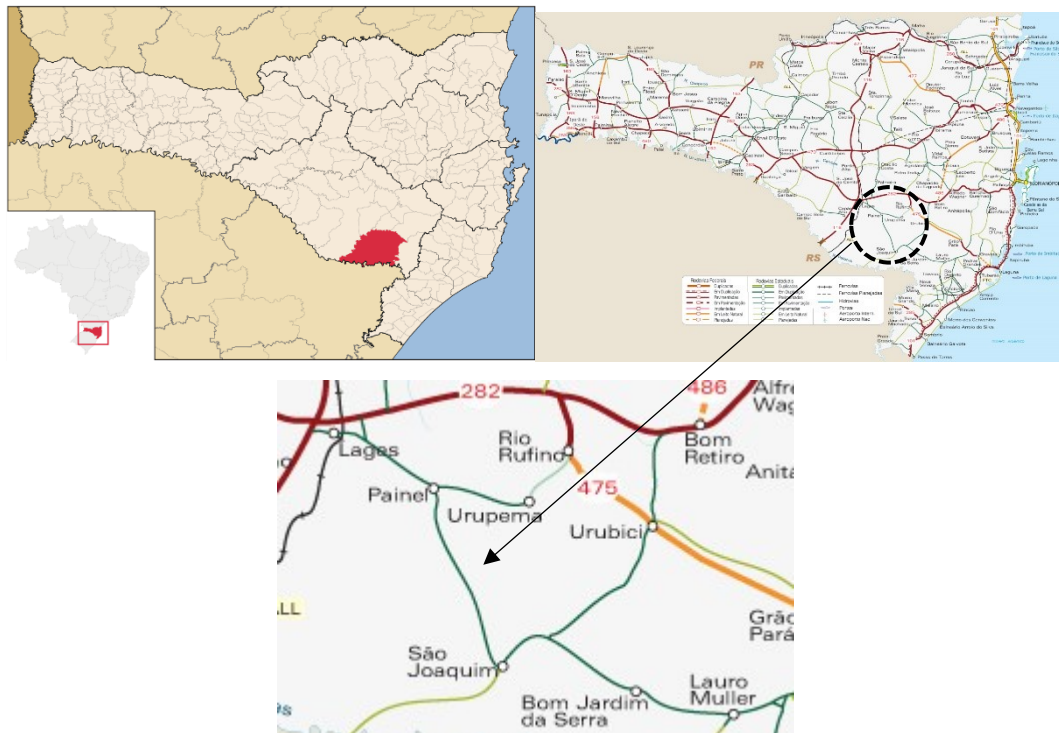
4.1.1 Localização e identificação dos segmentos monitorados

Em 2015, o Departamento Estadual de Infraestrutura - DEINFRA, atual Secretaria de Estado da Infraestrutura e Mobilidade – SIE, deu início a reabilitação do pavimento da Rodovia SC-114, no trecho entre os municípios de Painel e São Joaquim, localizados na região serrana no Estado de Santa Catarina. Os segmentos monitorados, objeto desta pesquisa estão localizados em terceira faixa (faixa adicional), com aclive de 6,0%.

A Rodovia SC-114 se desenvolve em uma região ondulada com rampas de longas extensões com aclives de até 6,0%. Isto faz com que veículos pesados alcancem baixas velocidades, favorecendo o aparecimento precoce de trilhas de rodas.

Os segmentos monitorados, com 280 metros cada um, foram nomeados como SBS-6,0% e HiMA-6,0%, representando o tipo de ligante e o teor de ligante da mistura empregada no segmento. A Figura 33 mostra a localização esquemática dos segmentos.

Figura 33 – Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

4.1.2 Informações Gerais

O pavimento da rodovia SC-114 apresentava em 2012 (ano da elaboração do projeto final de engenharia para sua restauração) altas deflexões e uma elevada porcentagem de área trincada. Portanto, o projeto contemplava agregar capacidade estrutural para o novo ciclo de vida da rodovia.

Inicialmente, havia sido projetada uma solução de reciclagem contemplando a trituração do revestimento e uma parte da camada de base existentes com adição de 3% de cimento para a restauração da rodovia, e, revestimento em asfalto borracha. Porém, durante a execução, a alternativa contemplada no projeto foi alterada e a solução adotada para a recuperação do revestimento da rodovia foi a fresagem da camada do revestimento asfáltico antigo e a execução de duas camadas de mistura asfáltica, sendo uma com 2,0 cm de espessura (faixa granulométrica de SAMI, com teor de 6,5% de ligante), e a segunda, com 4,0 cm de espessura, (faixa granulométrica

VI do DEINFRA, com teor de 6,0% de ligante), tendo como diferencial o uso do ligante HiMA, que seria utilizado pela primeira vez no estado de Santa Catarina.

Segundo o relatório do Projeto de Restauração, a região ondulada associada a elevadas temperaturas no verão, fazia com que os revestimentos em misturas convencionais aplicados na região apresentassem precocemente afundamento de trilha de roda. Este foi o principal motivo para o uso de um ligante altamente modificado – HiMA, que tem grande capacidade de resistir a deformação permanente e também seu desempenho superior quanto à fadiga.

Considerando-se que na época da execução não havia uma especificação para o HiMA, foi proposto a empresa executora a implementação de um segmento experimental com o CAP 60/85-E. O CAP 60/85-E também apresenta boa capacidade de resistir à deformação permanente, tendo a vantagem de ter uma especificação brasileira.

Os dois ligantes também apresentariam uma elevada capacidade de resistir ao trincamento por fadiga. Desta forma, a execução do segmento com SBS 60/85-E também permitiria um comparativo de desempenho em relação ao comportamento à fadiga do revestimento.

Os teores de ligante das misturas foram mantidos em 6,0% de ambos para evitar interferência da granulometria.

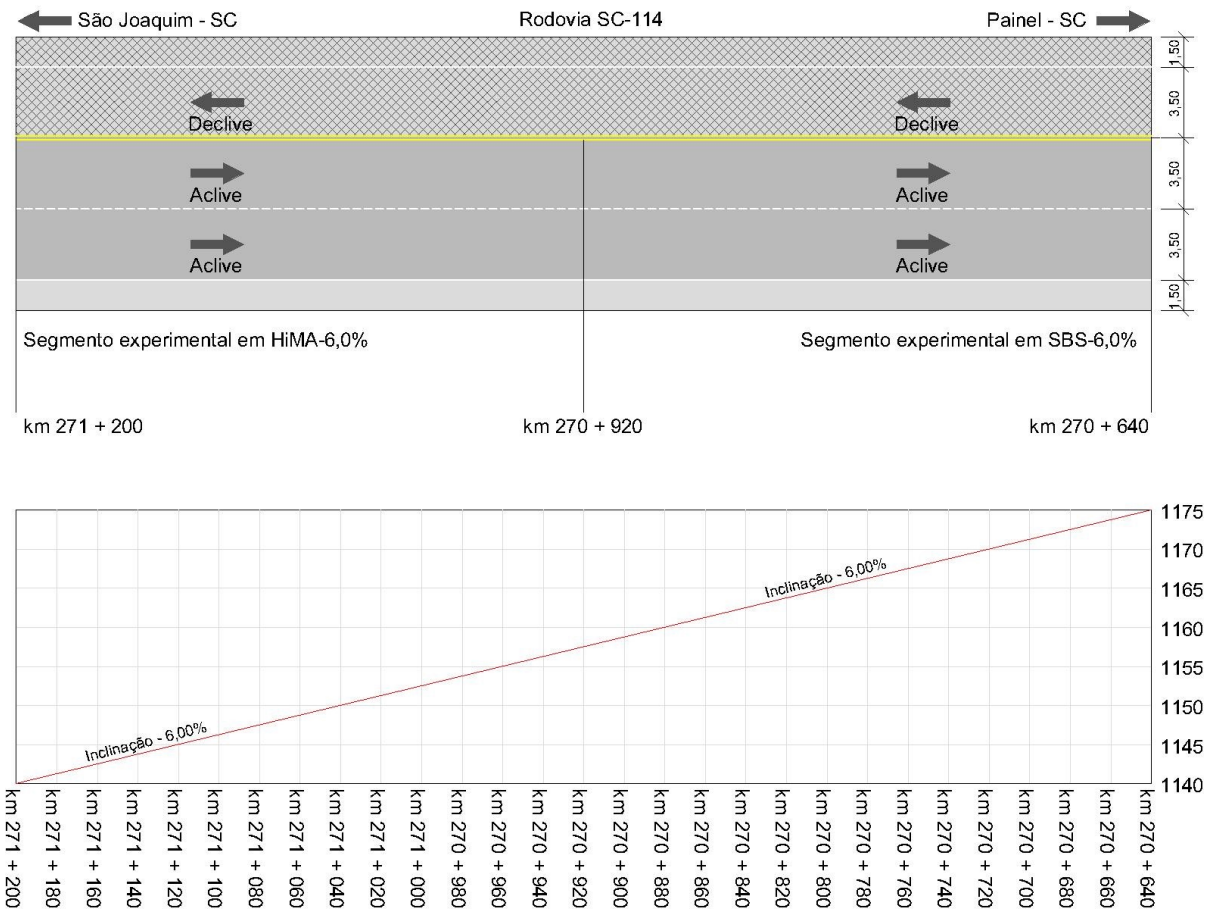
A Tabela 10 apresenta a disposição dos segmentos experimentais e a Figura 34 ilustra como estão executados em campo.

Tabela 10 – Localização dos segmentos experimentais.

Descrição	Coordenadas			
	Local	km	Latitude	Longitude
Início segmento experimental SBS-6,0%		270+640	28°3'36.72"S	50°4'25.38"O
Fim segmento experimental SBS-6,0%		270+920	28°3'45.69"S	50°4'24.17"O
Início segmento experimental HiMA-6,0%		270+920	28°3'45.69"S	50°4'24.17"O
Fim segmento experimental HiMA-6,0%		271+200	28°3'54.76"S	50°4'23.64"O

Fonte: Adaptado de Silva (2018).

Figura 34 – Desenho esquemático dos segmentos experimentais



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

4.1.3 Características da região

4.1.3.1 Topografia

Como já mencionado os segmentos foram executados em um trecho da rodovia que possui faixa adicional e rampa de 6,0%. O início do segmento experimental SBS-6,0% possui cota de 1.173,40 m, decrescendo em 6,0% até atingir o fim do trecho HIMA-6,0% com a cota de 1.140,00 m, totalizando um desnível de 33,00 m. De acordo com Silva (2018) os segmentos monitorados estão inseridos na parte final de um longo trecho em rampa de 6,0%, com extensão de 3,6 km. Não há variações de inclinação da rampa na extensão do trecho, o que possibilita a

manutenção de uma velocidade baixa e praticamente constante dos caminhões quando passa pelos segmentos monitorados.

4.1.3.2 Temperatura do ar

A Tabela 11 apresenta o histórico da medição da temperatura do ar entre os anos de 1961 à 2016, da estação meteorológica de São Joaquim. Os dados apresentam as médias observadas em cada mês. É possível notar que entre os meses de maio e agosto, que são os meses mais frios do ano, as médias variam entre 10,3°C a 11,6°C.

Tabela 11 – Temperaturas médias ao longo do ano (1961-2016).

Mês	Máxima do mês (°C)	Mínima do mês (°C)	Máxima média (°C)	Mínima média (°C)	Média do mês (°C)
Janeiro	27,10	7,42	22,23	12,61	17,42
Fevereiro	27,15	8,50	22,03	12,98	17,50
Março	25,97	6,93	20,91	12,01	16,46
Abril	24,00	3,28	18,35	9,60	13,97
Maio	21,57	0,25	15,66	7,43	11,55
Junho	20,56	-1,80	14,37	6,38	10,37
Julho	21,00	-2,72	14,52	6,04	10,28
Agosto	23,45	-1,61	16,04	6,57	11,31
Setembro	24,74	-0,59	16,53	7,52	12,03
Outubro	25,09	2,31	18,23	8,87	13,55
Novembro	25,86	4,27	19,89	10,04	14,96
Dezembro	27,24	6,07	21,58	11,64	16,61
Média Geral	24,48	2,69	18,36	9,31	13,83
Desvio Padrão	2,40	3,97	2,93	2,55	2,73

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia (2016) *apud* Silva (2018).

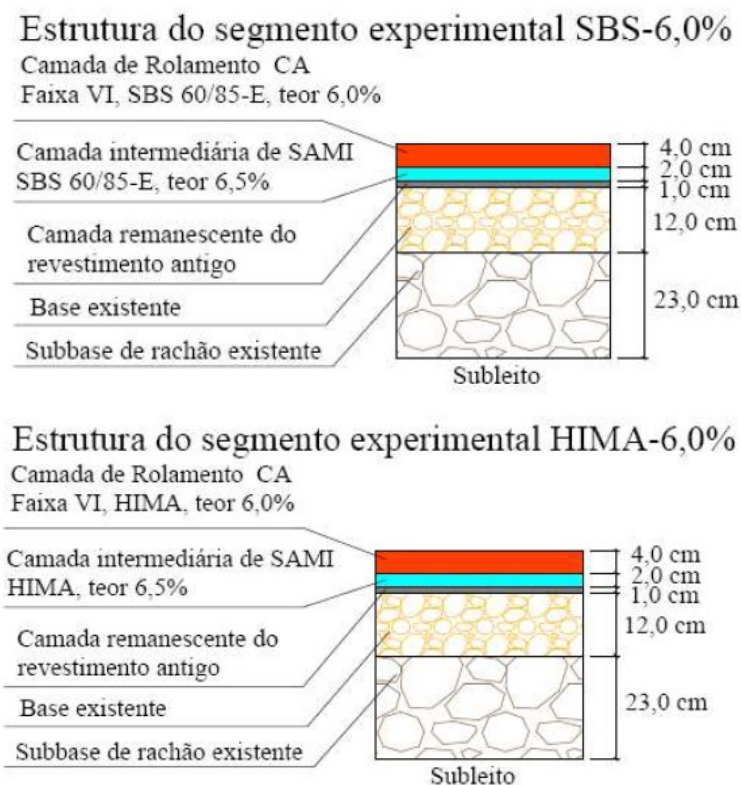
4.2 ETAPA 2 – CONDIÇÕES DO PAVIMENTO NO ANO ZERO

4.2.1 Projeto de restauração

De acordo com Silva (2018), o projeto original desenvolvido pela empresa Engevix SA (2012), contemplava a reciclagem profunda do revestimento e da base com adição de cimento.

Com a mudança da alternativa de restauração, as camadas de base, sub-base e subleito não sofreram alterações em relação às suas espessuras. A camada de revestimento antiga foi fresada parcialmente, mantendo-se cerca de 1,0 cm da espessura existente com o objetivo de manter a estabilidade e compactação da camada de base (SLVA, 2018). A Figura 35 apresenta a estrutura dos dois segmentos monitorados, contemplando nova alternativa de restauração.

Figura 35 – Perfil das estruturas dos segmentos monitorados.



Fonte: Silva (2018).

A estrutura do pavimento no restante do trecho restaurado contemplava a estrutura do segmento monitorado com HiMA, ilustrado na Figura 35.

4.2.1.1 Tráfego Previsto em projeto

A determinação do número $N_{8,2t}$ – Número de Repetições do Eixo Padrão de 8,2 tf, foi feita com base da Instrução de Serviço DER IS 02/98, contemplando as metodologias da USACE (Corpo de Engenheiros do Exército Americano) e da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*). A Tabela 12 apresenta as previsões para as duas metodologias.

Tabela 12 – Número N previsto para os dez anos de projeto.

Ano	Valores do Número "N"			
	USACE		ASSHTO	
	Ano a Ano	Acumulado	Ano a Ano	Acumulado
2015	$8,80 \times 10^5$	$8,80 \times 10^5$	$2,90 \times 10^5$	$2,90 \times 10^5$
2016	$9,18 \times 10^5$	$1,80 \times 10^6$	$3,03 \times 10^5$	$5,93 \times 10^5$
2017	$9,57 \times 10^5$	$2,76 \times 10^6$	$3,16 \times 10^5$	$9,09 \times 10^5$
2018	$9,98 \times 10^5$	$3,75 \times 10^6$	$3,29 \times 10^5$	$1,24 \times 10^6$
2019	$1,04 \times 10^6$	$4,80 \times 10^6$	$3,43 \times 10^5$	$1,58 \times 10^6$
2020	$1,09 \times 10^6$	$5,88 \times 10^6$	$3,58 \times 10^5$	$1,94 \times 10^6$
2021	$1,13 \times 10^6$	$7,01 \times 10^6$	$3,74 \times 10^5$	$2,31 \times 10^6$
2022	$1,18 \times 10^6$	$8,20 \times 10^6$	$3,90 \times 10^5$	$2,70 \times 10^6$
2023	$1,23 \times 10^6$	$9,43 \times 10^6$	$4,07 \times 10^5$	$3,11 \times 10^6$
2024	$1,29 \times 10^6$	$1,07 \times 10^7$	$4,24 \times 10^5$	$3,53 \times 10^6$

Fonte: Adaptado de Projeto de reabilitação da SC-114, trecho Painel-São Joaquim (2012).

4.2.2 Caracterização dos ligantes

Os ligantes utilizados são o CAP HiMA e o CAP SBS 60/85-E, ambos fornecidos pela empresa Compasa do Brasil Distribuidora de Derivados de Petróleo.

Os resultados dos ensaios de caracterização realizados no ligante CAP 60/85-E, estão apresentados na Tabela 13 e na Tabela 14, os ensaios foram realizados pela própria empresa distribuidora.

Tabela 13 – Resultados do ligante CAP 60/85-E.

Método	Características	Unid.	CAP AMP 60/85-E		
			Valores especificados		
			Mín.	Máx.	Resultado
NBR-6576	Penetração (100 g, 5s, 25°C)	0,1 mm	40	70	50,0
NBR-6560	Ponto de amolecimento, mín	°C	60	-	63,0
NBR-11341	Ponto de fulgor, mín	°C	235	-	312,0
NBR-15166	Ensaio de separação de fase, máx.	°C	-	5	0,5
NBR-15086	Recuperação elástica a 25° C, 20 cm, mín.		85	-	87,0
Viscosidade aparente com viscosímetro Brookfield					
NBR-15184	a 135°C, spindle 21, 20 rpm, máx	cP	-	3000	880,0
NBR-15184	a 150°C, spindle 21, 50 rpm, máx	cP	-	2000	375,0
NBR-15184	a 175°C, spindle 21, 100 rpm, máx	cP	-	1000	169,0
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C, 85 minutos					
NBR-15235	Varição em massa, máx.	% massa		1	0,0
NBR-6560	Varição do ponto de amolecimento, máx.	°C	-5	7	0,5
NBR-6576	Porcentagem de penetração original, mín	%	60		63,6
NBR-15086	Porcentagem de recuperação elástica original a 25°C, mín	%	80		95,9

Fonte: Adaptado de Certificado de controle de qualidade Compasa (2015) *apud* Silva (2018).

Tabela 14 – Temperatura de usinagem e compactação do CAP 60/85-E
(Recomendado pela fornecedora).

Resultado do ensaio de viscosidade				
Temperatura (°C)	Viscosidade (SSF)		Viscosidade (cP)	
135	416,5		880,0	
155	183,1		375,0	
175	87,9		169,0	
Determinação das temperaturas				
Características	Faixa de Viscosidade (SSF)		Faixa de Temperatura (°C)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Usinagem	125	152	160	165
Compactação	249	305	142	147

Fonte: Adaptado de Certificado de controle de qualidade Compasa (2015) *apud* Silva (2018).

Como já mencionado, o ligante HiMA não tem especificação brasileira. Os ensaios de caracterização do HiMA foram os mesmos que são utilizados para a caracterização de ligantes modificados por polímero elastomérico pela especificação brasileira DNIT 129 – EM – Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico. A Tabela 15 e Tabela 16, apresentam os ensaios de caracterização do ligante HiMA e as temperaturas de usinagem e compactação recomendados pela empresa fornecedora, respectivamente.

Tabela 15 – Resultados do ligante CAP HiMA.

Método	Características	Unid.	CAP HiMA		
			Valores especificados		
			Mín.	Máx.	Resultado
NBR-6576	Penetração (100 g, 5s, 25°C)	0,1 mm	40	70	48,0
NBR-6560	Ponto de amolecimento, mín	°C	80	-	86,0
NBR-11341	Ponto de fulgor, mín	°C	235	-	308,0
NBR-15166	Ensaio de separação de fase, máx.	°C	-	5	0,5
NBR-15086	Recuperação elástica a 25° C, 20 cm, mín.		95	-	96,0
Viscosidade aparente com viscosímetro Brookfield					
NBR-15184	a 135°C, spindle 21, 20 rpm, máx	cP	-	3000	1689,0
NBR-15184	a 150°C, spindle 21, 50 rpm, máx	cP	-	2000	676,0
NBR-15184	a 175°C, spindle 21, 100 rpm, máx	cP	-	1000	283,0
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C, 85 minutos					
NBR-15235	Varição em massa, máx.	% mass a		1	0,1
NBR-6560	Varição do ponto de amolecimento, máx.	°C	-5	7	0,5
NBR-6576	Porcentagem de penetração original, mín	%	60	-	66,8
NBR-15086	Porcentagem de recuperação elástica original a 25°C, mín	%	80	-	97,1

Fonte: Adaptado de Certificado de controle de qualidade Compasa (2015) *apud* Silva (2018).

Tabela 16 – Temperatura de usinagem e compactação do CAP HiMA
(Recomendado pela fornecedora).

Resultado do ensaio de viscosidade				
Temperatura (°C)	Viscosidade (SSF)		Viscosidade (cP)	
135	790,5		1689,0	
155	322,2		676,0	
175	140,6		283,0	
Determinação das temperaturas				
Características	Faixa de Viscosidade (SSF)		Faixa de Temperatura (°C)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Usinagem	125	152	173	179
Compactação	249	305	155	160

Fonte: Adaptado de Certificado de controle de qualidade Compasa (2015) *apud* Silva (2018).

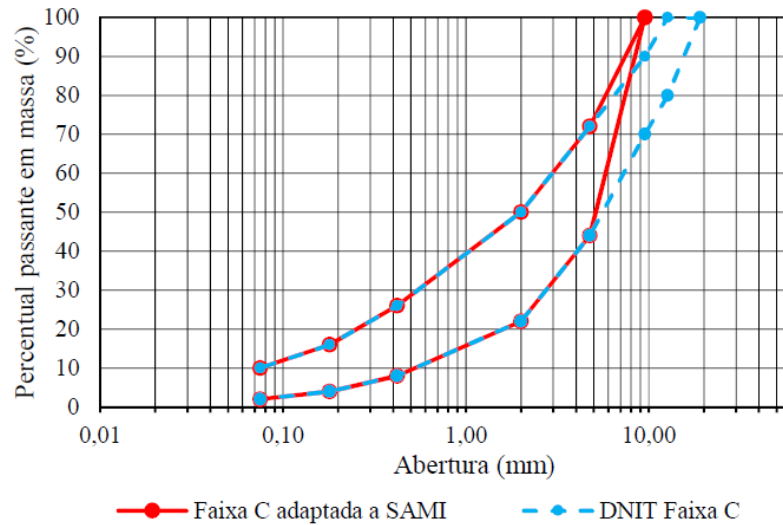
Segundo os resultados apresentados, é possível verificar que o ligante HiMA apresenta o dobro da viscosidade do ligante SBS 60/85-E. Seu ponto de amolecimento é bem mais elevado que o ligante SBS 60/85-E e maior também é a recuperação elástica. É de se esperar que em campo o ligante HiMA apresente, então, um desempenho muito superior ao ligante SBS 60/85-E quanto à deformação permanente. A recuperação elástica apresentada por ambos ligantes é elevada, porém a do HiMA é maior que sugere um melhor desempenho à fadiga destas misturas asfálticas.

4.2.3 Projeto das misturas asfálticas

4.2.3.1 Mistura asfáltica tipo SAMI

Com o objetivo de retardar a propagação de fissuras da camada remanescente de revestimento para o revestimento novo, foi projetada uma mistura para ser empregada como camada intermediária antirreflexão de trincas. Essa mistura se enquadra na faixa granulométrica “C” da especificação do DNIT 031/2006 – ES Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico, com tamanho máximo do agregado graúdo de 9,5mm. A Figura 36 mostra a curva granulométrica desta mistura (SILVA, 2018).

Figura 36 – Intervalo entre as faixas C DNIT e a proposta para SAMI.

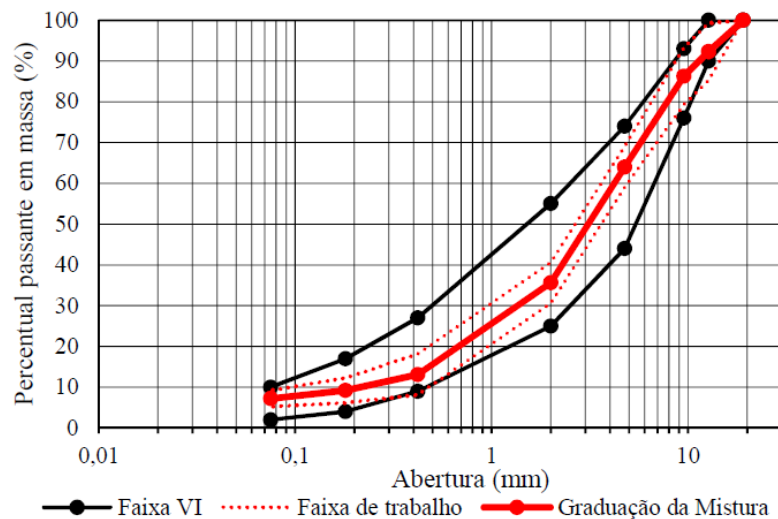


Fonte: Adaptado de Projeto de Mistura Asfáltica (2015) *apud* Silva (2018).

4.2.3.2 Misturas asfálticas para camada de rolamento

A faixa granulométrica das misturas para a camada de rolamento se enquadra na faixa VI do DEINFRA (atual Secretaria de Estado da Infraestrutura e Mobilidade - SIE). A Figura 37 apresenta seu enquadramento (SILVA, 2018).

Figura 37 – Curva granulométrica da mistura com a faixa VI



Fonte: Adaptado de Projeto de Mistura Asfáltica (2015) *apud* Silva (2018).

4.2.4 Caracterização das misturas asfálticas

4.2.4.1 Módulos resilientes obtidos em laboratório

A Tabela 17 apresenta a média dos resultados de módulo resiliente obtidos dos corpos de prova com a mistura asfáltica tipo faixa VI, para a mistura asfáltica tipo SAMI (ambas com ligante HiMA), estes ensaios foram realizados de acordo com Silva (2018) no Laboratório de Asfaltos e Materiais para Pavimentação da Universidade Federal do Paraná. O valor apresentado de módulo resiliente para a mistura com a Faixa VI e teor de 6,0% de ligante SBS 60/85-E, os ensaios foram realizados no laboratório de pavimentação da UFSC.

Tabela 17 – Módulos resilientes das misturas empregadas.

Mistura	Módulo resiliente (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
HiMA (6,0%)	3247*	118
SBS (6,0%)	5399**	111
SAMI (HiMA, 6,5%)	1897*	83

*Ensaio realizado no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Paraná.

**Ensaio realizado no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina.

Fonte: Elaborada pela autora (2021), com dados de Silva (2018).

Segundo Silva (2018), os módulos obtidos para as misturas HiMA-6,0% e SAMI com 6,5% de teor de ligante HiMA foram obtidos durante a execução da obra de restauração. É importante observar que os corpos de prova foram moldados para o ensaio, ao contrário da mistura SBS-6,0%, onde o módulo foi obtido no laboratório de pavimentação da UFSC com corpos de prova extraídos por sonda rotativa.

A mistura tipo SAMI apresentou o menor valor de módulo resiliente e pode ser considerada a mistura mais deformável, visto que sua função é absorver as movimentações do revestimento remanescente.

O módulo resiliente das misturas HiMA-6,0% e SBS-6,0% não será utilizado no desempenho entre as misturas, será utilizado o módulo complexo encontrado por Silva (2018), que representa melhor as características viscoelásticas das misturas

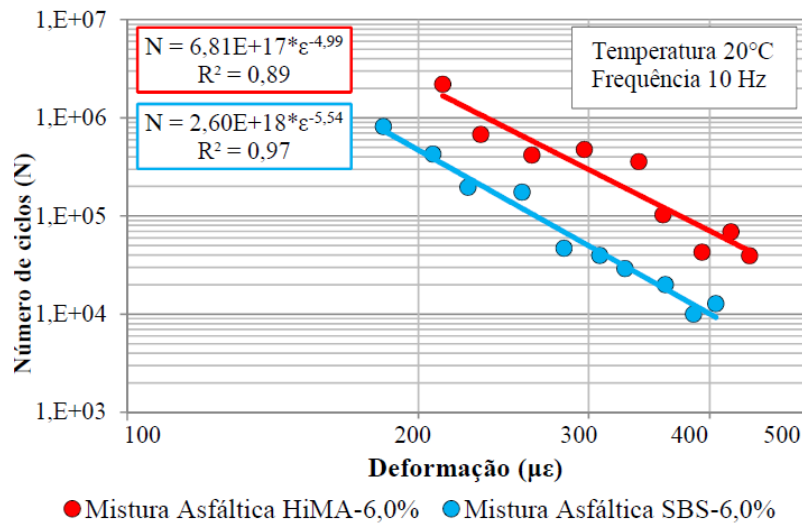
asfálticas. O módulo resiliente da mistura tipo SAMI será utilizado apenas para efeito de simulação.

4.2.4.2 Determinação da resistência à fadiga das misturas asfálticas

O ensaio de fadiga a 4 pontos foi realizado segundo a especificação EN 12697-24 (2004) e definindo-se como critério de ruptura a perda de 50% da rigidez inicial da mistura. Foram utilizados corpos de prova serrados de placas retiradas dos segmentos monitorados. Não foram realizados ensaios de fadiga com a mistura SAMI.

Na Figura 38 estão apresentadas as curvas obtidas para mistura HiMA-6,0% e SBS-6,0%.

Figura 38 – Comparação das duas curvas de fadiga das duas misturas.

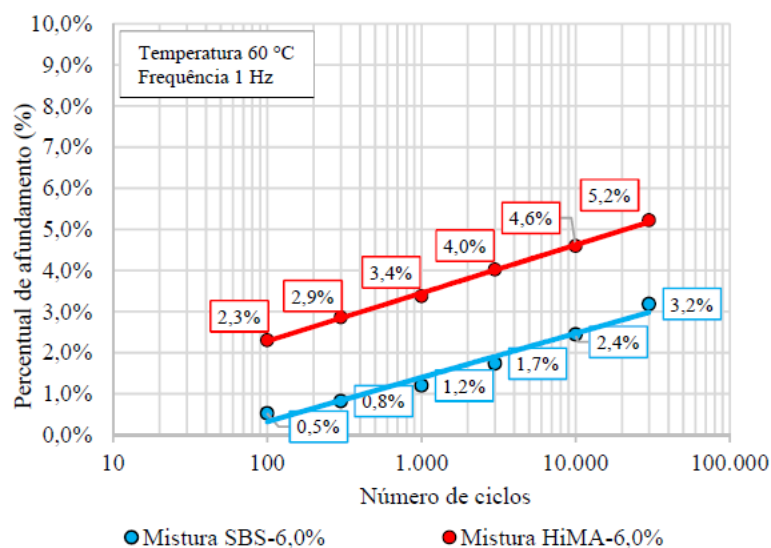


Fonte: Silva (2018).

4.2.4.3 Determinação da resistência à deformação permanente

O ensaio de deformação permanente foi realizado com o equipamento francês *Orniéreur*, seguindo a especificação NF P98-253-1 (1991). No ensaio, mede-se o percentual de afundamento da trilha de roda até a aplicação de 30.000 ciclos. A temperatura do ensaio é de 60°C. A Figura 39 apresenta a evolução do afundamento das duas misturas estudadas.

Figura 39 – Deformação permanente das misturas asfálticas.



Fonte: Silva (2018).

Os resultados mostram que embora o ligante HiMA apresente melhores resultados de recuperação elástica, ponto de amolecimento e viscosidade, porém para o ensaio de deformação permanente da mistura os melhores resultados, ou seja, menores percentuais de afundamento da trilha de roda, foram obtidos na mistura SBS.

Ressalta-se que ambas misturas atendem aos critérios de deformação permanente da norma francesa para rodovias de médio a elevado volume de tráfego.

4.2.5 Controle tecnológico da execução

4.2.5.1 Controle deflectométrico

O controle deflectométrico durante o processo executivo foi realizado empregando a viga Benkelman.

O levantamento deflectométrico foi realizado por Silva (2018) no período inicial de abertura ao tráfego (6 meses) (Janeiro de 2016) e 16 meses após a liberação ao tráfego (Novembro de 2016). A Tabela 18 apresenta os resultados obtidos. Como os segmentos possuem duas faixas de rolamento no mesmo sentido de deslocamento, a terceira faixa é considerada para atuação do tráfego pesado.

Tabela 18 – Resumo das deflexões características ($\times 10^{-2}$ mm), na faixa da esquerda e terceira faixa.

Segmento	Capa Asfáltica Período Inicial (Jan./2016)		Capa Asfáltica (Nov./2016)	
	Faixa Esquerda	Terceira Faixa	Faixa Esquerda	Terceira Faixa
SBS-6,0%	50,1	50,8	54,3	52,8
HiMA-6,0%	39,9	40,4	38,7	35,9

Fonte: Silva (2018).

Esperava-se que a deflexão no segmento com HiMA fossem menores pois os valores de Módulo Resiliente desta mistura foram muito menores que a mistura SBS. Ressalta-se, entretanto, que os ensaios de módulo do HiMA foram realizados em outro laboratório e, muito provavelmente, o valor do módulo de resiliência desta mistura não seja tão baixo como os mostrados na Tabela 18.

4.2.5.2 Macrotextura superficial

O ensaio de mancha de areia foi utilizado para determinação da textura do pavimento, com o objetivo de acompanhar a condição da superfície dos segmentos monitorados (SILVA, 2018).

O ensaio de mancha de areia realizado por Silva (2018), classifica o trecho como fina ou fechada, para ambos segmentos experimentais. As menores alturas de mancha (Hs) foram da mistura SBS-6,0%. O intervalo de segurança de acordo com o DNIT é $0,60 < Hs < 1,20$ mm, porém como os segmentos estão localizados onde a variação geométrica horizontal é pequena, se torna confortável ao rolamento e favorável a segurança.

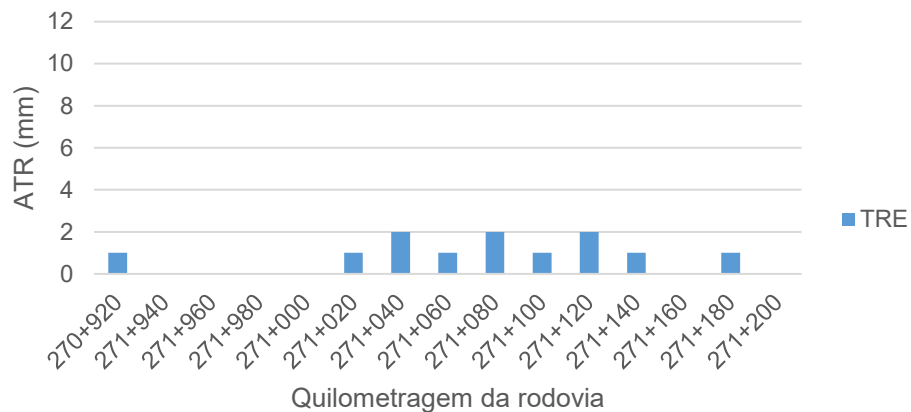
4.3 ETAPA 3 – AVALIAÇÃO EM 2019

Em setembro de 2019, 50 meses após abertura do tráfego, foi realizado o levantamento de afundamento de trilha de roda e inventário de defeitos. Estima-se que até o período de levantamento tenha atuado na estrutura um tráfego de $4,80 \times 10^6$ (USACE) (vide item 4.4).

4.3.1 Afundamento de trilha de roda

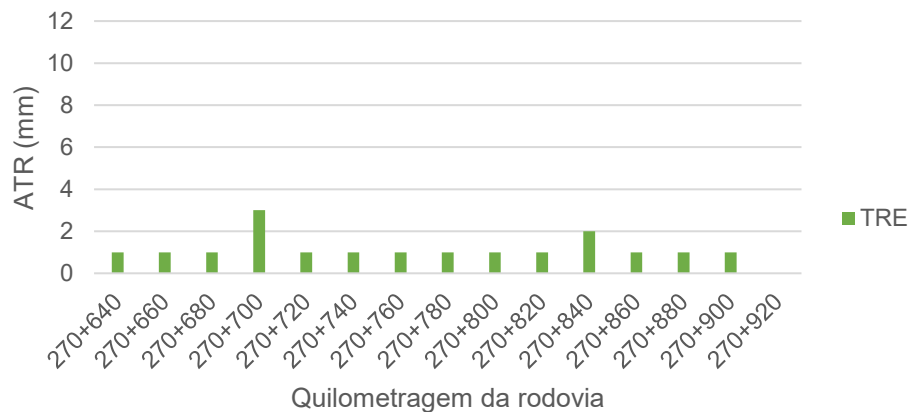
Foi realizado o levantamento da trilha de roda externa (TRE), da terceira faixa dos dois segmentos monitorados. As medidas obtidas para afundamento de trilha de roda (ATR) para os segmentos com HiMA e SBS estão apresentados nas Figura 40 e Figura 41, respectivamente.

Figura 40 – Afundamento de trilha de roda na terceira faixa do Segmento HiMA.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Figura 41 – Afundamento de trilha de roda na terceira faixa do Segmento SBS.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Pode observar através da Figura 40 e da Figura 41 que independente do ligante, HiMA ou SBS, o afundamento de trilha de roda não ultrapassa os 3 mm, ficando na maioria das estacas com valor de 1 mm.

Na Tabela 19 estão apresentados os valores de média e desvio padrão de afundamento de trilha de roda, para ambos segmentos.

Tabela 19 – Média e desvio padrão de ATR (mm) em 2019.

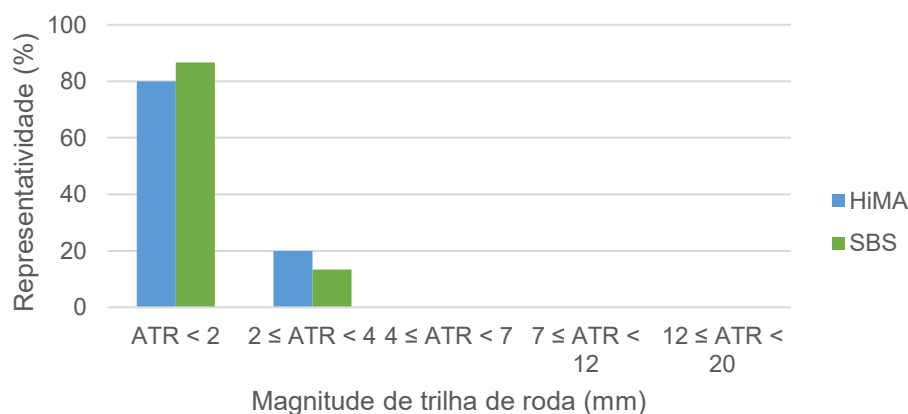
Segmento	TRE Média	Desvio Padrão
HiMA - 6,0%	0,800	0,775
SBS - 6,0%	1,133	0,640

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Através da Tabela 19, pode-se observar que o valor da TRE média do segmento com HiMA é menor, porém o valor do desvio padrão é maior, o que significa uma menor uniformidade dos dados. De uma maneira geral o ligante SBS apresenta os menores valores individuais de afundamento, sendo 1 mm pra todas as estacas, com exceção à estaca 270+700, que apresenta 3 mm de ATR.

O valor do TRE medido em campo foi dividido em cinco categorias em termo de porcentagem representativa. A Figura 42 apresenta a representatividade de ATR para a terceira faixa.

Figura 42 – Representatividade de ATR terceira faixa.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Pode-se observar na Figura 42 que os valores de afundamento ficaram limitados nas duas primeiras categorias, ou seja, até 4 mm, não havendo uma

diferença significativa entre os dois segmentos quanto ao desempenho deste parâmetro.

4.3.2 Inventário de defeitos

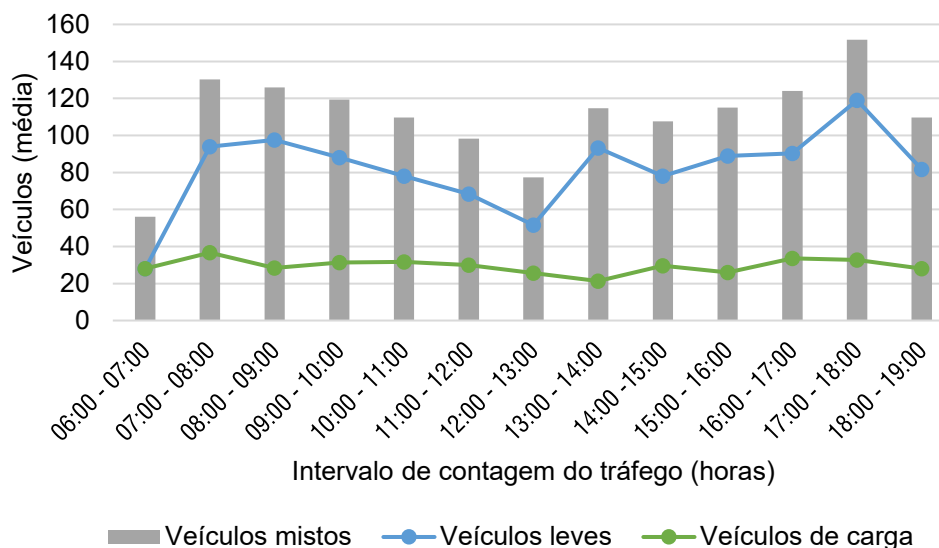
O levantamento de defeitos foi realizado na terceira faixa. Porém, como foi observado na Figura 27, os segmentos encontravam-se em perfeito estado, não apresentando trincas ou fissuras até a data em que os levantamentos foram realizados.

4.4 ETAPA 4 – ATUALIZAÇÃO DO TRÁFEGO

4.4.1 Contagem de tráfego realizada em 2020

Final do mês de setembro e primeiro dia do mês de outubro de 2020, foi realizado a contagem volumétrica de tráfego com caráter quantitativo e qualitativo dos veículos que trafegavam nos segmentos monitorados. Com esses valores foi possível se obter um panorama do volume médio de tráfego considerando os dois sentidos de rolamento (Painel – São Joaquim e São Joaquim – Painel), nos horários de contagem, conforme mostrado na Figura 43.

Figura 43 – Volume médio de veículos referente aos horários de contagem do tráfego em 2020 para os dois sentidos de rolamento.

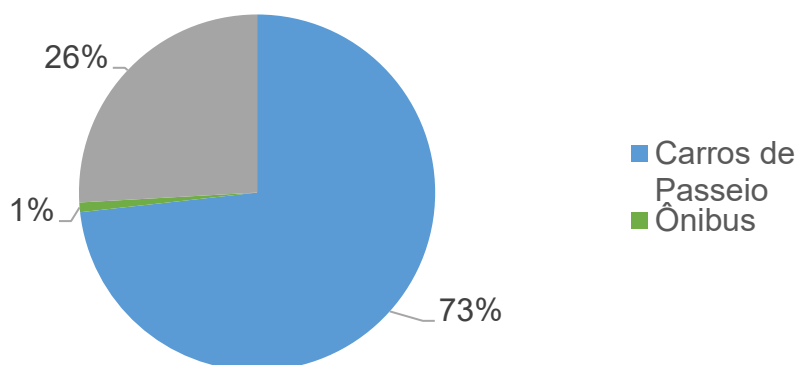


Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Através da Figura 43 é possível observar que o tráfego misto apresenta valores de pico em 2 horários, sendo o primeiro das 07:00 às 08:00 horas e o segundo das 17:00 às 18:00 horas (horário de início e fim de expediente, respectivamente).

Na Figura 44 é possível observar o perfil diário do tráfego nos segmentos monitorados a partir a contagem realizada. Na Tabela 20 estão apresentados os valores de VMDA por categoria de veículo nos dois sentidos do tráfego.

Figura 44 – Perfil do tráfego nos segmentos monitorados a partir da contagem de 2020.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Tabela 20 – Resumo do VMDA (ambos sentidos) para os segmentos monitorados em 2020.

Categoria	VMDA	%VMDA
Carros de Passeio	1322	73,16
2C ônibus	15	0,83
3C ônibus	1	0,06
2C	179	9,91
3C	187	10,35
4C	0	0,00
2S1	2	0,11
2S2	45	2,49
2S3	7	0,39
3S2	3	0,17
3S3	34	1,88
2C2	1	0,06
2C3	0	0,00
3C2	1	0,06
3C3	6	0,33
7 eixos	4	0,22
Total	1807	100

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

O volume médio de veículo diários em ambos sentidos de rolamento foi de 1807 veículos (Tabela 20), sendo 73% de veículos de passeio, 27% veículos de carga (caminhões) e ônibus.

Os veículos de maior ocorrência nos segmentos monitorados são os das classes 2C, 3C, 2S2 e 3S3, onde juntos representam 95% das classes dos veículos pesados.

No cálculo do número N para esta pesquisa, foi considerado que a distribuição de passagens de eixo foi mantida constante no período avaliado, aplicando-se apenas a variação do crescimento total de veículos por categoria e não de eventuais diferenças no crescimento de cada eixo específico.

Como no trecho estudado não existem balanças de pesagem de veículos, para as cargas dos eixos foram utilizados valores encontrados na literatura para a estimativa do número N (8,2 tf) (DNIT, 2006c).

Porém, foi considerado que os veículos que trafegavam com um ou mais eixos suspensos correspondiam a caminhões vazios, sendo possível observar a quantidade de veículos comerciais que trafegavam carregados (completamente ou parcialmente) e veículos vazios.

A porcentagem de veículos carregados e descarregados pode ser observada na Tabela 21. No sentido São Joaquim – Painel, em que estão inseridos os segmentos monitorados, cerca de 11% dos veículos trafegavam vazios, o que não é muito diferente, do outro sentido da via, onde 12,5% dos veículos trafegavam com os eixos suspensos. Esses dados influenciam no cálculo do número N, e conseqüentemente, na avaliação do desempenho do pavimento.

Tabela 21 – Relação de veículos identificados com eixos suspensos em ambos sentidos.

Sentido	% Vazios	% Carregados
São Joaquim – Painel (Active)	10,9	89,1
Painel – São Joaquim (Declive)	12,5	87,5

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

4.4.2 Comparativo da contagem de tráfego realizada em 2011 e 2020

Em 2011 a empresa responsável pelo projeto e execução da reabilitação da rodovia SC-114 realizou a contagem de tráfego da rodovia, adotando os seguintes elementos para fins de projeto:

- Ano base: foi considerado o ano de 2011, quando foram determinados os volumes de tráfego;
- Ano de abertura: o ano de abertura foi 2015, quatro anos após a realização da contagem;
- Horizonte de projeto: dez anos a partir do ano de abertura.

A contagem foi realizada em caráter volumétrico e classificatório, durante 13 horas consecutivas (terça feira e quarta feira), abrangendo o período das 06:00 às 19:00 horas.

A Tabela 22 apresenta os valores da contagem de tráfego realizada em 2011 e a contagem realizada em 2020, a fim de fazer um comparativo entre os volumes de veículos que foram quantificados.

Tabela 22 – Crescimento do tráfego no ano de 2020 em relação a contagem de 2011.

Categoria	2011	2020	% Crescimento
Veículos de Passeio	1359	1322	-2,72
Ônibus	64	16	-75,00
Caminhões	667	469	-29,69
Total	2090	1807	-13,54

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

É possível observar que houve uma queda nos veículos de passeio e comerciais (ônibus e caminhões). Tal fato pode ser justificado pela diferença nos meses de contagem, onde a primeira (2011) foi realizada em fevereiro e a segunda (2020) foi realizada em outubro, visto que a safra da maçã ocorre nos meses de fevereiro e março. Porém com a pandemia do COVID-19 os números de 2020 retratam a diminuição do volume de tráfego nas rodovias brasileiras.

Segundo o Jornal Estadão (2020), ABTC (2020), o movimento dos veículos nas rodovias federais teve uma queda de aproximadamente 18,4%, em março, comparado à fevereiro e essa redução do número de veículos trafegando nas rodovias teria sido maior que a greve dos caminhoneiros em 2018.

De acordo com a CNN Brasil (2021), a Ecorodovias registrou queda de 6,8% no volume de tráfego nas rodovias no período de março de 2020 à janeiro de 2021. A rodovia dos Imigrantes, teve uma redução de 9,1% do volume de tráfego.

4.4.3 Hipóteses de carregamento

Quando os veículos trafegavam com um ou mais eixos levantados durante a realização da contagem foi tomado como premissa que esses encontravam-se descarregados. Esses veículos geram um esforço no pavimento menor que os

veículos carregados, porém ainda tem-se que levar em consideração seu peso próprio.

Foram consideradas hipóteses de carregamentos pela falta de dados de pesagem dos veículos. Essas hipóteses estipularam cenários com porcentagens de veículos carregados e descarregados. Para os veículos descarregados foi utilizado os valores mínimos para cada eixo que foram estipulados pela Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP) na Instrução de Projeto IP-02/2004 (PMSP, 2004), conforme Tabela 23.

Tabela 23 – Cargas por eixo para veículos vazios (tf).

Eixo	ESRS	ESRD	ETD	ETT
Fernandes et al. (2018)	0,5	1,0	4,0	5,0
IP-02/2004 (PMSP, 2004)	2,7	3,0	4,5	8,5
Projeto Restauração PE-035 (GEP, 2012)	2,1	3,2	5,7	6,7
Projeto Restauração BR-101/SE (DNIT, 2005)	3,1	4,5	6,2	7,5

Fonte: Beutler (2020).

Para os veículos carregados foi considerado como referência os valores de carga máxima legal (CML), da Tabela 24, permitidos no Brasil para cada eixo.

Tabela 24 – Cargas máximas legais (CML).

Eixo	Carga Máxima Legal (CML)
ESRS	6
ESRD	10
ETD	17
ETT	25,5

Fonte: Adaptado de DNIT (2006c).

O cálculo do número $N_{8,2tf}$ seguiu a metodologia da Associação Norte-Americana de Especialistas Rodoviários e de Transporte (AASHTO) e do Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE).

Como visto na Tabela 21 a porcentagem de veículos que trafegavam vazios é de 10,9% no sentido São Joaquim – Paineis e 12,5% no sentido Paineis – São Joaquim, resultando em uma média de 11,7% de veículos considerados descarregados. Foram feitas 4 considerações para as hipóteses de carregamento:

- Hipótese 1: 90% dos veículos carregados (carga máxima legal) e 10% dos veículos descarregados;
- Hipótese 2: 85% dos veículos carregados e 15% dos veículos vazios, sendo que 85% dos veículos carregados são carregados com a carga máxima legal mais a carga de tolerância de 10% sobre a carga máxima legal por eixo (CML + T);
- Hipótese 3: 85% dos veículos carregados (carga máxima legal) e 15% dos veículos vazios;
- Hipótese 4: 88,3% dos veículos carregados (carga máxima legal) e 11,7% dos veículos vazios.

Com as equações utilizadas para calcular o fator de veículo (FVi), obteve-se os fatores para cada categoria de veículos e para as quatro hipóteses, em seguida calculou-se o número $N_{8,2f}$.

4.4.4 Estimativa do número N

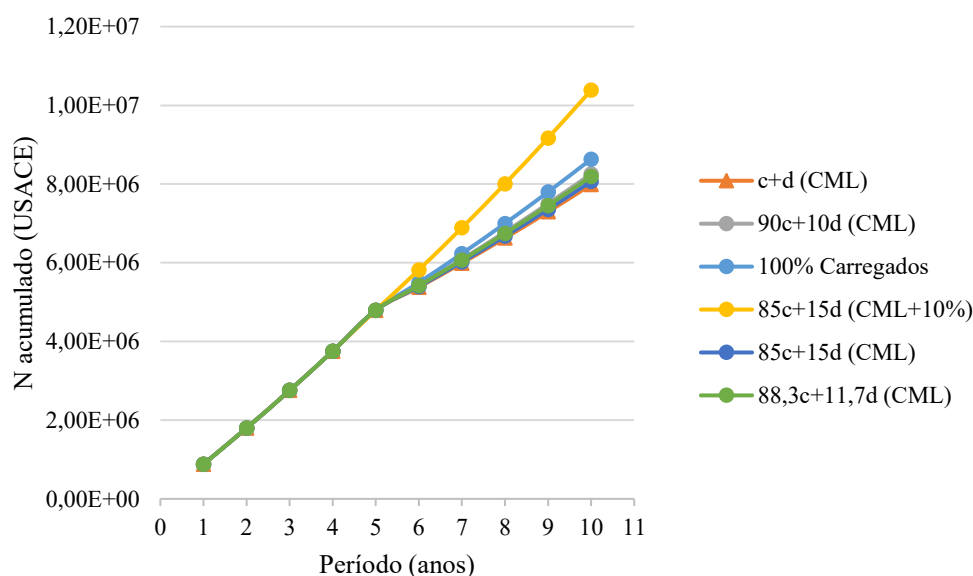
Para a previsão do tráfego acumulado considerou-se os valores de tráfego anual de projeto para os anos 2015 a 2019, visto que não houve contagem de tráfego nesse período para o trecho estudado e para os anos 2020 a 2024 foram utilizados os valores de tráfego anual obtidos pela contagem realizada no ano de 2020, totalizando 10 anos de projeto. A Tabela 25 apresenta os valores de $N_{8,2f}$ acumulados pela metodologia USACE para a consideração das quatro hipóteses, inclusive os valores para os caminhões 100% carregados e os caminhões carregados mais vazios, também está ilustrado na Figura 45, lembrando que até o ano de 2019 foram utilizados valores referente a contagem realizada pela empresa responsável pelo Projeto de Reabilitação da Rodovia SC-114.

Tabela 25 – Número $N_{8,2tf}$ acumulado obtido pela metodologia USACE para as diferentes hipóteses de carregamento.

Ano	$N_{8,2tf}$ acumulado (USACE)					
	100% Carregados	Carregados + Vazios	Hipótese 1	Hipótese 2	Hipótese 3	Hipótese 4
2015	8,80E+05	8,80E+05	8,80E+05	8,80E+05	8,80E+05	8,80E+05
2016	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06	1,80E+06
2017	2,76E+06	2,76E+06	2,76E+06	2,76E+06	2,76E+06	2,76E+06
2018	3,75E+06	3,75E+06	3,75E+06	3,75E+06	3,75E+06	3,75E+06
2019	4,79E+06	4,79E+06	4,79E+06	4,79E+06	4,79E+06	4,79E+06
2020	5,50E+06	5,38E+06	5,43E+06	5,82E+06	5,39E+06	5,42E+06
2021	6,23E+06	5,99E+06	6,09E+06	6,89E+06	6,02E+06	6,07E+06
2022	7,00E+06	6,63E+06	6,78E+06	8,01E+06	6,67E+06	6,75E+06
2023	7,80E+06	7,29E+06	7,50E+06	9,17E+06	7,36E+06	7,45E+06
2024	8,63E+06	7,99E+06	8,26E+06	1,04E+07	8,07E+06	8,19E+06

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Figura 45 – Evolução do número $N_{8,2tf}$ (USACE) para 10 anos de projeto.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Analisando-se o gráfico da Figura 45, é possível observar que as hipóteses 1, 3 e 4 não diferem muito entre si, e não atingem no final do período de projeto o número que foi estimado no projeto inicial da rodovia. Apenas a hipótese 2, que considera a tolerância de 10% da carga máxima legal é que o tráfego chegaria no previsto em projeto pela empresa, que foi de $1,04 \times 10^7$ para o ano de 2024.

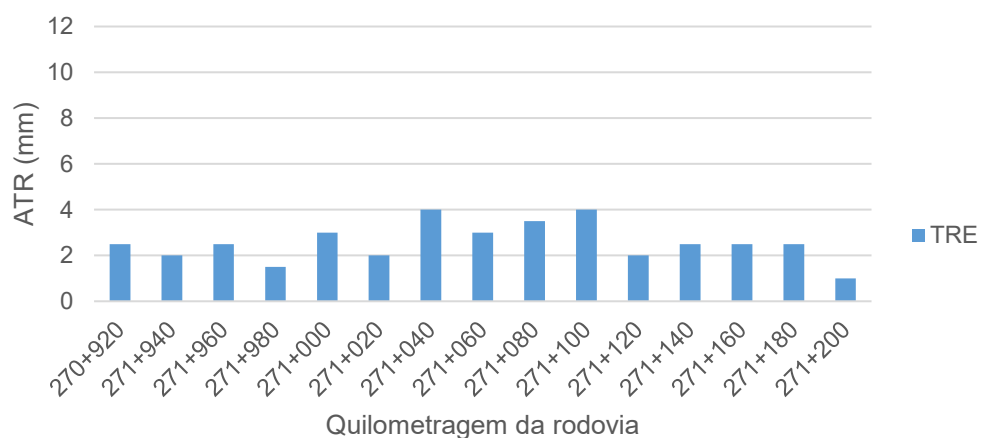
Essa diferença pode ser justificada como dito anteriormente pela queda do tráfego nas rodovias federais e estaduais do Brasil no ano de 2020.

4.5 ETAPA 5 – AVALIAÇÃO EM 2020

4.5.1 Afundamento de trilha de roda

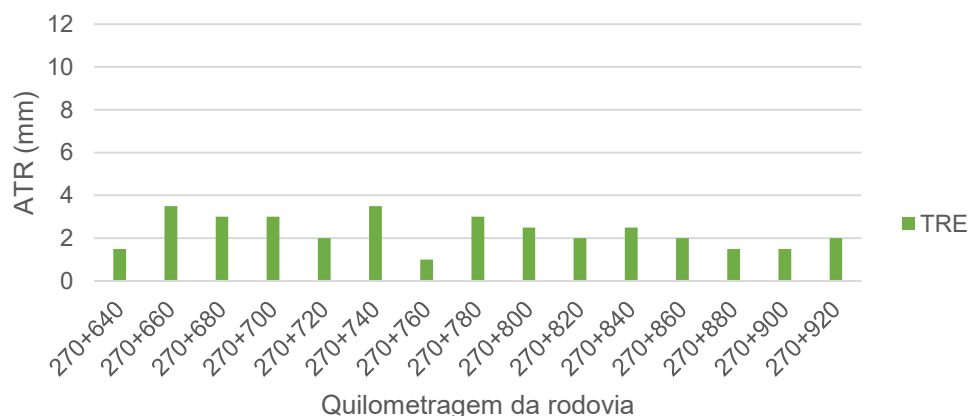
A Figura 46 e a Figura 47 apresentam os resultados do afundamento de trilha de roda por estaca, medidos como na avaliação de 2019 na trilha de roda externa da terceira faixa dos segmentos HiMA e SBS, respectivamente.

Figura 46 – Afundamento de trilha de roda na terceira faixa do Segmento HiMA.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Figura 47 – Afundamento de trilha de roda na terceira faixa do Segmento SBS.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Em geral, pode-se observar que o afundamento por trilha de roda foi maior no segmento HiMA, chegando a atingir os 4 mm em duas estacas, enquanto o segmento SBS teve no máximo 3,5 mm de deformação.

A partir destes dados de ATR foi calculado o afundamento médio e o desvio padrão de ambos os segmentos, como visto na Tabela 26. É possível observar que o afundamento de trilha de roda médio no segmento HiMA é levemente maior que no segmento SBS, assim como o desvio padrão.

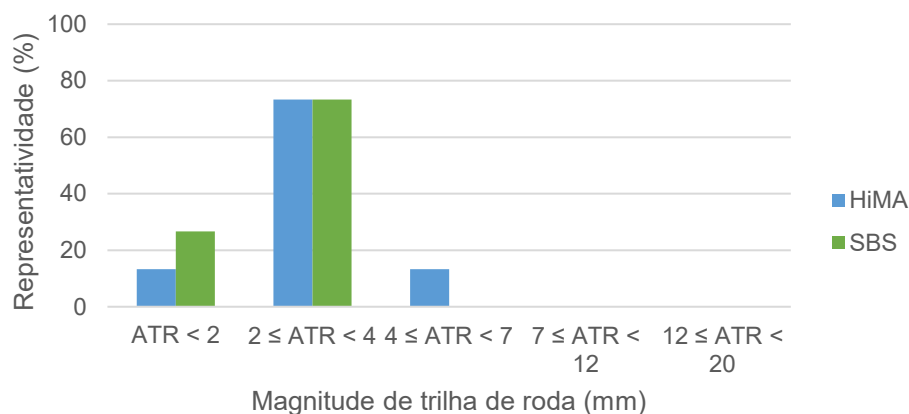
Tabela 26 – Média e desvio padrão de ATR (mm) em 2020.

Segmento	TRE (mm)	Média	Desvio Padrão
HiMA - 6,0%	2,567	0,842	
SBS - 6,0%	2,300	0,775	

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Os resultados obtidos de ATR foram separados conforme profundidade em cinco categorias, como pode ser observado na Figura 48.

Figura 48 – Representatividade de ATR terceira faixa.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Os dois segmentos apresentam aproximadamente 80% dos valores de ATR classificados de 2 mm a 4 mm. O segmento HiMA apresenta apenas 1 estaca com valores acima de 4 mm, em torno de 15%, porém nenhum dos dois segmentos ultrapassa a marca de 12 mm de afundamento de trilha de roda (nível recomendado pelo DNIT (Brasil, 2006) para realização de intervenção de correção).

4.5.2 Inventário de defeitos superficiais

Na Figura 49 é possível observar que o pavimento não apresentou nenhum defeito de superfície, mesmo na metade de sua vida de serviço (5 anos de abertura ao tráfego). Não foi observado nenhuma trinca ao longo de ambos segmentos, tanto trecho HiMA quanto o trecho executado em SBS.

Figura 49 – Inventário de defeitos.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

O levantamento detalhado de defeitos foi realizado em 560 m da extensão da rodovia, sendo 280 m executados com ligante SBS e 280 m com ligante HiMA, porém é importante frisar que ao longo de seus 52 km executados a mesma não apresenta defeitos.

4.5.3 Macrotextura

Os valores de macrotextura para os segmentos HiMA e SBS estão apresentados na Tabela 27, bem como o desvio padrão.

Tabela 27 – Valores médios e desvio padrão da macrotextura.

Segmento Monitorado	Macrotextura	
	HS _{médio}	σ
SBS	0,46	0,06
HiMA	0,58	0,03

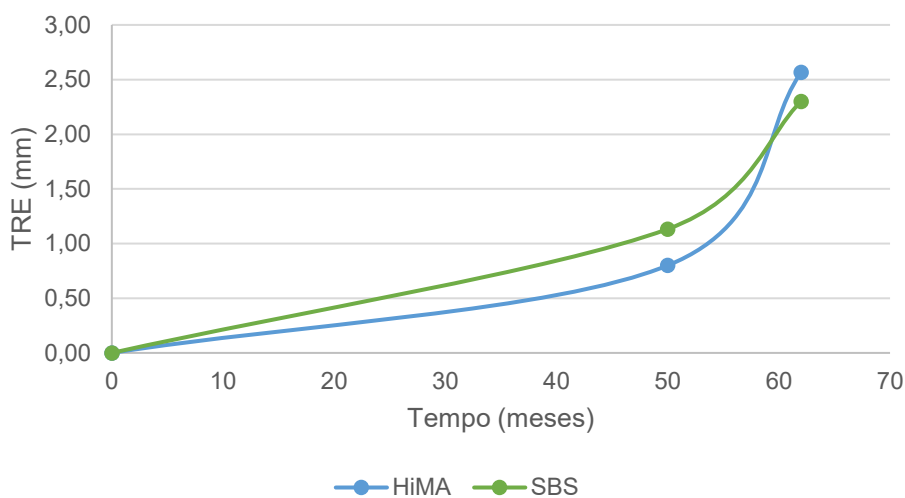
Fonte: Elaborada pela autora (2021).

De acordo com os valores tabelados por Brasil (2006a), os resultados de altura da mancha de areia ($HS_{\text{médio}}$) classifica a macrot textura como média. Como os segmentos estão localizados onde a variação geométrica horizontal é pequena, se torna confortável ao rolamento e favorável a segurança.

4.6 ETAPA 6 – AVALIAÇÃO TEMPORAL DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Os dados de afundamento de trilha de roda médio medido nos segmentos monitorados e sua evolução ao longo do tempo estão apresentados na Figura 50, Mesmo decorrido metade do período de projeto, a média do ATR permanece abaixo de 3,00 mm para ambos segmentos.

Figura 50 – Evolução do afundamento médio de trilha de roda externa (TRE) em função do tempo (meses).



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Como não se tem levantamentos no primeiro e no segundo ano de liberação ao tráfego, não tem-se conhecimento se o comportamento da evolução de trilha de roda é de maneira linear como mostra o gráfico da Figura 50, porém acredita-se que não seja diferente do apresentado.

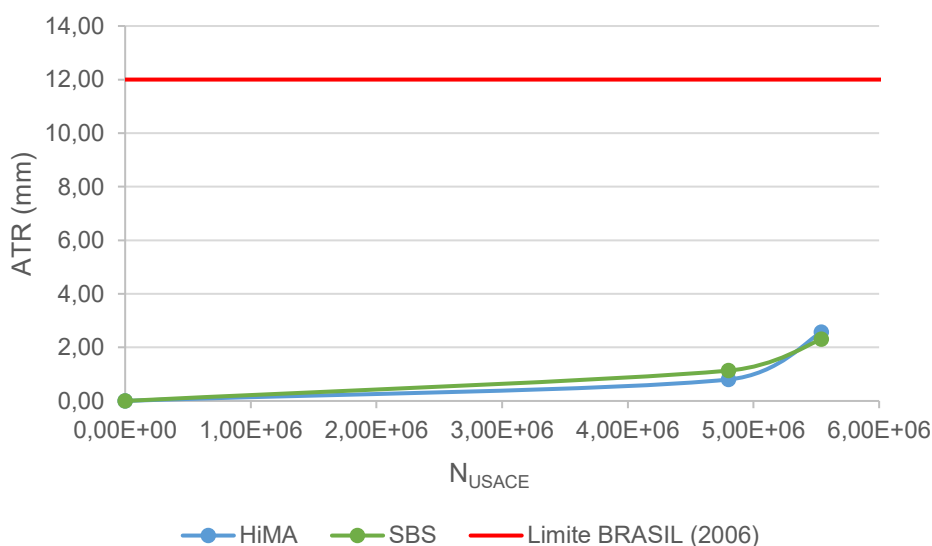
A Tabela 28 e a Figura 51 apresentam a evolução da média do afundamento de trilha de roda externa dos dois segmentos em relação ao tráfego acumulado (N) sobre o tráfego final (N_f) de projeto. O tráfego considerado foi referente a contagem realizada em 2020, considerando 100% do veículos carregados (condição mais crítica de cálculo) e o tráfego de projeto foi considerado o do projeto de reabilitação da rodovia.

Tabela 28 – Evolução de ATR (mm) médio.

Ano	Meses de abertura ao tráfego	N_{atuante}	N_{projeto}	$N_{\text{atuante}}/N_{\text{projeto}}$	HiMA	SBS
2015	0	0,00E+00		0,00	0,00	0,00
2019	50	4,80E+06	1,07E+07	0,45	0,80	1,13
2020	62	8,80E+06		0,82	2,57	2,30

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Figura 51 – Evolução de ATR médio em função do tráfego



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Os dois segmentos apresentam baixos valores de ATR, com média menor que 3 mm. Após a metade da atuação do tráfego previsto em projeto é possível notar que o ATR médio não atingiu o limite estabelecido por BRASIL (2006a), concluindo que os segmentos não possuem indicativo de comprometimento estrutural.

Alguns autores tem os seguintes limites satisfatórios para deformação permanente: Choi (2013) e Lacroix (2013) consideram valores satisfatórios de até 12,5 mm de ATR. Medina e Motta (2015) informam que resultados de ATR de até 10 mm são considerados satisfatórios para autoestradas de alguns países e para estradas com menor volume de tráfego, o valor de ATR pode chegar a 16 mm. Segundo BRASIL (2006a), valores de ATR de 12 mm seria indicativo de comprometimento estrutural. Para rodovias em concessão esses limites são de 5 a 7 mm, então é importante continuar os levantamentos mesmo não sendo o caso da rodovia SC-114.

4.7 ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO REVESTIMENTO E TEMPERATURA CONSTANTE

Este item foi desenvolvido com finalidade de se definir como seria considerada a espessura do revestimento para estimar a sua vida útil e estabelecer uma relação com o comportamento observado em campo, pois havia uma dúvida em como se considerar a camada anti-reflexão de trincas (SAMI), nas simulações numéricas:

- Considerar o revestimento com 4,0 cm e a camada de SAMI com 2,0 cm, sendo que a mesma é executada com o mesmo ligante;
- Considerar a camada de SAMI incorporada ao revestimento, ou seja, 6,0 cm.

Para tanto, foram realizadas simulações para o trecho executado com ligante SBS, considerando as camadas do pavimento conforme Tabela 29, variando-se a espessura do revestimento de 4,0 a 15,0 cm, a fim de se verificar para que espessura de revestimento a deformação de tração passa por um ponto de máximo em diferentes temperaturas do revestimento asfáltico.

Tabela 29 – Estrutura do pavimento utilizada no *software*.

Espessura (cm)	Camadas
4,0 a 15,0	SBS
2,0	SAMI
1,0	Camada Remanescente
12,0	Base
23,0	Sub-base
Infinito	Sub leito

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Os parâmetros utilizados para o cálculo da deformação específica de tração foram os da Tabela 4 e da Tabela 5, onde os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 30 e na Figura 52.

Tabela 30 – Deformação específica de tração ($\times 10^{-6}$).

Ligante SBS Temperatura (°C)	Espessura (cm)						
	4	5	6	7	10	12	15
15	98,32	103,96	103,18	99,25	82,43	71,77	58,64
20	93,93	104,77	107,84	106,62	93,57	83,50	70,08
30	54,44	80,92	97,04	106,30	112,44	108,44	98,90

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Para espessura de 4,0 cm, que corresponde à estrutura executada no trecho estudado, observa-se que a deformação decresce conforme a temperatura aumenta, comportamento este que não é esperado que ocorra nas simulações. Para as espessuras de 5,0 e 6,0 cm a deformação também diminui quando ultrapassa os 20°C, porém esse decréscimo é menor quando comparado às deformações considerando 4,0 cm de revestimento.

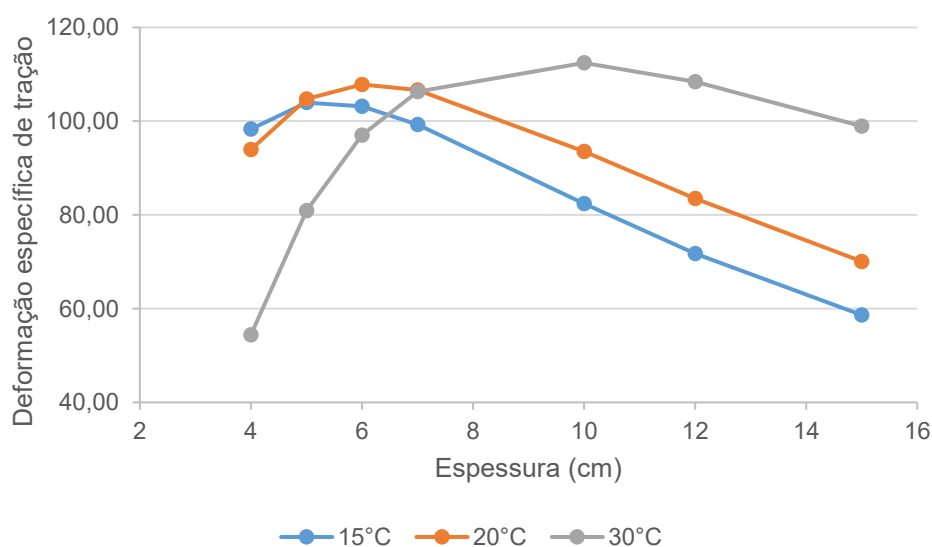
Para estruturas com espessuras acima de 7,0 cm de revestimento, tem-se uma inversão do comportamento observado nas espessura menores, isto é, as deformações aumentam conforme a temperatura sobe.

Outro ponto interessante observado na Tabela 30, é que as deformações para espessura de revestimento de 4,0 cm são menores que para 5,0, 6,0 e 7,0 cm, o que mostra que ao se projetar revestimentos pavimentos com essa espessura de revestimento ter-se-ia um melhor desempenho do revestimento. Entretanto é

importante levar em consideração o tráfego atuante na rodovia e também possíveis problemas de ruptura de cisalhamento da camada de base.

No gráfico da Figura 52 tem-se o ponto de máxima entre as espessuras de 6,0 e 7,0 cm para as temperaturas de 15 e 20°C, enquanto que para a temperatura de 30°C esse ponto de máxima ocorre apenas na espessura de 10,0 cm.

Figura 52 – Ponto de máxima inflexão de deformação em diferentes temperaturas.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Este tipo de comportamento das tensões e deformações com a variação do revestimento já é de conhecimento no meio acadêmico desde os anos de 1980, quando se iniciou aqui a análise tensão/deformação de estruturas com o programa Elsym5, por exemplo (análise elástica linear). Entretanto, ao que parece, com o emprego do programa viscoroute (leva em conta o comportamento reológico da mistura), este tipo de comportamento tende a ser mais acentuado, o que deve então ser levado em conta pelos projetistas.

É imprescindível que se faça essas simulações para se conseguir prever o comportamento da estrutura analisada no *software*, principalmente quanto ao dimensionamento de rodovias com baixo ou médio volume de tráfego, que em sua maioria utilizam revestimentos com espessuras iguais ou abaixo de 7,0 cm.

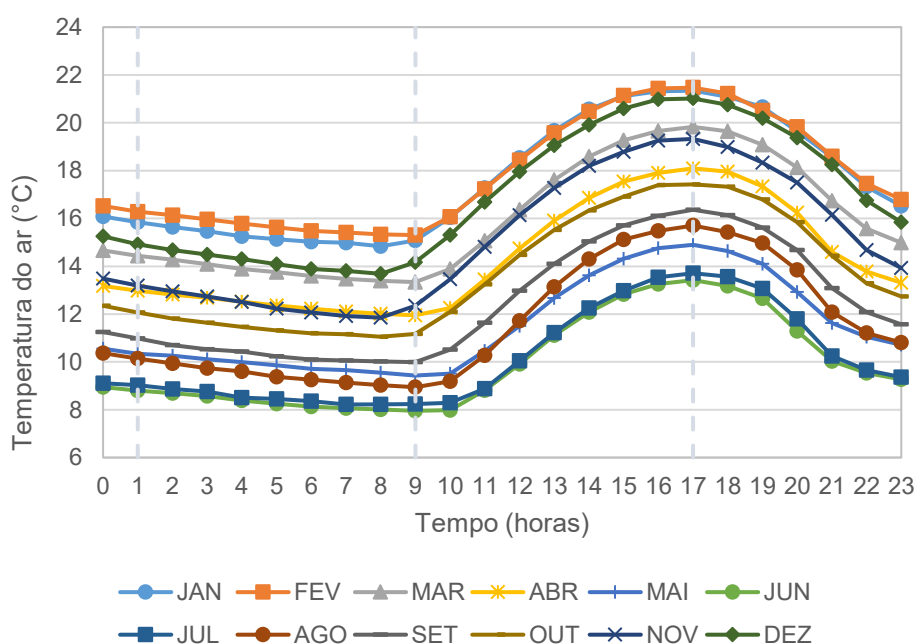
Ao calcular a deformação específica de tração na fibra inferior do revestimento utilizando o Viscoroute é preciso se atentar ao comportamento da estrutura e considerar a variação de temperatura no revestimento visto que esta influência nos resultados obtidos tanto na deformação, quanto na vida útil do pavimento.

4.8 ETAPA 7 – ESTIMATIVA DA VIDA ÚTIL CONSIDERANDO A TEMPERATURA DA REGIÃO

4.8.1 Variação da temperatura do ar durante o dia

Através de dados disponibilizados pelo INMET (2019), foi possível calcular a distribuição horária de temperatura nos doze meses do ano para a região de São Joaquim. Essas médias horárias estão mostradas na Figura 53.

Figura 53 – Média horária de temperatura do ar em cada mês (2008 a 2019).



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

O mês em apresenta as temperaturas do ar mais elevadas é fevereiro, chegando a uma temperatura média de 22°C, às 16 horas. Os meses mais frios do ano, junho e julho são os que apresentam as temperaturas mais baixas, depois desses meses a temperatura volta a subir gradativamente até o mês de fevereiro. Em Junho

tem-se a temperatura média do ar mais baixa do ano, chegando a 8°C entre as 7 e 8 horas da manhã.

É possível também observar que as curvas tem um comportamento semelhante ao longo do dia. As temperaturas mínimas ocorrem entre as 6 e 9 horas, e as temperaturas máximas ocorrem entre as 15 e 18 horas.

4.8.2 Cálculo da temperatura do revestimento

Para se estimar a temperatura do revestimento do pavimento é preciso determinar alguns parâmetros climáticos necessário com os dados meteorológicos.

O modelo de Barber (Equação 7), necessita dos seguintes dados: temperatura do ar (T_A), velocidade do vento (V), amplitude de variação de temperatura do ar (T_R) e radiação solar (I). Assim, com os dados fornecidos pelo INMET (2019), foi calculada a média da temperatura do ar e da velocidade do vento em cada intervalo de análise nos doze meses do ano. Esses dados estão apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 – Temperatura média do ar e velocidade média do vento nos três períodos do dia para cada mês.

Mês	09h - 16h		17h - 00h		01h - 08h	
	Ta (°C)	V (km/h)	Ta (°C)	V (km/h)	Ta (°C)	V (km/h)
Janeiro	18,70	10,08	18,90	10,80	15,27	8,69
Fevereiro	18,71	9,93	19,05	9,76	15,75	8,15
Março	16,72	9,38	17,33	9,66	13,86	8,54
Abril	15,08	9,30	15,56	8,42	12,46	7,73
Maio	12,03	9,75	12,56	8,48	9,94	8,15
Junho	10,49	9,80	11,04	8,47	8,37	8,29
Julho	10,68	10,35	11,31	9,31	8,55	9,31
Agosto	12,27	11,26	13,05	9,68	9,52	9,63
Setembro	13,26	11,25	13,85	10,31	10,38	9,49
Outubro	14,64	11,02	15,02	10,48	11,46	9,37
Novembro	16,28	10,75	16,55	10,67	12,43	9,49
Dezembro	18,08	10,39	18,43	10,47	14,23	8,44

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Na Tabela 32 é possível observar os valores da média da amplitude de variação de temperatura do ar (T_R) e da radiação solar (I) durante o dia para cada mês. Ambos foram obtidos com dados de maio de 2008 a dezembro de 2019, disponibilizados pelo INMET.

Tabela 32 – Média da amplitude de variação de temperatura e radiação solar durante o dia em cada mês.

Mês	TR (°C)	I (kJ/m².dia)
Janeiro	7,82	22125,60
Fevereiro	7,46	20419,76
Março	7,62	16624,57
Abril	7,17	13458,01
Maio	6,46	9578,55
Junho	6,41	11824,86
Julho	6,46	11252,97
Agosto	7,79	15658,22
Setembro	7,43	16169,18
Outubro	7,52	18322,91
Novembro	8,60	23988,38
Dezembro	8,57	26436,85

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Além dos dados apresentados anteriormente, o modelo de Barber (1957) necessita 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). Devido a falta de informações sobre o ligante estudado e de instrumentação necessária para a obtenção de tais parâmetros, foram utilizados valores encontrados na literatura para o ligante CAP 50/70.

Na Tabela 33 são apresentados os parâmetros adotados para o cálculo da temperatura do revestimento. A condutividade térmica e a capacidade calorífica foram adotados de Specht *et al.* (2008). O fator de absorção da radiação adotado foi o valor indicado por Barber (1957) para superfície negra e a massa específica aparente, foi obtida por Santos (2016).

Tabela 33 – 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)
	SBS	0,1646 W/m.°C	Zhang <i>et al.</i> (2019)
Cap. calorífica específica (c)	CAP 50/70	1049 J/kg.°C	Specht <i>et al.</i> (2008)
	SBS	1445 J/kg.°C	Zhang <i>et al.</i> (2019)
Coef. de absorção da radiação solar (b)	Em geral	0,95	Barber (1957)
Massa específica (w)	CAP 50/70	2,600 g/cm ³	Santos (2016)

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Para completar os dados necessários no modelo de Barber (1957) é preciso, ainda, informar o tempo em horas decorrido a partir do início do ciclo. O início do ciclo foi considerado as 09:00h, período em que ocorre o aumento gradual da temperatura da região conforme mostrado Figura 53. A hora do dia considerada no cálculo o gradiente de temperatura para cada intervalo de análise foi a hora correspondente a metade do intervalo. Dessa forma, para o intervalo entre 09h-16h calculou-se o gradiente de temperatura no revestimento às 12h30min (3,5 horas após o início do ciclo); para o intervalo entre 17h-00h, calculou-se às 20h (11 horas após o início do ciclo); para intervalo entre 01h-08h, o gradiente foi calculado às 04h (19 horas após o início do ciclo).

Dessa maneira, com todos os dados necessários, foi calculada a temperatura no centro de cada subcamada do revestimento asfáltico e em cada intervalo de análise. O gradiente de temperatura na camada do revestimento foi estimado para cada intervalo de análise (09h-16h, 17h-00h, 01h-08h) em cada mês, totalizando 36 perfis de temperatura. É importante ressaltar que não houve distinção quanto aos segmentos monitorados (HiMA e SBS) devido à falta de informações de alguns parâmetros necessários no cálculo.

A Tabela 34 e a Tabela 35 apresentam as temperaturas calculadas no revestimento para os segmentos HiMA e SBS, respectivamente.

Tabela 34 – Temperatura (°C) nas camadas do segmento HiMA.

Mês	Intervalo de Análise	Profundidade Calculada (cm)				
		1,00	3,00	4,00	5,00	6,00
JAN	09h - 16h	33,56	30,31	28,98	27,83	26,84
	17h - 00h	35,60	35,69	35,53	35,26	34,90
FEV	01h - 08h	8,02	11,13	12,58	13,95	15,24
	09h - 16h	32,51	29,49	28,25	27,18	26,26
	17h - 00h	35,16	35,21	35,04	34,77	34,42
MAR	01h - 08h	9,06	11,98	13,35	14,65	15,86
	09h - 16h	28,33	25,76	24,70	23,79	23,01
	17h - 00h	30,77	30,81	30,67	30,44	30,14
ABR	01h - 08h	7,95	10,39	11,53	12,61	13,62
	09h - 16h	24,63	22,48	21,60	20,84	20,19
	17h - 00h	27,20	27,21	27,07	26,86	26,60
MAI	01h - 08h	7,49	9,57	10,54	11,45	12,31
	09h - 16h	18,93	17,33	16,68	16,11	15,62
	17h - 00h	21,07	21,07	20,97	20,81	20,62
JUN	01h - 08h	6,00	7,54	8,25	8,93	9,56
	09h - 16h	18,80	16,92	16,15	15,48	14,91
	17h - 00h	21,27	21,27	21,15	20,97	20,74
JUL	01h - 08h	3,92	5,72	6,56	7,36	8,10
	09h - 16h	18,53	16,73	15,99	15,35	14,81
	17h - 00h	20,78	20,80	20,69	20,53	20,31
AGO	01h - 08h	4,15	5,84	6,63	7,38	8,08
	09h - 16h	22,79	20,40	19,42	18,56	17,83
	17h - 00h	25,81	25,85	25,71	25,49	25,21
SET	01h - 08h	3,70	5,97	7,03	8,03	8,97
	09h - 16h	24,04	21,61	20,61	19,74	19,00
	17h - 00h	26,59	26,65	26,52	26,30	26,03
OUT	01h - 08h	4,55	6,86	7,95	8,97	9,93
	09h - 16h	26,80	24,09	22,98	22,01	21,19
	17h - 00h	29,21	29,28	29,14	28,90	28,59
NOV	01h - 08h	5,11	7,69	8,90	10,04	11,12
	09h - 16h	32,13	28,65	27,21	25,97	24,91
	17h - 00h	34,77	34,86	34,68	34,38	33,99
DEZ	01h - 08h	4,45	7,75	9,29	10,76	12,13
	09h - 16h	35,59	31,78	30,21	28,86	27,70
	17h - 00h	38,50	38,60	38,40	38,07	37,64
	01h - 08h	5,81	9,51	11,24	12,87	14,40

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

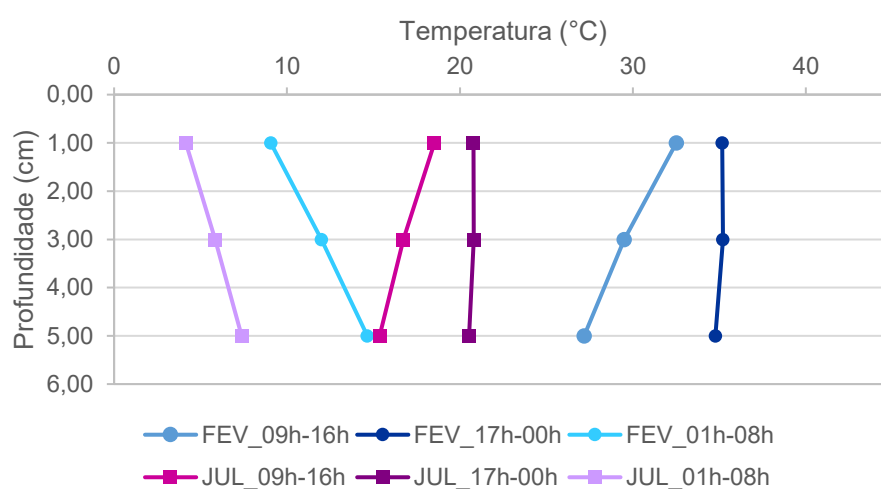
Tabela 35 – Temperatura (°C) das camadas do segmento SBS.

Mês	Intervalo de Análise	Profundidade Calculada (cm)				
		1,00	3,00	4,00	5,00	6,00
JAN	09h - 16h	33,33	25,17	23,58	23,02	23,13
	17h - 00h	36,73	34,83	32,93	31,03	29,38
	01h - 08h	6,94	16,77	20,09	22,38	23,80
FEV	09h - 16h	32,31	24,71	23,23	22,72	22,81
	17h - 00h	36,30	34,41	32,57	30,75	29,16
	01h - 08h	7,94	17,25	20,38	22,54	23,88
MAR	09h - 16h	28,20	21,69	20,43	19,99	20,08
	17h - 00h	31,74	30,14	28,58	27,03	25,68
	01h - 08h	7,08	14,81	17,42	19,22	20,33
ABR	09h - 16h	24,52	19,09	18,04	17,68	17,75
	17h - 00h	28,11	26,65	25,29	23,94	22,77
	01h - 08h	6,64	13,27	15,49	17,02	17,97
MAI	09h - 16h	18,83	14,80	14,02	13,75	13,80
	17h - 00h	21,74	20,66	19,64	18,63	17,76
	01h - 08h	5,42	10,29	11,94	13,06	13,76
JUN	09h - 16h	18,68	13,94	13,02	12,70	12,77
	17h - 00h	22,06	20,78	19,58	18,40	17,36
	01h - 08h	3,24	8,97	10,90	12,22	13,04
JUL	09h - 16h	18,38	13,88	13,00	12,70	12,75
	17h - 00h	21,49	20,32	19,21	18,10	17,13
	01h - 08h	3,62	8,94	10,74	11,98	12,76
AGO	09h - 16h	22,54	16,59	15,42	15,00	15,07
	17h - 00h	26,74	25,21	23,72	22,24	20,95
	01h - 08h	3,03	10,15	12,57	14,23	15,27
SET	09h - 16h	23,79	17,73	16,54	16,12	16,19
	17h - 00h	27,49	25,99	24,51	23,04	21,76
	01h - 08h	3,85	11,13	13,59	15,29	16,35
OUT	09h - 16h	26,54	19,78	18,45	17,98	18,06
	17h - 00h	30,19	28,55	26,91	25,29	23,87
	01h - 08h	4,31	12,44	15,19	17,09	18,27
NOV	09h - 16h	31,82	23,10	21,39	20,80	20,89
	17h - 00h	36,01	33,92	31,85	29,78	27,97
	01h - 08h	3,45	13,83	17,35	19,77	21,28
DEZ	09h - 16h	35,28	25,73	23,86	23,21	23,32
	17h - 00h	39,87	37,58	35,31	33,04	31,06
	01h - 08h	4,46	16,19	20,15	22,87	24,56

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

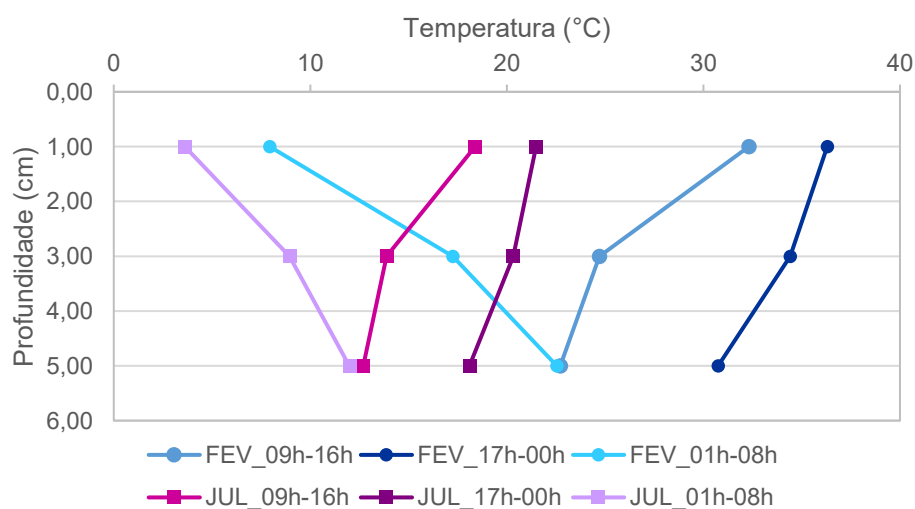
A variação de temperatura calculada para os três períodos do dia no revestimento estão apresentados na Figura 54 e Figura 55 para os segmentos HiMA e SBS, respectivamente. Foram escolhidos os meses de fevereiro e julho por representarem os dois extremos de temperatura que ocorrem durante o ano, o mês mais quente e frio, respectivamente.

Figura 54 – Variação de temperatura ao longo do dia no revestimento, nos meses de fevereiro e julho do segmento HiMA.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Figura 55 – Variação de temperatura ao longo do dia no revestimento, nos meses de fevereiro e julho do segmento SBS.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Segundo o modelo de Barber (1957), é possível observar que ocorre uma inversão de temperatura no revestimento durante o dia e a noite, apesar de ser suave devido a espessura do revestimento ser pequena e existirem apenas 3 pontos essa inversão é notável. A inversão de temperatura no revestimento é apontada por diversos autores Motta (1979), Park *et al.* (2001), Chong *et al.* (2009), Zheng *et al.* (2017) e Lopes (2019). No intervalo entre as 09h-16h e 17h-00h, a temperatura foi maior próximo à superfície, devido a maior exposição à radiação solar. O contrário se observa no período da 01h às 08h (ocorrendo o comportamento inverso), sendo menor a temperatura próximo à superfície, como esperado.

4.8.3 Influência da temperatura na deformação de tração no revestimento

O *software* utilizado para verificar a influência da temperatura na deformação de tração no revestimento foi o Viscoroute. Os parâmetros mecânicos de base, sub-base e subleito estão apresentados na Tabela 5. Para o revestimento, foram utilizados os parâmetros da Tabela 4, de acordo com cada segmento monitorado. Em relação ao carregamento foi considerado um semieixo do eixo padrão de 8,2 toneladas, conforme Figura 30.

Para considerar a sazonalidade da temperatura da região, foi calculada a temperatura no final da camada do revestimento, ou seja, nos 4,0 cm de profundidade e, então, lançada a estrutura para simulação computacional. A deformação específica de tração na fibra inferior do revestimento calculada está apresentadas nas Tabela 36 e Tabela 37. Nelas estão destacadas a maior e menor deformação obtidas em cada segmento monitorado.

Tabela 36 – Deformação específica de tração no segmento SBS com sazonalidade de temperatura ($\times 10^{-6}$).

Mês	Deformação na fibra inferior da camada asfáltica		
	09h - 16h	17h - 00h	01h - 08h
Janeiro	85,94	31,81	93,79
Fevereiro	86,97	34,84	93,33
Março	93,24	63,59	96,90
Abril	96,35	79,95	98,11
Maio	98,63	94,46	98,94
Junho	98,83	94,55	98,95
Julho	98,83	95,04	98,95
Agosto	98,14	85,50	98,89
Setembro	97,54	82,88	98,73
Outubro	95,93	72,73	98,24
Novembro	91,46	40,70	96,96
Dezembro	85,06	10,55	93,70

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Tabela 37 – Deformação específica de tração no segmento HiMA com sazonalidade de temperatura ($\times 10^{-6}$).

Mês	Deformação na fibra inferior da camada asfáltica		
	09h - 16h	17h - 00h	01h - 08h
Janeiro	68,21	29,18	98,91
Fevereiro	71,44	32,66	98,68
Março	83,99	59,84	99,14
Abril	91,06	76,21	99,29
Maio	96,98	92,14	99,43
Junho	97,35	91,84	99,39
Julho	97,45	92,57	99,39
Agosto	94,34	80,94	99,41
Setembro	92,70	78,22	99,43
Outubro	88,31	67,50	99,41
Novembro	75,65	35,15	99,39
Dezembro	62,21	7,75	99,19

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Nota-se que a deformação específica de tração é menor conforme a temperatura aumenta. Esses resultados não condizem com outras pesquisas como a de Lopes (2019), que usou a mesma metodologia de cálculo e obteve deformações maiores conforme a temperatura no revestimento aumentava.

A fim de validar os resultados obtidos de deformação com Viscoroute foi calculado também a deformação específica de tração nos 6,00 cm de profundidade onde foi considerado a camada de SAMI integrada a camada de HiMA e SBS. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 38 e na Tabela 39.

Tabela 38 – Deformação específica de tração no segmento SBS com sazonalidade de temperatura ($\times 10^{-6}$).

Mês	Deformação na fibra inferior da camada asfáltica		
	09h - 16h	17h - 00h	01h - 08h
Janeiro	184	216	187
Fevereiro	182	215	188
Março	169	197	170
Abril	159	182	160
Maio	145	159	145
Junho	142	157	142
Julho	141	156	141
Agosto	149	173	149
Setembro	153	177	153
Outubro	160	188	161
Novembro	173	209	175
Dezembro	185	223	191

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Tabela 39 – Deformação específica de tração no segmento HiMA com sazonalidade de temperatura ($\times 10^{-6}$).

Mês	Deformação na fibra inferior da camada asfáltica		
	09h - 16h	17h - 00h	01h - 08h
Janeiro	200	230	156
Fevereiro	198	229	157
Março	184	214	151
Abril	172	199	148
Mai	157	174	141
Junho	155	174	138
Julho	154	173	138
Agosto	164	193	140
Setembro	168	197	142
Outubro	176	208	145
Novembro	192	228	147
Dezembro	204	236	153

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Ao se observar a Tabela 38 e a Tabela 39, nota-se que não ocorreu o mesmo comportamento quando comparado aos resultados de deformação na profundidade de 4 cm, porém as deformações nesta profundidade (6 cm) foram consideravelmente maiores. A deformação específica de tração é maior nos meses em que a temperatura do ar é mais quente, e no mês de julho é onde ocorre as menores deformações, nos dois segmentos, por ser o mês mais frio do ano. Quanto maior a temperatura, maior será a deformação de tração gerada no revestimento asfáltico, pois menor é o módulo de rigidez da mistura.

Apesar de resultar em deformações maiores acredita-se que o *software* faz uma melhor interpretação de resultados considerando apenas 1 camada de revestimento (camada integrada de 4,0 cm de HiMA/SBS + 2,0 cm de SAMI) e não 3 camadas isoladas como no resultados de deformação das simulações anteriores, bem como em camadas com espessuras maiores.

Foram feitas, também, além das simulações considerando a variação de temperatura, as simulações com temperatura fixa de 15°C e 20°C, os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 40.

Tabela 40 – Deformação específica de tração com temperatura constante.

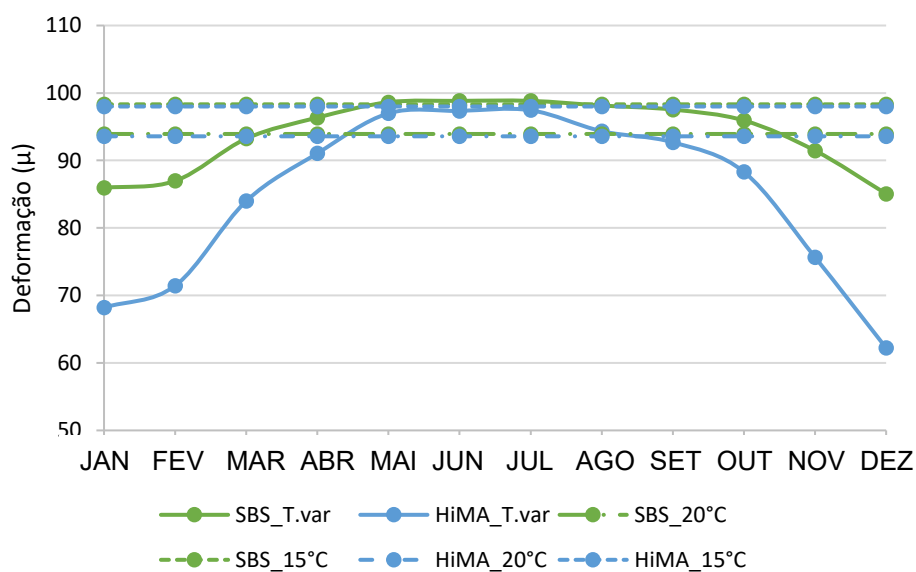
Segmento	Temperatura (°C)	Deformação na fibra inferior da mistura (μ) - 4	Deformação na fibra inferior da mistura (μ) - 6
		cm	cm
HiMA	15	98,00	155,00
	20	93,58	172,00
SBS	15	98,32	149,00
	20	93,93	169,00

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Na Figura 56, Figura 57 e Figura 58, são apresentadas as deformações obtidas nas simulações com 15°C, 20°C e com variação de temperatura (T.var) para os três períodos de análise: 09h – 16h, 17h – 00h, 01h – 08h, respectivamente, na profundidade de 4,0 cm. São apresentados nos gráficos os valores obtidos na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico dos dois segmentos monitorados.

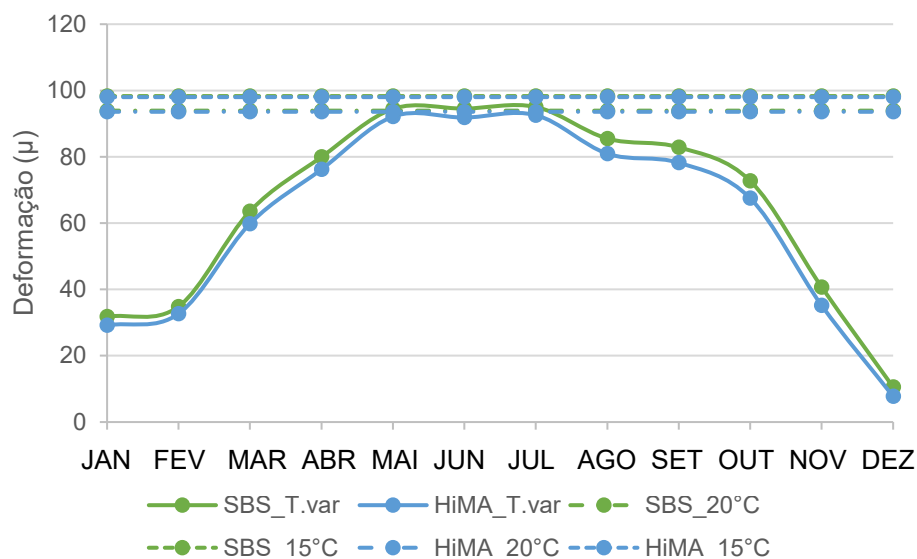
Na Figura 56 é possível observar que nos meses mais frios do ano, maio, junho e julho, as deformações com temperaturas variáveis atingem as mesmas deformações que com a temperatura constante de 15°C, devido a região estudada ser de temperaturas baixas.

Figura 56 – Deformação específica de tração no período das 09h – 16h.



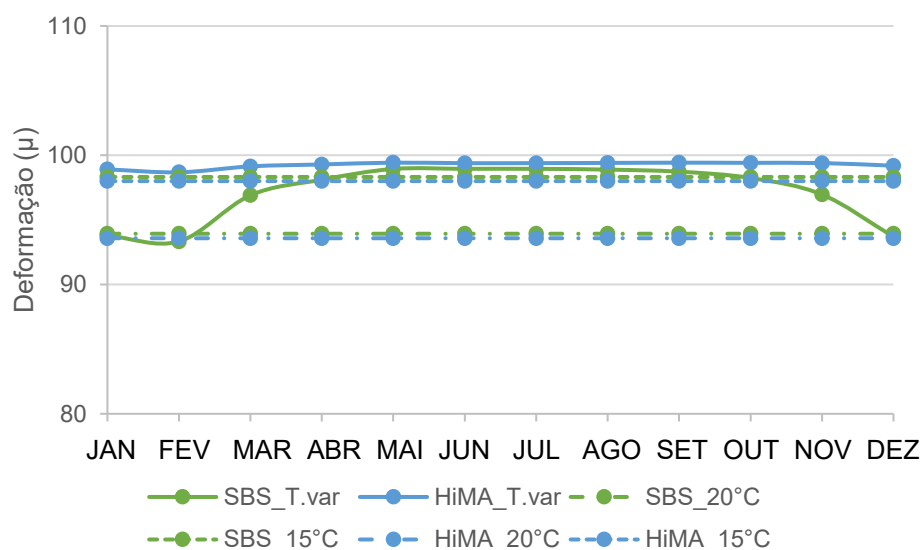
Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Figura 57 – Deformação específica de tração no período das 17h – 00h.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Figura 58 – Deformação específica de tração no período das 01h – 08h.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

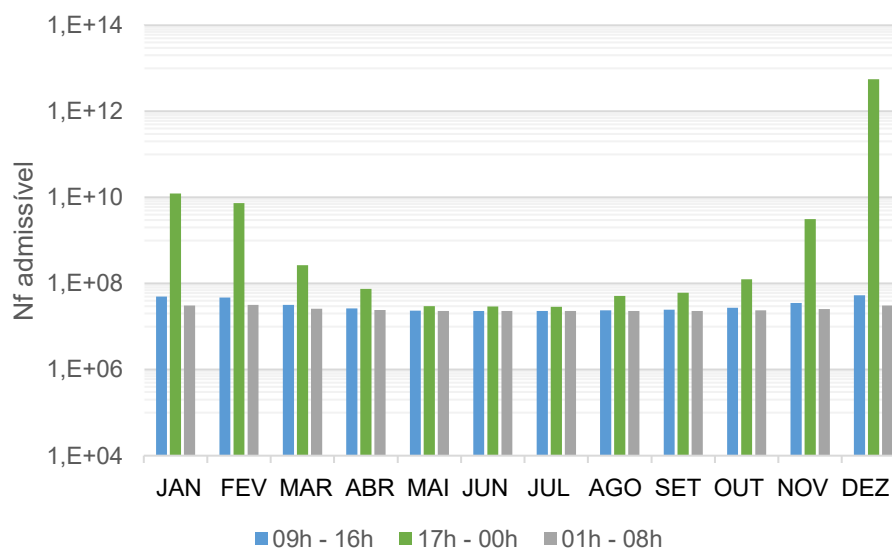
No período entre 01h – 08h, (Figura 58), as deformações do segmento HiMA com temperatura variável ficam em praticamente iguais do que as deformações de temperatura constante de 15°C, isto ocorre devido as baixas temperaturas da região durante a noite, que costumam estar abaixo de 15°C.

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

A vida útil foi estimada em termos de número de solicitações equivalentes do eixo de 8,2 tf ($N_{8,2tf}$) para a ruptura obtida com a aplicação dos modelos de fadiga apresentados na Tabela 8.

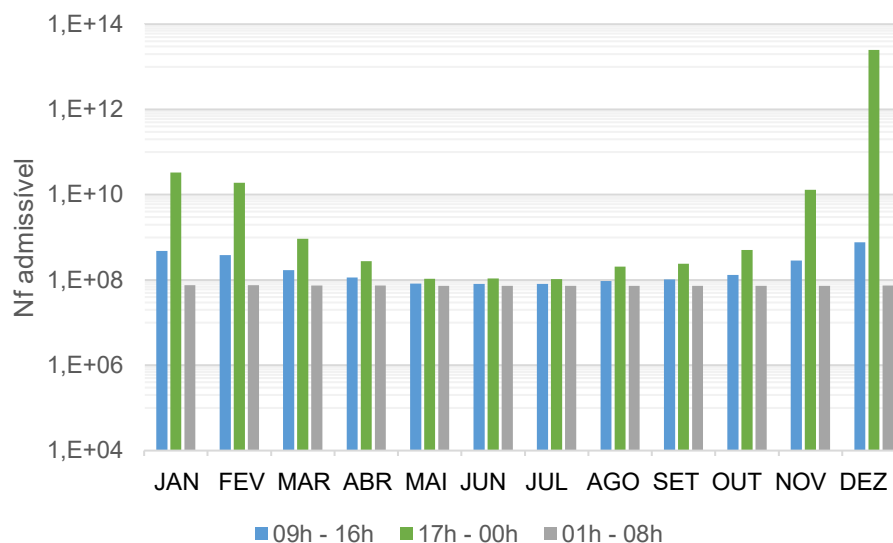
Os resultados obtidos estão apresentados no Apêndice E. A Figura 59 e a Figura 60 apresentam a variação da estimativa de vida útil (N_f admissível) ao longo do ano em cada intervalo de análise para ambos segmentos monitorados.

Figura 59 – Variação do N_f admissível ao longo do ano no segmento SBS.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Figura 60 – Variação do N_f admissível ao longo do ano no segmento HiMA.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Analisando-se a Figura 59 e a Figura 60, observa-se que o N_f admissível para ambos segmentos segue uma ordem de grandeza de 10^8 , porém os valores são ligeiramente maiores para o segmento HiMA, gerando assim a ele melhor desempenho de fadiga.

Tem-se nos meses de janeiro, fevereiro e dezembro, no período vespertino/noturno (17h – 00h) valores de N_f admissível alcançando a casa de 10^{13} esses valores específicos foram os que geraram menor deformação específica de tração, apesar de não ser cientificamente esperado, visto que são os meses mais quentes do ano.

4.8.5 Estimativa do dano acumulado no período de projeto

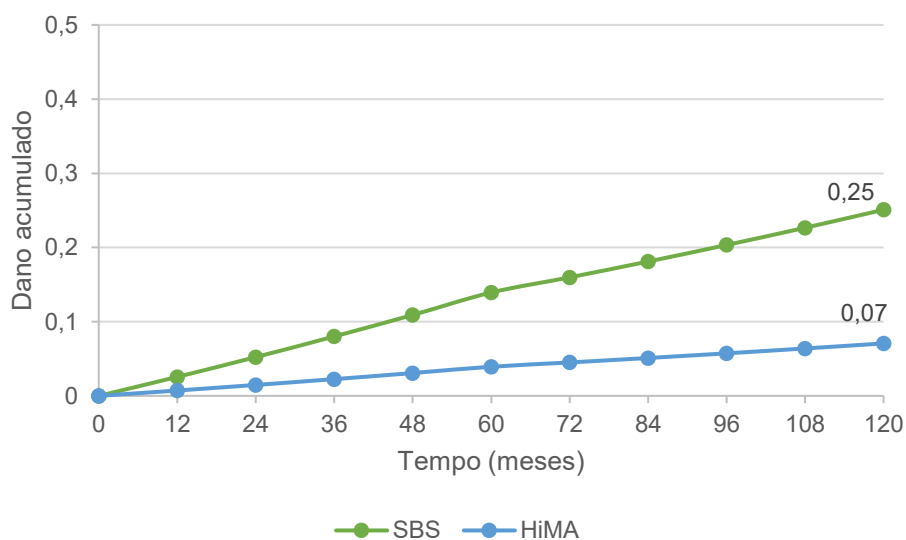
O dano acumulado no pavimento foi estimado a partir dos valores do número de repetições para atingir a ruptura do pavimento e a porcentagem de tráfego, a qual, por hipótese, foi igualmente dividida para os três períodos. Para o acúmulo do dano foi considerado que o pavimento não teria qualquer manutenção ao longo de sua vida útil e estaria apenas sofrendo deterioração.

A princípio foi determinado os três intervalos de análise do dia e para cada intervalo foi estimada a temperatura nas subcamadas do revestimento asfáltico para

os dois segmentos monitorados. As temperaturas calculadas pelo modelo de Barber (1957) foram inseridas no *software* Viscoroute com a intenção de resultar na deformação específica de tração na fibra inferior do revestimento. Utilizando as curvas de fadiga das misturas e as deformações obtidas no Viscoroute foi estimado o número de solicitações para ruptura em cada intervalo de análise. Utilizando o tráfego diário e o número de solicitações para ruptura foi estimado o dano acumulado no período de projeto. Os resultados estão apresentados no Apêndice F.

O dano foi calculado na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico (4,0 cm) e acumulado ao longo do período de projeto (120 meses). Quando o dano acumulado ultrapassa o valor 1 indica que o revestimento já teria atingido a ruptura por fadiga. A Figura 61 apresenta o dano acumulado considerando a variação de temperatura nos dois segmentos monitorados.

Figura 61 – Dano acumulado com variação de temperatura no período de projeto.

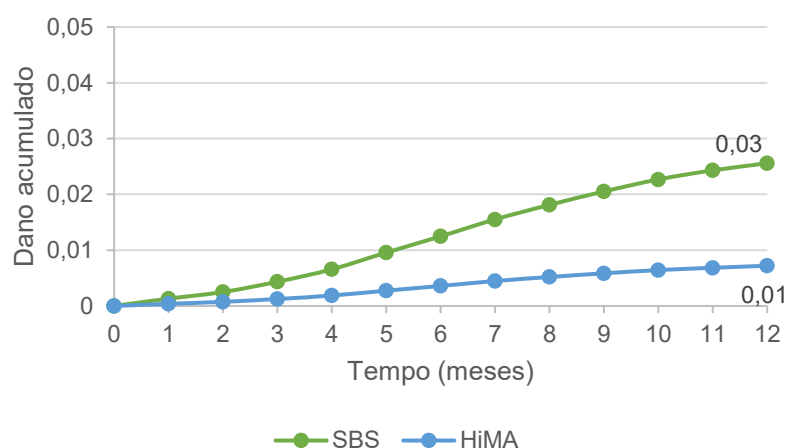


Fonte: Elaborada pela autora (2021).

É possível observar que o dano acumulado no final do período de projeto é menor que 1, o que condiz com a realidade encontrada em campo que apresenta 0% de área trincada. Ainda pode-se notar que o dano acumulado na mistura SBS é maior que o trecho executado em ligante HiMA.

Ao longo do período de projeto é possível observar que o dano acumulado não tem seu crescimento precisamente ocorrendo de forma linear, na Figura 62 é possível visualizar este comportamento nos 12 meses iniciais do projeto.

Figura 62 – Dano acumulado com variação de temperatura nos 12 meses iniciais.

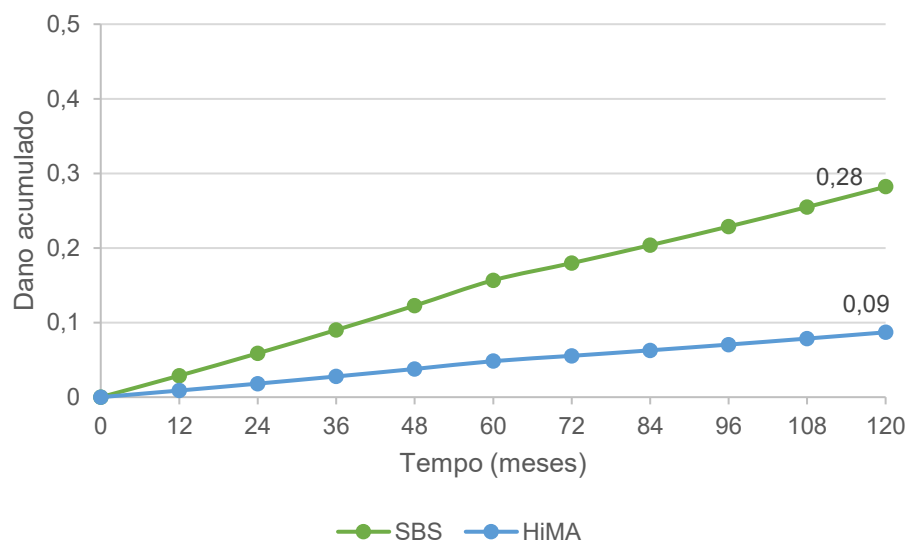


Fonte: Elaborada pela autora (2021).

A Figura 63 apresenta o dano acumulado no período de projeto considerando apenas a temperatura de 20°C. Os resultados do dano estão inseridos no Apêndice F.

Ao comparar a Figura 61 e a Figura 63, nota-se que o dano acumulado considerando a variação de temperatura é ligeiramente maior, porém não há uma grande diferença nos valores, pois a temperatura na região da serra catarinense são em geral mais baixas em relação a outros locais do estado. Para temperatura constante o melhor comportamento do dano acumulado foi também da mistura com ligante HiMA. Apesar de não haver muita diferença no dano considerando a sazonalidade de temperatura e a temperatura constante é evidente a importância de se analisar a variação da temperatura quanto ao desempenho à fadiga do material asfáltico, pois a região analisada encontra-se na serra catarinense a qual tem características de temperaturas baixas. Essa diferença é ainda maior em locais com temperaturas mais elevadas.

Figura 63 – Dano acumulado com temperatura de 20°C.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

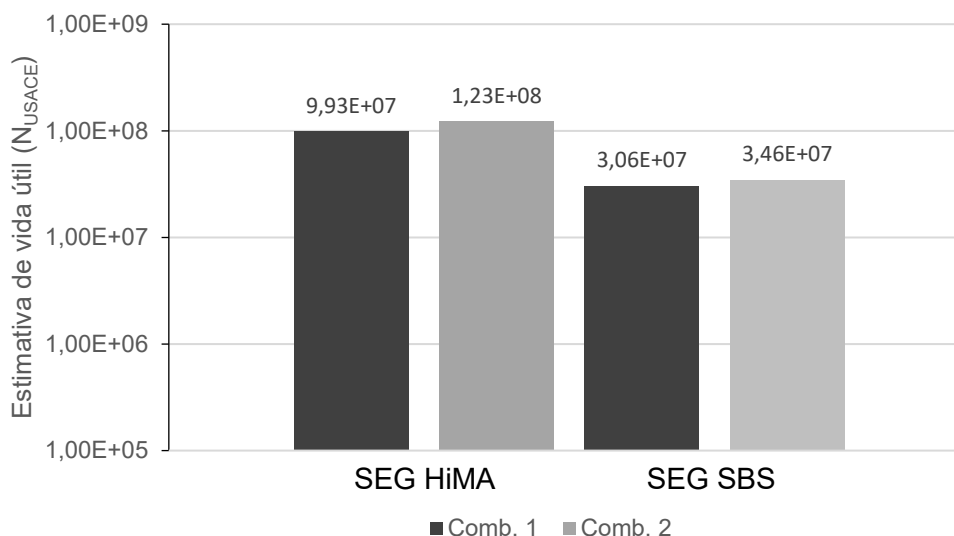
4.8.6 Estimativa de vida útil para o dano acumulado igual a 1

Quando o dano acumulado atinge o valor 1 indica que a estrutura atingiu a ruptura, de acordo com a Hipótese de Miner. Desta maneira foi calculado o tráfego que levaria ao dano acumulado igual a 1.

Foram realizadas duas combinações, onde a curva de fadiga foi de 20°C, a distribuição horária de tráfego foi constante para ambas combinações, a temperatura na combinação 1 foi de 20°C e para a combinação 2 a temperatura foi variável.

A estimativa de vida útil para cada segmentos monitorado é apresentada na Figura 64. O número de solicitações para a ruptura em cada combinação está apresentado no Apêndice G.

Figura 64 – Estimativa de vida útil a partir do dano acumulado.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

A combinação 2 apresentou valores de estimativa de vida útil ligeiramente maiores em ambos segmentos. Nesta combinação o tráfego foi mantido constante e a temperatura foi variada ao longo do ano, o que de fato ocorre em campo.

Na combinação 2 foi introduzida a variação de temperatura, então é possível observar que a vida útil aumenta com esse fator para os dois segmentos monitorados. Em relação a combinação 1, na combinação 2 houve aumento de 19,3% para o segmento HiMA e aumento de 11,6% na estimativa de vida útil para o segmentos SBS. É possível concluir que para o uso da variação de temperatura os segmentos aumentam em média 15,4% sua vida útil. Acredita-se que ocorre esse aumento devido às temperaturas amenas da região, visto que a temperatura é menor que 20°C até mesmo em alguns dias do verão.

Os métodos empíricos que são utilizados no Brasil para o dimensionamento de pavimentos não levam em consideração a variação de temperatura local. Os dados desta pesquisa apontam um aumento médio de 15% na vida útil dos pavimentos, devido à pouca variação de temperatura regional, visto que São Joaquim é uma das cidades com temperaturas mais baixas do Brasil. Já o estudo feito por Lopes (2019) em Araranguá-SC, cidade litorânea de Santa Catarina apontam reduções significativas de 80 a 90% de vida útil do pavimento considerando a sazonalidade de temperaturas.

A não consideração deste fator de variação de temperatura pode ocasionar o trincamento precoce do pavimento em campo, antes do período de projeto. É imprescindível a análise desses fatores no dimensionamento de pavimentos.

4.9 ETAPA 8 – FATOR CAMPO/LABORATÓRIO

Até o presente momento não foi possível obter um fator campo/laboratório visto que os segmentos monitorados encontram-se íntegros ao longo do período analisado (5 anos desde a abertura ao tráfego). Como visto nos resultados não existe área trincada no pavimento o que não permite a modelação dos resultados.

Quando se tem uma baixa área trincada tem-se uma incerteza maior relacionada com o procedimento da medida e está incerteza seria incorporada ao modelo, tornando-os pouco eficazes na previsão deste parâmetro para efeitos de dimensionamento da estrutura.

O principal benefício da rodovia se encontrar após 5 anos de abertura ao tráfego em perfeito estado é a manutenção zero que precisou ser feita na mesma, isto gera uma economia para o estado e para a população, além de evitar todos os transtornos relacionados a restauração da rodovia.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A pesquisa abordou a avaliação do desempenho de duas estruturas de pavimento flexível, executadas na rodovia SC-114 entre as cidades de Painel e São Joaquim – SC. A rodovia passava por diversas manutenções quase que anuais antes de 2015 (ano de abertura ao tráfego), pois se trata de um trecho que não suportava o tráfego que recebia. A proposta foi executar o trecho com ligante que atendia melhor aos defeitos de fadiga e deformação permanente. Então nesta pesquisa foi analisada a influência da temperatura da região na previsão da evolução do dano por fadiga no pavimento.

A rodovia tem seus 52 km executados com ligante HiMA e teve um segmento executado com ligante SBS 60/85-E a fim de propor um estudo e futura comparação das duas misturas asfálticas.

A rodovia tem 5 anos de abertura ao tráfego e os resultados obtidos na pesquisa apontam que ambas estruturas são significativamente eficientes em relação a deformação permanente e trincamento por fadiga. A influência da temperatura regional aponta pelas análises de dano por fadiga que ocorre uma redução na estimativa de vida útil do pavimento quando comparado às análises sem a inclusão da variação de temperatura. É importante se levar em consideração a sazonalidade da temperatura da região nos projetos de dimensionamento de pavimentos flexíveis.

5.1 CONCLUSÕES

A atualização da contagem de tráfego é fundamental para avaliar como ele se comporta em relação ao número N de projeto, e permitir que as análises de desempenho ao longo do tempo retratem o que de fato ocorre na rodovia. O projeto de restauração da rodovia foi realizado com uma contagem de 2011 pela empresa executora, em 2020 foi possível avaliar que o tráfego é ligeiramente menor que o projetado.

Em relação as condições funcionais do pavimento, ao longo dos 5 anos de abertura ao tráfego houve uma avaliação em 2017, outra em 2019 e uma em 2020, não houve em nenhuma avaliação a presença de área trincada no pavimento, os segmentos se apresentam adequados para a situação de dimensionamento.

O afundamento de trilha de roda médio do segmento HiMA é de 2,5mm e do SBS é de 2,3mm, ambos muito abaixo dos limites estabelecidos em norma. Em nenhum ponto foi encontrado afundamento maior que 4mm. O desempenho dos segmentos em relação ao afundamento de trilha de roda é satisfatório.

Em relação a macrotextura os valores encontrados ficam abaixo do sugerido por BRASIL (2006a), porém houve pouca variação desde a abertura ao tráfego, quando o trecho foi analisado por Silva (2018), então espera-se que o trecho não tenha tendência de diminuir os valores estabelecidos em norma, pois a evolução pode causar a instabilidade de veículos pela criação de lâmina d'água sobre a pista em dias chuvosos. Logo, é imprescindível a continuação do monitoramento dos segmentos experimentais a fim de propiciar o entendimento quanto ao comportamento das misturas e a manutenção da segurança do usuário.

O modelo de previsão de temperatura de Barber (1957) deu a possibilidade de estimar a temperatura no revestimento considerando a inversão que ocorre no pavimento durante o dia e noite, onde a temperatura diminui com a profundidade durante o dia e aumenta durante a noite.

As análises realizadas com o *software* Viscoroute possibilitaram a observação de que nos meses mais quentes a deformação específica de tração na fibra inferior do revestimento foi menor do que nos meses mais frios, isto ocorreu em ambas misturas. Também nota-se que durante o segundo período do dia, onde as temperaturas são mais elevadas a deformação também é menor. Acredita-se que devido a essa observação incomum, o *software* não seja tão preciso quando tem-se mais que uma camada de revestimento, visto que, para as simulações considerando a camada de SAMI integrada a de revestimento isto não ocorreu.

Analisando o número de solicitações admissível a partir dos modelos de fadiga, considerando a variação de temperatura, observou-se que o número admissível é maior nos meses mais quentes e no período matutino/noturno em ambos segmentos, reafirmando um possível descompasso do *software* com a realidade.

O dano acumulado foi maior para temperatura constante de 20°C que considerando a variação de temperatura. Acredita-se que isto ocorreu devido as baixas temperaturas da região. Para o segmento SBS o dano foi em geral três vezes

maior que para o segmento HiMA. Os resultados obtidos para o dano acumulado retratam o que existe atualmente em campo, que é uma porcentagem nula de área trincada, é imprescindível que o acompanhamento continue para se dar sequência e verificar como estará o pavimento no fim de sua vida útil.

A estimativa de vida útil considerando a variação de temperatura foi em média 15% maior do que a estimativa considerando a temperatura constante de 20°C. porém sem a inclusão desse fator o trincamento por fadiga pode ocorrer em campo antes do período previsto em projeto, principalmente em regiões com temperaturas mais altas.

O *software* Viscoroute apresentou algumas divergências nos resultados de deformação específica de tração da fibra inferior do revestimento, quando apresenta deformações altas mesmo quando as temperaturas de entrada são baixas e deformações baixas quando a temperatura de entrada é alta, isto pode ter ocorrido devido a camada fina de espessura do revestimento, visto que outros autores que utilizaram o *software* como Luz (2017) e Lopes (2019) simularam camadas de até 18,0 cm de revestimento, ou ainda uma discordância quando se tem três camadas de revestimento, sendo 4,00 cm de HiMA ou SBS, 2,00 cm de SAMI e 1,00 cm de camada remanescente.

De um modo geral os dois segmentos apresentaram bom desempenho quanto a fadiga e deformação permanente, o segmento HiMA apresentou melhores resultados na estimativa de vida útil e o segmento SBS apresentou uma média menor de afundamento de trilha de roda, acredita-se que os dois segmentos irão atingir a vida de serviço sem problemas na estrutura do pavimento e sem trincamento, porém é necessário que os monitoramos continuem ao longo dos anos.

Como os segmentos não apresentaram área trincada até o presente momento, não foi possível determinar um fator campo/laboratório. Devido ao bom estado do pavimento é inviável a realização de uma correlação entre os resultados obtidos em laboratório com os resultados de desempenho à fadiga em campo, até o momento o fator campo/laboratório é igual a 1. Deve-se continuar os monitoramentos até o fim do período de projeto para verificar o comportamento da estrutura para que seja possível obter um fator confiável.

Antes de se executar a restauração da rodovia SC-114 o histórico de manutenção se dava a cada dois anos, pois a rodovia tinha altas deflexões e uma

elevada porcentagem de área trincada. Este problema foi extinguido após a execução com Ligante HiMA, visto que a rodovia se encontra com 5 anos de liberação ao tráfego e não houve a necessidade de nenhuma intervenção.

5.2 SUGESTÕES

Recomenda-se para trabalhos futuros:

- Continuar o monitoramento dos segmentos até o fim do período de projeto, para acompanhar a evolução do desempenho funcional e estrutural do trecho;
- Realização com o auxílio de instrumentação do perfil de temperaturas da região no revestimento para comparar e aprimorar as simulações realizadas;
- Verificar também em outras regiões a influência da temperatura no dimensionamento de pavimentos, para aperfeiçoar o método incluindo este fator;
- Prosseguir com os levantamentos de defeitos no trecho com o objetivo de alcançar um fator campo/laboratório.

REFERÊNCIAS

ABTC – **Associação Brasileira de Logística e Transporte de Carga**. Brasil, 2020. Disponível em: <<https://www.abtc.org.br/index.php/noticias/noticias-do-setor/item/6121-concessoes-de-rodovias-sofrem-com-recorde-na-queda-do-trafego-diz-abcr>>. Acessado em: 07 jan. 2021

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.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM E 303: Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester**. USA, 2013.

_____. **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 965: Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique**. USA, 2015.

_____. **ASTM E 1703/E 1703M: Standard Test Method for Measuring Rut-Depth of Pavement Surfaces Using a Straightedge**. USA, 2015.

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.

BAAJ, H. **Comportement a la fatigue des matériaux granulaires traités aux liants hydrocarbonés**. Tese (Doutorado). L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2002.

BARBER, E. S. **Calculation of maximum pavement temperatures from weather reports**. Boletim nº 168, HRB, 1957.

BARROS, L. M. **Deformação permanente de misturas asfálticas: avaliação do desempenho conforme critério de Flow Number de misturas quentes e mornas**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS, 2017.

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS, ABEDA, 2010.

BEUTLER, C. S. **Avaliação do desempenho da reciclagem de pavimento com adição de cimento: estudo de caso da rodovia SC-355**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

BISCONSINI, D. R. **Avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos com dados coletados por smartphones**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

BLAŽEJOWSKI, K.; OLSZACKI, J.; PECIAKOWSKI, H. **Highly modified binders orbiton HiMA**. Version 1e, 2015.

BOEIRA, F. D.; **Estudo da rigidez da deformação permanente e da fadiga de misturas asfálticas com ligantes convencionais e modificados**. Tese (Doutorado). Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

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.

BORGES, R. L. **Deformação permanente em misturas asfálticas a partir do shift model viscoplástico e ensaios triaxiais de carga repetida**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2014.

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, 1994b.

_____. **DNER-PRO 273/96 - PRO: 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 006/2003 - PRO: Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos**. Rio de Janeiro, 2003b.

_____. **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, 2003c.

_____. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. Rio de Janeiro, 2006a.

_____. **DNIT 031/2006 - ES: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico**. Rio de Janeiro, 2006b.

_____. **DNIT IPR-723: Manual de Estudos de Tráfego.** Rio de Janeiro, Brasil, 2006c.

_____. **DNIT 135/2010 - ME: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação do módulo de resiliência.** Rio de Janeiro, 2010a.

_____. **DNIT 136/2010 - ME: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral.** Rio de Janeiro, 2010b.

_____. **DNIT 129 - EM - Especificação de Material - Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico.** Rio de Janeiro, 2011.

BUDNY, J. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

CNN Brasil, 2020. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/business/2021/01/05/trafego-da-ecorodovias-recua-6-8-durante-pandemia>>. Acessado em: 07 jan. 2021.

CHOI, Y. T. **Development of a mechanistic prediction model and test protocol for the permanent deformation of asphalt concrete.** (Dissertation of Philosophy). North Carolina State University. 2013.

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 2020: relatório gerencial.** Brasília, 2020.

De La ROCHE, C. **Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux.** Tese (Doutorado). Ecole Centrale de Paris, Paris, 1996.

DER – Departamento de Estradas de Rodagem. **DER - IP-DE-P00/003: Avaliação funcional e estrutural de pavimentos.** São Paulo, 2006.

DI BENEDETTO, H. *et al.* **Fatigue of bituminous mixtures.** In: Materials and structures, v. 37, n. 3. 2004.

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.

ENGEVIX. **Projeto de reabilitação da SC-114, trecho Painel-São Joaquim.** Projeto Final de Engenharia Parte 2: Projeto Executivo. Vol.1. Florianópolis, Brasil, 2012.

FACCIN, C. **Concretos asfálticos em utilização no Rio Grande do Sul: Comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

FERREIRA, J. L. S.; BASTOS, J. B. D.; SOARES, J. B. **Validação da metodologia de faixa de agregados dominantes para avaliação e especificação da granulometria de misturas asfálticas densas.** Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET. Ouro Preto. 2015.

FHWA – Federal Highway Administration. **Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis.** FHWA-SA-95-003. Washington, 1995.

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. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV.** Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

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.

HAAS R.; HUDSON, W. R.; ZANIEWSKI, J. **Modern pavement management.** Florida: Krieger Publ. 1994.

HAFEEZ, I. **Impact of hot mix asphalt properties on its permanent deformation behavior.** 152 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Department of Civil Engineering and Environmental Engineering, University of Engineering and Technology Taxila, 2009.

JORNAL ESTADÃO. **Pandemia faz movimento de veículos nas rodovias cair 18,4% – Brasil, 2020.** Disponível em: <<https://estradao.estadao.com.br/caminhoes/covid-19-derruba-fluxo-nas-rodovias/>>. Acessado em: 07 jan. 2021.

KAKUDA, F. M. **Desenvolvimento e a utilização de um equipamento de grandes dimensões na análise do comportamento mecânico de uma seção de pavimento sob carregamento cíclico.** Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

KLINSKY, L. M. G.; FARIA, V.C; BARELLA, R. **Determinação da Resistência à Fadiga de Misturas Asfálticas a partir de dois métodos de ensaio com diferentes tipos de asfalto.** Relatório CCR-ND-FADRTF. 2015.

KRATON. **Highly modified asphalt (HiMA) next generation in asphalt pavement design**, 2012.

LACROIX, A. T. **Performance prediction of the NCAT test track pavements using mechanistic models**. Dissertation (Doctor of Philosophy). North Carolina State University, 2013.

LEITE, L F. M. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros**. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

LI, Y.; LIU, L.; SUN, L. **Temperature predictions for asphalt pavement with thick asphalt layer**. Construction and Building Materials, 160, pp. 802-809, 2018.

LOPES, T. A. S. **Análise do efeito da sazonalidade da temperatura e do tráfego no desempenho de pavimentos flexíveis: segmentos monitorados de Araranguá**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

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, 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.

MANO, E. B. **Introdução a polímeros**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1985.

_____. **Polímeros, produção e aplicação**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1991.

MANSOURIAN, A.; GOAHRI A. R.; KHOSROWSSHAHI, F. K. **Performance evaluation of asphalt binder modified with EVA/HDPE/nanoclay based on linear and non-linear viscoelastic behaviors**. Construction and Building Materials. v. 208, p. 554-563, 2019.

MANUEL LPC, **Manuel LPC d'alde à la formulation des enrobés**. Groupe de Travail RST "Formulation des enrobés". Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris, France, 2007.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3ª Ed. Rio de Janeiro, 2015.

MELO, J. V. S. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com**

nanocompósitos. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

MIRZAIYAN, D.; AMERI, M.; AMINI, A.; SABOURI, M.; NOROUZI, A. **Evaluation of the performance and temperature susceptibility of gilsonite and SBS-modified asphalt binders.** Construction and Building Materials. v. 207, p. 679-692, 2019.

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. **Fatigue characteristics of asphalt paving mixtures and their use in pavement design.** In: Proceedings of 18th Paving Conference, University of New Mexico, Albuquerque, 1981.

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.

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

NASCIMENTO, L. A. H. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

NUÑEZ, J. Y. M. **Caracterização à fadiga de ligantes asfálticos modificados envelhecidos a curto e longo prazo.** Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, São Paulo, 2013.

ONOFRE, F. C. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas produzidas com ligantes asfálticos modificados por ácido polifosfórico e aditivos poliméricos, enfatizando a resistência à deformação permanente.** Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2012.

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.

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.

PARTL, M. N.; BAHIA, H. U.; CANESTRARI, F.; LA ROCHE, C. de.; DI BENEDETTO, H.; PIBER, H.; SYBILSKI, D. **Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials**. State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 206-ATB. RILEM, 2013.

PÉREZ, J. D. L. **Avaliação do desempenho de pavimentos flexíveis dos segmentos monitorados de Urubici e Itapoá**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

PESSOA, F. H. C. **Avaliações funcional e estrutural de trechos de rodovias no Distrito Federal construídos com diferentes materiais**. Tese (Doutorado). Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

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.

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.

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.

RIVIÈRE, N. **Comportement en fatigue des enrobés bitumineux**. Tese (Doutorado). Université de Bordeaux I. 1996.

RODRIGUES FILHO, O. S. **Características de aderência de revestimentos asfálticos aeroportuários. Estudo de caso do aeroporto internacional de São Paulo/Congonhas**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

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.; 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.

SILVA, A. M. **Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas projetadas com CAP HiMA e CAP 60/85-E Aplicadas na restauração de um trecho da rodovia SC-114.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

SILVA, J. P. S. **Aderência pneu-pavimento em revestimentos asfálticos aeroportuários.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 134 f., 2008.

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.

SOUSA, J. B.; CRAUS, J.; MONISMITH, C. L. **Summary Report on Permanent Deformation in Asphalt Concrete.** SHRP-A/IR-91-104. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, D. C. 1991.

VAVRIK, W. R.; HUBER, G.; PINE, W. ET AL. **Bailey Method for Gradation Selection in HMA Mixture Design.** Transportation Research Board: Transportation Research Circular Number E-C044, Washington, D. C., EUA. 2002

YAO, Z.; ZHANG, J.; GAO, F.; LIU, S.; YU, T. **Integrated utilization of recycled crumb rubber and polyethylene for enhancing the performance of modified bitumen.** Construction and Building Materials. v. 170, p. 217-224. 2018.

ZEIADA, W. **Endurance limit for HMA based on healing phenomenon using viscoelastic continuum damage analysis.** Tese (Doutorado). Arizona State University, 2012.

ZHANG, D.; CHEN, M.; WU, S.; RIARA, M.; WAN, J.; LI, Y. **Thermal and rheological performance of asphalt binders modified with expanded grafite/polyethylene glycol composite phase change material (EP-CPCM).** Construction and Building Materials. v. 194, p. 83-91, 2019.

ZHENG, Y.; ZHANG, P.; LIU, H. **Correlation between pavement temperature and deflection basin form factors of asphalt pavement.** International Journal of Pavement Engineering, 2017.

ZHOU, Z.; GU, X.; DONG, Q.; NI, F.; JIANG, Y. **Rutting and fatigue cracking performance of SBS-RAP blended binders with a rejuvenator.** Construction and Building Materials. v. 203, p. 294-303, 2019.

APÊNDICE A – Dados do levantamento de 2019**APÊNDICE A.1 Afundamento de trilha de roda**

Apêndice A.1.1 – Afundamento de trilha de roda do segmento com ligante

HiMA.

Estaca	TRE (mm) (Terceira Faixa)
270+920	1
271+940	0
271+960	0
271+980	0
271+000	0
271+020	1
271+040	2
271+060	1
271+080	2
271+100	1
271+120	2
271+140	1
271+160	0
271+180	1
271+200	0

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Apêndice A.1.2 – Afundamento de trilha de roda do segmento com ligante SBS.

Estaca	TRE (mm) (Terceira Faixa)
270+640	1
270+660	1
270+680	1
270+700	3
270+720	1
270+740	1
270+760	1
270+780	1
270+800	1
270+820	1
270+840	2
270+860	1
270+880	1
270+900	1
270+920	0

Fonte: Elaborada pela autora (2021).

APÊNDICE B – Dados do levantamento de 2020**APÊNDICE B.1 Afundamento de trilha de roda**

Apêndice B.1.1 – Afundamento de trilha de roda do segmento com ligante

HiMA.

Estaca	TRE (mm) (Terceira Faixa)
270+920	2,5
271+940	2
271+960	2,5
271+980	1,5
271+000	3
271+020	2
271+040	4
271+060	3
271+080	3,5
271+100	4
271+120	2
271+140	2,5
271+160	2,5
271+180	2,5
271+200	1

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

Apêndice B.1.2 – Afundamento de trilha de roda do segmento com ligante SBS.

Estaca	TRE (mm) (Terceira Faixa)
270+640	1,5
270+660	3,5
270+680	3
270+700	3
270+720	2
270+740	3,5
270+760	1
270+780	3
270+800	2,5
270+820	2
270+840	2,5
270+860	2
270+880	1,5
270+900	1,5
270+920	2

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

APÊNDICE B.2 Macrotextura

Apêndice B.2.1 – Macrotextura do segmento com ligante HiMA.

Estaca		HS ou TX (mm)	Classificação DNIT
270+920	TRE	0,61502	Média
271+940	TRE	0,58008	Média
271+960	TRE	0,58132	Média
271+980	TRE	0,54017	Média
271+000	TRE	0,58008	Média
271+020	TRE	0,52069	Média
271+040	TRE	0,61637	Média
271+060	TRE	0,54352	Média
271+080	TRE	0,53575	Média
271+100	TRE	0,55959	Média
271+120	TRE	0,62046	Média
271+140	TRE	0,61367	Média
271+160	TRE	0,59781	Média
271+180	TRE	0,57394	Média
271+200	TRE	0,58759	Média

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

Apêndice B.2.2 – Macrotextura do segmento com ligante SBS.

Estaca		HS ou TX (mm)	Classificação DNIT
270+640	TRE	0,449	Média
270+660	TRE	0,576	Média
270+680	TRE	0,501	Média
270+700	TRE	0,465	Média
270+720	TRE	0,504	Média
270+740	TRE	0,517	Média
270+760	TRE	0,449	Média
270+780	TRE	0,411	Média
270+800	TRE	0,410	Média
270+820	TRE	0,391	Fina ou Fechada
270+840	TRE	0,499	Média
270+860	TRE	0,367	Fina ou Fechada
270+880	TRE	0,442	Média
270+900	TRE	0,412	Média
270+920	TRE	0,445	Média

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

APÊNDICE C – Dados da contagem de tráfego

APÊNDICE C.1 Contagem de tráfego (set/2020)

Apêndice C.1.1 – Resumo dos dados brutos coletados.

Dia e Horário		Terça-feira (06:00 às 19:00)		Quarta-feira (06:00 às 19:00)		Quinta-feira (06:00 às 19:00)	
Sentido		Active	Declive	Active	Declive	Active	Declive
Carros de passeio	-	439	420	416	359	448	439
Caminhonetas	-	109	113	110	106	108	104
Ônibus	2C	6	5	7	5	6	6
	3C	0	0	0	0	1	0
Caminhões	2C	65	78	65	84	62	74
	3C	78	74	81	67	75	73
	4C	0	0	0	0	0	0
	2S1	0	0	1	1	0	1
	2S2	22	20	19	14	18	15
	2S3	5	2	3	2	1	3
	3S2	1	1	2	2	0	0
	3S3	12	14	9	13	13	19
	2C2	0	1	0	0	0	1
	2C3	0	0	0	0	0	0
	3C2	0	0	1	1	0	0
	3C3	2	2	2	2	2	2
	7 eixos	0	0	0	2	2	3

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

APÊNDICE D – Temperatura média do ar e desvio padrão

APÊNDICE D.1 Temperatura média do ar horária e desvio padrão em São Joaquim com base nos dados do INMET de 2008 à 2019

Apêndice D.1.1 – Temperatura média do ar horária e desvio padrão.

Hora	JAN		FEV		MAR		ABR		MAI		JUN	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
0	16,08	2,28	16,52	2,35	14,66	2,24	13,18	3,10	10,55	3,20	8,94	3,89
1	15,84	2,28	16,29	2,33	14,44	2,28	12,98	3,11	10,34	3,23	8,80	4,00
2	15,64	2,33	16,13	2,34	14,27	2,29	12,82	3,18	10,26	3,13	8,70	4,00
3	15,47	2,31	15,95	2,37	14,08	2,35	12,68	3,22	10,11	3,27	8,57	4,01
4	15,25	2,31	15,79	2,40	13,89	2,41	12,52	3,25	9,99	3,29	8,39	4,06
5	15,14	2,31	15,63	2,36	13,75	2,41	12,36	3,27	9,86	3,30	8,26	4,07
6	15,03	2,31	15,48	2,38	13,59	2,42	12,23	3,23	9,72	3,35	8,14	4,06
7	14,98	2,32	15,42	2,39	13,47	2,39	12,11	3,28	9,65	3,33	8,07	4,08
8	14,84	2,32	15,34	2,41	13,39	2,38	12,01	3,32	9,54	3,36	8,01	4,04
9	15,08	2,19	15,30	2,38	13,34	2,40	11,95	3,33	9,43	3,43	7,96	4,13
10	16,04	2,15	16,06	2,41	13,89	2,34	12,26	3,26	9,51	3,43	7,99	4,11
11	17,28	2,23	17,23	2,51	15,06	2,26	13,44	3,18	10,46	3,25	8,82	3,94
12	18,54	2,32	18,44	2,55	16,37	2,30	14,75	3,20	11,50	3,18	9,91	3,87
13	19,67	2,44	19,58	2,73	17,60	2,35	15,90	3,33	12,67	3,17	11,12	3,76
14	20,57	2,59	20,47	2,83	18,58	2,38	16,86	3,33	13,62	3,18	12,08	3,77
15	21,12	2,69	21,15	2,92	19,26	2,45	17,54	3,40	14,31	3,24	12,83	3,76
16	21,31	2,92	21,44	3,01	19,65	2,58	17,91	3,45	14,76	3,28	13,26	3,77
17	21,34	3,09	21,47	3,20	19,83	2,67	18,09	3,52	14,90	3,31	13,42	3,71
18	21,09	3,12	21,22	3,25	19,65	2,71	17,96	3,56	14,64	3,27	13,18	3,71
19	20,66	3,22	20,52	3,16	19,08	2,82	17,34	3,53	14,10	3,22	12,65	3,69
20	19,64	3,04	19,83	2,97	18,13	2,76	16,24	3,52	12,93	3,08	11,28	3,54
21	18,56	2,83	18,60	2,87	16,74	2,55	14,59	3,23	11,62	2,97	10,03	3,56
22	17,33	2,48	17,46	2,59	15,58	2,31	13,77	3,19	11,05	3,03	9,54	3,73
23	16,53	2,34	16,79	2,46	14,98	2,24	13,32	3,22	10,72	3,11	9,26	3,80

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

Apêndice D.1.2 – Temperatura média do ar horária e desvio padrão (continuação).

Hora	JUL		AGO		SET		OUT		NOV		DEZ	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
0	9,11	4,25	10,36	4,16	11,25	4,24	12,35	3,28	13,48	2,89	15,26	2,83
1	9,02	4,23	10,13	4,20	10,98	4,31	12,07	3,34	13,20	2,93	14,92	2,80
2	8,87	4,18	9,94	4,19	10,70	4,31	11,81	3,37	12,95	2,99	14,67	2,87
3	8,76	4,09	9,74	4,21	10,53	4,39	11,64	3,46	12,73	3,06	14,49	2,92
4	8,51	4,26	9,60	4,22	10,44	4,36	11,46	3,54	12,51	3,06	14,30	2,97
5	8,45	4,23	9,38	4,26	10,24	4,34	11,32	3,55	12,23	3,03	14,08	2,99
6	8,35	4,25	9,25	4,21	10,10	4,38	11,20	3,59	12,07	3,08	13,89	2,98
7	8,22	4,32	9,13	4,26	10,06	4,42	11,16	3,59	11,93	3,12	13,81	2,94
8	8,23	4,25	9,02	4,32	10,02	4,40	11,05	3,74	11,85	3,14	13,68	2,96
9	8,24	4,17	8,94	4,35	9,99	4,39	11,17	3,64	12,35	3,02	14,16	2,84
10	8,29	4,21	9,19	4,45	10,51	4,30	12,09	3,52	13,45	2,93	15,30	2,72
11	8,88	4,29	10,27	4,52	11,64	4,37	13,24	3,48	14,81	2,92	16,68	2,82
12	10,04	4,30	11,71	4,53	12,98	4,38	14,48	3,53	16,14	2,97	17,96	2,90
13	11,23	4,27	13,13	4,59	14,10	4,53	15,53	3,62	17,27	3,10	19,06	2,99
14	12,26	4,31	14,30	4,71	15,04	4,52	16,34	3,64	18,19	3,15	19,92	3,10
15	12,97	4,34	15,12	4,68	15,71	4,56	16,92	3,61	18,78	3,12	20,59	3,26
16	13,54	4,37	15,48	4,68	16,11	4,60	17,39	3,68	19,26	3,18	20,99	3,35
17	13,71	4,31	15,70	4,66	16,36	4,64	17,42	3,69	19,33	3,21	21,01	3,46
18	13,57	4,21	15,42	4,66	16,14	4,64	17,32	3,67	18,98	3,28	20,76	3,59
19	13,07	4,20	14,98	4,62	15,61	4,55	16,79	3,59	18,33	3,27	20,19	3,50
20	11,80	4,11	13,85	4,47	14,68	4,44	15,85	3,51	17,50	3,30	19,37	3,49
21	10,25	3,95	12,08	4,21	13,08	4,16	14,43	3,30	16,15	3,04	18,25	3,24
22	9,65	4,01	11,21	4,18	12,08	4,06	13,28	3,16	14,68	2,77	16,75	2,99
23	9,36	4,07	10,80	4,21	11,57	4,10	12,73	3,25	13,93	2,79	15,84	2,85

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

APÊNDICE E – N_f calculado para cada segmento monitorado

APÊNDICE E.1 Número de solicitações para a ruptura com variação 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 HiMA.

Mês	N_f		
	09h - 16h	17h - 00h	01h - 08h
Janeiro	4,81E+08	3,33E+10	7,53E+07
Fevereiro	3,82E+08	1,90E+10	7,62E+07
Março	1,70E+08	9,24E+08	7,45E+07
Abril	1,14E+08	2,77E+08	7,39E+07
Maio	8,31E+07	1,07E+08	7,34E+07
Junho	8,15E+07	1,09E+08	7,35E+07
Julho	8,11E+07	1,05E+08	7,35E+07
Agosto	9,54E+07	2,05E+08	7,35E+07
Setembro	1,04E+08	2,43E+08	7,34E+07
Outubro	1,33E+08	5,07E+08	7,34E+07
Novembro	2,87E+08	1,31E+10	7,35E+07
Dezembro	7,62E+08	2,48E+13	7,43E+07

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

Apêndice E.1.2 – N_f calculado para cada período do dia ao longo do ano na fibra inferior do revestimento asfáltico do segmento SBS.

Mês	N_f		
	09h - 16h	17h - 00h	01h - 08h
Janeiro	5,01E+07	1,23E+10	3,08E+07
Fevereiro	4,69E+07	7,44E+09	3,17E+07
Março	3,19E+07	2,66E+08	2,57E+07
Abril	2,66E+07	7,47E+07	2,40E+07
Maio	2,33E+07	2,97E+07	2,29E+07
Junho	2,31E+07	2,95E+07	2,29E+07
Julho	2,31E+07	2,87E+07	2,29E+07
Agosto	2,40E+07	5,15E+07	2,30E+07
Setembro	2,48E+07	6,12E+07	2,32E+07
Outubro	2,72E+07	1,26E+08	2,39E+07
Novembro	3,55E+07	3,15E+09	2,57E+07
Dezembro	5,30E+07	5,57E+12	3,10E+07

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

APÊNDICE F – Dano acumulado

APÊNDICE F.1 Dano acumulado considerando a variação de temperatura e distribuição de tráfego horária

Apêndice F.1.1 – Dano acumulado na fibra inferior do revestimento asfáltico do segmento HiMA.

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Soma	Acum.
2015	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
2016	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
2017	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02
2018	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03
2019	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04
2020	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,05
2021	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,05
2022	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,06
2023	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,06
2024	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,07

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

Apêndice F.1.2 – Dano acumulado na fibra inferior do revestimento asfáltico do segmento SBS.

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Soma	Acum.
2015	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,03
2016	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,05
2017	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,08
2018	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,11
2019	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,14
2020	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,16
2021	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,18
2022	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,20
2023	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,23
2024	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,25

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

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 HiMA.

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Soma	Acum.
2015	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,01	0,01
2016	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,01	0,02
2017	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,01	0,03
2018	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,01	0,04
2019	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,01	0,05
2020	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,01	0,06
2021	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,01	0,06
2022	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,01	0,07
2023	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,01	0,08
2024	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,01	0,09

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

Apêndice F.2.2 – Dano acumulado na fibra inferior do revestimento asfáltico do segmento SBS.

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Soma	Acum.
2015	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,03	0,03
2016	0,003	0,002	0,003	0,002	0,003	0,002	0,003	0,003	0,002	0,003	0,002	0,003	0,03	0,06
2017	0,003	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,03	0,09
2018	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,03	0,12
2019	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,03	0,16
2020	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,02	0,18
2021	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,02	0,20
2022	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,03	0,23
2023	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,03	0,25
2024	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,03	0,28

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

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 HiMA.

Mês	JAN a DEZ		
Período	09h - 16h	17h - 00h	01h - 08h
N_f	9,93E+07		
Tráfego diário (%)	100%		
(% tráfego)/ N_f	1,01E-08		
Estimativa de vida útil *	9,93E+07		

* Estimativa de vida útil igual ao N_f , pois foi considerada constante a distribuição de tráfego nesta combinação.

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

Apêndice G.1.2 – Estimativa de vida útil para o segmento SBS.

Mês	JAN a DEZ		
Período	09h - 16h	17h - 00h	01h - 08h
N_f	3,06E+07		
Tráfego diário (%)	100%		
(% tráfego)/ N_f	3,27E-08		
Estimativa de vida útil *	3,06E+07		

* Estimativa de vida útil igual ao N_f , pois foi considerada constante a distribuição de tráfego nesta combinação.

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

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 HiMA.

Mês	Jan			Fev			Mar		
Período	09h-16h	17h-00h	01h-08h	09h-16h	17h-00h	01h-08h	09h-16h	17h-00h	01h-08h
N _f	4,8E+08	3,3E+10	7,5E+07	3,8E+08	1,9E+10	7,6E+07	1,7E+08	9,2E+08	7,4E+07
Tráfego diário (%)*	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%
Tráfego anual (%)**	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%
(Tráf. Anual %)/(N _f)	5,8E-11	8,3E-13	3,7E-10	7,3E-11	1,5E-12	3,6E-10	1,6E-10	3,0E-11	3,7E-10
Mês	Abr			Mai			Jun		
Período	09h-16h	17h-00h	01h-08h	09h-16h	17h-00h	01h-08h	09h-16h	17h-00h	01h-08h
N _f	1,1E+08	2,8E+08	7,4E+07	8,3E+07	1,1E+08	7,3E+07	8,2E+07	1,1E+08	7,4E+07
Tráfego diário (%)*	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%
Tráfego anual (%)**	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%
(Tráf. Anual %)/(N _f)	2,4E-10	1,0E-10	3,7E-10	3,3E-10	2,6E-10	3,8E-10	3,4E-10	2,5E-10	3,8E-10
Mês	Jul			Ago			Set		
Período	09h-16h	17h-00h	01h-08h	09h-16h	17h-00h	01h-08h	09h-16h	17h-00h	01h-08h
N _f	8,1E+07	1,0E+08	7,4E+07	9,5E+07	2,0E+08	7,3E+07	1,0E+08	2,4E+08	7,3E+07
Tráfego diário (%)*	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%
Tráfego anual (%)**	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%
(Tráf. Anual %)/(N _f)	3,4E-10	2,6E-10	3,8E-10	2,9E-10	1,4E-10	3,8E-10	2,7E-10	1,1E-10	3,8E-10
Mês	Out			Nov			Dez		
Período	09h-16h	17h-00h	01h-08h	09h-16h	17h-00h	01h-08h	09h-16h	17h-00h	01h-08h
N _f	1,3E+08	5,1E+08	7,3E+07	2,9E+08	1,3E+10	7,4E+07	7,6E+08	2,5E+13	7,4E+07
Tráfego diário (%)*	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%
Tráfego anual (%)**	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%
(Tráf. Anual %)/(N _f)	2,1E-10	5,5E-11	3,8E-10	9,7E-11	2,1E-12	3,8E-10	3,6E-11	1,1E-15	3,7E-10
SOMA ((% tráfego anual)/(N _f))								8,2E-09	
Estimativa de vida útil								1,23E+08	

*Tráfego diário: constante ao longo do dia, foram utilizadas porcentagens indicadas porque os três períodos do dia possuem 8 horas de duração.

**Tráfego anual: quanto a porcentagem do tráfego diário represente do tráfego anual. Dentro do mês, considerou-se a mesma condição todos os dias. Assim, dividiu-se a porcentagem por 12 para encontrar a porcentagem do tráfego anual que passa em cada período de análise.

Fonte: Elaborada pela autora (2021)

Apêndice G.2.2 – Estimativa de vida útil para o segmento SBS.

Mês	Jan			Fev			Mar		
Período	09h-16h	17h-00h	01h-08h	09h-16h	17h-00h	01h-08h	09h-16h	17h-00h	01h-08h
Nf	5,0E+07	1,2E+10	3,1E+07	4,7E+07	7,4E+09	3,2E+07	3,2E+07	2,7E+08	2,6E+07
Tráfego diário (%)*	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%
Tráfego anual (%)**	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%
(Tráf. Anual %)/(Nf)	5,5E-10	2,2E-12	9,0E-10	5,9E-10	3,7E-12	8,7E-10	8,7E-10	1,0E-10	1,1E-09
Mês	Abr			Mai			Jun		
Período	09h-16h	17h-00h	01h-08h	09h-16h	17h-00h	01h-08h	09h-16h	17h-00h	01h-08h
Nf	2,7E+07	7,5E+07	2,4E+07	2,3E+07	3,0E+07	2,3E+07	2,3E+07	2,9E+07	2,3E+07
Tráfego diário (%)*	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%
Tráfego anual (%)**	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%
(Tráf. Anual %)/(Nf)	1,0E-09	3,7E-10	1,2E-09	1,2E-09	9,3E-10	1,2E-09	1,2E-09	9,4E-10	1,2E-09
Mês	Jul			Ago			Set		
Período	09h-16h	17h-00h	01h-08h	09h-16h	17h-00h	01h-08h	09h-16h	17h-00h	01h-08h
Nf	2,3E+07	2,9E+07	2,3E+07	2,4E+07	5,2E+07	2,3E+07	2,5E+07	6,1E+07	2,3E+07
Tráfego diário (%)*	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%
Tráfego anual (%)**	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%
(Tráf. Anual %)/(Nf)	1,2E-09	9,7E-10	1,2E-09	1,2E-09	5,4E-10	1,2E-09	1,1E-09	4,5E-10	1,2E-09
Mês	Out			Nov			Dez		
Período	09h-16h	17h-00h	01h-08h	09h-16h	17h-00h	01h-08h	09h-16h	17h-00h	01h-08h
Nf	2,7E+07	1,3E+08	2,4E+07	3,5E+07	3,1E+09	2,6E+07	5,3E+07	5,6E+12	3,1E+07
Tráfego diário (%)*	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%	33,33%
Tráfego anual (%)**	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%	2,77%
(Tráf. Anual %)/(Nf)	1,0E-09	2,2E-10	1,2E-09	7,8E-10	8,8E-12	1,1E-09	5,2E-10	5,0E-15	8,9E-10
SOMA ((% tráfego anual)/(Nf))								2,9E-08	
Estimativa de vida útil								3,46E+07	

*Tráfego diário: constante ao longo do dia, foram utilizadas porcentagens indicadas porque os três períodos do dia possuem 8 horas de duração.

**Tráfego anual: quanto a porcentagem do tráfego diário represente do tráfego anual. Dentro do mês, considerou-se a mesma condição todos os dias. Assim, dividiu-se a porcentagem por 12 para encontrar a porcentagem do tráfego anual que passa em cada período de análise.

Fonte: Elaborada pela autora (2021)