

Allan Monteiro Silva

**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 submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Santa Catarina
para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Glicério Trichês.

Florianópolis
2018

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

Silva, Allan Monteiro
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 / Allan Monteiro Silva ; orientador, Glicério
Trichês, 2018.
153 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Mistura asfáltica. 3.
HiMA. 4. Desempenho mecânico. I. Trichês, Glicério.
II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III.
Título.

Allan Monteiro Silva

**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**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 15 de fevereiro de 2018.

Prof. Glicério Trichês, Dr.
Coordenador do Curso

Prof. Glicério Trichês, Dr.
Orientador

Banca Examinadora:

Prof^ª. Liedi Legi Bariani Bernucci, Dr^ª.
Universidade de São Paulo
(Via Skype)

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

Prof. João Victor Staub de Melo, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, por me mostrar que em tudo há um ensinamento.

À família, meus pais Osmar e Luciane, minha irmã Mariane, obrigado pelo apoio e pelo carinho nesta jornada.

À minha namorada Kelly, pelo carinho, paciência e compreensão nestes anos, obrigado por me tornar uma pessoa melhor.

Ao professor Glicério Trichês, por ser referência e exemplo. Agradeço os ensinamentos, a confiança, a paciência e a amizade nesta caminhada.

À professora Liseane, pelos ensinamentos, incentivo e contribuições neste trabalho.

Ao professor João pelas contribuições para a pesquisa e por aceitar avaliar este trabalho.

À professora Liedi, por aceitar participar da banca examinadora.

Ao DEINFRA, em especial ao engenheiro Jaimir e ao engenheiro Romeu que possibilitaram a execução dos segmentos experimentais.

Aos amigos da Engevix: Antenor, Hugo, José, Júnior e Sérgio, pela fundamental ajuda.

Aos amigos da Compasa, em especial ao engenheiro Yan por todo o apoio e cooperação durante a pesquisa.

Ao engenheiro Antônio Santos pelo conhecimento, confiança e motivação a mim passados.

Aos meus colegas e amigos do Laboratório de Pavimentação: Adosindro, Ângela, Drielle, Emmanuelle, Gabriela, Job, Jonathan, Lídia e Thomas. Obrigado por fazerem parte desta jornada. Agradeço, em especial, a Emmanuelle e a Gabriela, pela incansável assistência que me deram durante a pesquisa.

Ao PPGEC/UFSC, pela oportunidade e pelo aprendizado.

À Rede Temática do Asfalto/Petrobras, pelos investimentos no Laboratório de Pavimentação da UFSC, fundamentais para a realização dessa pesquisa.

Agradeço a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

A qualidade das rodovias é um importante indicador de desenvolvimento do País. A necessidade de expansão da malha rodoviária e de restauração de grande parte das rodovias pavimentadas têm demandado a utilização de materiais mais resistentes às condições ambientais e às impostas pelo tráfego aliadas à redução dos custos de intervenções precoces e à expansão da malha pavimentada com qualidade e conforto ao rolamento. Surgem, no mercado, ligantes asfálticos que prenunciam alto desempenho quanto aos principais defeitos dos pavimentos flexíveis, como o ligante altamente modificado por polímero, o *Highly Modified Asphalt* – HiMA, cujo uso, no entanto, ainda é incipiente no Brasil. A investigação do desempenho mecânico de misturas asfálticas com este tipo de ligante, em comparação a misturas com materiais já consolidados no Brasil, torna-se essencial para a consolidação e emprego desse ligante. Esta pesquisa teve por objetivo avaliar o desempenho mecânico de misturas asfálticas projetadas com o CAP HiMA e CAP 60/85-E, aplicadas na restauração de um trecho da rodovia SC-114, no estado de Santa Catarina, Brasil. Foram executados segmentos experimentais em campo, nos quais se retiraram corpos de prova para determinar o desempenho à fadiga no equipamento de flexão alternada em viga de quatro pontos e à deformação permanente no simulador de tráfego francês *Orniéreur*. No estudo, a mistura asfáltica com o CAP HiMA apresentou desempenho superior ao da mistura que continha o CAP 60/85-E quanto à fadiga, devido às propriedades elásticas do CAP HiMA, enquanto que, no ensaio à deformação permanente, o melhor desempenho foi o da mistura com o CAP 60/85-E, motivado pelo volume de vazios. A execução dos segmentos experimentais permitiu o monitoramento das misturas asfálticas em campo, onde não foram observados defeitos estruturais ou funcionais dentro do prazo da pesquisa. O comparativo de custo e vida útil das misturas asfálticas evidenciou que, para locais de alto tráfego, a mistura com o CAP HiMA é mais vantajosa que a mistura com o CAP 60/85-E.

Palavras-chave: Mistura asfáltica. HiMA. Desempenho mecânico.

ABSTRACT

The quality of highways is an important indicator of a country development. The need for road network expansion and rehabilitation of a large number of the existing paved highways has demanded the use of materials that are more resistant to both environmental and traffic-imposed conditions. This should also be combined with cost reduction of early interventions and the expansion of a paved road network offering quality and comfortable driving conditions. Asphalt binders that predict high performance for the main defects of flexible pavements have appeared on the market, such as the highly modified polymer binder – the Highly Modified Asphalt (HiMA) – whose use is still incipient in Brazil. Investigating the mechanical performance of asphalt mixtures with this type of binder and compare them to mixtures with materials already consolidated in Brazil becomes essential for consolidating its use. The objective of this research was to evaluate the mechanical performance of asphalt mixtures designed with CAP HiMA and CAP 60/85-E, applied in the rehabilitation of a section of highway SC-114 in the state of Santa Catarina, Brazil. Field tests were performed using test specimens to determine fatigue performance on the four-point beam alternating bending machine, and permanent deformation on the French traffic simulator Orniéreur. In the study, the asphalt mixture with CAP HiMA showed higher performance when compared to the mixture containing CAP 60/85-E regarding fatigue, due to the elastic properties of CAP HiMA, while, on the permanent deformation test, the best performance was the mixture with CAP 60/85 -E, caused by the volume of voids. Performing experimental segments tests enabled field monitoring of asphalt mixtures, and no structural or functional defects were observed throughout the research period. Life-cycle cost comparison between the asphalt mixtures showed that CAP HiMA mix is more advantageous than CAP 60/85-E mix to high traffic sites.

Keywords: Asphalt mix. HiMA. Mechanical performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Efeito do incremento de polímero no asfalto.....	31
Figura 2 - Módulo resiliente versus temperatura de ensaio para diferentes frequências da mistura Trap1, Texas.....	41
Figura 3 - Curvas de fadiga obtidas na <i>Delft University</i>	44
Figura 4 - Curvas de fadiga obtidas com equipamento de tração indireta e velocidade controlada, (a) pedreira Jambeiro (b) pedreira Pombal.....	46
Figura 5 - Curvas de fadiga obtidas com equipamento de flexão alternada, (a) Pedreira Jambeiro (b) pedreira Pombal.....	47
Figura 6 - Curvas de fadiga com ligantes Orbiton 25/55-80 HiMA e Orbiton 45/80-80 HiMA.....	49
Figura 7 - Posição da camada de SAMI na restauração do pavimento.	54
Figura 8 - Fluxograma das etapas desta pesquisa.....	59
Figura 9 - Desenho esquemático dos segmentos experimentais.....	61
Figura 10 - Mapa de localização da área de estudo.....	63
Figura 11 - Determinação as espessuras das camadas existentes.....	67
Figura 12 - Perfil da estrutura existente.....	68
Figura 13 - Perfil das estruturas dos segmentos experimentais.....	73
Figura 14 - Intervalo entre as faixas C DNIT e a proposta para SAMI.	76
Figura 15 - Curvas granulométricas dos materiais.....	77
Figura 16 - Curva granulométrica da mistura tipo SAMI.....	79
Figura 17 - Curva granulométrica da mistura com a faixa VI.....	81
Figura 18 - Pista fresada recebendo a primeira camada – SAMI.....	82
Figura 19 - Execução da 2ª camada - Faixa VI.....	83
Figura 20 - Compactação da 2ª camada.....	83
Figura 21 - Usina misturadora TEREX MAGNUM 140 A.....	84
Figura 22 - Ensaio de deflexão através da Viga Benkelman.....	86
Figura 23 - Ensaio de mancha de areia no segmento experimental.....	87
Figura 24 - Extração dos corpos de prova no trecho experimental.....	89
Figura 25 - Corpos de prova serrados, prontos para o ensaio de fadiga.	90
Figura 26 - Equipamento para ensaio de fadiga.....	90
Figura 27 - Pontos de controle da deformação permanente.....	91
Figura 28 - Gráfico comparativo das curvas isócronas.....	106
Figura 29 - Comparativo das misturas no Espaço de Black.....	107
Figura 30 - Curvas mestras para as 2 misturas.....	109
Figura 31 - Comparativo das 2 misturas no plano Cole-Cole.....	110
Figura 32 - Comparativo das curvas de fadiga das 2 misturas.....	113
Figura 33 - Gráfico das curvas de desempenho à fadiga.....	117
Figura 34 - Deformação permanente das misturas asfálticas.....	122

Figura 35 - Estrutura proposta para a simulação numérica.....	124
Figura 36 - Esquema de carregamento.....	125
Figura 37 - Perfil deflectométrico longitudinal da pista direita.	133
Figura 38 - Perfil deflectométrico longitudinal da pista esquerda.	134
Figura 39 - Deformação no segmento SBS-6,0%.	137
Figura 40 - Aspecto do segmento SBS-6,0%, em janeiro de 2018.	137
Figura 41 - Deformação no segmento HiMA-6,0%.....	138
Figura 42 - Aspecto do segmento HiMA-6,0%, em janeiro de 2018..	138

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações do CAP modificado por polímeros elastoméricos.....	28
Tabela 2 - Ligantes asfálticos modificados com o polímero D0243.	32
Tabela 3 - Ligantes asfálticos e PG à alta temperatura.....	33
Tabela 4 - Valores típicos de módulo resiliente.	35
Tabela 5 - Variação dos elementos da mistura asfáltica.....	45
Tabela 6 - Resultado da simulação de desempenho à fadiga.	48
Tabela 7 - Disposição dos segmentos experimentais.	60
Tabela 8 - Coordenadas dos segmentos experimentais.	64
Tabela 9 - Extremos da série histórica com relação à temperatura.	65
Tabela 10 - Temperaturas médias ao longo do ano (1961-2016).	65
Tabela 11 - Característica mensal de chuva (1961-2016).	66
Tabela 12 - Resumo da avaliação objetiva.	68
Tabela 13 - Parâmetros deflectométricos do segmento homogêneo 11.	69
Tabela 14 - Módulos resilientes das camadas existentes.....	70
Tabela 15 - Número N previsto para 2024.	70
Tabela 16 - Estrutura prevista no projeto original de restauração do pavimento.....	71
Tabela 17 - Parâmetros admissíveis e calculados para a estrutura.	71
Tabela 18 - Dados de entrada no SisPav para o projeto original.....	72
Tabela 19 - Dados de entrada no SisPav para a alternativa proposta. ...	72
Tabela 20 - Resultados apresentados com o SisPav.....	73
Tabela 21 - Granulometria da cal tipo CH-1.	75
Tabela 22 - Comparativo entre a faixa C do DNIT e a faixa proposta para SAMI.....	76
Tabela 23 - Resultado do peneiramento dos materiais.	77
Tabela 24 - Composição granulométrica da mistura.	78
Tabela 25 - Distribuição granulométrica da mistura, dentro da faixa C adaptada para SAMI.....	78
Tabela 26 - Intervalos da faixa granulométrica VI do DEINFRA.....	79
Tabela 27 - Composição dos agregados.	80
Tabela 28 - Graduação da mistura dos agregados.	80
Tabela 29 - Faixas de temperaturas para o processo de usinagem.	85
Tabela 30 - Faixas de temperaturas durante a compactação.	86
Tabela 31 - Resultados do ligante CAP AMP 60/85-E.	94
Tabela 32 - Viscosidade com a temperatura do CAP AMP 60/85-E. ...	95
Tabela 33 - Especificação e resultados do ligante CAP HiMA.....	96
Tabela 34 - Viscosidade com a temperatura do CAP HiMA.	96
Tabela 35 - Parâmetros Marshall das misturas asfálticas tipo SAMI... ..	98

Tabela 36 - Parâmetros Marshall para 2 misturas com a faixa VI.	99
Tabela 37 - Vazios com ar e saturação dos corpos de prova.....	101
Tabela 38 - Ensaio de dano por umidade induzida com HiMA-6,0%. 101	
Tabela 39 - Ensaio de dano por umidade induzida com SBS-6,0%....	101
Tabela 40 - Módulo resiliente para mistura HiMA-6,0%.	103
Tabela 41 - Módulo resiliente, mistura tipo SAMI, ligante HiMA (teor 6,5%).....	103
Tabela 42 - Módulo resiliente, mistura SBS-6,0%, obtido na UFSC..	103
Tabela 43 - Módulo complexo na varredura de frequência e temperatura do ensaio.	105
Tabela 44 - Ângulo de fase na varredura de frequência e temperatura do ensaio.	106
Tabela 45 - Coeficientes de transladação horizontal das 2 misturas... 108	
Tabela 46 - Resultados do ensaio de fadiga da mistura SBS-6,0%....	112
Tabela 47 - Resultados do ensaio de fadiga da mistura HiMA-6,0%. 112	
Tabela 48 - Comparativo da resistência à fadiga.	114
Tabela 49 - Resumo dos parâmetros das misturas asfálticas.....	115
Tabela 50 - Resumo dos parâmetros de fadiga, 20°C, 10Hz.....	116
Tabela 51 - Resumo da granulometria das misturas asfálticas.....	116
Tabela 52 - Classificação das misturas para níveis de 50 e 100 µε....	119
Tabela 53 - Classificação das misturas para 1,00E+07 ciclos.....	120
Tabela 54 - Volume de vazios dos corpos de prova.....	121
Tabela 55 - Percentual de afundamento médio das misturas.	122
Tabela 56 - Parâmetros viscoelásticos de Huet-Sayegh.....	124
Tabela 57 - Parâmetros das camadas remanescentes.	125
Tabela 58 - desempenho à fadiga das misturas asfálticas	126
Tabela 59 - Preço de aquisição dos ligantes em novembro de 2017... 127	
Tabela 60 - Demonstrativo do custo de usinagem.	128
Tabela 61 - Espessuras de mistura asfáltica para o mesmo número N.128	
Tabela 62 - Custo do ligante por tonelada de mistura asfáltica.....	129
Tabela 63 - Quantidade de mistura asfáltica para 1 km de pista.	129
Tabela 64 - Comparativo final do custo para 1 km de pista.....	129
Tabela 65 - Deflexões ($D_0 \times 10^{-2}$ mm) medidas em diferentes períodos na pista direita - Segmento experimental SBS-6,0%.....	131
Tabela 66 - Deflexões ($D_0 \times 10^{-2}$ mm) medidas em diferentes períodos na pista direita - Segmento experimental HIMA-6,0%	132
Tabela 67 - Resumo das deflexões características ($\times 10^{-2}$ mm).	132
Tabela 68 - Resultado do ensaio de mancha de areia.....	136

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMP	Asfalto modificado por polímero
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
APA	<i>Asphalt Pavement Analyzer</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BBR	<i>Bending Beam Rheometer</i>
C_1 e C_2	Constantes dependentes do material
CA	Concreto asfáltico
CALTRANS	<i>Califórnia Department of Transportation</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAUQ	Concreto asfáltico usinado à quente
CH	Cal hidratada
cm	Centímetro
Cp	Corpo de prova
CPA	Camada porosa de atrito
DEINFRA	Departamento Estadual de Infraestrutura
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer</i>
E^*	Módulo complexo
E_0	Módulo estático
E_1	Módulo de armazenamento ou real
E_2	Módulo de perda ou imaginária
E_∞	Módulo complexo infinito
EM	Especificação de material
EVA	Etileno acetato de vinila
F	Fator de escala ou direção
f	Frequência
fr	Frequência reduzida
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
GLWT	<i>Georgia Loaded Wheel Tester</i>
h	Parâmetro dos elementos parabólicos, situado no intervalo entre $0 < k < h < 1$
HFPO	<i>Heavy fraction of pyrolysis oil</i>
HiMA	<i>Highly Modified Asphalt</i>

HWTD	<i>Hamburg Wheel Tracking Devices</i>
Hz	Hertz
i	Número complexo definido por $i^2 = -1$
ICPF	Índice da Condição do Pavimento Flexível
IDOT	<i>Illinois Department of Transportation</i>
IFSTTAR	<i>Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de L'aménagement et des Réseaux</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
k	Parâmetro dos elementos parabólicos, situado no intervalo entre $0 < k < h < 1$
kgf	Quilograma-força
LAS	<i>Linear Amplitude Sweep</i>
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
LTDA	Limitada
LVDT	<i>Linear variable differential transformer</i>
Máx.	Máximo
ME	Método de ensaio
Mín.	Mínimo
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
MR	Módulo resiliente
NCAT	<i>Nacional Center for Asphalt Technology</i>
PG	<i>Performance Grade</i>
PRO	Procedimento
PVC	Policloreto de vinila
R	Constante universal dos gases
RBV	Relação Betume/Vazios
RICE	Densidade Máxima Medida
rpm	Rotações por minuto
RTCD	Resistência à tração por compressão diametral
RTFOT	<i>Rolling Thin Film Oven Test</i>
SAMI	<i>Stress absorbing membrane interlayer</i>
SBR	<i>Styrene butadiene rubber</i>
SBS	<i>Styrene butadiene styrene</i>
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SICRO	Sistema de Custos Referenciais de Obras
SMA	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
t	Tempo
T	Temperatura
TLA	<i>Trinidad Lake Asphalt</i>
T_{ref}	Temperatura de referência

UFPR	Universidade Federal do Paraná
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
VAM	Vazios do Agregado Mineral
V _v	Volume de vazios
δ	Constante adimensional, função da natureza do ligante asfáltico e da granulometria da mistura asfáltica
δH	Energia de ativação característica do material
ε	Amplitude complexa de deformação sinusoidal
ε_x	Deformação de tração no diâmetro horizontal
σ_1	Tensão vertical
σ_3	Tensão de confinamento
σ_d	Tensão desvio
σ_x ; $\sigma_{\text{horizontal}}$	Tensão horizontal
σ_y ; σ_{vertical}	Tensão vertical
φ	Ângulo de fase
ω	Frequência angular da solitação $\omega = 2\pi f$
θ	Temperatura, °C
τ	Tempo de relaxação em função da temperatura (θ)
μ	Coefficiente de Poisson

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	OBJETIVOS.....	23
1.1.1	Objetivo geral.....	23
1.1.2	Objetivos específicos.....	23
1.2	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO ESTUDO.....	23
1.3	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	24
2	REFERENCIAL TEÓRICO	27
2.1	LIGANTES MODIFICADOS.....	27
2.1.1	Pesquisas relacionadas à modificação asfáltica.....	29
2.1.2	O ligante altamente modificado por polímero - HiMA	30
2.2	DEFORMABILIDADE DO PAVIMENTO.....	33
2.2.1	Deflexões.....	33
2.2.2	Módulo resiliente.....	34
2.2.3	Módulo Complexo.....	37
2.2.4	Influência da temperatura e da frequência na rigidez	40
2.2.5	Fadiga	41
2.2.6	Deformação permanente.....	50
2.3	TÉCNICAS DE RESTAURAÇÃO DO PAVIMENTO.....	52
2.3.1	Reforço do pavimento	52
2.3.2	Reciclagem do pavimento	54
2.3.3	Reconstrução do pavimento.....	55
2.4	RESUMO DO CAPÍTULO	55
3	MÉTODOS DA PESQUISA	59
3.1	DESCRIÇÃO DA PESQUISA.....	60
3.1.1	Seleção e formação da área de pesquisa.....	60
3.1.2	Localização e identificação dos segmentos experimentais.....	62
3.1.3	Condições ambientais da região	64
3.2	CARACTERIZAÇÃO DO PAVIMENTO EXISTENTE E PROJETO DE RESTAURAÇÃO	67
3.2.1	Projeto existente	67
3.2.2	Projeto de restauração.....	70
3.2.3	Configuração das estruturas nos segmentos experimentais.....	73
3.3	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	74
3.3.1	Agregados pétreos	74
3.3.2	Fíler	74
3.3.3	Ligantes asfálticos	75
3.3.4	Projeto das misturas asfálticas.....	75
3.4	EXECUÇÃO DOS SEGMENTOS EXPERIMENTAIS.....	81
3.4.1	Histórico da execução.....	81

3.4.2	Controles tecnológicos da execução.....	84
3.5	CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	87
3.5.1	Determinação do dano por umidade induzida	87
3.5.2	Módulos resilientes obtidos em laboratório	88
3.5.3	Determinação comportamento reológico das misturas asfálticas.....	88
3.5.4	Determinação da resistência à fadiga das misturas asfálticas.....	89
3.5.5	Determinação da resistência à deformação permanente das misturas asfálticas	91
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	93
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	93
4.1.1	Agregados pétreos.....	93
4.1.2	Ligantes asfálticos.....	94
4.1.3	Composição das misturas asfálticas	97
4.1.4	Resistência ao dano por umidade induzida	100
4.1.5	Rigidez das misturas asfálticas.....	102
4.1.6	Desempenho à fadiga	111
4.1.7	Desempenho à deformação permanente.....	121
4.2	VIDA ÚTIL DOS SEGMENTOS EXPERIMENTAIS	123
4.2.1	Simulação do desempenho à fadiga das misturas asfálticas.....	123
4.2.2	Relação entre custo e vida útil das misturas asfálticas	126
4.3	SEGMENTOS EXPERIMENTAIS	130
4.3.1	Monitoramento deflectométrico	130
4.3.2	Monitoramento dos defeitos na superfície do pavimento.....	135
5	CONCLUSÕES	141
	REFERÊNCIAS.....	145

1 INTRODUÇÃO

No Brasil predomina o sistema rodoviário como principal meio de transporte de cargas e passageiros. As rodovias são responsáveis pelo deslocamento de mais de 61% das cargas e aproximadamente 95% dos passageiros, o que torna a infraestrutura rodoviária um dos principais agentes de desenvolvimento socioeconômico do país (CNT, 2017). Para o *World Economic Forum* (2017) a qualidade das rodovias é um indicador de desempenho e desenvolvimento do país. Em 2017 a organização publicou o *The Global Competitiveness Report*, no qual o Brasil ocupa a 103ª posição de um ranking com 137 países em relação a qualidade de rodovias, reflexo da necessidade de mais investimentos na infraestrutura rodoviária para manter e ampliar a malha existente.

Rodovias em melhores condições e que oferecem maior conforto ao rolamento colaboram para o crescimento e o desenvolvimento do País. A percepção de conforto e segurança sentida pelo usuário aumenta a intenção de viagens, assim rodovias em boas condições induzem ao desenvolvimento turístico e econômico de micro e macrorregiões. A conservação e manutenção da infraestrutura rodoviária também colabora para a economia do poder público. Trechos em boas condições de sinalização e conservação do pavimento diminuem o risco de acidentes que frequentemente incidem seus custos à administração pública. Entretanto, a densidade da malha pavimentada brasileira é pequena e apresenta necessidade de melhorias em muitos aspectos. Segundo o Sistema Nacional de Viação - SNV (2016), a malha rodoviária nacional consiste em 212.866 km de rodovias pavimentadas e 1.365.426 km de rodovias não pavimentadas.

Notadamente, os dados do SNV demonstram a necessidade de expansão da malha pavimentada com o objetivo de levar desenvolvimento e igualdade social em todas as regiões do País. Com relação à parcela pavimentada existente, a 21ª edição da pesquisa CNT (2017) de rodovias apontou que 61,74%, de um total de 105.814 km de rodovias avaliadas, apresentam condições entre regular a péssima e com relação ao estado do pavimento este percentual corresponde a 50%. Os dados desta pesquisa demonstram a necessidade de restauração de uma grande porcentagem da malha existente, e que ao fazer esta restauração, é necessário que sejam empregados materiais mais resistentes às condições ambientais e às impostas pelo tráfego, com objetivo de atingir a vida de serviço projetada, reduzindo custos com intervenções precoces.

Neste sentido, a indústria de produtos asfálticos tem disponibilizado ao mercado brasileiro, ligantes asfálticos modificados

que prometem um alto desempenho quanto aos principais defeitos dos pavimentos flexíveis brasileiros, o trincamento e a deformação permanente. O ligante altamente modificado por polímero *Highly Modified Asphalt* – HiMA é um destes produtos, que vem apresentando bom desempenho mecânico e reológico em misturas asfálticas, segundo a literatura internacional (SCHOLTEN *et al.*,2011; BŁAŻEJOWSKI *et al.* 2015; KLUTZ *et al.* 2016).

No entanto, a utilização deste ligante é relativamente recente e de pequena expressão no Brasil, por ser um ligante considerado com alto custo de aquisição e pelo desconhecimento em relação a sua real capacidade de desempenho. Por esta razão, é necessário promover a investigação do desempenho mecânico e do comportamento reológico de misturas asfálticas com este tipo de ligante, em comparação a misturas com materiais já consolidados no país, como o ligante asfáltico modificado por polímero AMP 60/85-E.

No estado de Santa Catarina, a primeira aplicação deste ligante em misturas asfálticas foi no trecho da rodovia SC-114 entre os municípios de Painel e São Joaquim, onde evidenciou-se a necessidade de compreender o comportamento de misturas asfálticas projetadas com o ligante HiMA.

Motivada neste contexto, esta pesquisa vem por investigar e comparar o desempenho mecânico de misturas asfálticas modificadas com o CAP HiMA e o CAP AMP 60/85-E empregadas na restauração de pavimentos rodoviários catarinenses, utilizando como ferramentas de pesquisa a execução de segmentos experimentais, o monitoramento em campo e a investigação em laboratório.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral avaliar o desempenho mecânico de misturas asfálticas modificadas com CAP HiMA e CAP 60/85-E aplicadas na restauração de pavimento.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos propostos para este estudo são:

- Avaliar o desempenho mecânico das misturas asfálticas modificadas com CAP HiMA e CAP 60/85-E;
- Avaliar o comportamento reológico das misturas asfálticas modificadas com CAP HiMA e CAP 60/85-E;
- Comparar os resultados de desempenho à fadiga entre as misturas estudadas e com outras literaturas que possuem elementos comuns às misturas propostas;
- Estimar a vida útil dos segmentos experimentais pela simulação do desempenho à fadiga;
- Mensurar a relação entre custo e benefícios de aplicação das misturas estudadas, com relação ao tipo de ligante, na restauração de pavimentos flexíveis;
- Monitorar o desempenho funcional e estrutural dos segmentos experimentais dentro do prazo desta pesquisa;
- Propor o acompanhamento das condições do pavimento nos segmentos experimentais para determinar o fator campo-laboratório;

1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO ESTUDO

A infraestrutura rodoviária é um dos principais agentes do desenvolvimento socioeconômico do país. Rodovias em melhores condições traduzem-se em economia e desenvolvimento para micro e macrorregiões. Processos mais ágeis de execução e restauração do pavimento, aliados a materiais com alto desempenho, colaboram para a aceleração do crescimento no país. Surgem, no Brasil, novos materiais como o ligante asfáltico HiMA, que pode ser extremamente benéfico à pavimentação e restauração de rodovias, com alto desempenho ao trincamento e a deformação permanente, segundo a literatura

internacional. Contudo, é necessário a investigação do desempenho mecânico e reológico de misturas asfálticas com este material para que se possa estabelecer a relação entre o custo e o benefício, comparativamente, a outros materiais já consolidados no mercado brasileiro. E é neste contexto, em que se procura materiais de alto desempenho aliados ao melhor custo-benefício, que esta investigação do desempenho mecânico e comportamento reológico de misturas asfálticas modificadas com o CAP HiMA e o CAP AMP 60/85-E empregadas na restauração de pavimentos rodoviários catarinenses se insere, utilizando como ferramentas de pesquisa a execução de segmentos experimentais, a investigação em laboratório e o monitoramento em campo.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta pesquisa está organizada em 5 capítulos descritos de forma sucinta a seguir:

- Capítulo 1 - Introdução: tem por objetivo contextualizar a pesquisa frente ao cenário da infraestrutura rodoviária brasileira, apresentando as justificativas e a relevância deste estudo, assim como os objetivos a serem alcançados para a validação da pesquisa como fonte de informação sobre os materiais e os métodos empregados na restauração de pavimentos;
- Capítulo 2 - Referencial Teórico: neste capítulo está apresentada uma revisão da literatura sobre os principais assuntos abordados na pesquisa como os ligantes asfálticos modificados, a deformabilidade e as técnicas de restauração do pavimento. Tem por objetivo retratar o entendimento quanto aos ligantes modificados, em especial o CAP HiMA, retratar o comportamento mecânico e reológico de misturas asfálticas estudadas por outros autores e servir de orientação ao desenvolvimento da pesquisa;
- Capítulo 3 - Método da Pesquisa: neste capítulo é apresentada e desenvolvida a metodologia da pesquisa e as características dos materiais envolvidos. Está apresentada no desenvolvimento a descrição, seleção e formação da área de pesquisa com relação às misturas asfálticas e da execução dos segmentos experimentais. As características do pavimento existente, da região, dos materiais e das misturas asfálticas, bem como as metodologias de ensaio estão descritas no desenvolvimento deste capítulo;
- Capítulo 4 - Discussão e resultados: analisa-se os resultados obtidos com o desenvolvimento da pesquisa. Expõe-se os

resultados de forma comparativa a fim de demonstrar o desempenho das misturas asfálticas, apresenta-se o estudo da vida útil das misturas asfálticas, assim como do monitoramento e acompanhamento dos segmentos experimentais;

- Capítulo 5 - Conclusões: o capítulo apresenta as considerações finais obtidas com o desenvolvimento da dissertação, discorrendo sobre o desempenho das misturas asfálticas e dos principais aspectos que envolvem a restauração de pavimentos flexíveis.

Ao final desta pesquisa, encontram-se as referências bibliográficas que fundamentam esta dissertação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 LIGANTES MODIFICADOS

O asfalto é uma mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo que pode ser obtido de forma natural ou por destilação, essencialmente composto por betume. Quimicamente, o asfalto é composto por uma mistura complexa de hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos não voláteis de elevada massa molecular e pequenas estruturas heterocíclicas contendo outros elementos como enxofre, nitrogênio e oxigênio. No Brasil, utiliza-se a definição CAP (cimento asfáltico de petróleo) para designar o ligante asfáltico que se torna semissólido em baixas temperaturas, viscoelástico a temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas (CERATTI e REIS, 2011).

Os ligantes convencionais têm um bom desempenho para a utilização no meio rodoviário, atendendo aos requisitos técnicos de uma mistura asfáltica. Entretanto, para condições onde o volume de tráfego é muito intenso, locais canalizados onde passam veículos com alto peso, onde há situação de clima severo com grandes variações térmicas, é cada vez mais necessário modificar as propriedades do asfalto (CERATTI e REIS, 2011). Bernucci *et al.* (2010) a necessidade de modificar os ligantes asfálticos está relacionada com o ganho nas propriedades reológicas que se obtém com essas modificações. De forma geral, as modificações nos ligantes asfálticos têm por objetivo: elevar a coesão do CAP; reduzir a susceptibilidade térmica; baixar a viscosidade à temperatura de aplicação; elevar a resistência à deformação plástica, à fissuração e à fadiga; garantir uma boa adesividade ao agregado e aumentar a resistência ao envelhecimento.

Os modificadores de CAP mais empregados são os polímeros. Esses polímeros são o resultado do encadeamento de mais de dez mil átomos de carbono, podendo ser obtidos de forma natural ou sintética (BERNUCCI *et al.* 2010). Os polímeros podem ser classificados quanto ao seu comportamento frente às variações térmicas:

- **Termorrígidos:** quando não se fundem, sofrem degradação a uma temperatura limite e endurecem irreversivelmente quando aquecidos a certa temperatura, como exemplo, as resinas epóxi, o poliéster e o poliuretano;
- **Termoplásticos:** fundem-se e se tornam maleáveis, reversivelmente, quando aquecidos, como exemplo, o polietileno, polipropileno e o PVC (policloreto de vinila);

- **Elastoméricos:** decompõem-se antes de amolecer quando aquecidos e tem propriedades elásticas, por exemplo, o SBR (*styrene butadiene rubber*);
- **Elastoméricos termoplásticos:** apresentam comportamento termoplástico quando aquecidos e muito elásticos quando resfriados, por exemplo, o EVA (etileno acetato de vinila) e o SBS (*styrene butadiene styrene*).

Para a utilização de ligantes modificados por polímero elastomérico no Brasil deve-se obedecer às especificações da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP ou da norma DNIT 129/2011 – EM Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico, conforme apresenta Tabela 1 .

Tabela 1 - Especificações do CAP modificado por polímeros elastoméricos.

Características	Unidade	Limites			Método		
		Tipo					
		55/75	60/85	65/90	ABNT	ASTM	DNIT
Penetração (100 g, 5s, 25°C)	0,1 mm	45-70	40-70		6576	D5	155/10
Ponto de amolecimento, mín.	°C	55	60	65	6560	D36	131/10
Ponto de fulgor, mín.	°C	235			11341	D92	-
Ensaio de separação de fase, máx.	°C	5			15166	D7173	-
Recuperação elástica a 25° C, 20 cm, mín.	%	75	85	90	15086	D6084	130/10
Viscosidade Brookfield							
a 135°C, spindle 21, 20 rpm, máx.	cP	3000			15184	D4402	-
a 150°C, spindle 21, 50 rpm, máx.	cP	2000			15184	D4402	-
a 177°C, spindle 21, 100 rpm, máx.	cP	1000			15184	D4402	-
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C, 85 minutos							
Variação do ponto de amolecimento, máx.	°C	-5 a +7			6560	D36	131/10
Porcentagem de penetração original, mín.	%	60			6576	D5	155/10
Porcentagem de recuperação elástica original a 25°C, mín.	%	80			15086	D6084	130/10

Fonte: Adaptado de DNIT (2011).

Esta especificação tem por objetivo identificar a presença do agente modificador através de evidências nas características físicas do ligante e apresentar requisitos para inspeção do material. Países mais desenvolvidos adotam especificações do ligante com base no desempenho do material em relação às variações térmicas. Esta abordagem baseada no desempenho do ligante asfáltico, como proposto nas especificações ASTM D6373 e AASHTO MP 19, representa uma preocupação com a durabilidade do pavimento e com a correta destinação dos materiais.

O Brasil está iniciando um processo de transição para uma adoção de especificação por desempenho dos ligantes asfálticos. Sabe-se que especificar ligantes pelo seu desempenho traz muitos benefícios, mas para implementar esta mudança ainda será necessário um longo prazo e investimentos em equipamentos modernos (VIVONI, 2016).

2.1.1 Pesquisas relacionadas à modificação asfáltica

A modificação do ligante asfáltico pode ser feita com materiais diversos buscando maior desempenho de alguma propriedade do ligante, assim, pesquisas relacionadas a esta proposta são desenvolvidas ao redor de todo o mundo.

Com o objetivo de melhorar o desempenho do ligante asfáltico Cong *et al.* (2011) utilizaram um CAP 60/80 com polímero SBS para avaliar o uso de resina epóxi em misturas asfálticas quanto a fadiga, o estudo mostrou que a vida de fadiga pode ser aumentada gradualmente pela adição de resina epóxi.

Zhang & Hu, (2014) produziram ligantes altamente elásticos adicionando SBS, agente plastificante (ftalato de dioctilo) e agente reticulador (enxofre), em um CAP convencional denominado AH-70, penetração a 25 °C igual a 60 e recuperação elástica igual a 70%. Na pesquisa, observaram que o principal agente modificador foi o SBS, sendo que a adição do agente plastificante contribuiu para melhorar a capacidade elástica e as propriedades a baixa temperatura, já o reticulador proporcionou estabilidade ao CAP modificado. Ying *et al.* (2013) também estudaram o polímero SBS e o efeito do envelhecimento por oxidação do asfalto, onde concluíram que a longo prazo o polímero pode se degradar severamente por oxidação e perder totalmente sua função junto ao ligante.

Fang *et al.* (2013) estudaram as propriedades do CAP convencional com a adição de resíduos de embalagens de polietileno e resíduos de pó de borracha com o objetivo de minimizar os impactos

ambientais. O estudo mostrou que esses materiais melhoram as propriedades do CAP, mas com o efeito do envelhecimento essas propriedades aproximam-se bastante das observadas no CAP convencional.

Melo (2014) estudou a modificação do CAP 50/70 com nanotubos de carbono e nanoargila. A pesquisa mostrou que os nanocompósitos aumentaram a resistência à deformação permanente, sendo os nanotubos de carbono mais eficientes que as nanoargilas. You *et al.* (2010) incorporaram nanoargila em um asfalto PG 64-28, onde evidenciaram o potencial dessa modificação em reduzir a deformação permanente e o trincamento por fadiga.

Yang *et al.* (2013) utilizaram o óleo resultante da pirólise de produção de placas de circuito impresso, denominado (HFPO) na modificação do CAP. A pesquisa demonstrou que as propriedades físicas do asfalto podem ser melhoradas pela adição de HFPO.

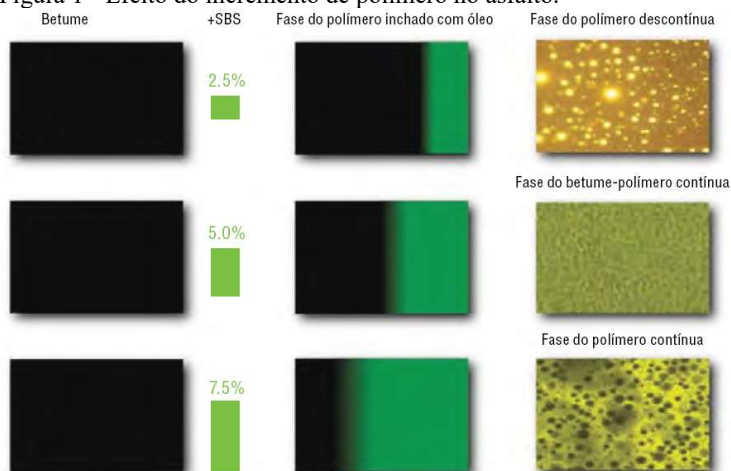
Santos *et al.* (2009) demonstraram que a modificação do CAP com asfalto natural retirado da ilha de Trinidad (*Trinidad Lake Asphalt - TLA*), tem a propriedade de aumentar a resistência à deformação permanente quando comparado com ligantes convencionais.

A literatura demonstra que não somente os materiais poliméricos podem melhorar as propriedades do ligante asfáltico, mas são eles os principais agentes modificadores. O uso de polímeros, pela sua afinidade com o ligante asfáltico, contribui significativamente na melhoria do desempenho, assim, pesquisas são desenvolvidas buscando materiais que possam conferir ao ligante modificado maior desempenho frente as mais severas condições.

2.1.2 O ligante altamente modificado por polímero - HiMA

Segundo a Kraton® (2012), o *Highly Modified Asphalt - HiMA* é uma altíssima modificação no ligante asfáltico convencional através do uso de SBS modificado, denominado pela empresa de D0243 Kraton®. A alta concentração deste polímero, em teores de 7 a 8%, confere ao ligante asfáltico um altíssimo desempenho. Os SBS convencionais melhoram as propriedades com teores de 2,5%, mas a fase dominante é a do asfalto. Por consequência o comportamento será do asfalto. Na medida em que se acresce o teor de polímero, a fase dominante vai se invertendo e o comportamento do material vai tendendo para o comportamento elástico, como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Efeito do incremento de polímero no asfalto.



Fonte: Adaptado de Klutz *et al.* (2016).

A implementação do alto teor de polímero na matriz asfáltica tem por objetivo desenvolver uma rede polimérica contínua atuando no ligante como um reforço elástico. Esta rede elástica contínua reduz a propagação de fissuras pelo ligante asfáltico. Teores baixos de polímero desenvolvem redes poliméricas descontínuas, possibilitando a existência de pontos fracos que permitem o avanço da fissura pelo ligante. A adição de polímeros convencionais no ligante asfáltico em quantidade expressiva pode ocasionar problemas de estabilidade durante o armazenamento e transporte do ligante modificado, bem como haver aumento da viscosidade do ligante devido à adição de polímero. Assim maiores temperaturas são necessárias para os processos de usinagem e compactação da mistura asfáltica. Porém, o polímero SBS D0243 permite a produção de ligantes asfálticos altamente modificados sem que haja limitações de estabilidade e aumento significativo na viscosidade do novo ligante (BŁAŻEJOWSKI *et al.* 2015).

Błażejowski *et al.* (2015) empregaram o polímero SBS D0243 na produção de três ligantes altamente modificados, conforme mostra a Tabela 2. Os ensaios de desempenho à baixa temperatura, através do reômetro de viga à flexão, do inglês “*Bending Beam Rheometer*” (BBR), e à altas temperaturas através do reômetro de cisalhamento dinâmico, do inglês *Dynamic Shear Rheometer* (DSR), demonstraram a alta capacidade resistente dos ligantes modificados pelo polímero D0243. O grau de desempenho *Performance Grade* (PG) encontrado para cada ligante da

pesquisa está apresentado na Tabela 2, onde é possível notar que o grau de desempenho foi superior ao máximo descrito na especificação ASTM D6373 - 16, para altas temperaturas no ligante ORBITON 25/55-80 HiMA.

Tabela 2 - Ligantes asfálticos modificados com o polímero D0243.

Propriedade	Unidade	ORBITON 25/55-80 HiMA		ORBITON 45/80-80 HiMA		ORBITON 65/105-80 HiMA	
		Parâmetro	Resultado	Parâmetro	Resultado	Parâmetro	Resultado
Penetração a 25 °C	0,1 mm	25 a 55	41	45 a 80	66	65 a 105	87
Ponto de amolecimento	°C	≥80	95	≥80	92	≥80	87,2
Recuperação elástica a 25 °C	%	≥80	90	≥80	96	≥80	95
Recuperação elástica a 10 °C	%	-	71	-	76	-	85
PG real	-	95-26		84-30		77-30	
PG (Superpave*)	-	94-22		82-28		76-28	

* O grau PG máximo para altas temperaturas proposto na ASTM 6373 - 16 é 82°C, os autores continuaram a classificação considerando um grupo a cada 6°C.

Fonte: Adaptado de Błażejowski *et al.* (2015).

Klutz *et al.* (2016) na pesquisa desenvolvida nas pistas experimentais do *Nacional Center for Asphalt Technology* (NCAT) da Universidade de Auburn, utilizaram o polímero SBS D0243, no teor de 7,5 %, para a modificação das propriedades de um ligante asfáltico base de PG 67-22. Esta modificação resultou em um ligante altamente modificado cujo PG real obtido foi PG 93-26 pela classificação da ASTM D6373 – 16 e PG 76E-22 pela especificação da AASHTO T350 e M332, onde a designação “E” - *extreme* - indica que o ligante tem resistência para um tráfego extremamente pesado, mostrando a possibilidade de excelente desempenho do novo ligante.

Martins (2014) investigou a utilização do ensaio de varredura linear de amplitude de deformação, do inglês *Linear Amplitude Sweep* (LAS), como ferramenta na previsão do desempenho à fadiga de nove tipos de ligantes asfálticos, entre eles o CAP AMP 60/85 e o CAP HiMA, cujas características estão na Tabela 3 . A pesquisa apontou que o ligante HiMA obteve a maior resistência ao dano quando comparado com os demais ligantes, seguido do ligante CAP AMP 60/85.

Tabela 3 - Ligantes asfálticos e PG à alta temperatura.

Propriedade	Unidade	CAP 60/85	CAP HiMA
Viscosidade Brookfield 135°C	cP	990	1790
Penetração a 25 °C	0,1 mm	46	31
Ponto de amolecimento	°C	62,7	88,1
PG	-	70-xx	82-xx
PG, AASHTO TP 19-10	-	70V-xx	82H-xx

XX – Parâmetro não determinado.

Fonte: Martins (2014).

A literatura aponta que a modificação de ligantes convencionais com o polímero SBS D0243, no teor de 7,5 %, constituindo então o CAP HiMA, confere propriedades, a este novo ligante modificado, capazes de resistir a maiores níveis de deformação e por consequência uma maior vida útil pode ser obtida, há também a possibilidade de uma redução da espessura de camada asfáltica para uma mesma vida de serviço quando comparado com outros ligantes. Contudo, apesar do ligante ser elemento fundamental dos pavimentos asfálticos, não cabe somente a ele resistir aos esforços observados no pavimento, é preciso compreender o desempenho da mistura asfáltica como um todo, através de ensaios de laboratório e experimentação em campo.

2.2 DEFORMABILIDADE DO PAVIMENTO

2.2.1 Deflexões

As deflexões do pavimento são deslocamentos verticais decorrentes da ação da passagem de cargas, são medidas por aparelhos genericamente conhecidos como defletômetros. A determinação da deflexão é importante para a avaliação estrutural de um pavimento existente e para monitorar a qualidade de um pavimento novo, uma vez que estes deslocamentos verticais são responsáveis pelo surgimento da maioria do trincamento de um pavimento ao longo de sua vida, o afundamento plástico também é resultado do acúmulo das deformações verticais causadas pela ação da passagem de cargas (BERNUCCI *et al.*2010).

Os defletômetros utilizados para medir as deflexões podem ser divididos conforme o tipo de carregamento:

- **Carregamento quase estático:** Viga Benkelman e o ensaio de placa;
- **Carregamento vibratório:** Dynaflect;

- **Carregamento por impacto:** FWD (*Falling Weight Deflectometer*);

- **Carregamento contínuo:** Curviâmetro.

O equipamento mais comum para a obtenção das deflexões é o desenvolvido pelo engenheiro do CALTRANS (*California Department of Transportation*) Alvin Carlton Benkelman no ano de 1950, conhecido como viga Benkelman. Com este equipamento é possível medir a deflexão máxima, o raio de curvatura e determinar a bacia de deformação.

A viga Benkelman é um equipamento que mede a deformação elástica provocada pela passagem de um caminhão com eixo traseiro simples carregado com 8,2 tf, o procedimento de ensaio está descrito na norma DNER 024/94 - Pavimento - determinação das deflexões pela viga Benkelman.

2.2.2 Módulo resiliente

Deve-se a Francis N. Hveem o primeiro estudo do comportamento resiliente dos materiais empregados na pavimentação, no qual correlacionou as deformações recuperáveis com as fissuras observadas nos revestimentos asfálticos, foi também, Hveem que adotou o termo “resiliência” para a energia armazenada em um dado corpo deformado elasticamente que é devolvida ao cessar as tensões causadoras de tal deformação (BERNUCCI *et al.*, 2010). Para Huang (2004) os materiais empregados na pavimentação experimentam alguma deformação permanente cada vez que se aplica uma carga, porém se a carga for muito pequena em relação a resistência do material, a deformação causada é quase que completamente recuperável.

O módulo resiliente dos materiais empregados em pavimentação, desde que fora das zonas de intensa plastificação, é determinado de duas maneiras: em campo ou em laboratório. A determinação do módulo resiliente no campo se dá pela interpretação de deformações ocorridas durante a ação de determinada prova de carga, método conhecido como retroanálise. Em laboratório é determinado pela relação entre a tensão aplicada e a deformação ocorrida (BERNUCCI *et al.*, 2010).

2.2.2.1 Módulos resilientes obtidos por retroanálise

A *American Society for Testing and Materials* - ASTM D5858 (2015) define a retroanálise como uma técnica analítica utilizada para determinar o módulo elástico equivalente das camadas do pavimento de acordo com a resposta deflectométrica em função de uma dada carga.

Para determinar os módulos resilientes das camadas que compõem a estrutura de um pavimento é necessário o conhecimento do comportamento mecânico do pavimento, ou seja, da relação entre as tensões (carregamento) e deformações (deflexões) deste sistema de camadas. A deflexão do pavimento devido a ação de uma carga é resultante da contribuição de todas as camadas que por sua vez possuem seus valores de módulo e coeficiente de Poisson independentes, sendo conhecida a deformação, os tipos de materiais que compõem a estrutura e suas espessuras é possível estimar os módulos resilientes que levaram àquela deformação (MEDINA & MOTTA, 2015).

O procedimento de retroanálise pode ser feito com diferentes técnicas, seja por processos iterativos, sistemas de equações, bancos de dados, métodos simplificados etc. A aplicação de *softwares* nos métodos de retroanálise facilitaram a execução deste procedimento, estes processos analíticos simulam a condição de campo a partir de dados de entrada. Existem diversos programas computacionais que realizam este tipo de operação, como: o ELMOD da Dynatest, KUAB da *Engineering & Research International Inc.* (ERI), o BAKFAA disponível no sítio da *Federal Aviation Administration*, o KENLAYER de Yang H. Huang, o ELSYM5, entre outros.

A utilização do programa Elsym5 para determinar os módulos resilientes das camadas por retroanálise requer que o usuário possua algumas informações iniciais como a espessura das camadas, dados da bacia deflectométrica medida em campo, cargas atuantes, módulos resilientes aproximados e coeficiente de Poisson. Depois disso o processo é extremamente interativo onde o usuário alterna valores estimados de módulo e Poisson até atingir as deflexões medidas na bacia deflectométrica.

Quando não se tem dados disponíveis para entrada nos programas que fazem retroanálise através de iterações, a ASTM D5858 (2015) sugere os valores de módulo resiliente conforme indicado na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores típicos de módulo resiliente.

Materiais	Módulo Resiliente (MR, em MPa)
Misturas asfálticas à quente	3.500
Concreto de cimento Portland	35.000
Materiais granulares tratados com cimento	4.100
Materiais granulares para base	200
Materiais granulares para sub-base	100
Solos coesivos	50

Fonte: ASTM D5858 (2015).

2.2.2.2 Módulos resilientes obtidos em laboratório

Os módulos resilientes das camadas novas geralmente são obtidos através de ensaios de laboratório, principalmente de misturas asfálticas. Os ensaios tecnológicos de avaliação do módulo resiliente procuram simular as condições reais de solitação no campo, muito embora a estrutura do pavimento esteja sujeita a cargas de diferentes intensidades com frequências variáveis ao longo do dia e do ano tornando difícil a simulação (MEDINA & MOTTA, 2015).

Segundo Barksdale *et al.* (1997) os ensaios para obtenção do módulo resiliente são feitos, principalmente a partir de cargas repetidas, sendo os mais comuns:

- Ensaio triaxial de cargas repetidas;
- Ensaio de flexotração em viga;
- Ensaio de compressão diametral a cargas repetidas.

Deve-se a inclusão ensaio triaxial de cargas repetidas nos estudos voltados a pavimentação ao professor Harry Bolton Seed da Universidade da Califórnia. Para tornar possível a investigação da deformabilidade do subleito da pista experimental da AASHO executada no Estado de Illinois (EUA), o professor Harry fez adaptações no equipamento triaxial estático existente até então (SEED & FEAD, 1960). Este ensaio é utilizado para determinar o módulo resiliente de solos e materiais granulares, não sendo comum a aplicação em misturas asfálticas. Durante a execução do ensaio entende-se que a tensão vertical (σ_1) corresponde ao carregamento imposto à estrutura do pavimento (σ_{vertical}) e que a tensão de confinamento (σ_3) equivale a tensão horizontal ($\sigma_{\text{horizontal}}$) que a estrutura está submetida, a tensão desvio (σ_d) é a variação da tensão ocasionada pelo deslocamento da carga aplicada na estrutura (SEED & FEAD, 1960).

Segundo Medina & Motta (2015), o ensaio de flexotração de cargas repetidas utiliza corpos de prova prismáticos, nos quais as cargas atuam nos terços médios durante a realização do ensaio a fim de garantir momento fletor constante no vão central. Mede-se o deslocamento vertical no centro da vigota através de um dispositivo conhecido como LVDT (*linear variable differential transformer*). Esse deslocamento vertical (d_0) levando em conta as tensões cisalhantes distribuídas na seção transversal do corpo de prova, é dado em função do módulo de resiliência do material, do coeficiente de Poisson, da carga aplicada e de sua geometria.

Segundo Bernucci *et al.* (2010) a determinação do módulo de resiliência através do ensaio de compressão diametral é realizada pela

aplicação de uma carga repetidamente no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico. Esta desenvolve uma tensão de tração no plano horizontal dando origem a deslocamentos horizontais recuperáveis. A deformação de tração no plano horizontal, considerando o estado de tensões aplicadas ao corpo de prova é dada pela equação (1):

$$\varepsilon_x = \frac{1}{MR} * (\sigma_x - \mu\sigma_y) \quad (1)$$

Onde:

ε_x = deformação de tração no diâmetro horizontal;

σ_x = tensão horizontal;

σ_y = tensão vertical;

μ = coeficiente de Poisson;

MR = módulo resiliente.

2.2.3 Módulo Complexo

Hratch S. Papazian, no ano de 1962, foi o primeiro a aplicar o ensaio de módulo complexo em misturas asfálticas. Papazian (1962, apud CLYNE *et al.* 2003) aplicou um carregamento sinusoidal a certa frequência em um corpo de prova cilíndrico, medindo a deformação sinusoidal para aquela frequência, o ensaio foi realizado a temperatura controlada com diferentes amplitudes de carga e frequência, assim concluiu que os conceitos de viscoelasticidade poderiam ser aplicados ao projeto de misturas asfálticas e ao seu desempenho.

O módulo complexo E^* é um número complexo definido pela Equação (2):

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2)$$

Sendo:

σ = tensão sinusoidal de pulsação (ω) aplicado ao material;

ε = deformação sinusoidal que devido a viscoelasticidade do material apresenta defasagem em relação ao ciclo de tensão aplicada dando origem a um ângulo conhecido como ângulo de fase (φ).

Sendo σ definido pela Equação (3) e ε definido pela Equação (4).

$$\sigma = \sigma_0 * \sin(\omega * t) \quad (3)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 * \sin(\omega * t - \varphi) \quad (4)$$

Sendo:

σ_0 = amplitude da tensão;

ω = pulsação aplicada;

t = tempo;

φ = ângulo de fase;

ε_0 = amplitude da deformação.

A conotação do módulo complexo pode ser feita ainda, dividindo-o em suas componentes E_1 e E_2 sendo a primeira referida a parte elástica também dita módulo de armazenamento ou real, a segunda refere-se a parcela não recuperável, denominada módulo de perda ou imaginária (DI BENEDETTO *et al.* 2001). O comportamento reológico das misturas asfálticas pode ser observado através do módulo complexo representado em função da variação da temperatura, da frequência, das componentes do módulo e do ângulo de fase. As representações gráficas oriundas do módulo complexo podem ser feitas através das curvas isotérmicas, do diagrama de Black, das curvas isócronas, do plano Cole-Cole e da curva de equivalência frequência temperatura, também conhecida como *master curve* (PARTL & FRANCKEN, 1998 *apud* FONTES 2009).

- **Curvas isotérmicas:** estas podem ser obtidas pela plotagem em escala logarítmica do valor de módulo complexo na ordenada e a frequência na abcissa, para cada temperatura. O valor absoluto do módulo complexo tende a aumentar com o decréscimo da temperatura. A inclinação da curva isotérmica demonstra a suscetibilidade cinética a uma dada temperatura, ou seja, a alteração do valor de módulo com a duração do carregamento (BAAJ, 2002).

- **Curvas isócronas:** São plotados os valores de módulo em escala logarítmica na ordenada e a temperatura em escala linear na abcissa, para todos os valores de frequência. Com as curvas isócronas é possível observar a suscetibilidade térmica das misturas asfálticas (BAAJ, 2002).

- **Espaço de Black:** também conhecido na literatura como diagrama de Black, é apresentado no eixo das ordenadas, em escala logarítmica o módulo complexo e no eixo das abcissas está o ângulo de fase em escala linear. Segundo Baaj (2002) neste modelo de representação é possível visualizar o trecho em que ocorre a redução do ângulo de fase nas temperaturas mais elevadas.

• **Plano Cole-Cole:** A representação do plano cole-cole tem o formato aproximado de um semicírculo. Plotado em escala linear, no eixo da ordenada, a componente imaginária (E2), no eixo da abcissa está a componente elástica ou real (E1) também em escala linear. Nesta representação é possível verificar a influência da temperatura nas parcelas elástica e viscosa da mistura asfáltica (BAAJ, 2002).

• **Curva de equivalência frequência-temperatura:** também conhecida como *master curve*, esta figura como uma das mais importantes representações do módulo complexo. A *master curve* de uma mistura asfáltica permite que seja determinado o módulo ao longo de intervalos maiores de frequência e temperatura, estas curvas são geradas através do princípio da sobreposição de tempo e temperatura, permitindo deslocar horizontalmente as curvas isotérmicas para uma temperatura de referência (EKINGEN, 2004). A translação para formar em uma única curva é feita pela aplicação de um fator de escala ou direção, sendo função da Equação (5):

$$F = \log(at * fr) \quad (5)$$

Sendo:

F = fator de escala ou direção;

$\log(at)$ = fator de escala;

fr = frequência reduzida (Hz).

Os modelos mais comuns para obter o fator de translação são os propostos por Williams *et al.* (1955) também chamado de equação de Williams-Landel-Ferry e o modelo de Arrhenius.

O modelo de Williams-Landel-Ferry é dado pela equação (6):

$$\log(at) = \frac{-C_1*(T-T_{ref})}{C_2+(T-T_{ref})} \quad (6)$$

Sendo:

C_1 e C_2 = constantes dependentes do material;

T = temperatura (K);

T_{ref} = temperatura de referência (K).

O modelo de Arrhenius é dado pela equação (7):

$$\log(at) = 0,4343 * \frac{\delta H}{R} * \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \quad (7)$$

Onde:

δH = energia de ativação característica do material.

R = constante universal dos gases.

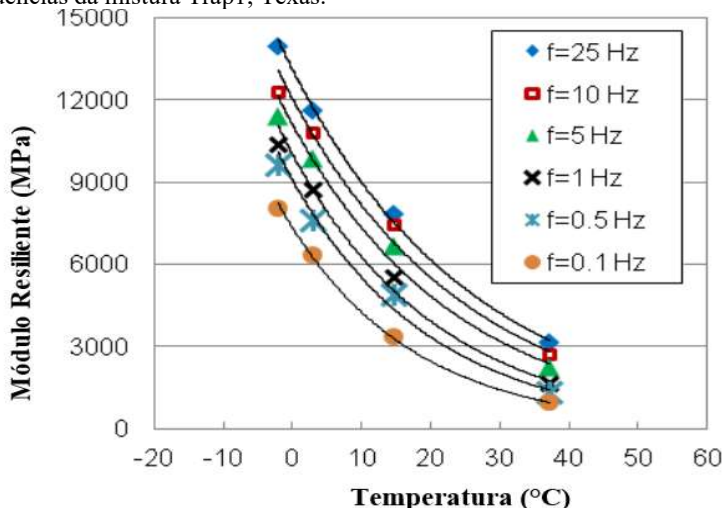
O módulo complexo permite avaliar o comportamento reológico das misturas asfálticas. As representações do módulo complexo denotam a influência da velocidade do carregamento e da temperatura na mistura asfáltica. A caracterização do comportamento termoviscoelástico do concreto asfáltico possibilita compreender a suscetibilidade cinética e térmica, permitindo correlacionar o desempenho das misturas asfálticas quando sujeitas às solicitações de campo.

2.2.4 Influência da temperatura e da frequência na rigidez

A temperatura influencia diretamente na rigidez dos revestimentos asfálticos, as variações diárias da temperatura causam alterações na rigidez. A rigidez dos revestimentos asfálticos tende a aumentar com o decréscimo da temperatura (MEDINA & MOTTA, 2015).

Akbarzadeh *et al.* (2012) pesquisaram a influência exercida pela temperatura no módulo resiliente. No estudo compararam módulos resilientes obtidos de 41 misturas asfálticas onde demonstraram que o módulo decresce exponencialmente com o aumento da temperatura. Para ilustrar esse comportamento os autores apresentaram os resultados de módulo resiliente com variação de temperatura e frequência de carregamento, como ilustrado no gráfico da Figura 2. A mistura apresentada foi desenvolvida no Texas, denominada Trap1, com ligante de PG 76-22, teor de 5,6%, Vv 4,2%.

Figura 2 - Módulo resiliente versus temperatura de ensaio para diferentes frequências da mistura Trap1, Texas.



Fonte: Akbarzadeh *et al.* (2012).

Mesmo que haja a influência da frequência de carregamento do ensaio no valor do módulo, é predominante a influência da temperatura no comportamento resiliente da mistura asfáltica (AKBARZADEH *et al.* 2012). Alguns países, em especial os que adotam a especificação Superpave, levam em consideração a temperatura regional no momento de projetar a mistura asfáltica, porque já é de conhecimento a variação da rigidez de misturas asfálticas em função do gradiente térmico.

Garcia & Thompson (2007) avaliaram os modelos de previsão do módulo dinâmico de misturas asfálticas adotados no *Illinois Department of Transportation* (IDOT). Na pesquisa observaram que as curvas genéricas ou curvas mestras prediziam bem a rigidez, com frequência de 10 Hz, para misturas asfálticas com as faixas 12,5mm e 19,0mm, com ligante de PG 64-22 e PG 70-22. Na mistura asfáltica tipo *Stone Matrix Asphalt* (SMA) 12,5 mm e ligante tipo PG 76-28, a curva mestra apresentou-se diferente dos resultados de módulo dinâmico para as diferentes temperaturas.

2.2.5 Fadiga

As camadas asfálticas presentes nas rodovias são submetidas frequentemente a uma carga de curta duração cada vez que um veículo

passa, isso provoca microdanos que resultam em perda de rigidez do material que pode, por acumulação, levar a ruptura no longo prazo. A fadiga tem importância considerável na qualidade das rodovias e deve ser entendida para garantir um correto dimensionamento do pavimento e o bom desempenho da rodovia. No processo de evolução da fadiga, duas fases podem ser consideradas, a primeira corresponde a uma etapa inicial de degradação por microfissuração que se espalha ao longo do pavimento asfáltico reduzindo o valor do módulo, na segunda fase iniciam as microfissuras que se propagam pelo pavimento, oriundas da união de microfissuras. Estas duas etapas são classicamente chamadas de iniciação e propagação (DI BENEDETTO *et al.* 2003).

O fenômeno da fadiga de um material é caracterizado pela sua falha após a aplicação de um grande número de solicitações. Os primeiros estudos sobre o fenômeno de fadiga realizados em laboratório foram desenvolvidos em 1852 por Wöhler, para materiais metálicos. Atualmente a fadiga em misturas asfálticas e outros materiais compostos são objeto de numerosos estudos, sendo os mais clássicos aqueles que consistem em submeter uma amostra do material a solicitações repetidas e observar o número de ciclos necessários para levar a amostra até a ruína (BAAJ, 2002).

A deterioração de uma camada asfáltica é consequência de uma forma complexa de aplicações de carga composta por diferentes níveis de distribuição de tensões e deformações, temperatura, umidade, envelhecimento e velocidade de carregamento. No entanto, a experiência adquirida em relação ao desempenho da vida de fadiga das misturas asfálticas está relacionada com o carregamento imposto, sendo à tensão controlada ou a deformação controlada (SAID, 1988). A solicitação à tensão controlada é considerada a que ocorre em revestimentos asfálticos mais rígidos ou mais espessos que a camada de base e que ao resistirem às cargas impostas determinam a magnitude de deformação, já a solicitação à deformação controlada corresponde ao comportamento do revestimento delgado e fraco em relação a camada de base, que apesar de oferecer alguma resistência, sua deformação é dada pela deformabilidade das camadas inferiores (MEDINA & MOTTA, 2015).

Segundo Baaj (2002) nos ensaios de fadiga realizados à tensão controlada, a ruptura é bem definida já que o corpo de prova se rompe ao final do ensaio, já para os realizados à deformação controlada, o critério de falha não é prontamente visível, sendo este critério um valor percentual da rigidez inicial do corpo de prova, geralmente considerando a ruptura como a redução em 50% desta rigidez.

Apesar da tentativa de simular a realidade das condições aleatórias de carregamento no campo em laboratório, os ciclos de carga aplicados são periódicos e ignoram as variações de amplitude ou frequência observados nas faixas de rodagem (RAITHBY & STERLING 1972, *apud* BAAJ 2002). Maccarone & Jameson (1988) investigaram as características elásticas e a vida de fadiga de três misturas asfálticas utilizadas pelo órgão rodoviário australiano. A vida de fadiga destas misturas foi obtida através do equipamento de flexão alternada em viga de quatro pontos sob a condição de tensão controlada, variando o teor de betume, volume de vazios, grau de compactação, temperatura e tensão. Na pesquisa concluíram que todas estas variáveis influenciam no comportamento e que a vida de fadiga destas misturas tende a dobrar para cada acréscimo de 2% no grau de compactação da amostra enfatizando a importância de uma compactação adequada e uniforme para assegurar um desempenho satisfatório da mistura, também observaram a importância do monitoramento em campo do desempenho das misturas estudadas a fim de calibrar os ensaios laboratoriais buscando um fator de correlação do desempenho observado no campo e no laboratório.

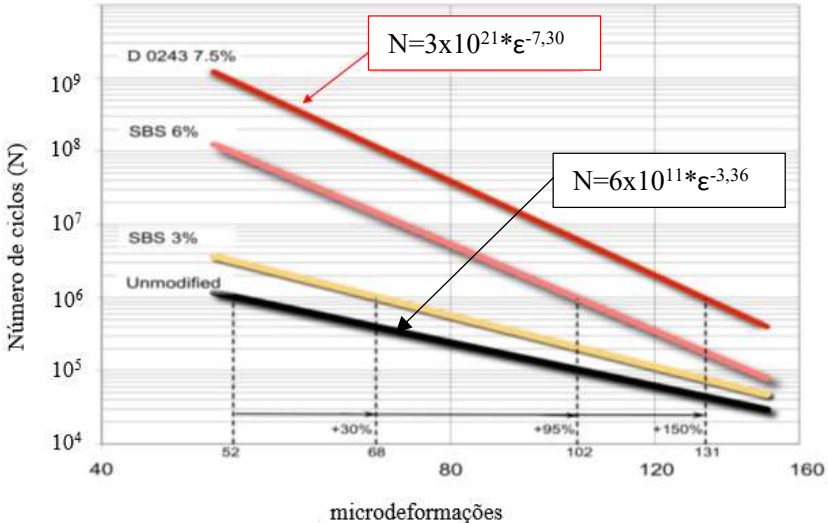
2.2.5.1 Comportamento à fadiga de misturas asfálticas com ligante HiMA

O comportamento à fadiga das misturas asfálticas pode sofrer influência de variáveis como o ligante asfáltico. Nos últimos anos algumas investigações da fadiga de misturas asfálticas com a utilização do ligante HiMA têm sido desenvolvidas, buscando compreender o desempenho deste ligante na mistura asfáltica.

Estudos de fadiga em misturas asfálticas foram desenvolvidos utilizando ligante modificado com 6% de SBS, outro com 3% de SBS, um não modificado de penetração 40/60 e o ligante altamente modificado com o polímero (Kraton® D 0243), o mesmo utilizado para o ligante HiMA. Os ensaios de fadiga foram executados na *Delft University of Technology* – Holanda, utilizando o ensaio de flexão alternada em viga de quatro pontos sob a temperatura de 20°C e frequência de 8 Hz. Os resultados apontaram para um excelente desempenho quanto à fadiga da mistura que continha o ligante modificado com o polímero Kraton® D 0243, como mostra a Figura 3. Para avaliar o desempenho da mistura asfáltica com este ligante na estrutura do pavimento foi construída uma pista experimental no *National Center for Asphalt Technology* (NCAT), onde se evidenciou a capacidade superior de resistir à fadiga e à deformação permanente desta mistura, mesmo com espessuras de

revestimento asfáltico inferior a pista de controle (SCHOLTEN *et al.*, 2011; KLUTZ *et al.*, 2016).

Figura 3 - Curvas de fadiga obtidas na *Delft University*.



Fonte: Scholten *et al.* (2011).

Scholten *et al.* (2011), demonstrou que a resistência à fadiga pode ser melhorada com a adição de polímeros no ligante asfáltico. Nesta pesquisa, o autor utilizou misturas asfálticas com volume de vazios próximo a 5,0%, agregados com diâmetro máximo de 22 mm, para a mistura asfáltica com o polímero SBS D0243 o teor de ligante foi de 4,6%, evidenciando o desempenho superior do ligante modificado por este polímero.

Klinsky *et al.* (2015) avaliaram a vida de fadiga de misturas asfálticas com diferentes tipos de ligante e agregados. No estudo utilizaram como método de ensaio o equipamento de tração indireta com velocidade controlada e o equipamento de flexão alternada em viga de quatro pontos sob a condição de deformação controlada, frequência de 10 Hz e temperatura de 20 °C. os autores utilizaram o CAP 30/45, CAP borracha AB 08, CAP 60/85, CAP HiMA e CAP Alto Módulo (Penetração 17 x 0,1mm e ponto de amolecimento de 67 °C), os agregados originários de duas pedreiras distintas e 4 faixas granulométricas, gerando 40 misturas diferentes, na Tabela 5 é possível observar o planejamento fatorial da pesquisa.

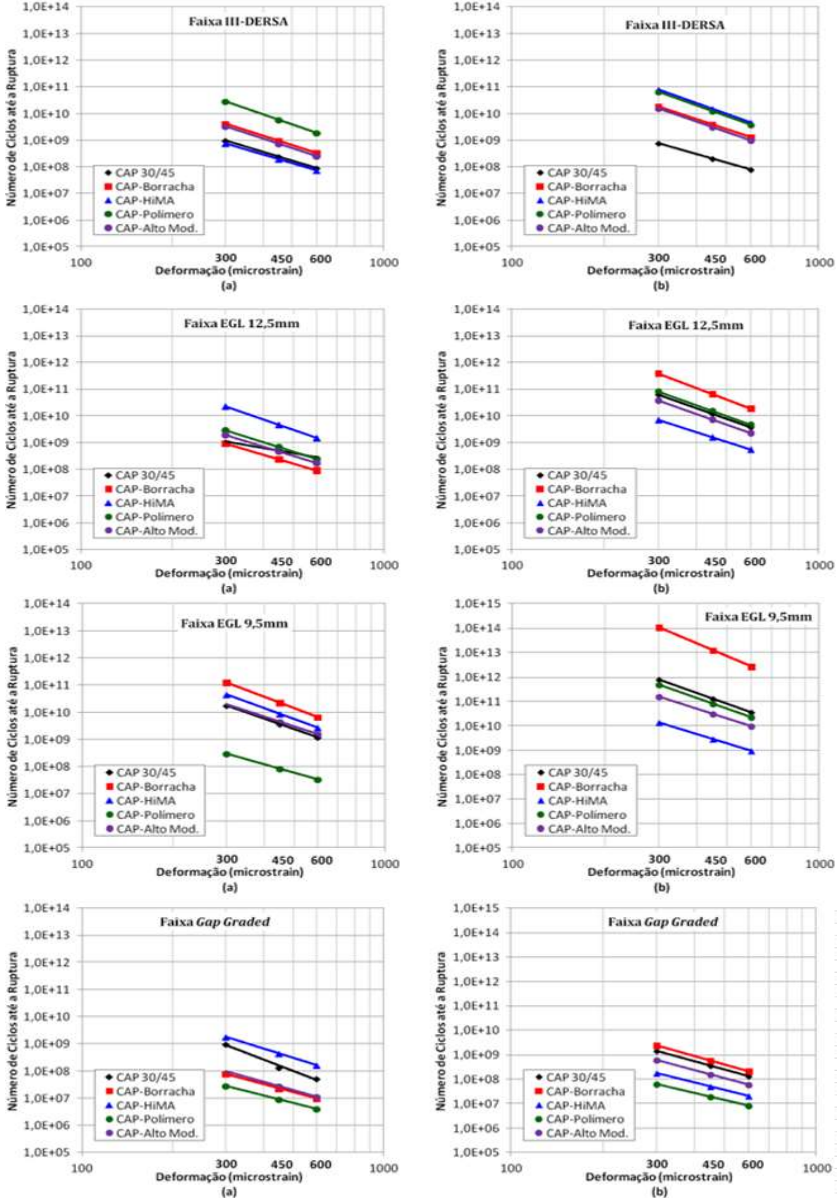
Tabela 5 - Variação dos elementos da mistura asfáltica.

Fator	1	2	3
	Fonte de agregado	Ligante asfáltico	Faixas granulométricas
Níveis	1 Jambeiro 2 Pombal	1 CAP 30/45 2 CAP Borracha 3 CAP Polímero 4 CAP HiMA 5 CAP Alto Módulo	1 Faixa III - Dersa 2 EGL 12,5mm 3 EGL 9,5 mm 4 Gap Graded
	2	5	4
Total	40		

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

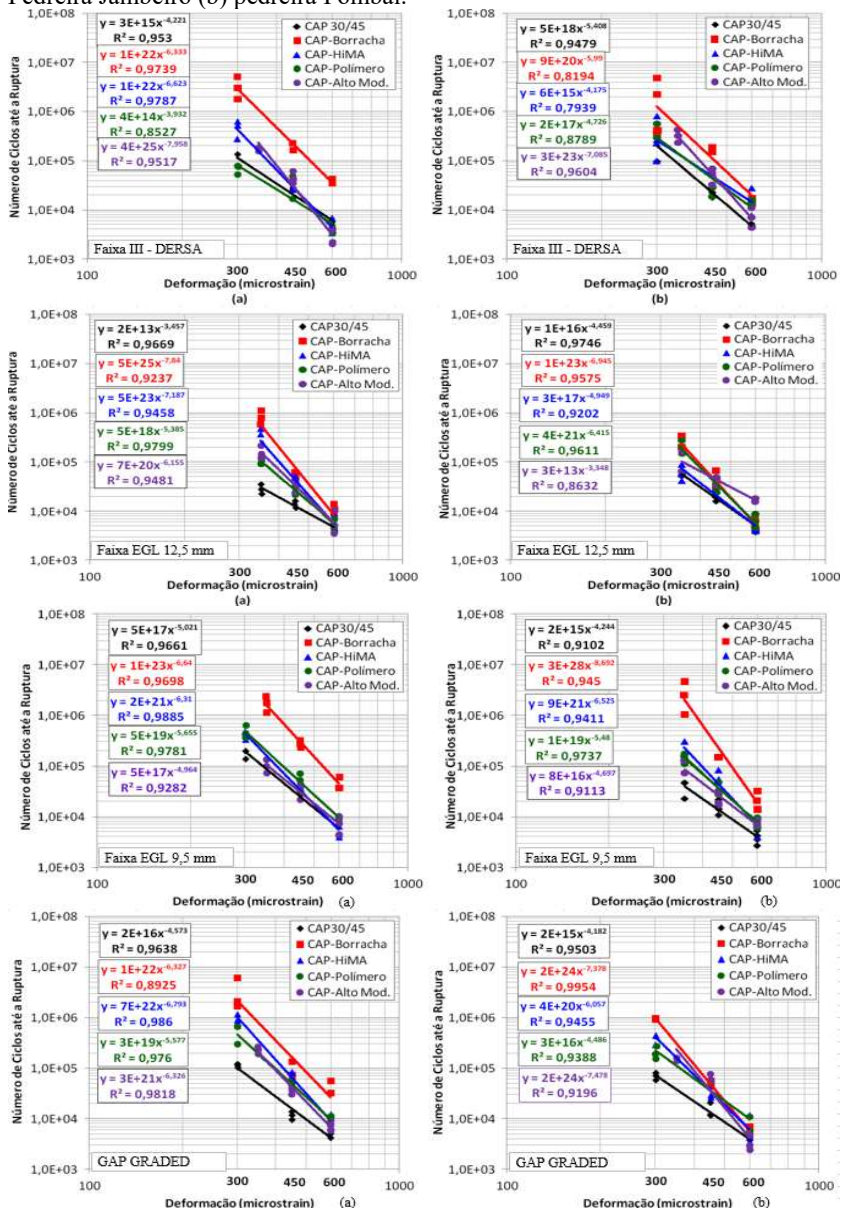
Os resultados apontaram que o tipo de ligante, o tipo de agregado, a granulometria e o tipo de ensaio influenciaram diretamente na vida de fadiga. Na Figura 4 é possível visualizar as curvas de fadiga obtidas com o ensaio realizado no equipamento de tração indireta e velocidade controlada. A Figura 5 apresenta as curvas obtidas com o ensaio de flexão alternada em viga de quatro pontos.

Figura 4 - Curvas de fadiga obtidas com equipamento de tração indireta e velocidade controlada, (a) pedra Jambeiro (b) pedra Pombal.



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

Figura 5 - Curvas de fadiga obtidas com equipamento de flexão alternada, (a) Pedreira Jambeiro (b) pedreira Pombal.



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

Nesta pesquisa foi possível verificar uma oscilação nos desempenhos das misturas devido a variação dos fatores que compõem cada mistura, porém ficou em evidência a tendência de melhor desempenho das misturas com CAP Borracha que também foram as misturas que demandaram maiores teores de ligante ficando difícil identificar se o melhor desempenho foi devido ao tipo ou ao teor de ligante. Assim como, na Figura 5, nota-se que as misturas com o ligante HiMA apresentaram desempenho semelhante a misturas com CAP-Polímero e CAP-Alto módulo, diferente do observado em Scholten *et al.* (2011), onde o desempenho da mistura com o polímero D0243 foi bem superior. Isto denota a importância de conhecer o desempenho das misturas asfálticas antes da execução de uma obra, já que variações nos parâmetros físicos podem facilmente influenciar no desempenho do concreto asfáltico.

Na pesquisa também se fez a análise mecanística das misturas asfálticas, através de simulação na estrutura do pavimento com auxílio do programa computacional *Mechanistic-Empirical Pavement Design and Analysis Software* - mePADS, utilizado para avaliar as tensões nos pavimentos considerando a rigidez de cada camada. Através destas simulações, os ligantes que apresentaram maior vida de fadiga em cada faixa granulométrica, considerando a rigidez das misturas asfálticas e o comportamento na estrutura do pavimento, estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultado da simulação de desempenho à fadiga.

Faixa Granulométrica	Misturas com o melhor desempenho à fadiga
	Estrutura Flexível
III-DERSA	CAP Alto Módulo Jambeiro
EGL 12,5 mm	CAP-HiMA Jambeiro
EGL 9,5 mm	CAP-Borracha Pombal
Gap Graded	CAP-HiMA Jambeiro

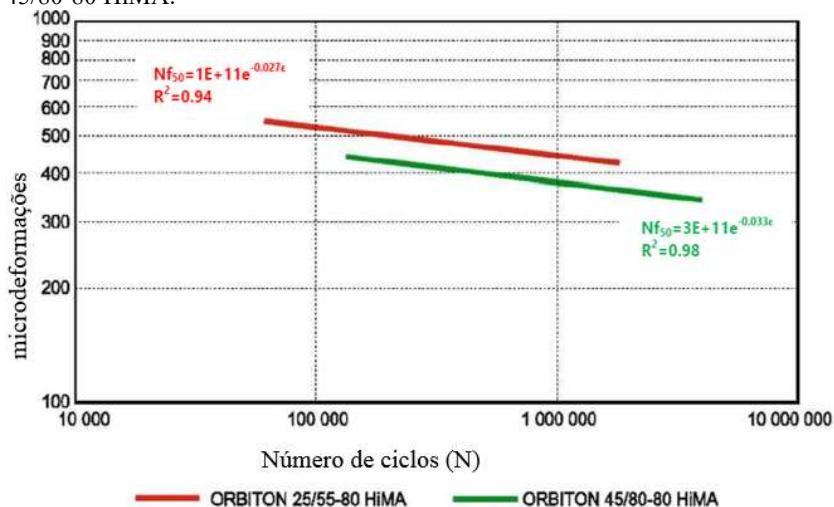
Fonte: Klinsky *et al.* (2015).

A Tabela 6 demonstra a importância de considerar a rigidez no desempenho à fadiga. Apesar das curvas de fadiga da Figura 5 demonstrarem que as misturas com o CAP-Borracha tenderiam a um melhor comportamento à fadiga, pois na maioria das faixas granulométricas o CAP-Borracha apresentou a melhor curva, na estrutura do pavimento, a simulação com auxílio do mePADS mostrou que se deve levar em consideração os efeitos da rigidez, ou seja, o módulo. Desta

forma, considerando a rigidez da mistura asfáltica e o nível de deformação de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico, para a faixa granulométrica III-DERSA, por exemplo, o melhor desempenho foi da mistura com CAP Alto Módulo Jambreiro e não da mistura com o CAP-Borracha como mostrava as curvas de fadiga na Figura 5. Os demais resultados desta pesquisa encontram-se disponíveis no endereço eletrônico da agência ANTT.

Błażejowski *et al.* (2015) utilizaram dois ligantes asfálticos modificados com o polímero Kraton® D 0243 sendo ORBITON 25/55-80 HiMA e o segundo ligante ORBITON 45/80-80 HiMA, onde os dois primeiros valores representam os intervalos de penetração a 25°C e o terceiro representa o ponto de amolecimento. Utilizou-se a mesma faixa granulométrica em ambos os ligantes, o ensaio de fadiga foi executado através do equipamento de flexão em viga de quatro pontos, sob a temperatura de 10°C e frequência de 10 Hz, os resultados estão apresentados no gráfico da Figura 6.

Figura 6 - Curvas de fadiga com ligantes Orbiton 25/55-80 HiMA e Orbiton 45/80-80 HiMA.



Fonte: Błażejowski *et al.* (2015).

É esperado que se atinjam valores elevados de número de ciclos com deformações ligeiramente maiores uma vez que o ensaio foi realizado à temperatura de 10 °C o que aumenta consideravelmente a rigidez das misturas quando comparado com misturas executadas a 20 ou

25°C de temperatura. Cabe também comentar que a baixa temperatura se justifica já que o estudo é decorrente da Polônia. Błażejowski *et al.* (2015) afirmou que para pavimentos rodoviários típicos, em que as deformações de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico são da ordem de 80 a 150 μe o uso de ligantes HiMA pode conferir ao pavimento uma vida de fadiga superior a 50 anos, típico dos pavimentos perpétuos. Entretanto, a vida útil de um pavimento não é dada somente pelo efeito do trincamento, outros defeitos podem levar um pavimento ao colapso, como envelhecimento, congelamento e deformações excessivas, a combinação destes fatores pode acelerar o processo de degradação da estrutura, mesmo para misturas de alto desempenho.

Os resultados obtidos por Scholten *et al.* (2011), Klinsky *et al.* (2015) e Błażejowski *et al.* (2015) demonstraram um bom potencial de resistência à fadiga de misturas asfálticas produzidas a partir do ligante altamente modificado HiMA, mesmo em diferentes condições de ensaio, temperatura e composição da mistura. Na pesquisa de Klinsky *et al.* (2015), apesar de encontrar evidências do potencial do ligante HiMA, não é totalmente claro seu desempenho quando comparado com outros ligantes disponíveis no mercado, desta forma é necessário o desenvolvimento de mais estudos em relação ao seu comportamento em comparação com outros ligantes.

2.2.6 Deformação permanente

A deformação permanente em pavimentos asfálticos é resultado das frequentes passagens de carga oriundas principalmente dos eixos pesados, manifesta-se gradualmente com o aumento do número de repetições na forma de depressões longitudinais nas trilhas de rodagem. Estes afundamentos, quando a superfície é impermeável, tornam-se barreiras para o escoamento superficial prendendo a água, que em profundidades superiores a 0,5 cm podem ocasionar o fenômeno de hidroplanagem principalmente em veículos de passeio. Outro risco relacionado à formação de trilhas é o desnivelamento transversal da pista de rodagem, este efeito dificulta a condução dos veículos, principalmente em pistas sinuosas, gerando risco de perda da dirigibilidade aos usuários (SHRP, 1994).

O concreto asfáltico é constituído de ligante, agregados e vazios preenchidos com ar. As propriedades do concreto asfáltico dependem da qualidade destes componentes, assim como do processo executivo e do projeto da mistura. A falha do concreto asfáltico quanto a deformação permanente excessiva está intimamente ligada a estes fatores. Misturas

com altos valores no volume de vazios tendem a ser mais suscetíveis ao aparecimento de deformações plásticas em pista. A compactação da mistura também é fator decisivo no desempenho, níveis de compactação muito inferiores a 100% diminuem a área de contato entre os agregados tornando a mistura asfáltica propensa a uma acomodação e por consequência aumento de deformação, já níveis excessivos de compactação podem provocar segregação na mistura (GARBA, 2002).

As propriedades físicas e a composição granulométrica dos agregados influenciam no desempenho das misturas por interferirem no contato grão a grão, na adesividade com o ligante e no intertravamento da mistura, quanto melhor for a qualidade do agregado e o imbricamento da composição granulométrica, maior será o desempenho quanto à deformação permanente da mistura (GARBA, 2002).

Nascimento *et al.* (2015) estudaram a influência do ligante asfáltico e da granulometria na deformação permanente de misturas asfálticas através do simulador de tráfego francês, utilizando os ligantes asfálticos CAP 50/70 e CAP 60/85-E e três granulometrias distintas com agregado de origem granítica. Os resultados apontaram para a influência dos dois fatores no afundamento na trilha de roda, tendo a variação granulométrica maior contribuição.

A determinação do potencial em resistir a deformações permanentes pode ser feita em laboratório através de equipamentos simuladores de tráfego em escala laboratorial, nos quais a amostra geralmente é submetida a vários ciclos de carregamento, a exemplo destes simuladores tem-se o *Asphalt Pavement Analyzer - APA*, o *Hamburg Wheel Tracking Devices - HWTD* e o equipamento francês *Orniéreur*, que em tradução livre significa produtor de trilhas (MOURA, 2010).

O APA é uma modificação do *Georgia Loaded Wheel Tester - GLWT*, o ensaio consiste em uma roda metálica que aplica uma carga de 445 N sobre a superfície do corpo de prova com temperatura controlada, levado até 8.000 ciclos onde se mede a deformação e determina-se o afundamento (COOLEY *et al.* 2000).

O HWTD foi desenvolvido na *Helmut-Wind Incorporated* de Hamburgo, Alemanha. O ensaio é realizado com o corpo de prova submerso com temperatura que pode variar entre 20°C e 70°C, uma roda metálica solicita o corpo de prova com carregamento cíclico de 705 N, onde o ensaio é levado até 20.000 ciclos ou até ocorrer a deformação de 20 mm (COOLEY *et al.* 2000).

O *Orniéreur* ou simulador francês foi desenvolvido no *Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de L'aménagement et des Réseaux - IFSTTAR*, antigo *Laboratoire Central*

des Ponts et Chaussées – LCPC, França, este equipamento é capaz de ensaiar dois corpos de prova simultaneamente a uma dada temperatura, geralmente a 60 °C. O ensaio consiste na passagem do pneu sobre o corpo de prova com frequência de 1 Hz, sendo um ciclo equivalente a duas passadas (ida e volta), acompanha-se a evolução do afundamento através da medição da deformação em 15 pontos distribuídos na área de passagem do pneu (BONNOT, 1986). As diretrizes deste ensaio estão descritas na norma francesa NF P98-253-1 (1991), a especificação permite dois tipos de corpos de prova prismáticos (180x500x100mm) ou (180x500x50mm).

2.3 TÉCNICAS DE RESTAURAÇÃO DO PAVIMENTO

Quando o pavimento se aproxima do final de sua vida útil, torna-se necessário alguma intervenção. Para tal, é fundamental o estudo de sua condição de superfície e de sua estrutura. A avaliação funcional está ligada a condição de defeitos superficiais como: a condição de irregularidade, área trincada, severidade da área trincada, deformações ao longo da pista, desgaste. A avaliação estrutural é dada pela condição do pavimento em suportar cargas, o principal parâmetro é a análise das deformações por meio de métodos não destrutivos, como as deflexões do pavimento pela viga Benkelman ou pelo FWD. As deflexões, bem como o raio de curvatura, demonstram a capacidade de suportar carregamentos oriundos do tráfego. Valores altos de deflexões e raios de curvatura baixos indicam que a estrutura do pavimento já possui baixa capacidade de suporte acarretando em maiores deformações e maior tensão que chega até o subleito. Uma vez constatado o comprometimento estrutural do pavimento, as alternativas de restauração passam a ser mais volumosas, com a incorporação de novas camadas asfálticas, remoção ou tratamento do pavimento antigo (BERNUCCI *et al.*, 2010).

2.3.1 Reforço do pavimento

Segundo o DNIT (2005), o reforço do pavimento é o aporte estrutural constituído de uma ou mais camadas betuminosas, a serem sobrepostas a um pavimento existente, após devidamente executadas as correções superficiais necessárias, com a finalidade de torná-lo apto a cumprir um novo ciclo de vida. A aplicação de novas camadas de concreto asfáltico (CA), é quase que obrigatória na restauração estrutural, exceto quando se trabalha com pavimentos rígidos. Essas podem ser constituídas de ligantes convencionais (CAP 30/45, CAP 50/70) ou ligantes

modificados (CAP 60/85, CAP HiMA, CAP borracha), também variam quanto a granulometria e função:

Mistura asfáltica tipo SMA (*Stone Mastic Asphalt*): consiste de um concreto asfáltico usinado a quente, especialmente projetado para proporcionar uma maior interação entre os agregados graúdos da mistura, maximizando o contato grão a grão. A quantidade de agregados graúdos na mistura é bem elevada, característica que eleva o volume de vazios entre os agregados graúdos. Esses vazios são preenchidos por um mástique asfáltico, constituído pela mistura da fração areia, filer, ligante asfáltico e fibras.

Mistura asfáltica tipo CPA (camada porosa de atrito): consiste num revestimento asfáltico de mistura descontínua e aberta, devido à grande quantidade de vazios de ar que possui (18 a 25%). A CPA é muito utilizada como camada de rolamento e tem como sua principal função o aumento da aderência entre o pneu e o pavimento em dias de chuva.

Mistura asfáltica tipo *Gap Graded*: tem como característica uma descontinuidade em um intervalo específico da curva granulométrica, chamado de "Gap". Trata-se de uma mistura descontínua fechada, sua faixa granulométrica resulta num revestimento final de macrotextura superficial rugosa, mas com teor de vazios entre 4,0 a 6,0%.

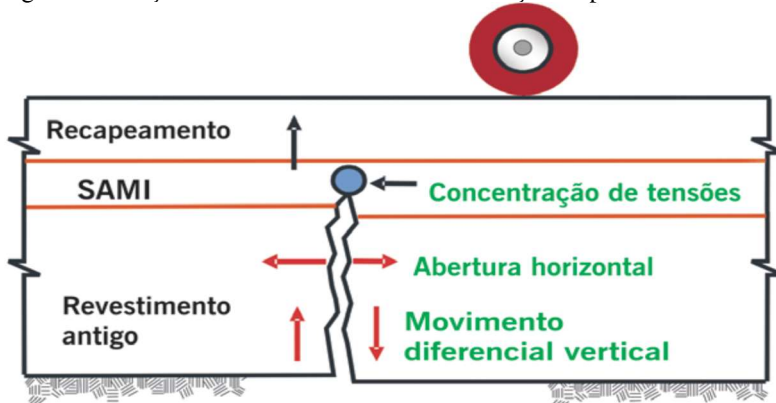
Misturas asfálticas de rolamento e de ligação: Muitas agências e órgãos públicos possuem suas próprias faixas granulométricas, utilizadas para atender características regionais e materiais disponíveis.

Quando se mantém as camadas asfálticas antigas ou parte delas há o risco de ocorrer trincas por reflexão, onde as trincas do revestimento antigo ascendem a superfície do pavimento. São desenvolvidas tensões de tração nas camadas novas devido ao movimento das trincas do pavimento deteriorado (MUKHTAR & DEMPSEY, 1996). No combate deste tipo de fenômeno podem ser utilizados materiais como geossintéticos e geotêxteis entre o revestimento antigo e a nova camada. Existe também a aplicação de camadas asfálticas especiais que dissipam a propagação de trincas ou aliviam as tensões existentes entre as camadas.

A camada de SAMI (*Stress absorbing membrane interlayer*) ou camada intermediária de alívio de tensão, é uma solução utilizada em obras de restauração de pavimento, esta camada é executada na superfície de um revestimento deteriorado e sobre a qual será executado um novo recapeamento, como mostra a Figura 7, essas podem ser constituídas de microrrevestimentos asfálticos, tratamentos superficiais, ou mesmo com

misturas asfálticas usinadas a quente com teor de ligante asfáltico modificado em camadas delgadas. Atua dissipando movimentos e tensões nas trincas e juntas de baixa a média severidade, devido as características de recuperação elástica do ligante empregado (MUKHTAR & DEMPSEY, 1996; BERNUCCI *et al.*, 2010;).

Figura 7 - Posição da camada de SAMI na restauração do pavimento.



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

2.3.2 Reciclagem do pavimento

A reciclagem está diretamente relacionada ao termo reutilização, esta técnica consiste em reaproveitar todo ou parte do pavimento deteriorado para a construção de uma nova camada com ou sem a adição de novos materiais (KANDHAL & MALLICK, 1997).

Segundo o DNIT (2005), a reciclagem do pavimento tem como benefícios: a conservação de agregados, ligantes e energia; a preservação do meio ambiente; e a restauração das condições geométricas existentes.

As metodologias de reciclagem envolvem principalmente os processos, podendo ser reciclagem a quente ou a frio e “in loco” ou em usinas estacionárias.

A execução da reciclagem do pavimento pode envolver apenas o pavimento asfáltico, nesse caso envolve a adição de agentes, como emulsões e ligantes, pode-se, eventualmente, adicionar agregados a fim de adequar a granulometria da nova camada. A reciclagem envolvendo uma ou mais das camadas inferiores pode ou não incorporar algum agente, dependendo do projeto e da rigidez que se busca, pode-se empregar emulsões, ligantes asfálticos, cal, cimento Portland, cinza

volante e agregados para adequação da granulometria (KANDHAL & MALLICK, 1997).

Pasetto & Baldo (2016) estudaram a resistência à fadiga de misturas asfálticas recicladas dosadas com diferentes teores de pavimento fresado e agregados novos, através do equipamento de tração indireta com frequência de 10 Hz e temperatura de 20°C. Na pesquisa observaram que as misturas dosadas com pavimento reciclado apresentaram maior vida de fadiga do que a mistura que não havia incorporação de material fresado, especialmente as misturas recicladas dosadas com ligantes modificados.

Luvizão (2014) avaliou o desempenho de misturas recicladas com adição pó de pedra e cimento Portland em teores de dois a quatro por cento executadas na rodovia SC-355. Na pesquisa concluiu que a resistência da mistura reciclada à compressão simples e à compressão diametral tende a aumentar conforme aumenta o teor de cimento e o tempo de cura da mistura.

2.3.3 Reconstrução do pavimento

Segundo o DNIT (2005) a reconstrução do pavimento consiste na remoção total ou parcial da espessura do pavimento podendo atingir o subleito e posteriormente na execução adequada de novas camadas estruturais.

O procedimento de avaliação da superfície do pavimento, descrito na norma DNIT 008/2003, através do Índice da Condição do Pavimento Flexível – ICPF, indica a reconstrução do pavimento quando houver defeitos generalizados com correções prévias em toda a extensão do segmento, infiltração de água, descompactação da base e restaurações já executadas anteriormente.

A reconstrução do pavimento pode abranger uma grande extensão da rodovia, ou apenas alguns segmentos. Quando da execução deste tipo de solução, o entendimento é inferido ao de uma obra nova, deste modo a literatura é bastante escassa para este termo.

2.4 RESUMO DO CAPÍTULO

- A modificação do ligante asfáltico convencional pode trazer ganhos no desempenho, em especial com a adição de materiais poliméricos, mas sem descartar o uso de outros materiais. A adição do polímero D0243, formando o CAP HiMA, tem apresentado ganho nas propriedades elásticas dos ligantes e espera-se que haja aumento significativo na resistência à fadiga com esta adição. A

incorporação de outros materiais como o próprio SBS convencional e a borracha moída de pneus também conferem ganhos de resistência ao ligante convencional. Neste aspecto, torna-se importante a comparação de desempenho entre estes materiais.

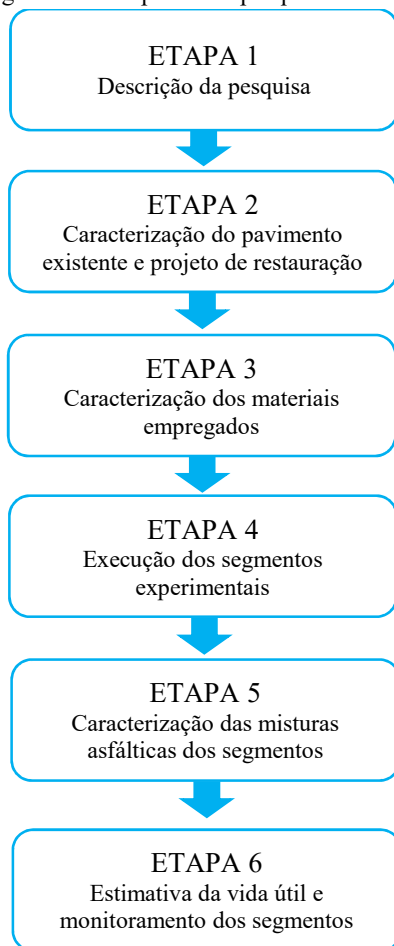
- A deformabilidade é característica do material que determina o comportamento quando este é submetido a tensão. O conhecimento desta característica é fundamental para o entendimento do comportamento quando os materiais asfálticos estão submetidos a variação de frequência e temperatura.
- A fadiga e a deformação permanente em misturas asfálticas são defeitos indesejáveis embora comuns em pavimentos asfálticos. A previsão do desempenho das misturas asfálticas frente a esses defeitos é objeto de intensa pesquisa na literatura. Misturas asfálticas que empregam o ligante HiMA têm demonstrado alto potencial de resistência à fadiga. Porém, alguns estudos sugerem que este potencial também pode ser obtido com outros ligantes, sendo necessário mais estudos para compreender o comportamento deste material em misturas asfálticas e o quão vantajoso pode ser em relação a outros ligantes.
- Quando o pavimento se encontra com alto grau de defeitos, é necessário a restauração, o nível de comprometimento estrutural é determinante para adotar um tipo de solução, que pode ser com utilização de reforço do pavimento, reciclagem, reconstrução ou ainda uma solução híbrida das anteriores. O conhecimento do estado do pavimento e o domínio das técnicas de restauração é importante para determinar a melhor solução técnica e econômica a ser empregada. Novos materiais e técnicas de restauração têm surgido buscando maior vida útil do pavimento e economia de recursos, sendo necessário estudá-las, compreendê-las e divulgá-las. Assim a execução dos segmentos experimentais vai ao encontro dessa premissa, tornando-se uma ferramenta para o monitoramento do desempenho das misturas estudadas e da obtenção de um fator campo-laboratório.
- Misturas asfálticas com ligantes de alto desempenho têm sido uma opção para o combate aos principais defeitos do pavimento. O ligante HiMA tem apresentado um bom desempenho quanto a fadiga e a deformação permanente em misturas asfálticas. Porém, alguns estudos indicam que outros agentes modificadores do ligante asfáltico podem atingir desempenho até mesmo superior a

este ligante altamente modificado por polímero. Isto deixa em dúvida a ideia de altíssimo desempenho do ligante HiMA, como prenuncia a literatura internacional. Desta forma, torna-se relevante estudar o comportamento da mistura asfáltica com o ligante HiMA aplicada em campo bem como determinar as características de desempenho com ensaios de laboratório. Aliado a isto, comparar estas propriedades com outras misturas asfálticas projetadas com ligantes também considerados de alto desempenho.

3 MÉTODOS DA PESQUISA

Para alcançar os objetivos estabelecidos, a pesquisa foi desenvolvida em 6 etapas conforme mostrado no fluxograma da Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma das etapas desta pesquisa.



Fonte: Elaboração do autor (2018).

3.1 DESCRIÇÃO DA PESQUISA

3.1.1 Seleção e formação da área de pesquisa

Em meados de 2015, o Departamento Estadual de Infraestrutura - DEINFRA deu início a reabilitação do pavimento da Rodovia SC-114, no trecho entre os municípios de Paineira e São Joaquim no Estado de Santa Catarina - Brasil. A solução adotada nesta obra de restauração do pavimento compreendeu a fresagem da camada de revestimento asfáltico antigo, execução de duas camadas de mistura asfáltica, uma com 2,0 cm de espessura com faixa granulométrica de SAMI, teor de 6,5% de ligante e a outra 4,0 cm de camada de rolamento com a faixa granulométrica VI do DEINFRA, teor de 6,0% de ligante, o diferencial desta solução foi a utilização do ligante HiMA, pela primeira vez no Estado de Santa Catarina. Até o ano de 2015, a literatura sobre este ligante altamente modificado - HiMA não apresentava muitas referências disponíveis, evidenciando a necessidade de estudos para avaliar e comparar o desempenho da mistura asfáltica com esse ligante a outros já empregados no Brasil e presente na especificação brasileira. Para isso foi escolhido o CAP SBS 60/85-E, que também é um ligante considerado de alto desempenho, em função da disponibilidade da empresa executora da obra.

A comparação do desempenho destas misturas seria com a execução de 2 segmentos experimentais. Para evitar a interferência da granulometria e do teor de ligante, optou-se por mantê-los constantes, assim as misturas asfálticas com a faixa SAMI teriam igual teor de 6,5% para os dois ligantes e o mesmo aconteceria para as misturas asfálticas com a faixa VI, mantendo 6,0% de teor.

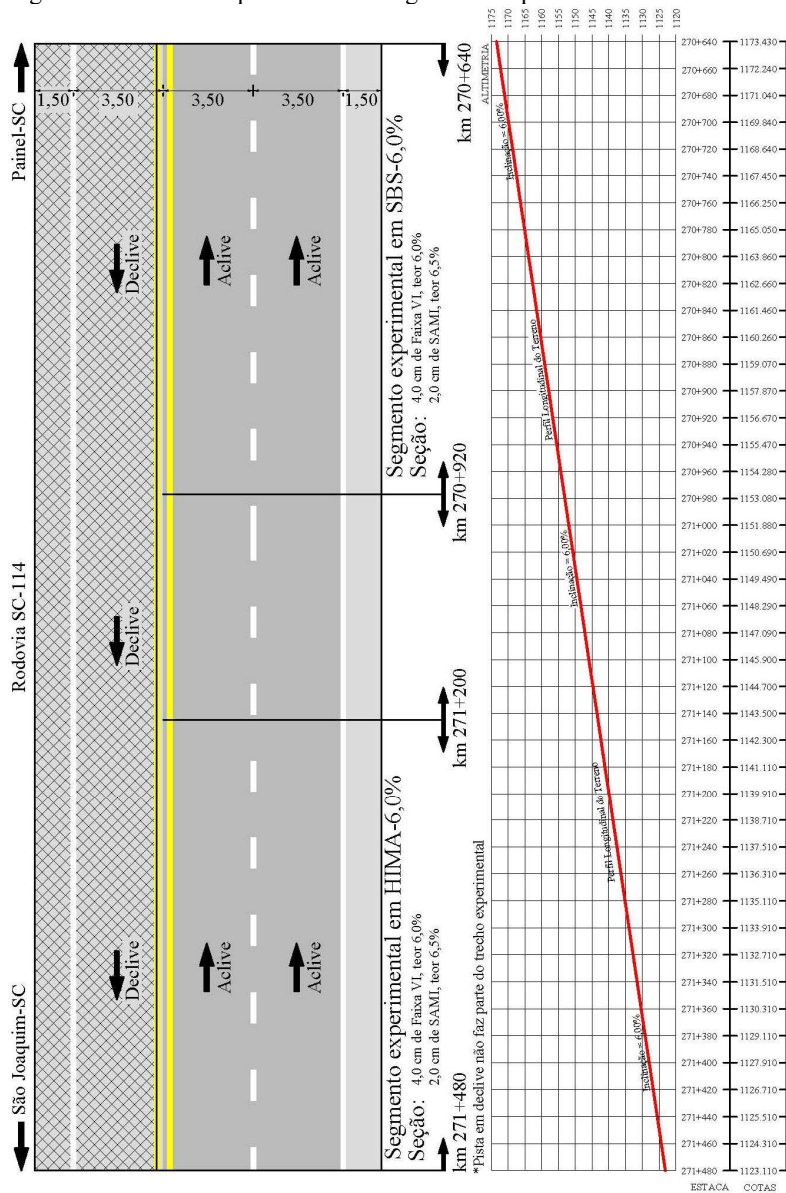
Os dois segmentos experimentais estão executados em campo conforme mostra a Tabela 7 e a Figura 9.

Tabela 7 - Disposição dos segmentos experimentais.

Local	km
Início segmento experimental SBS-6,0%	270+640
Fim do segmento experimental SBS-6,0%	270+920
Início segmento experimental HiMA-6,0%	271+200
Fim do segmento experimental HiMA-6,0%	271+480

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Figura 9 - Desenho esquemático dos segmentos experimentais.



Fonte: Elaboração do autor (2018).

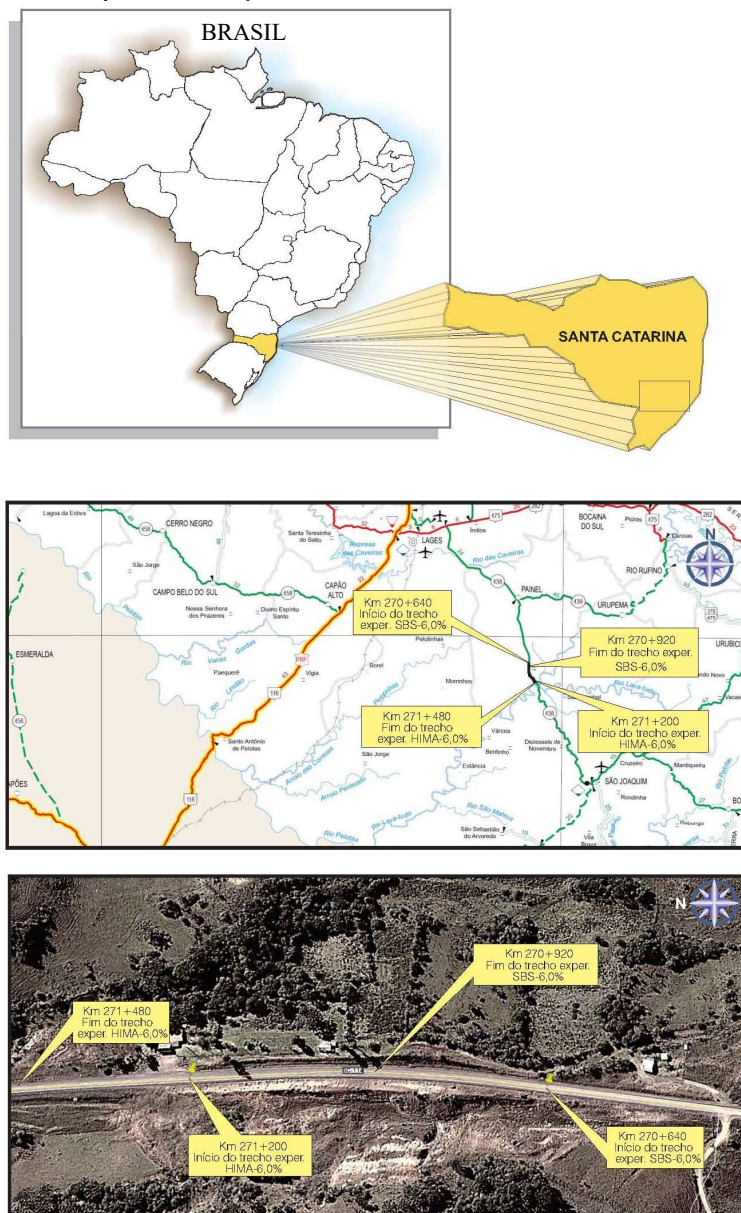
3.1.2 Localização e identificação dos segmentos experimentais

A localização e identificação dos segmentos experimentais tem por objetivo a possibilidade de acompanhamento e controle ao longo do tempo do desempenho destes materiais.

Os segmentos experimentais estão inseridos na Rodovia SC-114 que cruza a serra catarinense, entre os municípios de São Joaquim e Paineira, possuem 280,00 m de extensão cada um, totalizando 560,00 m, em duas pistas de sentido único e aclive de 6,0%, compreendidos dentro de um segmento com faixa adicional. O fato dos segmentos experimentais estarem inseridos em segmento de aclive, pode acelerar o surgimento de defeitos, como o afundamento na trilha de roda, motivado pela canalização e passagem mais lenta dos veículos de carga na pista da direita.

Os trechos estão dispostos sequencialmente, sendo os segmentos experimentais denominados SBS-6,0% e HiMA-6,0%. As siglas dadas em função do tipo de ligante e o valor residual percentual referente ao teor de ligante da mistura asfáltica empregada no segmento. Na Figura 10 é possível visualizar a localização e a configuração destes segmentos experimentais.

Figura 10 - Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Adaptado de Santa Catarina (2013).

3.1.3 Condições ambientais da região

3.1.3.1 Topografia

Os segmentos experimentais foram executados em 2 pistas com aclive, dentro de uma zona com faixa adicional, no sentido Sul-Norte, uma vez que a região é produtora de maçã observa-se que os segmentos experimentais foram executados no sentido do escoamento da produção regional, assim o maior fluxo de cargas passa sobre os segmentos. Para que se possa localizar com precisão os segmentos experimentais, as coordenadas geográficas foram obtidas conforme a Tabela 8.

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 1.123,10 m, totalizando um desnível de 50,30 m. Ressalta-se que os segmentos estão inseridos dentro de um longo segmento em rampa de 6,0%, não havendo variações de inclinação na extensão dos segmentos.

Tabela 8 - Coordenadas 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 SBS-6,0%	270+920	28° 3' 45.69"S	50° 4' 24.17"O
Início segmento experimental HiMA-6,0%	271+200	28° 3' 54.76"S	50° 4' 23.64"O
Fim HiMA-6,0%	271+480	28° 4' 4.00"S	50° 4' 24.00"O

Fonte: Elaboração do autor (2018).

3.1.3.2 Temperatura

Uma das características mais peculiares da região serrana catarinense é a temperatura, com valores que chegam à -9 °C a região é uma das mais frias do Brasil, a temperatura média anual gira em torno dos 14 °C e não ultrapassa 35 °C em nenhuma das estações do ano. As medições de temperatura estão disponíveis em estações meteorológicas. A estação mais próxima é a 2849014 São Joaquim, localizada no próprio município cujo órgão controlador é o INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. A série histórica disponível tem início em 1961 e estende-se até os dias atuais. Os dados das temperaturas extremas observados na região estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Extremos da série histórica com relação à temperatura.

Observação de extremos da série (1961-2016)	
Máxima (°C)	31,40
Mínima (°C)	-9,00

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia (2016).

Com base na medição da temperatura ao longo da série histórica (1961-2016) é possível observar a variação das médias da temperatura no decorrer do ano, a Tabela 10 apresenta os dados referentes as médias observadas em cada mês, fica evidente a queda da temperatura entre junho e agosto apresentando médias de 10°C a 11°C, também é possível observar que a média anual fica entre 10°C a 18°C.

Tabela 10 - 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
Mai	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).

O clima frio da região onde encontram-se os segmentos experimentais requer cautela. As baixas temperaturas contribuem para o aumento na rigidez das misturas asfálticas e por consequência a deformabilidade da estrutura tende a ser menor quando da aplicação do carregamento, contribuindo para maior vida útil. Por outro lado, as temperaturas inferiores a 0°C, que ocorre nos meses de abril a setembro,

podem congelar a água dos poros da estrutura, podendo ser extremamente danoso ao pavimento pelo efeito expansivo da água.

3.1.3.3 Precipitação

A precipitação combinada com outros fatores climáticos pode ser prejudicial ao pavimento flexível. A Tabela 11 mostra a característica da precipitação com relação aos meses do ano, com base nas observações de pluviosidade da estação meteorológica de São Joaquim na série histórica de 1961-2016. Ainda segundo os dados do INMET, a média anual de precipitação na região é de 1.709 mm.

Tabela 11 - Característica mensal de chuva (1961-2016).

Mês	Precipitação		
	Mínimo (mm)	Média (mm)	Máxima (mm)
Janeiro	48,50	173,74	377,50
Fevereiro	16,40	166,56	363,40
Março	37,30	128,43	251,10
Abril	10,00	101,57	257,20
Maio	2,70	112,53	345,50
Junho	21,20	127,29	445,10
Julho	0,10	144,69	736,70
Agosto	7,00	147,46	513,10
Setembro	34,40	169,03	417,90
Outubro	55,10	167,92	382,80
Novembro	28,30	137,54	353,30
Dezembro	32,60	136,37	325,10
Média	24,47	142,76	397,39

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia (2016).

Os dados de precipitação da Tabela 11 mostram que o volume de chuva mensal é praticamente constante ao longo do ano. Dentro do período de inverno, onde as temperaturas baixas são mais intensas, há o risco da formação de gelo sobre a pista, que apesar de incomum no Brasil, é um fenômeno que pode acontecer na região da serra catarinense. Este efeito pode causar acidentes pela perda do atrito entre o pneu e o pavimento, demandando de intensa sinalização nesta região. Neste mesmo sentido, o surgimento de deformações excessivas na pista poderia ocasionar acúmulo de água sobre o pavimento em dias chuvosos, o que também poderia ocasionar acidentes pelo fenômeno da hidroplanagem.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO PAVIMENTO EXISTENTE E PROJETO DE RESTAURAÇÃO

3.2.1 Projeto existente

3.2.1.1 Estrutura do pavimento

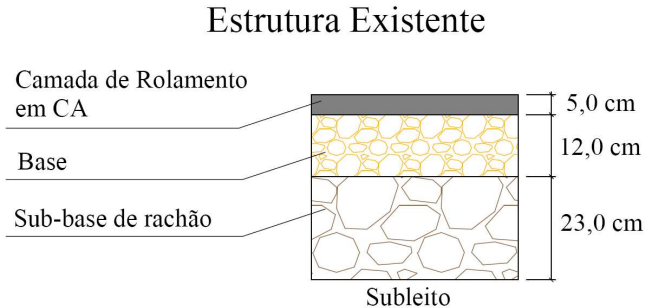
O subleito e as espessuras dos materiais que compõem a estrutura do pavimento existente foram obtidos através da abertura de poços de inspeção antes da execução dos segmentos experimentais, conforme a Figura 11. Assim a camada inferior da estrutura é constituída de pedra de origem basáltica, diâmetro máximo de 15 cm, que pode ser classificada como um material obtido direto do britador primário ou mesmo da própria detonação de pedreira face ao diâmetro encontrado, a espessura encontrada foi de 23 cm. A camada intermediária, camada de base, apresenta característica de uma base de brita graduada, com aparência de material granular que passou por processo de peneiramento e graduação antes de ser lançado na camada, a espessura desta camada foi determinada em 12 cm. A camada superior, camada de revestimento, é um concreto asfáltico - CA, com espessura de 5,0 cm. A Figura 12 apresenta o perfil da estrutura existente no local de execução dos segmentos experimentais.

Figura 11 - Determinação as espessuras das camadas existentes.



Fonte: Elaboração do autor (2018).

Figura 12 - Perfil da estrutura existente.



Fonte: Elaboração do autor (2018).

3.2.1.2 Defeitos do pavimento

Os segmentos experimentais encontram-se inseridos no segmento homogêneo número 11 do projeto de reabilitação da Rodovia SC-114 entre os municípios de Paniel e São Joaquim. O levantamento dos defeitos teve como parâmetro as diretrizes da norma DNIT 006/2003 – PRO Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos. Os dados referentes a este levantamento estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Resumo da avaliação objetiva.

Segmento h.	Trincamento médio (%)				
	FC-1	FC-2	FC-3	FC-2 + FC-3	FC-1+FC-2 + FC-3
11	0	0,12	0	0,12	0,12
	Painéis e desgaste médio (%)				Trilha de roda
	Painéis		Desgaste		ATR (mm)
	0		0		9,6
IGG	43,2				
Condição	Regular				

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

A condição funcional do trecho referente a obra de restauração variou entre péssimo e regular. Especificamente onde foram executados os segmentos experimentais, a condição superficial foi tida como regular, isto é, IGG entre 40 e 80.

3.2.1.3 Deflexões do pavimento existente

As deflexões do pavimento existente, assim como o levantamento dos defeitos, têm como base o segmento homogêneo número 11. Estas deflexões foram obtidas através do equipamento FWD e posteriormente convertidas pela equação proposta por Borges (2001), para estrutura do Tipo I que considera uma camada de CA, uma de base de brita graduada simples – BGS e macadame seco - MS para deflexões com viga Benkelman. A Tabela 13 apresenta o resumo dos parâmetros deflectométricos.

Tabela 13 - Parâmetros deflectométricos do segmento homogêneo 11.

Deflexões ($\times 10^{-2}$ mm) FWD			Deflexões viga Benkelman (Borges, 2001)
$D_{\text{média}}$	Desvio padrão	$D_{\text{característica}}$	$D_{\text{característica}}$
38	7	46	54
Raio da bacia befectométrica			
$R_{\text{médio}}$ (m)	Desvio padrão	$R_{\text{característico}}$ (m)	
230	55	175	

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

A deflexão característica para este segmento pode ser considerada baixa, o que denota de uma boa condição estrutural, assim como apresentaram boa parte dos segmentos homogêneos do trecho em restauração.

3.2.1.4 Módulos resilientes das camadas existentes

Baseados nas bacias deflectométricas, os módulos resilientes das camadas existentes foram obtidos por retroanálise. Para isso o projeto de reabilitação da Rodovia SC-114 utilizou o programa computacional BAKFAA. A Tabela 14 apresenta os valores de módulo obtidos dessa retroanálise.

Tabela 14 - Módulos resilientes das camadas existentes.

Segmento Homogêneo 11	Camada	Módulo Resiliente (MPa)	Coefficiente de Poisson
	Revestimento	3.103	0,32
	Base	269	0,35
	Sub-base	209	0,35
	Subleito	165	0,45

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

Os módulos resilientes da Tabela 14 são os apresentados pelo projeto de reabilitação para o segmento homogêneo 11. Os valores das camadas granulares e do subleito serão adotados como referência, para a simulação do desempenho das misturas asfálticas na estrutura do pavimento.

3.2.2 Projeto de restauração

3.2.2.1 Tráfego previsto

A determinação do número de solicitações previstas (N) deu-se a partir da contagem de tráfego e posterior aplicação da metodologia contida na Instrução de Serviço DER IS-02/98.

O horizonte de projeto previa a abertura ao tráfego no ano de 2015, sendo então o N calculado para o décimo ano (2024). A Tabela 15 apresenta o valor de N para as metodologias AASHTO e USACE.

Tabela 15 - Número N previsto para 2024.

Metodologia	Número (N)
AASHTO	$3,53 \times 10^6$
USACE	$1,07 \times 10^7$

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

Apesar de apresentar ambas as metodologias, o projeto de reabilitação adotou o número de solicitações previstas pela metodologia USACE, para o dimensionamento da reabilitação do pavimento.

3.2.2.2 Projeto original

A solução de restauração do pavimento originalmente desenvolvida pela empresa Engevix (2012), contemplava a reciclagem

profunda do revestimento e da base com adição de cimento. Para o dimensionamento desta estrutura utilizou-se a abordagem mecanicista.

Para o dimensionamento da reabilitação contemplando a reciclagem profunda, as espessuras referentes à nova base cimentada, bem como a camada de revestimento em concreto asfáltico foram determinadas através de análise mecanística com utilização do programa computacional ELSYM5.

Assim a estrutura originalmente projetada está apresentada na Tabela 16, já os parâmetros admissíveis e calculados estão dispostos na Tabela 17.

Tabela 16 - Estrutura prevista no projeto original de restauração do pavimento.

Estrutura projetada			
Camada	Módulo Resiliente (MPa)	Coefficiente de Poisson	Espessura (cm)
CA (borracha)	5.500	0,30	4,0
Base Reciclada	560	0,30	15,0
Base Remanescente	269	0,35	10,3
Sub-base Remanescente	208	0,35	27,7

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

Tabela 17 - Parâmetros admissíveis e calculados para a estrutura.

Parâmetros de projeto			
Referência		Admissíveis	Calculados no ELSYM5
Deformação CA (mm/mm)	Fibra inferior CAUQ Borracha (FONTES, 2009)	$1,90 \times 10^{-4}$	$1,30 \times 10^{-4}$
Tensão na camada reciclada (MPa)	Fibra inferior da base reciclada (BALBO, 1993)	0,25	0,13
Deflexão ($\times 10^{-2}$ mm)	Superfície do pavimento (DNIT PRO 11/79)	61	33
Tensão no subleito (MPa)	Superfície do subleito (HEUKLON, 1962)	0,171	0,034

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

3.2.2.3 Revisão do projeto original

Em meados de 2014 a empreiteira responsável pela execução da reabilitação do pavimento da SC-114 apresentou um estudo para substituição do projeto original de pavimentação. Este estudo baseou-se na comparação do desempenho entre a solução originalmente proposta com sua alternativa. Para isso, foi utilizado o *software* DARWin-ME 1.0, respeitando os parâmetros originalmente propostos. Segundo o estudo para substituição do projeto original de pavimentação, além da análise de previsão de desempenho realizada pelo DARWin-ME, realizou-se a análise da vida remanescente de ambas as soluções através do *software* de análise mecânica SisPav. Os resultados estão apresentados nas Tabela 18 e Tabela 19 e Tabela 20, ressalta-se que no segmento homogêneo 11, a alternativa proposta se constitui da utilização de misturas asfálticas com o ligante altamente modificado, denominado HiMA, sendo:

- Fresagem do pavimento antigo;
- Camada de SAMI, com CAP HiMA, espessura de 2,0 cm;
- Camada de rolamento, com CAP HiMA, espessura de 4,0 cm.

Tabela 18 - Dados de entrada no SisPav para o projeto original.

Projeto Original		
Camada	Espessura (cm)	Módulo resiliente (MPa)
CA (Asfalto Borracha)	4,0	2.500
Base Reciclada	15,0	560
Base Remanescente	10,3	241
Sub-base	27,7	75
Subleito	-	172

Fonte: Estudo para substituição do projeto original de pavimentação (2014).

Tabela 19 - Dados de entrada no SisPav para a alternativa proposta.

Alternativa Proposta (HiMA)		
Camada	Espessura (cm)	Módulo resiliente (MPa)
CA (HiMA)	4,0	3.500
SAMI (HiMA)	2,0	2.500
Base	20,3	241
Sub-base	27,7	75
Subleito	-	172

Fonte: Estudo para substituição do projeto original de pavimentação (2014).

Tabela 20 - Resultados apresentados com o SisPav.

Resultados calculados (SisPav)	Projeto original	Alternativa proposta (HiMA)
Vida de serviço estimada (anos)	5,60	6,50
Deformação permanente estimada (mm)	2,93	3,50
Deflexão calculada (0,01mm)	57,80	67,96

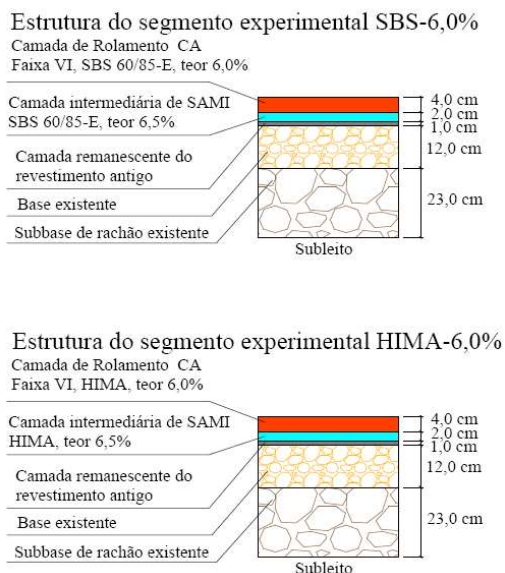
Fonte: Estudo para substituição do projeto original de pavimentação (2014).

Assim, esta foi a solução executada ao longo da obra de restauração do pavimento na rodovia SC-114, no trecho entre os municípios de Painel e São Joaquim.

3.2.3 Configuração das estruturas nos segmentos experimentais

Nos locais dos segmentos experimentais não houve alteração nas camadas de base, sub-base e subleito, porém a camada de revestimento antigo foi fresada, remanescendo 1,00 cm a fim de manter a estabilidade e compactação da camada de base. Na Figura 13 é possível verificar a estrutura dos dois segmentos experimentais.

Figura 13 - Perfil das estruturas dos segmentos experimentais.



Fonte: Elaboração do autor (2018).

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.3.1 Agregados pétreos

Os agregados foram oriundos da pedreira Compasa localizada na SC-114 entre os municípios de Painel e São Joaquim no km 277+600 na margem direita da rodovia. O agregado da pedreira Compasa é de origem magmática, trata-se de um derrame em basalto com granulação fina e de cor cinza. As propriedades dos agregados produzidos a partir desta rocha foram determinados em laboratório, pela própria empresa, seguindo os seguintes procedimentos:

- **Resistência ao desgaste por abrasão:** para determinar a abrasão “Los Angeles” do agregado utilizou-se a especificação do DNIT DNER ME 035/98, onde o valor de desgaste por abrasão, expresso em percentual (%), não pode ultrapassar 50%.
- **Limpeza:** segundo a norma DNER ME 054/97 o valor especificado mínimo de equivalente de areia para o agregado é de 55%.
- **Sanidade:** ensaio padronizado pela DNER ME 089/94.
- **Adesividade:** o recobrimento mínimo esperado após o ensaio, conforme a norma DNER ME 078/94, é de 90%.
- **Forma dos grãos:** utilizou-se a especificação proposta pelo DNIT na DNER-ME 086/94 Agregado – Determinação do Índice de forma, o método consiste em caracterizar o agregado pelo índice de forma (f) variando de 0 a 1 onde o agregado de melhor cubicidade tem $f = 1$ e o de maior lamelaridade tem $f = 0$, como parâmetro para utilização em misturas asfálticas tem-se o limite mínimo de $f = 0,5$.
- **Absorção:** Utilizou-se a especificação do DNIT DNER ME 081/98.

Os resultados destes ensaios serão discutidos no capítulo 4.

3.3.2 Fíler

Nas misturas asfálticas, empregou-se como material de enchimento (fíler) a cal hidratada do tipo CH-1, calcítica, onde o número 1 está relacionado com a pureza da cal. A CH-1 é constituída essencialmente de hidróxido de cálcio ou de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, com teor de gás carbônico igual ou menor

que 5% (TANCAL, 2016). A granulometria deste material consta na Tabela 21.

Tabela 21 - Granulometria da cal tipo CH-1.

Peneiras		Percentual passante (%)
Nº	Abertura (mm)	CAL CH-1
Nº 40	0,42	100
Nº 80	0,18	100
Nº 200	0,07	95,8

Fonte: Projeto de Mistura asfáltica (2015).

3.3.3 Ligantes asfálticos

Para as misturas asfálticas, utilizou-se dois ligantes diferentes, o CAP HiMA e o CAP AMP 60/85-E. Ambos os ligantes vieram da distribuidora Compasa do Brasil Distribuidora de Derivados de Petróleo, situada na cidade industrial de Curitiba no estado do Paraná.

Os resultados dos ensaios de caracterização dos ligantes asfálticos têm origem da própria distribuidora. Para o CAP HiMA considerou-se os limites propostos pela Compasa do Brasil Distribuidora de Derivados de Petróleo, pois este material não está presente na especificação brasileira de ligantes asfálticos modificados por polímero. Para o ligante CAP AMP 60/85-E, os limites são aqueles propostos na especificação.

3.3.4 Projeto das misturas asfálticas

A dosagem das misturas asfálticas foi desenvolvida pela empresa executora da obra, utilizando o método Marshall descrito na especificação DNER-ME 043/95, com 75 golpes por face.

3.3.4.1 Mistura asfáltica tipo SAMI

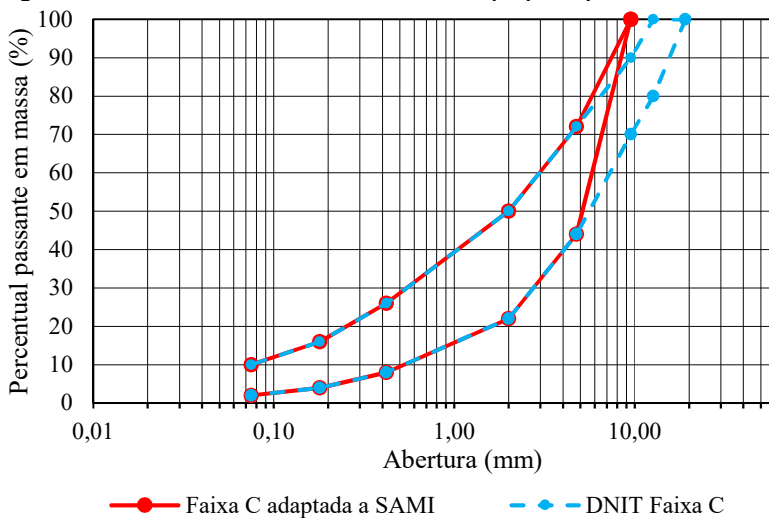
A mistura asfáltica proposta como camada intermediária antirreflexão de trincas, foi desenvolvida com base na faixa granulométrica “C” da especificação DNIT 031/2004 - ES Pavimentos Flexíveis – Concreto asfáltico, com adaptação do agregado graúdo como mostra a Tabela 22e o gráfico da Figura 14 . Esta faixa fez parte da obra de reabilitação da SC-114 com o objetivo de retardar a propagação de fissuras da camada remanescente para a superfície do pavimento novo.

Tabela 22 - Comparativo entre a faixa C do DNIT e a faixa proposta para SAMI.

Peneiras		Percentual passante em massa (%)				Tolerância (%)
Série ASTM	Abertura (mm)	DNIT Faixa C		Faixa C adaptada a SAMI		
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
3/4"	19,1	100	100	-	-	± 7
1/2"	12,7	80	100	-	-	± 7
3/8"	9,52	70	90	100	100	± 7
Nº 4	4,76	44	72	44	72	± 5
Nº 10	2,00	22	50	22	50	± 5
Nº 40	0,42	8	26	8	26	± 5
Nº 80	0,18	4	16	4	16	± 3
Nº 200	0,08	2	10	2	10	± 2

Fonte: Projeto de mistura asfáltica (2015).

Figura 14 - Intervalo entre as faixas C DNIT e a proposta para SAMI.



Fonte: Projeto de Mistura asfáltica (2015).

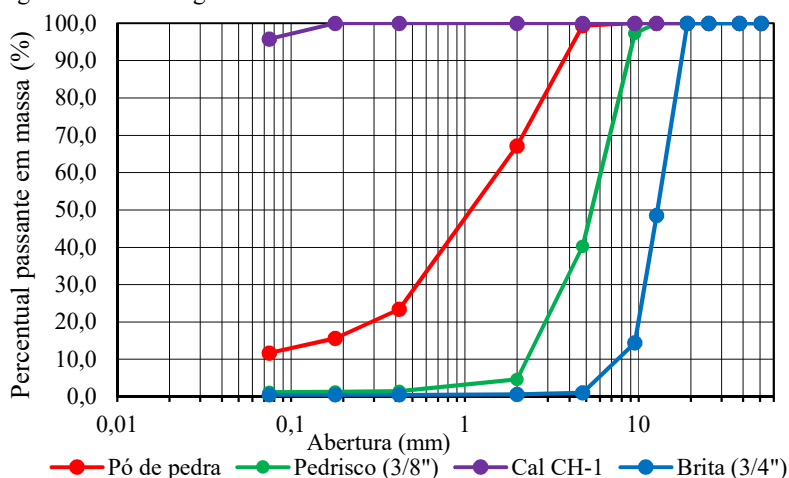
Para compatibilizar o material disponível da britagem na faixa granulométrica proposta foi necessário o conhecimento da granulometria do material britado, para então apresentar a composição da mistura. Isto foi executado através de peneiramento do material, os resultados estão apresentados na Tabela 23 e no gráfico da Figura 15.

Tabela 23 - Resultado do peneiramento dos materiais.

Peneiras		Percentual passante em massa (%)			
Série ASTM	Abertura (mm)	Brita (3/4")	Pedrisco (3/8")	Pó de pedra	Cal CH-1
3/4"	19,1	100	100	100	100
1/2"	12,7	48,5	100	100	100
3/8"	9,52	14,4	97,3	100	100
Nº 4	4,76	1,00	40,3	99,4	100
Nº 10	2,00	0,60	4,6	67,1	100
Nº 40	0,42	0,50	1,5	23,4	100
Nº 80	0,18	0,50	1,3	15,6	100
Nº 200	0,08	0,50	1,2	11,7	95,8

Fonte: Adaptado de Projeto de mistura asfáltica (2015).

Figura 15 - Curvas granulométricas dos materiais.



Fonte: Adaptado de Projeto de mistura asfáltica (2015).

Com o resultado do peneiramento foi possível determinar a quantidade necessária de cada material para compor a mistura dos agregados, como mostra a Tabela 24, e assim determinar a composição da mistura dos agregados de acordo com a faixa proposta. Na Tabela 25 e no gráfico da Figura 16 está apresentada a composição e o enquadramento na faixa C adaptada para SAMI.

Tabela 24 - Composição granulométrica da mistura.

Peneiras		Percentual passante em massa (%)		
Série ASTM	Abertura (mm)	Pedrisco (3/8") (60%)	Pó de pedra (39%)	Cal CH-1 (1%)
3/8"	9,52	60,0	39,0	1,0
Nº 4	4,76	24,8	38,8	1,0
Nº 10	2,00	2,8	26,2	1,0
Nº 40	0,42	0,9	9,1	1,0
Nº 80	0,18	0,8	6,1	1,0
Nº 200	0,08	0,7	4,6	1,0

Fonte: Adaptado de Projeto de mistura asfáltica (2015).

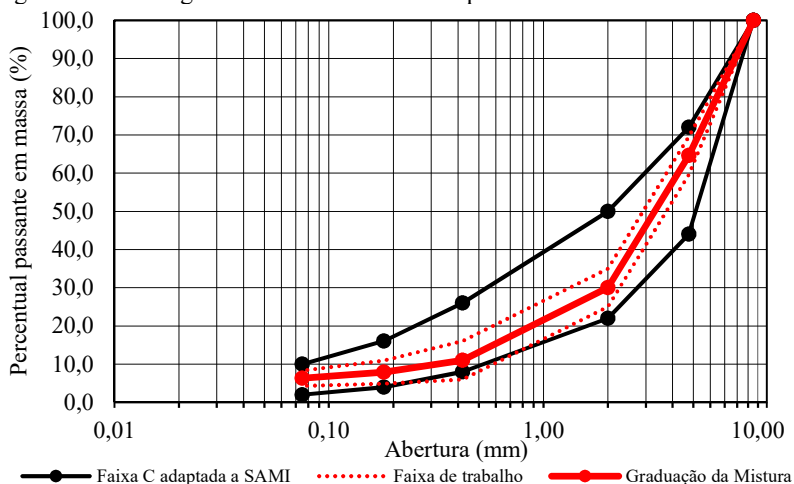
Tabela 25 - Distribuição granulométrica da mistura, dentro da faixa C adaptada para SAMI.

Peneiras		Percentual passante em massa (%)					Tolerância (%)
Série ASTM	Abertura (mm)	Gradação da Mistura	Faixa C adaptada a SAMI		Faixa de trabalho		
			Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
3/8"	9,52	100	100	100	100	100	± 7
Nº 4	4,76	64,6	44,0	72,0	59,6	69,6	± 5
Nº 10	2,00	30,0	22,0	50,0	25,0	35,0	± 5
Nº 40	0,42	11,0	8,0	26,0	6,0	16,0	± 5
Nº 80	0,18	7,9	4,0	16,0	4,9	10,9	± 3
Nº 200	0,08	6,3	2,0	10,0	4,3	8,3	± 2

Fonte: Adaptado de Projeto de mistura asfáltica (2015).

Através dos parâmetros da dosagem Marshall (75 golpes) obteve-se o teor de 6,5% de CAP HiMA para a mistura asfáltica tipo SAMI. Para manter iguais condições em ambos os ligantes (CAP HiMA e CAP SBS 60/85-E), o teor de ligante e a granulometria foram mantidos constante, assim houve a variação dos parâmetros Marshall, estes resultados estão apresentados no capítulo 4.

Figura 16 - Curva granulométrica da mistura tipo SAMI.



Fonte: Adaptado de Projeto de mistura asfáltica (2015).

3.3.4.2 Misturas asfálticas para camada de rolamento

A faixa granulométrica proposta para a camada de rolamento nos segmentos experimentais foi a faixa VI do Departamento Estadual de Infraestrutura do Estado de Santa Catarina – DEINFRA/SC, constante na Especificação DEINFRA-SC-ES-P-05/16 Camadas de Misturas Asfálticas Usinadas a Quente, também dosada pela empresa executora da obra de reabilitação. Seu intervalo está apresentado na Tabela 26.

Tabela 26 - Intervalos da faixa granulométrica VI do DEINFRA.

Peneiras		Percentual passante em massa (%)		
Série ASTM	Abertura (mm)	Faixa VI DEINFRA		Tolerância (%)
		Mínimo	Máximo	
1"	25,4	-	-	± 7
3/4"	19,1	100	100	± 7
1/2"	12,7	90	100	± 7
3/8"	9,52	76	93	± 7
Nº 4	4,76	44	74	± 5
Nº 10	2,00	25	55	± 5
Nº 40	0,42	9	27	± 5
Nº 80	0,18	4	17	± 3
Nº 200	0,08	2	10	± 2

Fonte: Adaptado de Projeto de mistura asfáltica (2015).

A composição dos agregados para a faixa VI está apresentada na Tabela 27, a composição granulométrica da mistura para a faixa VI está na Tabela 28, e seu enquadramento pode ser observado no gráfico da Figura 17.

Tabela 27 - Composição dos agregados.

Peneiras		Percentual passante em massa (%)			
Série ASTM	Abertura (mm)	Brita 3/4" (15%)	Pedrisco 3/8" (35%)	Pó de pedra (49%)	Cal CH-1 (1%)
3/4"	19,1	15,0	35,0	49,0	1,0
1/2"	12,7	7,3	35,0	49,0	1,0
3/8"	9,52	2,2	34,1	49,0	1,0
Nº 4	4,76	0,2	14,1	48,7	1,0
Nº 10	2,00	0,1	1,6	32,9	1,0
Nº 40	0,42	0,1	0,5	11,5	1,0
Nº 80	0,18	0,1	0,5	7,6	1,0
Nº 200	0,075	0,1	0,4	5,7	1,0

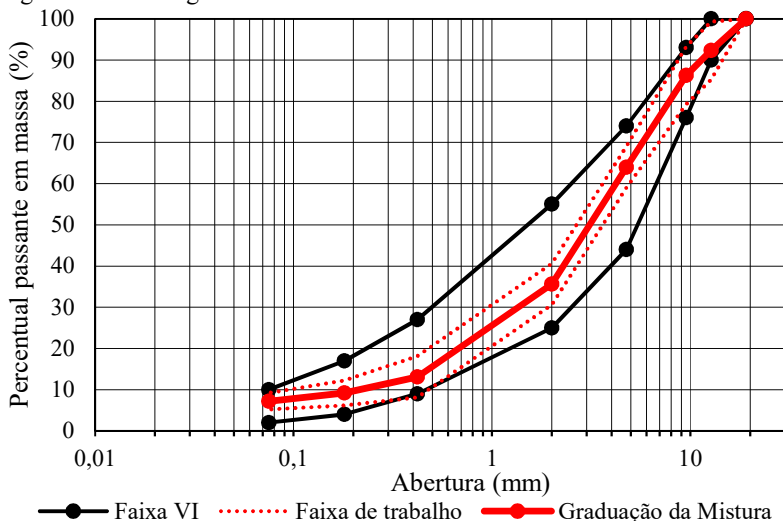
Fonte: Adaptado de Projeto de mistura asfáltica (2015).

Tabela 28 - Graduação da mistura dos agregados.

Peneiras		Percentual passante em massa (%) - faixa VI do DEINFRA					
Série ASTM	Abertura (mm)	Graduação da mistura	Faixa VI		Faixa de trabalho		Tolerância (%)
			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	
3/4"	19,1	100	100	100	100	100	-
1/2"	12,7	92,3	90	100	85,3	99,3	± 7
3/8"	9,52	86,3	76	93	79,3	93,3	± 7
Nº 4	4,76	64,0	44	74	59,0	69,0	± 5
Nº 10	2,00	35,6	25	55	30,6	40,6	± 5
Nº 40	0,42	13,1	9	27	8,1	18,1	± 5
Nº 80	0,18	9,2	4	17	6,2	12,2	± 3
Nº 200	0,08	7,2	2	10	5,2	9,2	± 2

Fonte: Adaptado de Projeto de mistura asfáltica (2015).

Figura 17 - Curva granulométrica da mistura com a faixa VI.



Fonte: Adaptado de Projeto de mistura asfáltica (2015).

A partir da dosagem Marshall (75 golpes), determinou-se um teor de ligante em 6,0% para a mistura com o ligante HiMA. Para manter iguais condições em ambas misturas asfálticas, o teor de ligante e a granulometria foram mantidos constante, para a mistura SBS-6,0%, assim houve a variação dos parâmetros Marshall, principalmente com relação ao volume de vazios da mistura SBS-6,0%, os resultados dos parâmetros Marshall estão apresentados no capítulo 4.

3.4 EXECUÇÃO DOS SEGMENTOS EXPERIMENTAIS

3.4.1 Histórico da execução

Os segmentos experimentais foram executados durante a obra de reabilitação da rodovia SC-114. No mês de novembro de 2015, a Compasa do Brasil Distribuidora de Derivados de Petróleo LTDA, empresa executora das obras de reabilitação da SC-114 deu início a primeira etapa de execução dos segmentos experimentais através da fresagem de 4,0 cm da camada de revestimento existente nos dois sentidos da rodovia, na sequência foi executada a pintura de ligação com taxa de 0,5 litros de emulsão do tipo RR-2C por metro quadrado e então a primeira camada de revestimento asfáltico constituída de um SAMI com

2,0 cm de espessura com uso de ligante asfáltico modificado por polímero tipo SBS 60/85-E executado entre os km 270+640 e km 270+920 totalizando 280,00 metros de extensão sendo executado nos dois sentidos da rodovia. No mesmo dia, executou-se a camada de rolamento também com o ligante asfáltico modificado por polímero tipo SBS 60/85-E, com granulometria dos agregados encaixando-se na faixa VI do DEINFRA, com espessura de 4,0 cm.

A segunda etapa da execução do segmento experimental ocorreu no início de janeiro de 2016, iniciando com a fresagem de 4,0 cm da camada de revestimento existente nos dois sentidos da rodovia, na sequência foi executada a pintura de ligação com taxa de 0,5 litros de emulsão do tipo RR-2C por metro quadrado e então a primeira camada de revestimento asfáltico constituída de um SAMI com 2,0 cm de espessura com uso de ligante asfáltico altamente modificado por polímero denominado HiMA, executado entre os km 271+200 e km 271+480 totalizando 280,00 metros de extensão sendo executado nos dois sentidos da rodovia, na sequência, executou-se a camada de rolamento também com o ligante asfáltico altamente modificado por polímero denominado HiMA no qual o teor era de 6,0%, que possui as mesmas características do restante da obra de restauração. A Figura 18 apresenta o início da execução do segmento experimental, com a camada de revestimento antigo fresada e recebendo a camada de SAMI. Na Figura 19 é possível visualizar a aplicação da segunda camada, camada de rolamento, na faixa VI. Já na Figura 20 a compactação da camada de rolamento.

Figura 18 - Pista fresada recebendo a primeira camada – SAMI.



Fonte: Elaboração do autor (2018).

Figura 19 - Execução da 2ª camada - Faixa VI.



Fonte: Elaboração do autor (2018).

Figura 20 - Compactação da 2ª camada.



Fonte: Elaboração do autor (2018).

3.4.2 Controles tecnológicos da execução

3.4.2.1 Usinagem

Os controles relacionados à usinagem, ou seja, a mistura entre os agregados e o ligante, visam assegurar que a mistura asfáltica esteja conforme proposta no projeto da mistura asfáltica. Os parâmetros comumente observados são: temperatura de mistura do agregado com o ligante; temperatura do agregado; granulometria; teor de ligante; umidade do agregado.

A usina utilizada para execução dos segmentos experimentais foi a mesma utilizada para executar a obra de reabilitação da SC-114. A usina era do tipo “drum mixer” com sistema de secagem dos agregados em contrafluxo, com capacidade máxima de 140 toneladas por hora. A Figura 21 mostra a usina utilizada.

Figura 21 - Usina misturadora TEREX MAGNUM 140 A.



Fonte: Elaboração do autor (2018).

Além da temperatura obtida no painel da usina, controlou-se a temperatura durante o descarregamento da batelada no caminhão transportador. As faixas de temperatura estão apresentadas na Tabela 29, conforme definido pelo fornecedor dos ligantes em termos de viscosidade.

Tabela 29 - Faixas de temperaturas para o processo de usinagem.

Tipo de ligante	Etapa	Temperatura (°C)	
		Mínimo	Máximo
HiMA	Misturação	173	179
HiMA	Entrada do agregado	183	189
SBS 60/85-E	Misturação	160	165
SBS 60/85-E	Entrada do agregado	170	175

Fonte: Elaboração do autor (2018).

O controle do teor de ligante asfáltico foi através do aparelho extrator de betume, cujo ensaio está descrito na ABNT NBR 16208:2013 Misturas asfálticas - Determinação do teor de betume pelo Soxhlet, pelo Rotarex e pelo refluxo duplo e também na DNER-ME 053/94 Misturas betuminosas – percentagem de betume. Outro ensaio também utilizado para o controle do teor de ligante é o Soxhlet, descrito também na ABNT NBR 16208:2013 e na Norma DNIT 158/2011 - ME Mistura asfáltica – Determinação da porcentagem de betume em mistura asfáltica utilizando o extrator Soxhlet – Método de ensaio. Ambos os métodos foram utilizados para conferência do teor de betume na execução dos segmentos experimentais.

3.4.2.2 Compactação

Durante a execução, os fatores mais importantes a serem satisfeitos estão relacionados a compactação e espessura. A temperatura de lançamento e compactação deve ser satisfatória ao projeto de dosagem e do tipo de ligante, a espessura deve atender ao especificado no projeto, a compactação não deve ser inferior a 97% da prevista no projeto da mistura. As temperaturas de compactação para cada tipo de ligante estão descritas na Tabela 30.

A observação de outros fatores também é importante para garantir a qualidade do serviço, como:

- Limpeza da camada inferior: verificar se não há resíduos, materiais soltos ou pó sobre esta camada;
- Execução da pintura de ligação: verificar se está curada e com a taxa correta;
- Equipamentos: verificar se os equipamentos de distribuição e compactação são adequados e estão em boas condições para a execução do serviço;

- Pessoal: verificar se a equipe tem conhecimento do manuseio de equipamento e execução correta do serviço;
- Alinhamento e emendas: verificar se o alinhamento está correto e se a execução das emendas transversais e longitudinais estão sendo bem executadas.

Esta série de cuidados contribuem para que a execução do serviço seja conforme o planejado.

Tabela 30 - Faixas de temperaturas durante a compactação.

Tipo de ligante	Etapa	Temperatura (°C)	
		Mínimo	Máximo
HiMA	Compactação	155	160
SBS 60/85-E	Compactação	142	147

Fonte: Elaboração do autor (2018).

3.4.2.3 Controle deflectométrico

A Figura 22 mostra o registro fotográfico do ensaio de deflexão através da viga Benkelman executado na camada final.

Figura 22 - Ensaio de deflexão através da Viga Benkelman.



Fonte: Elaboração do autor (2018).

Determinou-se as deflexões sobre a camada fresada e sobre a camada de rolamento, para a pista da direita (pista central) e para a pista esquerda (pista do bordo). Estas determinações têm por objetivo o

monitoramento das condições do pavimento ao longo do tempo e serão apresentadas e discutidas no capítulo 4 desta pesquisa.

3.4.2.4 Macrotextura superficial

A textura foi obtida através do ensaio de mancha de areia, descrito na ABNT NBR 16504 Misturas asfálticas – Determinação da profundidade média da macrotextura superficial de pavimentos asfálticos por volumetria - Método da mancha de areia. A condição superficial de macrotextura foi obtida com a finalidade de acompanhamento das condições de superfície dos segmentos experimentais, permitindo determinar a evolução de possíveis patologias na macrotextura do pavimento. Na Figura 23 encontra-se o registro da execução do ensaio no segmento experimental.

Figura 23 - Ensaio de mancha de areia no segmento experimental.



Fonte: Elaboração do autor (2018).

3.5 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

3.5.1 Determinação do dano por umidade induzida

A análise do dano por umidade nas misturas asfálticas executadas nos segmentos experimentais, foi executada buscando seguir as recomendações descritas na norma brasileira ANBT NBR 15617 (2015)

que se refere a determinação do dano por umidade induzida em misturas asfálticas. Uma das recomendações desta norma refere-se ao percentual de vazios com ar na ordem de $(7\% \pm 1\%)$ com corpos de prova moldados. Esta recomendação não pôde ser seguida uma vez que os corpos de prova foram extraídos dos segmentos experimentais por sonda rotativa, o que também contribui para uma selagem ao longo da altura do corpo de prova, consequentemente não se pôde atender a recomendação quanto a condição de saturação (entre 55 e 80%) mesmo com a aplicação de vácuo por um período muito superior a 30 minutos.

3.5.2 Módulos resilientes obtidos em laboratório

Os módulos resilientes das misturas asfálticas com o ligante HiMA no teor de 6,0% e faixa VI, e a mistura tipo SAMI com teor de 6,5% foram obtidos pelo ensaio de compressão diametral por cargas repetidas, sob as condições da norma DNIT 135/2010, executado no Laboratório de Asfaltos e Materiais para Pavimentação da Universidade Federal do Paraná, a pedido da empresa responsável pela execução da obra de reabilitação da SC-114. Os corpos de prova foram entregues à UFPR pela empresa.

A mistura asfáltica SBS teor de 6,0% com a faixa granulométrica VI, teve seu módulo resiliente obtido no laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina, com base na norma DNIT 135/2010.

3.5.3 Determinação comportamento reológico das misturas asfálticas

O ensaio de módulo complexo foi executado com base na norma europeia EN 12697-26 (2004) que trata dos ensaios para se obter a rigidez, através do equipamento de flexão alternada em viga de quatro pontos, para as 2 misturas asfálticas denominadas SBS-6,0% e HiMA-6,0% com varredura para as temperaturas de 0°C, 5°C, 10°C, 15°C, 20°C, 25°C e 30°C, nas frequências de 0,1 Hz, 0,2 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz e 20 Hz. Assim, para cada conjunto de temperatura e frequência foram aplicados 100 ciclos, sob a condição de deformação controlada igual a 50 $\mu\text{m/m}$.

3.5.4 Determinação da resistência à fadiga das misturas asfálticas

A determinação do comportamento à fadiga das misturas asfálticas estudadas deu-se através de ensaio em laboratório com equipamento de flexão em viga de quatro pontos. Os corpos de prova foram serrados de placas extraídas das pistas experimentais, a Figura 24 mostra o método de extração destas placas em campo. Na Figura 25 os corpos de prova já serrados com as dimensões 50,8x63,5x381 mm, ao todo foram serrados 32 corpos de prova a fim de obter a curva de fadiga de cada uma das misturas.

Seguiu-se as recomendações da EN 12697-24 (2004) a respeito do critério de fadiga, sendo definido como 50% do módulo de rigidez inicial que é considerado a partir do centésimo ciclo de aplicação de carga devido à uma acomodação inicial do corpo de prova, o ensaio foi executado à deformação controlada com a condição de temperatura em 20°C e frequência de 10 Hz. A Figura 26 apresenta a execução do ensaio de fadiga, o equipamento encontra-se dentro de uma câmara térmica capaz de manter a temperatura constante, assim é possível manter além do corpo de prova e o equipamento sob a temperatura controlada, é possível manter os demais corpos de prova termicamente condicionados dentro da câmara.

Figura 24 - Extração dos corpos de prova no trecho experimental.



Fonte: Elaboração do autor (2018).

Figura 25 - Corpos de prova serrados, prontos para o ensaio de fadiga.



Fonte: Elaboração do autor (2018).

Figura 26 - Equipamento para ensaio de fadiga.



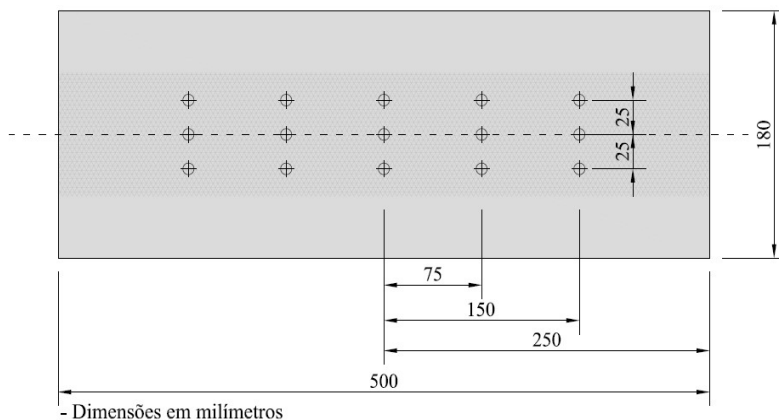
Fonte: Elaboração do autor (2018).

3.5.5 Determinação da resistência à deformação permanente das misturas asfálticas

O ensaio de deformação permanente das misturas asfálticas estudadas seguiu as recomendações da norma francesa NF P98-253-1 (1991), com exceção quanto a moldagem dos corpos de prova. Estes foram extraídos dos segmentos experimentais e posteriormente serrados nas dimensões de 180x500x50mm. Utilizou-se então o equipamento *Orniéreur*, após o período de condicionamento de 12 horas na temperatura de 60 °C, executou-se o ensaio para as 2 misturas asfálticas. A determinação da deformação se dá pela medição da evolução do afundamento medido em 15 pontos conforme a Figura 27 para 0 (inicial), 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos.

Figura 27 - Pontos de controle da deformação permanente.

Corpo de prova para o ensaio de deformação permanente



- Dimensões em milímetros

Fonte: Elaboração do autor (2018).

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

4.1.1 Agregados pétreos

As propriedades dos agregados empregados nas misturas asfálticas desta pesquisa estão relacionadas a baixo:

- **Resistência ao desgaste por abrasão:** O agregado apresentou desgaste em 24%, por abrasão, sendo o limite igual a 50%, portanto apresentando valor satisfatório para a utilização em misturas asfálticas.
- **Limpeza:** O agregado oriundo da pedreira da Compasa apresentou o valor de 68,7%, com relação ao equivalente de areia, sendo satisfatório para o uso em misturas asfálticas já que o limite é de 55%.
- **Sanidade:** Para o agregado graúdo da pedreira da Compasa a perda de massa foi de 1,6% e para o agregado miúdo foi de 3,0%, ambos apresentando resultados adequados para a utilização em misturas asfálticas.
- **Adesividade:** O agregado oriundo da pedreira Compasa apresentou um recobrimento de 100% da área dos agregados após a execução do ensaio, podendo ser considerado um agregado com boa adesividade, confirmando a premissa de que agregados de origem basáltica apresentam boa adesividade.
- **Forma dos grãos:** No ensaio de índice de forma proposto pelo DNIT o agregado da pedreira Compasa apresentou valor de $f = 0,7$, sendo este valor satisfatório para o emprego do agregado em mistura asfáltica.
- **Absorção:** Os agregados graúdos oriundos da pedreira Compasa apresentaram massa específica real de 2.909 kg/m^3 , massa específica aparente de 2.765 kg/m^3 e absorção de 1,795 %.

Estes resultados indicam que o agregado da pedreira Compasa tem boas condições para ser utilizado em misturas asfálticas. Apesar do ensaio de adesividade não demonstrar qualquer problema em relação à afinidade entre agregado e ligante, utilizou-se a cal como parte da composição das misturas asfálticas. A cal hidratada é um melhorador de adesividade, o emprego deste filler é obrigatório em concretos asfálticos do DEINFRA e por isso as misturas asfálticas desta pesquisa possuem em suas

granulometrias, uma vez que estas faixas são aquelas propostas para a obra de restauração.

4.1.2 Ligantes asfálticos

O ligante CAP AMP 60/85-E, com base nos ensaios da especificação apresentou os resultados constantes na Tabela 31 e Tabela 32 as informações contidas têm origem no certificado de controle de qualidade da própria distribuidora.

Tabela 31 - Resultados do ligante CAP AMP 60/85-E.

Método	Características	Unid.	CAP AMP 60/85-E		
			Valores especificados		
			Mín.	Máx.	Resultado
NBR-6576	Penetração (100 g, 5s, 25°C)	0,1mm	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).

Tabela 32 - Viscosidade com a temperatura do CAP AMP 60/85-E.

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).

O ligante asfáltico denominado CAP HiMA, muito embora seja modificado por polímero elastomérico, não há especificação brasileira vigente para este produto, desta forma, considerou-se os limites propostos pela Compasa do Brasil Distribuidora de Derivados de Petróleo, na Tabela 33 e Tabela 34 é possível verificar os valores específicos e os resultados do ligante CAP HiMA.

Tabela 33 - Especificação e resultados do ligante CAP HiMA.

Método	Características	Unid.	CAP HiMA		
			Valores especificados		
			Mín.	Máx.	Resultado
NBR-6576	Penetração (100 g, 5s, 25°C)	0,1mm	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 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.	% massa	-	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).

Tabela 34 - Viscosidade com a temperatura do CAP HiMA.

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).

Os resultados apresentados mostram que o ligante HiMA é mais viscoso, possui mais capacidade elástica e seu ponto de amolecimento é mais elevado que o ligante AMP 60/85-E. Comportamento muito semelhante aos ligantes convencionais que possuem maiores teores de asfaltenos, que têm menor suscetibilidade térmica, por consequência têm seu ponto de amolecimento e viscosidade elevados (Hunter *et al.* 2015). A adição dos polímeros na matriz asfáltica, em especial o polímero D-0243 no CAP HiMA, concede ao ligante asfáltico as mesmas propriedades combinadas com maior capacidade elástica, evidenciada pela recuperação elástica de 96,0%.

A recuperação elástica apresentada por estes dois ligantes sugere um bom desempenho à fadiga das misturas asfálticas. Retomando que as misturas asfálticas HiMA-6,0% e SBS-6,0% possuem mesma granulometria e mesmo teor de ligante, espera-se que a mistura HiMA-6,0% tenha desempenho à fadiga superior ao da mistura SBS-6,0% já que o ligante HiMA possui maior capacidade elástica.

De mesma forma, a viscosidade e o ponto de amolecimento do ligante HiMA contribuem para a possibilidade de menor deformação permanente da mistura com este ligante, quando comparada com o AMP 60/85-E. Porém, não depende somente do tipo de ligante o desempenho à deformação permanente de uma mistura asfáltica, mas sim de uma combinação de variáveis.

A viscosidade destes ligantes denota que as misturas com o CAP HiMA demandam de uma temperatura de 13 °C mais elevada para o processo de produção das misturas asfálticas quando comparado com misturas asfálticas que empregam o ligante AMP 60/85-E. Desta forma, também é necessário um consumo maior de energia para elevar a temperatura, tornando a usinagem das misturas asfálticas com ligante HiMA mais onerosa quando comparada com misturas que contenham o AMP 60/85-E.

4.1.3 Composição das misturas asfálticas

4.1.3.1 Mistura asfáltica tipo SAMI

Na Tabela 35 é possível verificar os parâmetros Marshall para as composições da mistura asfáltica tipo SAMI com os ligantes diferentes e mesmo teor.

Tabela 35 - Parâmetros Marshall das misturas asfálticas tipo SAMI.

Propriedades das Misturas asfálticas tipo SAMI					
Ensaio	Und.	Parâmetro		Resultados	
		Mín.	Máx.	HiMA	SBS 60/85-E
Teor de Ligante	%	-	-	6,5	6,5
Volume de Vazios - VV	%	7	10	9,7	11,5
Relação Betume/Vazios - RBV	%	-	-	60,3	55,6
Vazios do Agregado Mineral - VAM	%	17	-	24,5	25,9
Densidade Máxima Medida (RICE)	-	-	-	2,518	2,513
Densidade Aparente	-	-	-	2,282	2,254
Estabilidade, 60 °C	kgf	500	-	1285,3	818,2
Resistência à Tração na Compressão Diametral a 25°C	MPa	0,65	-	1,27	0,83
Fluência, 60 °C	mm	2	5	3,76	4,00

Fonte: Adaptado de Projeto de mistura asfáltica (2015).

Devido a opção por manter constante o teor e granulometria para ambas as misturas asfálticas, os parâmetros Marshall variaram. Especialmente pela alteração no volume de vazios, que segundo a especificação proposta pelo DEINFRA, o limite estabelecido para misturas do tipo SAMI é 10%, sendo que a mistura SAMI com o ligante SBS 60/85-E apresentou volume de vazios igual a 11,5%.

O alto volume de vazios pode representar um aumento na deformação plástica devido a densificação inicial ocasionada pelo tráfego. Entretanto, esta camada possui 2,0 cm de espessura e está posicionada a 4,0 cm abaixo da superfície de rolamento, espera-se que sua contribuição para o aparecimento de deformações plásticas não seja significativa. Contudo, face a pequena espessura e por não estar diretamente em contato com o tráfego e aos fatores climáticos, esta camada não foi objeto de investigação do comportamento à fadiga e de desempenho à deformação permanente nesta pesquisa.

4.1.3.2 Mistura asfáltica da camada de rolamento

A Tabela 36 apresenta os resultados dos parâmetros Marshall para a mistura HiMA-6,0% e SBS-6,0%. As misturas compartilham de mesma granulometria, mesmo teor, apenas o tipo de ligante é diferente. Apesar

disso, houve a variação significativa nos parâmetros Marshall destas misturas.

Tabela 36 - Parâmetros Marshall para 2 misturas com a faixa VI.

Propriedades Marshall das misturas enquadradas na faixa VI					
Ensaio	Und.	Parâmetro		Resultado	
		Mín.	Máx.	HiMA- 6,0%	SBS-6,0%
Teor de Ligante	%	-	-	6,0	6,0
Volume de Vazios - VV	%	3	5	5,00	2,56
Relação Betume/Vazios - RBV	%	70	82	74,30	85,12
Vazios do Agregado Mineral - VAM	%	15	-	19,5	17,2
Densidade Máxima Medida (RICE)	-	-	-	2,552	2,558
Densidade Aparente	-	-	-	2,423	2,455
Estabilidade, 60 °C	kgf	500	-	1622	1118
Resistência à Tração na Compressão Diametral a 25°C	MPa	0,65	-	1,62	0,98
Fluência, 60 °C	mm	2	4	4,22	4,00

Fonte: Adaptado de Projeto de mistura asfáltica (2015).

O volume de vazios e consequentemente a relação betume/vazios foram as principais variações nos parâmetros Marshall das misturas. Cabe retomar do capítulo 3, a forma como foram projetadas as misturas. A mistura HiMA-6,0% foi dosada pelo método Marshall pela empresa executora da obra, já a mistura SBS-6,0% adotou-se o mesmo teor e granulometria da mistura HiMA-6,0%. Devido a isto, é a mistura SBS-6,0% que se apresenta fora de alguns intervalos da especificação proposta pelo DEINFRA. Outra consideração a ser feita é que se a mistura SBS-6,0% fosse dosada pelo método Marshall com a finalidade do enquadramento nos parâmetros de volume de vazios, muito provavelmente o teor de ligante seria mais baixo e consequentemente a granulometria seria alterada. Assim esta pesquisa, além da variável ligante, teria o teor e a granulometria diferentes entre as misturas, o que inicialmente não era o objetivo desta pesquisa.

Variações no volume de vazios e no RBV podem produzir misturas asfálticas instáveis por excesso ou pela falta de ligante (CERATTI E REIS, 2011). Na mistura SBS-6,0%, esta pelo excesso de ligante, há a possibilidade de exsudação, ou instabilidade na mistura asfáltica, além da

chance maior de deformação plástica. No entanto, no segmento experimental desta mistura não se observou a presença de deformações plásticas, mas sim uma pequena alteração na textura superficial proporcionada pelo teor de ligante.

Em termos de resistência à fadiga, a redução do volume de vazios possibilita um ganho na rigidez da mistura e isto pode contribuir para uma maior vida de fadiga da mistura SBS-6,0%, comparada a mistura HiMA-6,0%. Entretanto, as características do ligante HiMA, com relação à capacidade elástica e à viscosidade, são superiores ao ligante da mistura SBS-6,0% e somam-se a favor da mistura HiMA-6,0%. Desta forma, torna-se difícil a identificação da mistura que apresentará melhor comportamento à fadiga, apenas pelo conhecimento dos parâmetros Marshall e das características do ligante, sendo necessário o ensaio de fadiga a fim de determinar o comportamento destas misturas.

Quanto a resistência às deformações plásticas, a mesma analogia pode ser aplicada. O ligante HiMA, pela sua viscosidade, ponto de amolecimento e retorno elástico, indica melhor resistência às deformações plásticas comparado ao ligante SBS 60/85-E. No entanto, como a mistura SBS-6,0% é a que apresenta menor volume de vazios, pode existir um favorecimento desta mistura no ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego francês *Orniéreur*, já que os corpos estão submetidos à compressão com confinamento lateral e a mistura SBS-6,0% possui uma quantidade menor de vazios para permitir deslocamentos dentro do corpo de prova. Porém, de encontro a este favorecimento, o baixo volume de vazios também indica possível excesso de ligante na mistura SBS-6,0%, o que poderia tornar a mistura instável especialmente pela alta temperatura do ensaio (60°C). Com base nestas premissas, torna-se necessário a execução do ensaio a deformação permanente para avaliar o desempenho destas misturas quando submetidas à ação do tráfego.

4.1.4 Resistência ao dano por umidade induzida

Os resultados do ensaio de resistência ao dano por umidade induzida estão apresentados na sequência. A Tabela 37 demonstra os valores referentes aos vazios com ar e a saturação máxima atingida. Os corpos de provas foram levados ao condicionamento de elevada severidade, pois a região em que se encontram executados os segmentos experimentais é uma das mais frias e úmidas do país. Este condicionamento de alta severidade consiste em resfriamento a (-18 ± 3) °C por no mínimo 16h, seguido de imersão em água com temperatura de

(60 ± 1) °C por 24h e novamente imersão em água com temperatura de (25 ± 1) °C por 2 a 3h, depois deste condicionamento os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral, assim como os corpos de prova denominados de controle, sendo os que não sofreram o condicionamento. Na Tabela 38 para os corpos de prova com ligante HiMA, retirados do segmento experimental HiMA-6,0% e Tabela 39 para os retirados do segmento SBS-6,0% estão apresentados os valores obtidos do ensaio de resistência à tração.

Tabela 37 - Vazios com ar e saturação dos corpos de prova.

Identificação	Tipo de ligante	Vazios com ar (%)	Grau de saturação máximo atingido (%)
H5	HiMA	5,04	11,04
H6	HiMA	4,60	14,65
H8	HiMA	5,52	14,78
S1	SBS	3,44	16,03
S4	SBS	3,01	5,95
S6	SBS	2,35	10,13

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 38 - Ensaio de dano por umidade induzida com HiMA-6,0%.

Identificação	Tipo de ligante	Condicionamento	RTCD (MPa)	Resistência média (MPa)
H1	HiMA	Não	1,27	1,22
H2	HiMA	Não	1,21	
H7	HiMA	Não	1,19	
H5	HiMA	Sim	0,98	1,08
H6	HiMA	Sim	1,13	
H8	HiMA	Sim	1,12	
Razão da resistência à tração por compressão diametral				88%

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 39 - Ensaio de dano por umidade induzida com SBS-6,0%.

Identificação	Tipo de ligante	Condicionamento	RTCD (MPa)	Resistência média (MPa)
S2	SBS	Não	1,14	1,21
S3	SBS	Não	1,24	
S5	SBS	Não	1,25	
S1	SBS	Sim	1,03	1,03
S4	SBS	Sim	0,98	
S6	SBS	Sim	1,09	
Razão da resistência à tração por compressão diametral				85%

Fonte: Elaboração do autor (2018).

As amostras utilizadas neste ensaio são oriundas do campo, por esta razão não possuem o volume de vazios requerido ao ensaio e por consequência não se atingiu a saturação entre 55% e 80%. Apesar deste fato, a severidade da condição de ensaio imposta, com relação a umidade e os ciclos de congelamento e descongelamento evidenciou uma tendência a perda de resistência que poderá ocorrer nas pistas experimentais. Apesar da temperatura na região, a princípio, não atingir -18°C, mas sim temperatura de até -9°C conforme evidenciado no estudo da temperatura regional, aliada a condição de umidade pode então ocorrer ciclos de congelamento e descongelamento havendo a perda de resistência à tração das misturas asfálticas. Diante disso, seria válida a retirada de corpos de prova no futuro, aliada a um possível monitoramento, a fim de acompanhar se haverá a perda na resistência ao longo da vida de serviço dos segmentos experimentais.

A norma brasileira NBR 15617 (2016) não especifica o limite para considerar a mistura asfáltica suscetível a umidade. A AASHTO T-283, considera que uma mistura é suscetível se a razão da resistência à tração por compressão diametral for inferior a 80% para misturas dosadas e moldadas no método SUPERPAVE. Porém, tanto a dosagem quanto a moldagem das misturas asfálticas estudadas diferem deste método.

As misturas asfálticas possuem em sua composição a cal hidratada calcítica, o que contribui para um melhor desempenho à ação da umidade, em termos de adesividade do ligante com o agregado. Apesar de a caracterização dos agregados não indicar problemas de adesividade, nem mesmo a necessidade da cal, o valor da razão da resistência à tração por compressão diametral das duas misturas indica a necessidade de investigação. Sugere-se então, estudo destas misturas sem a cal e com volume de vazios dentro do preconizado pela NBR 15617 (2016) a fim de avaliar o dano causado nestas misturas asfálticas sob a condição de saturação entre 55% a 80%, porém esta avaliação não fará parte desta pesquisa devido ao cumprimento do cronograma proposto.

4.1.5 Rigidez das misturas asfálticas

4.1.5.1 Módulo de resiliência das misturas asfálticas

A Tabela 40 apresenta os resultados obtidos dos corpos de prova com a mistura asfáltica tipo faixa VI, na Tabela 41 estão os resultados obtidos para a mistura asfáltica tipo SAMI, ambas com o ligante HiMA.

Tabela 40 - Módulo resiliente para mistura HiMA-6,0%.

Identificação	Módulo resiliente (MPa)
D1	3.111
D2	3.325
D3	3.304
Média	3.247

Fonte: Laboratório de Asfaltos e Materiais para Pavimentação da Universidade Federal do Paraná, (2015).

Tabela 41 - Módulo resiliente, mistura tipo SAMI, ligante HiMA (teor 6,5%).

Identificação	Módulo resiliente (MPa)
S1	1.942
S2	1.801
S3	1.947
Média	1.897

Fonte: Laboratório de Asfaltos e Materiais para Pavimentação da Universidade Federal do Paraná, (2015).

Na Tabela 42 estão apresentados os valores de módulo resiliente obtidos no laboratório de pavimentação da UFSC, para a mistura com a Faixa VI e teor de 6,0% de ligante SBS 60/85-E.

Tabela 42 - Módulo resiliente, mistura SBS-6,0%, obtido na UFSC.

Identificação	Módulo resiliente (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
Mistura SBS-6,0%	5.399	111

Fonte: Elaboração do autor (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 e não por esta pesquisa, 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.

Observa-se que a mistura tipo SAMI é a que possui menor valor de módulo resiliente e pode ser considerada a mistura mais deformável, isso vai ao encontro de sua função, absorver as movimentações oriundas do revestimento antigo remanescente.

A mistura HiMA-6,0% apresentou o menor valor de módulo entre as misturas utilizadas como camada de rolamento, porém deve-se considerar que os ensaios de módulo de resiliência possuem diferentes abordagens com relação a obtenção dos corpos de prova.

O módulo de resiliência varia com a faixa granulométrica, o tipo e teor de ligante, as propriedades volumétricas e a energia de compactação, isso torna de difícil tarefa correlacionar os valores obtidos com as variáveis envolvidas e prever de forma comparativa sobre o desempenho destas misturas.

Devido a diferença observada no valor do módulo resiliente para as misturas HiMA-6,0% e SBS-6,0%, estes valores não serão utilizados para efeito de comparação de desempenho entre estas misturas, mas sim o módulo complexo que melhor representa as características viscoelásticas das misturas asfálticas. Apenas será adotado, para efeito de simulação de desempenho, o módulo resiliente obtido da mistura tipo SAMI.

4.1.5.2 Módulo complexo misturas asfálticas

Com a determinação do módulo complexo das misturas asfálticas utilizadas nos segmentos experimentais foi possível analisar o comportamento destas misturas, na variação de frequência e temperatura pela interpretação dos resultados. Obteve-se os valores de módulo complexo e ângulo de fase para as 2 misturas asfálticas através da execução do ensaio descrito na EN 12697-26 (2004) que estão apresentados na Tabela 43 e Tabela 44.

Na Figura 28 está apresentado o comportamento do módulo complexo com a evolução da temperatura, onde cada curva representa uma frequência, para ambas as misturas, na representação conhecida como curvas isócronas.

Tabela 43 - Módulo complexo na varredura de frequência e temperatura do ensaio.

Módulo complexo mistura SBS-6,0% (MPa)							
Frequência	Temperatura						
	0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
0,1 Hz	14.555	9.424	5.441	2.554	1.166	589	290
0,2 Hz	16.172	11.151	6.795	3.409	1.601	727	370
0,5 Hz	18.255	13.361	8.730	4.865	2.391	1.136	566
1 Hz	19.761	15.075	10.445	6.165	3.296	1.648	817
2 Hz	21.363	16.757	12.141	7.717	4.353	2.371	1.153
5 Hz	23.449	19.119	14.611	9.943	6.202	3.565	1.831
10 Hz	24.776	20.912	16.617	11.953	7.819	4.767	2.624
20 Hz	26.382	22.471	18.157	13.603	9.501	6.145	3.561

Módulo complexo mistura HiMA-6,0% (MPa)							
Frequência	Temperatura						
	0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
0,1 Hz	12.403	7.779	5.845	3.051	1.440	700	417
0,2 Hz	13.906	8.729	7.013	3.910	1.992	979	597
0,5 Hz	15.650	10.417	8.948	5.251	2.824	1.461	899
1 Hz	17.000	11.677	10.352	6.483	3.752	2.046	1.242
2 Hz	18.311	12.918	11.963	7.732	4.706	2.752	1.662
5 Hz	20.103	14.533	14.358	9.845	6.354	3.869	2.477
10 Hz	21.537	15.802	16.070	11.555	7.731	4.981	3.328
20 Hz	23.069	16.972	17.963	13.563	9.484	6.164	4.238

Fonte: Elaboração do autor (2018).

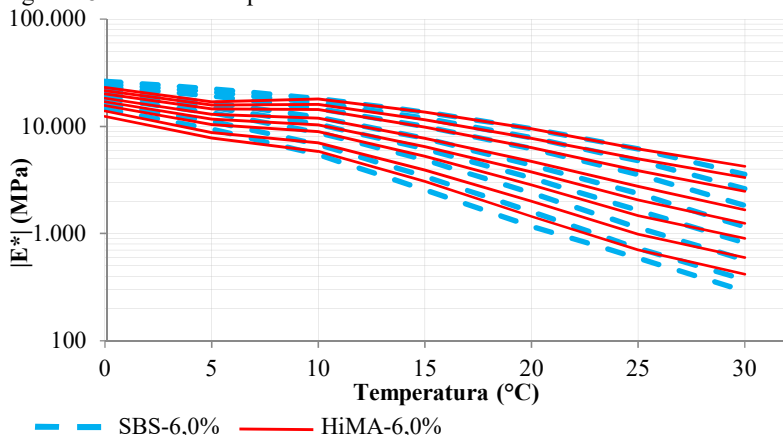
Tabela 44 - Ângulo de fase na varredura de frequência e temperatura do ensaio.

Ângulo de fase mistura SBS-6,0% (φ°)							
Frequência	Temperatura						
	0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
0,1 Hz	13,0	20,6	29,0	37,9	41,7	41,9	39,7
0,2 Hz	11,2	18,0	26,4	36,2	42,4	44,2	44,4
0,5 Hz	9,1	14,9	22,7	32,6	41,2	45,7	46,3
1 Hz	8,0	13,0	19,6	29,1	38,7	45,3	49,2
2 Hz	6,9	11,4	17,3	25,9	35,5	43,1	48,8
5 Hz	5,6	9,3	14,3	21,7	30,5	39,0	46,6
10 Hz	4,5	7,6	12,0	18,7	26,9	35,4	43,8
20 Hz	4,0	6,6	10,5	16,3	23,7	32,3	41,0

Ângulo de fase mistura HiMA-6,0% (φ°)							
Frequência	Temperatura						
	0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
0,1 Hz	12,4	18,4	23,9	32,1	38,2	39,2	38,9
0,2 Hz	11,1	16,6	21,6	29,9	37,4	40,5	41,4
0,5 Hz	9,1	14,3	18,8	26,7	34,6	40,2	42,8
1 Hz	7,9	12,4	16,3	23,6	32,0	38,7	43,0
2 Hz	7,2	11,0	14,5	21,2	29,3	36,3	41,6
5 Hz	6,1	9,4	12,2	18,1	25,4	32,8	38,8
10 Hz	4,9	8,4	10,9	15,8	22,4	29,8	36,3
20 Hz	2,2	7,6	8,9	13,4	19,5	27,2	34,6

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Figura 28 - Gráfico comparativo das curvas isócronas.



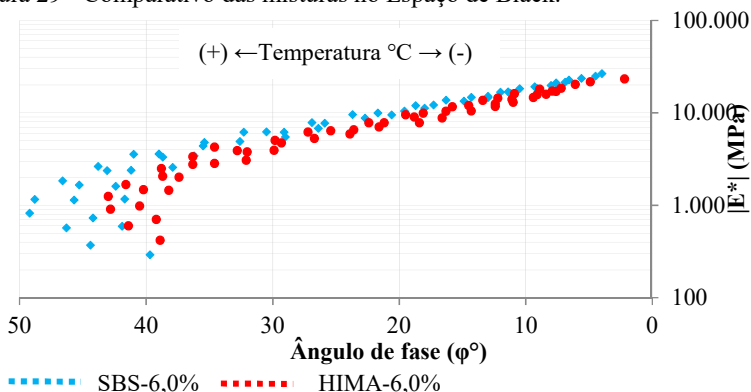
Fonte: Elaboração do autor (2018).

Os dados da Tabela 43 e da Figura 28 permitem entender que o módulo tende a decrescer quando a temperatura aumenta, o mesmo ocorre quando a frequência diminui. Na Figura 28 é possível perceber uma pequena descontinuidade na mistura HiMA-6,0%, na temperatura de 5°C, esta diferença pode ser atribuída à menor suscetibilidade térmica apresentada pela mistura HiMA-6,0% comparada à mistura SBS-6,0%, porém, não pode ser descartada a possibilidade de variação na temperatura no momento do ensaio, pois a variação de 1°C de temperatura tem efeito no valor absoluto do módulo complexo.

Em termos de comparação, observando apenas o valor absoluto do módulo complexo, pode-se dizer que as misturas têm comportamento semelhante, mesmo havendo diferença significativa no volume de vazios das misturas. No entanto, diferentemente do módulo resiliente, o módulo complexo considera as características viscoelásticas das misturas asfálticas com as variações de frequência e temperatura, e não apenas o valor absoluto. Isto significa a possibilidade de analisar as parcelas viscosa e elástica separadamente em cada mistura. O ângulo de fase ou ângulo de defasagem é a representação destas parcelas. Ângulos menores demonstram maior parcela elástica, que é responsável pela resposta recuperável do material. Assim, se as misturas asfálticas possuírem valores de módulo complexo semelhantes, o ângulo de fase poderá demonstrar qual mistura tenderá a um melhor desempenho à fadiga em uma dada temperatura e frequência.

Os dados da Tabela 44 permitem obter o Espaço de Black (Figura 29) que é uma forma de representação da evolução do ângulo de fase e do módulo complexo com a variação da temperatura.

Figura 29 - Comparativo das misturas no Espaço de Black.



Fonte: Elaboração do autor (2018).

O deslocamento horizontal, no sentido crescente, indica o aumento do ângulo de fase, que tende a ser maior conforme a temperatura aumenta. Na Figura 29 predomina a mistura SBS-6,0% nos maiores valores de ângulo de fase, isto demonstra que para temperaturas mais elevadas, esta mistura manifestará maior parcela viscosa que a mistura asfáltica HiMA-6,0%, e por consequência tenderá a sofrer maiores deformações plásticas.

A mistura HiMA-6,0% possui ângulo de fase máximo de $43,1^\circ$, na temperatura de 30°C , enquanto que a mistura SBS-6,0% teve seu máximo em $49,2^\circ$, na temperatura de 30°C . Esta diferença indica um possível ganho na resistência à fadiga das misturas que utilizam o HiMA como ligante, já que haverá uma manifestação maior do comportamento elástico desta mistura.

A curva de equivalência entre frequência e temperatura, também conhecida por curva mestra, permite analisar o comportamento de cada mistura em intervalos maiores de frequência para uma temperatura de referência definida. A construção desta curva deve-se ao princípio da superposição entre frequência e temperatura desenvolvido com base no fator de transladação proposto em Williams *et al.* (1955), conforme já apresentado na Equação (6).

A construção das curvas de equivalência entre frequência e temperatura para as misturas asfálticas desta pesquisa foram desenvolvidas na temperatura de 20°C como referência. Esta temperatura refere-se também aos ensaios de fadiga.

A Equação (6) de Williams *et al.* (1955) permite a transladação horizontal das curvas isotérmicas, para isso é preciso determinar os coeficientes (C_1 e C_2) de cada curva de acordo com a temperatura de referência. A Tabela 45 apresenta os coeficientes de transladação horizontal (C_1 e C_2) para cada mistura.

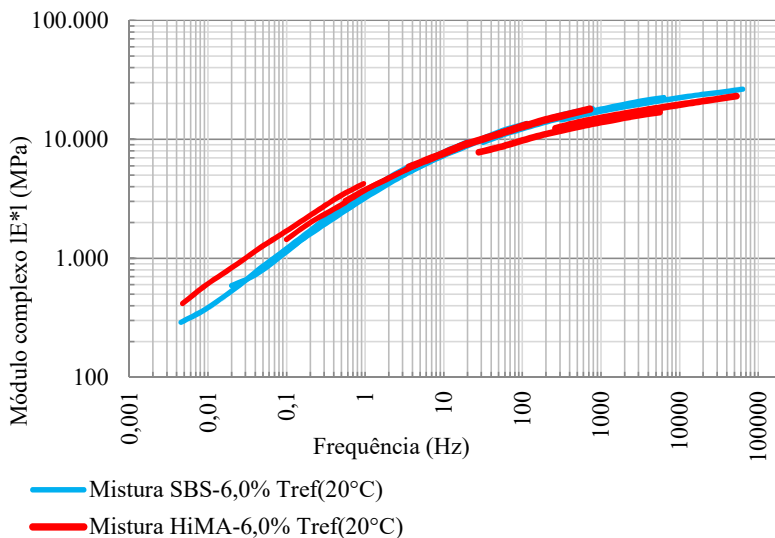
Tabela 45 - Coeficientes de transladação horizontal das 2 misturas.

Mistura	C_1	C_2
SBS-6,0% $T_{\text{ref}}(20^\circ\text{C})$	-17,1788	118,1263
HiMA-6,0% $T_{\text{ref}}(20^\circ\text{C})$	-17,4778	122,176

Fonte: Elaboração do autor (2018).

A Figura 30 apresenta a curva de equivalência entre frequência e temperatura das misturas.

Figura 30 - Curvas mestras para as 2 misturas.

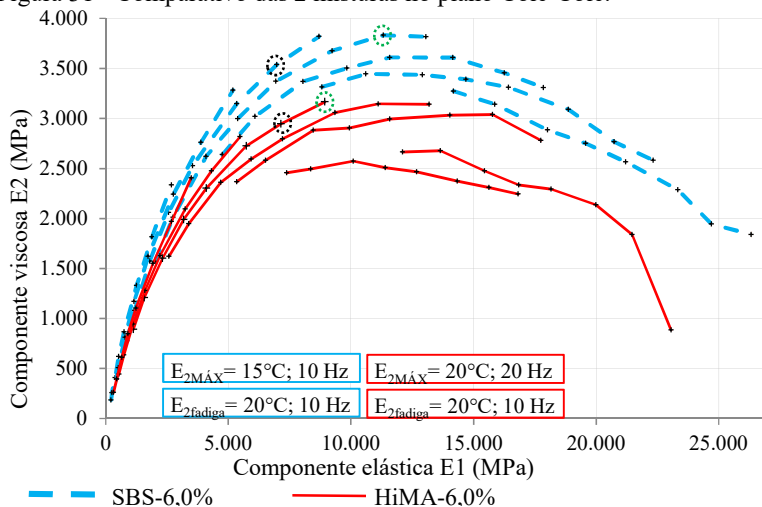


Fonte: Elaboração do autor (2018).

As misturas SBS-6,0% e HiMA-6,0% apresentam um comportamento reológico muito semelhante em termos de rigidez, ao longo de toda a faixa de frequência. Porém, a curva da mistura HiMA-6,0% demonstra-se ligeiramente menos inclinada, o que confere a esta mistura menor suscetibilidade de sua rigidez na variação do tempo de carregamento em comparação a mistura SBS-6,0%.

O plano complexo, também conhecido por plano cole-cole, é formado pela componente viscosa do módulo complexo no eixo das ordenadas e a componente elástica no eixo das abcissas, assemelha-se a um semicírculo devido a variação das componentes do módulo, com a variação da temperatura e do ângulo de fase. A Figura 31 demonstra esse comportamento para as misturas da pesquisa.

Figura 31 - Comparativo das 2 misturas no plano Cole-Cole.



Fonte: Elaboração do autor (2018).

Na Figura 31 é possível identificar que a mistura SBS-6,0% apresenta picos mais elevados de componente viscosa. As razões para este comportamento se devem a dois elementos fundamentais: o ângulo de fase e o valor absoluto do módulo complexo.

O ângulo de fase da mistura SBS-6,0%, comparado ao da mistura HiMA-6,0%, é maior. Isto faz com que a parcela viscosa seja maior que a elástica numa mesma combinação de frequência e temperatura, o que não é benéfico para a vida de fadiga pelos conceitos de energia dissipada pois maior parcela viscosa indica maior dissipação de energia por ciclo de carregamento. De encontro a isto, o módulo complexo absoluto da mistura SBS-6,0% é maior que o da mistura HiMA-6,0% nas baixas temperaturas, o que é favorável para a vida de fadiga desta mistura. Entretanto, em temperaturas superiores a $15^{\circ}C$, o ângulo de fase é menor e o módulo complexo absoluto é maior para a mistura HiMA-6,0%, o que indica a possibilidade de maior vida de fadiga desta mistura, para temperaturas mais elevadas em qualquer faixa de frequência.

No plano cole-cole é possível notar um pico onde a componente viscosa é máxima para cada uma das misturas asfálticas. Este ponto corresponde a combinação de frequência e temperatura onde haverá a maior perda de energia, ou maior dissipação desta durante a aplicação de carregamento em situação de deformação controlada, sendo este o ponto crítico do desempenho à fadiga. Porém este ponto varia para cada mistura,

não havendo uma combinação crítica uniforme de frequência e temperatura. A definição deste ponto crítico é importante para sugerir em que temperatura e frequência o ensaio de fadiga deve ser realizado, uma vez que o ponto de máxima componente viscosa a perda de energia também seria máxima, e por consequência haveria uma perda maior na resistência à fadiga. Como o ponto de frequência e temperatura crítico não é igual para as misturas, optou-se por homogeneizar quando da execução do ensaio de fadiga em ambas as misturas para 20°C e 10 Hz, estando todas as misturas abaixo do ponto de máxima, o que facilita a comparação do desempenho entre estas misturas e também com outras curvas de fadiga obtidas de outros trabalhos desenvolvidos dentro da academia.

4.1.6 Desempenho à fadiga

4.1.6.1 Curvas de fadiga das misturas asfálticas

A avaliação do comportamento à fadiga das misturas asfálticas, bem como a comparação entre estas foi possível devido à realização do ensaio de fadiga no equipamento de flexão alternada em viga de quatro pontos. O ensaio foi realizado à deformação controlada, seguindo a especificação EN 12697-24 (2004), definiu-se como critério de ruptura a perda de 50% de rigidez inicial, contada a partir do centésimo ciclo, utilizando corpos de prova retirados dos segmentos experimentais.

A varredura de frequência e temperatura do módulo complexo demonstrou que para cada mistura da pesquisa existe uma combinação crítica de frequência e temperatura onde o módulo de perda é máximo (Figura 31), optou-se então pela execução do ensaio de fadiga na frequência de 10 Hz e temperatura de 20°C, estando logo abaixo do ponto de máxima perda em ambas misturas. Esta combinação de frequência e temperatura também possibilita a comparação do desempenho à fadiga com outras literaturas que também obtiveram curvas de fadiga dentro desta faixa.

Para cada mistura asfáltica desta pesquisa obteve-se uma curva característica de seu desempenho, na Tabela 46 e Tabela 47 estão apresentados os resultados do ensaio de fadiga. Na Figura 32 estão reproduzidos dentro do mesmo gráfico as curvas de desempenho para cada mistura desta pesquisa.

Tabela 46 - Resultados do ensaio de fadiga da mistura SBS-6,0%.

Corpo de prova	Volume de vazios (%)	Deformação ($\mu\epsilon$)	N (ciclos)	Módulo inicial (E^* , MPa)	Ângulo de fase inicial (φ°)
01	2,59%	184	810.754	6.457	32,2
02	2,65%	207	424.872	6.365	30,2
03	2,56%	225	196.407	7.262	28,7
04	2,63%	256	174.260	6.390	32,3
05	2,84%	283	46.916	5.969	33,9
06	2,94%	308	39.587	6.794	30,8
07	2,71%	327	29.098	6.224	33,4
08	3,33%	360	19.914	5.825	32,3
09	3,05%	385	9.957	6.288	31,0
10	2,74%	406	12.776	6.025	34,6
Média	2,80%			6.360	
Desvio Padrão	0,24%			420	

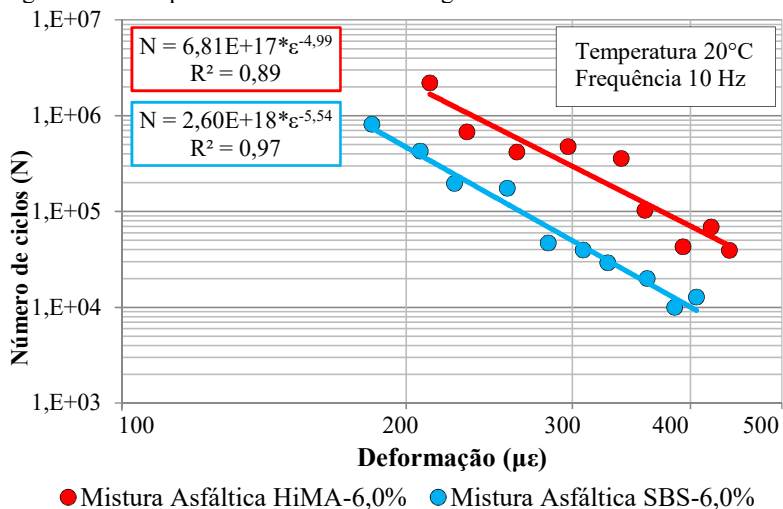
Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 47 - Resultados do ensaio de fadiga da mistura HiMA-6,0%.

Corpo de prova	Volume de vazios (%)	Deformação ($\mu\epsilon$)	N (ciclos)	Módulo inicial (E^* , MPa)	Ângulo de fase inicial (φ°)
01	5,19%	212	2.197.059	4.626	32,9
02	5,04%	232	675.355	5.431	30,9
03	5,67%	262	416.833	5.321	30,6
04	4,84%	297	473.232	4.341	36,7
05	5,09%	338	357.884	4.441	34,8
06	4,90%	358	102.476	4.787	33,3
07	4,96%	393	42.629	4.341	34,7
08	5,03%	421	68.694	4.278	36,3
09	5,01%	440	39.171	4.278	38,1
Média	5,08%			4.649	
Desvio Padrão	0,24%			446	

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Figura 32 - Comparativo das curvas de fadiga das 2 misturas.



Fonte: Elaboração do autor (2018).

A resistência à fadiga é propriedade de interesse quando se trata de mistura asfáltica empregada na pavimentação rodoviária. Misturas asfálticas resistentes à fadiga aumentam a vida útil do pavimento e muitas vezes este ganho se traduz em economia de recursos materiais e financeiros.

Neste estudo, a mistura HiMA-6,0% apresentou resultados elevados de resistência à fadiga quando comparada com a mistura SBS-6,0%. Atribui-se este resultado ao ligante HiMA, que possui recuperação elástica mínima de 95,0% e viscosidade mais elevada, porque em termos de mistura asfáltica, o volume de vazios favorece a mistura SBS-6,0%, já que o menor volume de vazios observado nesta mistura (Tabela 46 e Tabela 47) contribuiu para uma maior rigidez. Isto vai ao encontro do alto desempenho do ligante HiMA demonstrado por Kraton (2012); Martins (2014); Błażejowski *et al.* (2015) e Klutz *et al.* (2016).

Na Figura 32, é notável a existência de inclinações diferentes entre as curvas da mistura HiMA-6,0% e SBS-6,0%, evidenciada pelos coeficientes angulares da deformação de cada curva. Na proporção em que o nível de deformação (ϵ) aumenta, a diferença de desempenho também cresce. Na Tabela 48, é possível compreender o quão significativo é a diferença na resistência à fadiga destas misturas, considerando um mesmo nível de deformação.

Tabela 48 - Comparativo da resistência à fadiga.

Mistura	Deformação ($\mu\epsilon$)	N	Diferença em relação à mistura SBS-6,0%
HiMA-6,0%	50	2,27E+09	125%
SBS-6,0%		1,01E+09	-
HiMA-6,0%	75	3,00E+08	181%
SBS-6,0%		1,06E+08	-
HiMA-6,0%	100	7,13E+07	230%
SBS-6,0%		2,16E+07	-
HiMA-6,0%	125	2,34E+07	273%
SBS-6,0%		6,28E+06	-
HiMA-6,0%	150	9,43E+06	312%
SBS-6,0%		2,29E+06	-

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Em níveis de deformação considerados baixos, como 50 $\mu\epsilon$, a mistura HiMA-6,0% é capaz de suportar 2,25 vezes mais números de ciclos que a mistura SBS-6,0%, conforme o nível de deformação aumenta esta diferença cresce ainda mais, com 150 $\mu\epsilon$, a mistura HiMA-6,0% é capaz de suportar 4,12 vezes mais ciclos que a mistura SBS-6,0%. É evidente que há um melhor desempenho da mistura com o ligante HiMA, mas face a iteração da mistura asfáltica na estrutura do pavimento, é necessário que simulações de desempenho sejam feitas para a correta interpretação destes resultados.

O comparativo da resistência à fadiga das misturas asfálticas, apresentado na Tabela 48, demonstra a diferença de resistência considerando apenas a curva característica das misturas asfálticas obtidas na temperatura de 20°C, frequência de 10 Hz e sob a condição de deformação controlada de ensaio. É evidente que em campo as misturas asfálticas estão sujeitas às variações de carregamento e condições climáticas. Assim, deve-se considerar um fator de ponderação, para correlacionar o desempenho obtido em laboratório com o desempenho de campo. No entanto, este fator ainda é alvo de investigação e demanda de monitoramento do comportamento das misturas asfálticas em campo, sendo este um trabalho que exige muito tempo e que, por muitas vezes, acaba se perdendo antes que se tenha alcançado o objetivo.

4.1.6.2 Comparativo do desempenho à fadiga com outras misturas asfálticas

O desempenho à fadiga das misturas asfálticas pode ser comparado a outras desde que haja parâmetros comuns entre estas. Assim, buscou-se na literatura curvas de fadiga determinadas sob o mesmo tipo de ensaio, temperatura e frequência que as curvas determinadas nesta pesquisa.

Fontes (2009), Klinsky *et al.* (2015) e Marcon (2016), apresentaram curvas de fadiga para suas misturas asfálticas de acordo as mesmas premissas de ensaio, frequência e temperatura que as estudadas. Um resumo dos parâmetros de cada mistura asfáltica está apresentado na Tabela 49 e na Tabela 50. A granulometria utilizada, de acordo com cada mistura, está apresentada na Tabela 51 .

As misturas apresentadas, possuem granulometria, teor, volume de vazios e tipo de ligante que diferem entre si, mas possuem em comum a obtenção das curvas de fadiga, que foi realizada através do equipamento de flexão alternada em viga de quatro pontos, sob a condição de deformação controlada, temperatura de 20°C, frequência de 10 Hz e o critério de ruptura determinado em 50% da rigidez inicial do corpo de prova. Esta equidade no modo de ensaio torna possível a comparação de desempenho, em relação a variação de materiais envolvidos.

Tabela 49 - Resumo dos parâmetros das misturas asfálticas.

Referência	Descrição	Ligante	Teor de ligante (%)	Volume de vazios (%)
Autor (2018)	SBS-6,0%	60/85-E	6,00	2,80
	HiMA-6,0%	HiMA	6,00	5,08
Klinsky <i>et al.</i> (2015)	CAP Borracha	Borracha AB-08	5,30	4,10
	CAP HiMA	HiMA	4,60	4,00
	CAP polímero	60/85-E	4,60	4,20
Marcon (2016)	Polímero SBS	FLEXPAVE 60/85	4,50	4,00
	Borracha moída de pneu	ECOFLEX B (AB-08; 15%)	5,40	3,80
Fontes (2009)	ABB20	<i>Terminal blend,</i>	7,50	6,00
	CBB20	20% de borracha	7,50	6,00
	IBB15	<i>Terminal blend,</i> 15% de borracha	6,00	5,00
	ABBbB	<i>Continuous blend,</i> 17% de borracha	7,50	6,00
	CBBbB		8,00	6,00
	IBBbB		7,00	5,00
	BBB		CAP 50/70	5,50

Fonte: Adaptado de Fontes (2009); Klinsky *et al.* (2015) e Marcon (2016).

Tabela 50 - Resumo dos parâmetros de fadiga, 20°C, 10Hz.

Referência	Descrição	Rigidez inicial média (MPa)	Curva de fadiga
Autor (2018)	SBS-6,0%	6.360	$N=2,60 \times 10^{18} * \epsilon^{-5,54}$
	HiMA-6,0%	4.649	$N=6,81 \times 10^{17} * \epsilon^{-4,99}$
Klinsky <i>et al.</i> (2015)	CAP Borracha	6.046	$N=1 \times 10^{22} * \epsilon^{-6,333}$
	CAP HiMA	10.905	$N=1 \times 10^{22} * \epsilon^{-6,623}$
	CAP polímero	8.534	$N=4 \times 10^{14} * \epsilon^{-3,932}$
Marcon (2016)	Polímero SBS	6.306	$N=1,659 \times 10^{19} * \epsilon^{-5,842}$
	Borracha moída pneu	5.595	$N=1,265 \times 10^{17} * \epsilon^{-5,004}$
Fontes (2009)	ABB20	4.089	$N=6,57 \times 10^{11} * (1/\epsilon)^{2,708}$
	CBB20	4.810	$N=4,761 \times 10^{10} * (1/\epsilon)^{2,285}$
	IBB15	5.399	$N=4,966 \times 10^{13} * (1/\epsilon)^{3,315}$
	ABBbB	3.809	$N=5,193 \times 10^{15} * (1/\epsilon)^{4,249}$
	CBBbB	4.593	$N=6,426 \times 10^{14} * (1/\epsilon)^{3,807}$
	IBBbB	5.013	$N=3,715 \times 10^{16} * (1/\epsilon)^{4,427}$
	BBB	6.314	$N=1,185 \times 10^{15} * (1/\epsilon)^{4,037}$

Fonte: Adaptado de Fontes (2009); Klinsky *et al.* (2015) e Marcon (2016).

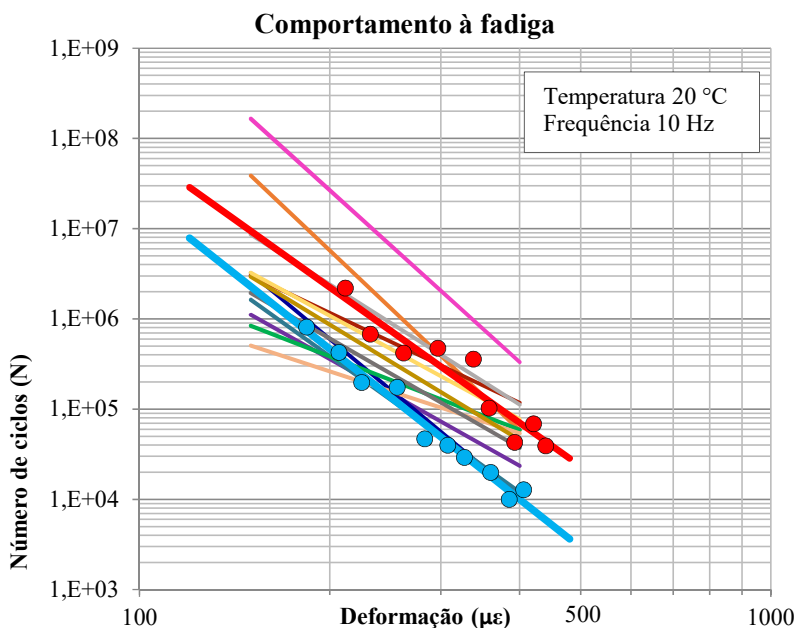
Tabela 51 - Resumo da granulometria das misturas asfálticas.

Referência	Klinsky <i>et al.</i> (2015)	Marcon (2016)	Fontes (2009)			
			(BBB) Faixa C DNIT	(IBB15; IBBbB) <i>Asphalt Institute</i> (AI-tipo IV)	(CBB20; CBBbB) <i>Caltrans</i> (ARHM-GG)	(ABB20; ABBbB) <i>Arizona Department of Transportation</i> (AR-AC)
Peneira Série ASTM	Faixa III Dersa (jambeiro)	Faixa B DNIT				
3/4"	100	100	100	100	100	100
1/2"	85,1	77,5	97,51	97,69	98,06	98,15
3/8"	78,3	61,3	85,52	86,8	87,76	88,23
Nº 4	53,1	43,3	51,56	60,42	36,46	36,58
Nº 8	-	-	-	46,45	22,99	21,59
Nº 10	37,9	24,3	35,95	-	-	-
Nº 16	-	17,4	-	-	-	-
Nº 30	-	12,6	-	27,36	14,21	-
Nº 40	22,5	-	19,15	-	-	12,27
Nº 50	-	9,8	-	18,79	10,41	-
Nº 80	14,6	-	11,62	-	-	-
Nº 100	-	7,6	-	11,29	6,81	-
Nº 200	8,6	5,4	6,14	6,6	4,45	4,44

Fonte: Adaptado de Fontes (2009); Klinsky *et al.* (2015) e Marcon (2016).

As curvas de desempenho apresentadas pelos autores demonstram o comportamento destas misturas com a variação do nível de deformação. Estas curvas estão apresentadas no gráfico da Figura 33, juntamente com as curvas de desempenho das misturas estudadas. No eixo das abscissas estão apresentados os níveis de microdeformação ($\mu\epsilon$), no eixo das ordenadas o número de ciclos previsto para atingir o critério de ruptura que é definido como 50% da rigidez inicial.

Figura 33 - Gráfico das curvas de desempenho à fadiga.



- Klinsky et. al. (2015) - CAP Borracha
- Klinsky et. al. (2015) - CAP HiMA
- Klinsky et. al. (2015) - CAP Polímero
- Marcon (2016) - Polímero SBS
- Marcon (2016) - Borracha moída de pneu
- Fontes (2009) - ABB20
- Fontes (2009) - CBB20
- Fontes (2009) - IBB15
- Fontes (2009) - ABBbB
- Fontes (2009) - CBBbB
- Fontes (2009) - IBBbB
- Fontes (2009) - BBB
- Mistura asfáltica SBS-6,0%
- Mistura asfáltica HiMA-6,0%

Fonte: Adaptado de Fontes (2009); Klinsky *et al.* (2015) e Marcon (2016).

A representação gráfica das curvas de desempenho traduz com clareza o comportamento destas misturas. É notável que algumas destas apresentam melhor desempenho no âmbito das altas deformações enquanto outras nos baixos níveis, caracterizadas pela inclinação de suas curvas. Destaca-se a curva da mistura CAP Borracha proposta por Klinsky *et al.* (2015) que apresenta um desempenho bem superior às demais, assim como, logo abaixo desta, a curva CAP HiMA também proposta por Klinsky *et al.* (2015). Estas curvas mostram-se altamente resistentes ao carregamento cíclico nos baixos níveis de deformação. Devido a este desempenho, cabe a investigação do fator que influencia no comportamento destas misturas.

Observando a Tabela 51 é possível notar que há equidade na granulometria destas misturas, porém, isso não acontece na nos elementos apresentados na Tabela 49 e Tabela 50 onde nota-se que o tipo e o teor de ligante são diferentes, embora o volume de vazios seja muito semelhante. Estes fatos poderiam corroborar para este desempenho, porém a mistura CAP Polímero também possui a mesma granulometria e não atingiu resultados expressivos como as misturas CAP Borracha e CAP HiMA de Klinsky *et al.* (2015). Quanto ao tipo de ligante (Borracha AB-08 e CAP HiMA), Fontes (2009) e Marcon (2016) utilizaram ligante asfáltico modificado por borracha, e apesar de bons resultados, não obtiveram o mesmo sucesso expressado pela curva CAP Borracha de Klinsky *et al.* (2015), o mesmo pode ser atribuído a esta pesquisa já que se utiliza do ligante HiMA na composição de uma das misturas em estudo e não se obteve tamanha expressividade. O fato é que estes ganhos de resistência destas duas misturas apresentadas por Klinsky *et al.* (2015), podem ser produto da combinação de diversos fatores como o teor e tipo de ligante, granulometria, tipo do agregado, volume de vazios, tornando difícil a compreensão destas curvas.

A mistura HiMA-6,0% apesar de demonstrar um bom desempenho em relação a mistura SBS-6,0%, nota-se que esta possui um desempenho muito semelhante a mistura IBBbB de Fontes (2009) que utiliza ligante modificado no sistema *continuous blend* com 17% de borracha e granulometria do *Asphalt Institute*. Desempenho mais próximo ainda se observou entre a mistura SBS-6,0% e mistura CAP Polímero proposta por Marcon (2016), ambas as misturas utilizaram o ligante CAP 60/85-E e seus valores de rigidez inicial assemelham-se muito.

Níveis de microdeformação entre 50 a 100 $\mu\epsilon$, são comuns na estrutura do pavimento, o desempenho das misturas asfálticas está diretamente relacionado com estes níveis, na Tabela 52, de acordo com

as curvas de cada mistura está apresentado o número de ciclos previsto para a ruptura, ou seja, para a perda de rigidez em 50%, nos níveis de 50 e 100 $\mu\epsilon$. Os dados foram ordenados no sentido decrescente de acordo com o desempenho que cada mistura apresenta. De mesma forma, na Tabela 53 está apresentado o nível de deformação necessário à ruptura em 10 milhões de ciclos.

Tabela 52 - Classificação das misturas para níveis de 50 e 100 $\mu\epsilon$.

Posição	Mistura asfáltica	Nível de deformação ($\mu\epsilon$)		Número de ciclos previsto até a ruptura	
		50	100	50	100
1º	Klinsky <i>et al.</i> (2015) - CAP Borracha	50	100	1,74E+11	2,16E+09
2º	Klinsky <i>et al.</i> (2015) - CAP HiMA	50	100	5,59E+10	5,68E+08
3º	Mistura asfáltica HiMA-6,0%	50	100	2,27E+09	7,13E+07
4º	Marcon (2016) - Polímero SBS	50	100	1,97E+09	3,43E+07
5º	Fontes (2009) - IBBbB	50	100	1,12E+09	5,20E+07
6º	Mistura asfáltica SBS-6,0%	50	100	1,01E+09	2,16E+07
7º	Marcon (2016) - Borracha moída de pneu	50	100	3,99E+08	1,24E+07
8º	Fontes (2009) - ABBbB	50	100	3,14E+08	1,65E+07
9º	Fontes (2009) - CBBbB	50	100	2,13E+08	1,52E+07
10º	Fontes (2009) - BBB	50	100	1,64E+08	9,99E+06
11º	Fontes (2009) - IBB15	50	100	1,16E+08	1,16E+07
12º	Klinsky <i>et al.</i> (2015) - CAP Polímero	50	100	8,35E+07	5,47E+06
13º	Fontes (2009) - ABB20	50	100	1,65E+07	2,52E+06
14º	Fontes (2009) - CBB20	50	100	6,25E+06	1,28E+06

Fonte: Adaptado de Fontes (2009); Klinsky *et al.* (2015) e Marcon (2016).

Tabela 53 - Classificação das misturas para 1,00E+07 ciclos.

Posição	Mistura asfáltica	Número de ciclos	Nível de deformação prevista na ruptura
1º	Klinsky <i>et al.</i> (2015) - CAP Borracha	1,00E+07	234
2º	Klinsky <i>et al.</i> (2015) - CAP HiMA	1,00E+07	184
3º	Mistura asfáltica HiMA-6,0%	1,00E+07	148
4º	Fontes (2009) - IBBbB	1,00E+07	145
5º	Marcon (2016) - Polímero SBS	1,00E+07	124
6º	Mistura asfáltica SBS-6,0%	1,00E+07	115
7º	Fontes (2009) - ABBbB	1,00E+07	113
8º	Fontes (2009) - CBBbB	1,00E+07	112
9º	Fontes (2009) - IBB15	1,00E+07	105
10º	Marcon (2016) - Borracha moída de pneu	1,00E+07	104
11º	Fontes (2009) - BBB	1,00E+07	100
12º	Klinsky <i>et al.</i> (2015) - CAP Polímero	1,00E+07	86
13º	Fontes (2009) - ABB20	1,00E+07	60
14º	Fontes (2009) - CBB20	1,00E+07	41

Fonte: Adaptado de Fontes (2009); Klinsky *et al.* (2015) e Marcon (2016).

Nota-se que as misturas CAP Borracha e CAP HiMA de Klinsky *et al.* (2015) têm desempenho previsto muito superior às demais, assim como indicavam suas curvas de fadiga. Abaixo destas encontra-se a mistura HiMA-6,0%, na Tabela 52 e também na Tabela 53 indicando um possível desempenho superior às demais misturas, porém a mistura Polímero SBS de Marcon (2016) e a mistura IBBbB de Fontes (2009) situam-se próximas a mistura HiMA-6,0% e SBS-6,0%, indicando a necessidade de comparação entre esta mistura na estrutura do pavimento.

A rigidez da mistura asfáltica influencia na distribuição de tensões na estrutura do pavimento, por consequência há alteração no nível de deformação da fibra inferior da camada asfáltica. Assim, cabe a observação da rigidez inicial apresentada na mistura CAP HiMA de Klinsky *et al.* (2015) que atinge o valor médio de 10.905 MPa, possivelmente este valor resultará em menor nível de deformação na fibra inferior da mistura asfáltica, podendo apresentar melhor desempenho que a mistura CAP Borracha de Klinsky *et al.* (2015) que apresenta a melhor curva de fadiga.

O comparativo de desempenho à fadiga com outras literaturas demonstrou que as misturas desta pesquisa apresentam comportamento semelhante a outras já estudadas, diferente do que se acreditava, não se notou desempenhos expressivos destas misturas, em especial da mistura com o ligante HiMA. Cabe então analisar o desempenho à fadiga como parte da estrutura do pavimento, a fim de verificar a vida útil destas misturas.

4.1.7 Desempenho à deformação permanente

O afundamento na faixa de rodagem é um defeito no pavimento oriundo de deformações plásticas nas camadas do pavimento. As misturas asfálticas podem sofrer deformações plásticas pela ação do carregamento em maior ou menor grau devido à variação da temperatura e frequência em função de suas características termoviscoelásticas e devido aos materiais que a compõem.

A resistência à deformação permanente nas misturas asfálticas empregadas nos segmentos experimentais foi determinada através do simulador de tráfego francês *Orniéreur*, seguindo a especificação NF P98-253-1 (1991). Neste ensaio mede-se a evolução percentual do afundamento na temperatura de 60°C até 30.000 ciclos. Na Tabela 54 está apresentado o volume de vazios dos corpos de prova e na Tabela 55 os resultados do afundamento médio, obtidos para cada mistura dos segmentos experimentais.

Na Figura 34 está apresentada a evolução deste afundamento onde é possível comparar o desempenho destas misturas.

Tabela 54 - Volume de vazios dos corpos de prova.

Descrição	Densidade aparente (kg/m ³)	Volume de vazios Vv (%)
01 - HiMA-6,0%	2.431	4,97
02 - HiMA-6,0%	2.433	4,88
01 - SBS-6,0%	2.470	2,87
02 - SBS-6,0%	2.477	3,01

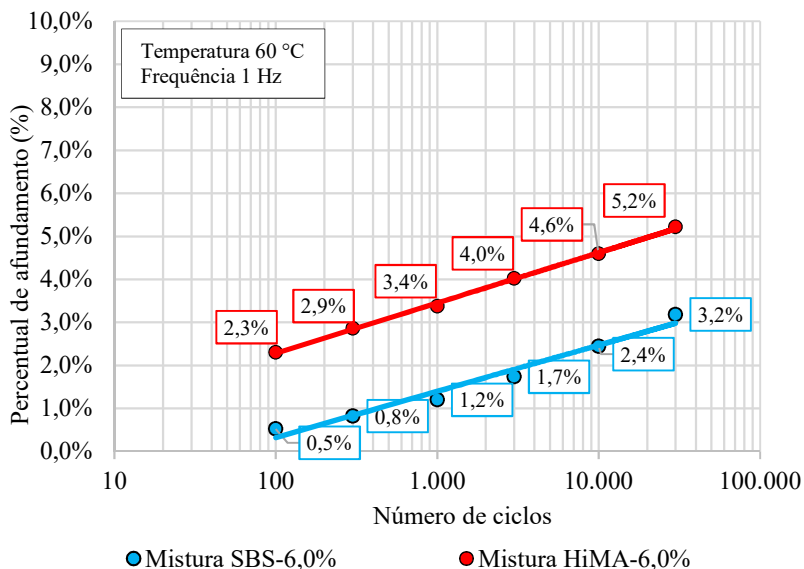
Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 55 - Percentual de afundamento médio das misturas.

Descrição	Número de ciclos					
	100	300	1.000	3.000	10.000	30.000
SBS-6,0%	0,52%	0,82%	1,20%	1,74%	2,45%	3,19%
HiMA-6,0%	2,31%	2,86%	3,37%	4,02%	4,60%	5,22%

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Figura 34 - Deformação permanente das misturas asfálticas.



Fonte: Elaboração do autor (2018).

A recuperação elástica, o ponto de amolecimento e a viscosidade dos ligantes demonstravam que a mistura com o ligante HiMA apresentaria o menor nível de deformação plástica, em misturas com mesmo teor e granulometria. De mesmo modo, o comportamento reológico na varredura de frequência e temperatura indicava que a mistura HiMA-6,0% apresentaria melhor desempenho que a mistura SBS-6,0%, especialmente nas altas temperaturas. No entanto, o melhor desempenho foi da mistura SBS-6,0% neste ensaio.

O menor volume de vazios observado na mistura SBS-6,0%, que de certa forma poderia ser prejudicial a esta mistura, mostrou-se uma variável importante neste ensaio. Acredita-se que o menor volume de vazios impediu maiores deslocamentos dentro do corpo de prova, pois

durante o ensaio, o corpo de prova é submetido ao amassamento com confinamento lateral.

Em termos de nível da deformação plástica ocorrida, todas as misturas apresentaram desempenho satisfatório ao limite de 10% de afundamento proposto na especificação francesa (LCPC, 2007) para 30.000 ciclos.

4.2 VIDA ÚTIL DOS SEGMENTOS EXPERIMENTAIS

4.2.1 Simulação do desempenho à fadiga das misturas asfálticas

A previsão do desempenho à fadiga de misturas asfálticas depende do comportamento reológico e da relação entre tensão-deformação atuante na estrutura do pavimento. O comportamento reológico das misturas asfálticas deste estudo demonstrou a possibilidade de bom desempenho quanto à fadiga, porém é necessário determinar o nível de deformação de tração que atua na fibra inferior das camadas asfálticas. Este nível de deformação pode ser determinado através de simulação numérica.

As simulações numéricas foram realizadas com auxílio do *software* ViscoRoute 2.0, desenvolvido pelo LCPC. Este programa computacional determina os níveis de tensão e deformação no plano definido pelo usuário, com base nas informações fornecidas de estrutura e carregamento. As deformações obtidas foram aplicadas nas curvas de desempenho à fadiga das misturas HiMA-6,0% e SBS-6,0% para então comparar com o número $N_{8,2t}$, obtido do Projeto de Reabilitação da Rodovia SC-114, determinado pela metodologia USACE. Para efeito de comparação, considerou-se que as curvas de desempenho obtidas em laboratório equivalem ao desempenho real das misturas asfálticas em campo, ou seja, fator campo-laboratório igual a 1.

O comportamento reológico das misturas asfálticas da pesquisa na simulação numérica está representado pelo modelo físico matemático viscoelástico 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 conforme a Equação (8). Os parâmetros do modelo estão apresentados na Tabela 56.

$$|E^*(i\omega\tau(\theta))| = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau(\theta))^{-k} + (i\omega\tau(\theta))^{-h}} \quad (8)$$

Onde:

$|E^*|$ = módulo complexo;

E_∞ = módulo complexo infinito;

E_0 = módulo estático;

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

τ = tempo de relaxação em função da temperatura (θ);

θ = temperatura, °C;

ω = frequência angular da sollicitação $\omega = 2\pi f$;

f = frequência de carregamento;

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

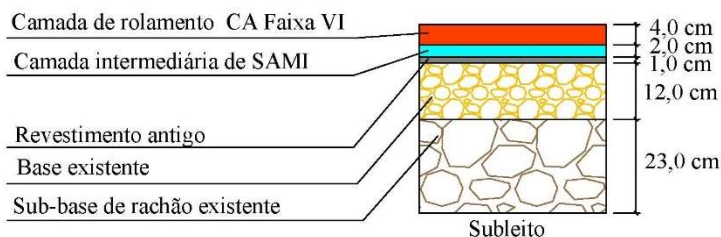
δ = constante adimensional, função da natureza do ligante asfáltico e da granulometria da mistura asfáltica.

Tabela 56 - Parâmetros viscoelásticos de Huet-Sayegh.

Parâmetros	Mistura asfáltica	
	SBS-6,0%	HiMA-6,0%
E_0 (MPa)	38,27	19,44
E_∞ (MPa)	38.733,90	33.910,20
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: Elaboração do autor (2018).

Figura 35 - Estrutura proposta para a simulação numérica.



Fonte: Elaboração do autor (2018).

As estruturas definidas para a simulação numérica correspondem a mesma estrutura dos segmentos experimentais, como mostra a Figura 35. Os parâmetros de cada camada estão apresentados na Tabela 57 e

obedecem aos valores apresentados no Projeto de Reabilitação da Rodovia SC-114 para as camadas remanescentes. A temperatura de referência, na simulação numérica, foi de 20 °C, mesma temperatura em que as curvas de fadiga foram obtidas.

Quanto ao carregamento, considerou-se o eixo padrão de 8,2 toneladas, aplicado a uma frequência de 10 Hz, equivalente a velocidade de 72 km/h em campo, distribuído conforme o esquema da Figura 36.

Tabela 57 - Parâmetros das camadas remanescentes.

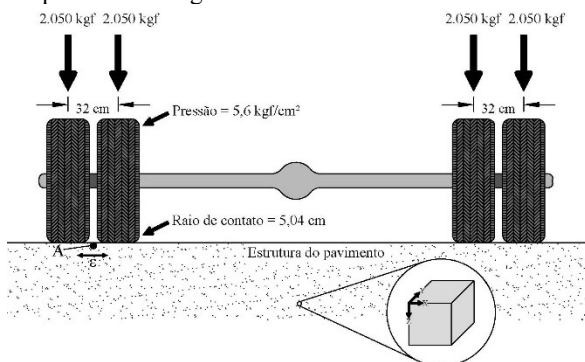
Camada	Comportamento da camada	Espessura (cm)	Módulo resiliente (MPa)	Poisson
Capa de rolamento	viscoelástico	4,0	*	0,30
Camada de SAMI	elástico	2,0	1.897**	0,30
Revestimento antigo	elástico	1,0	3.103	0,32
Base de BGS	elástico	15,0	269	0,35
Sub-base	elástico	23,0	209	0,35
Subleito	elástico	∞	165	0,45

* Módulo complexo da camada viscoelástica.

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

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

Figura 36 - Esquema de carregamento.



Fonte: Elaboração do autor (2018).

Referenciando-se nos parâmetros viscoelásticos das misturas HiMA-6,0% e SBS-6,0% e considerando o mesmo estado de tensão dado pelo carregamento, os níveis de deformação de tração na fibra inferior das misturas asfálticas foram de 99 $\mu\epsilon$ para SBS-6,0% e 98 $\mu\epsilon$ para HiMA-

6,0%. A deflexão calculada na superfície da camada de rolamento foi de 35×10^{-2} mm, para ambas misturas.

A Tabela 58 demonstra o desempenho das misturas asfálticas para esta condição estrutural e de carregamento, com relação a vida de fadiga.

Tabela 58 - desempenho à fadiga das misturas asfálticas

Mistura asfáltica	Deformação ($\mu\epsilon$)	Curva de fadiga	Número N
HiMA-6,0%	98	$N=6,81 \times 10^{17} * \epsilon^{-4,99}$	7,89E+07
SBS-6,0%	99	$N=1,66 \times 10^{18} * \epsilon^{-5,34}$	3,66E+07

Fonte: Elaboração do autor (2018).

O nível de deformação aplicado na curva de desempenho demonstrou capacidade superior da resistência à fadiga da mistura HiMA-6,0% em 2,15 vezes comparada com a mistura SBS-6,0%. Esta simulação confirma os resultados de desempenho obtidos por Scholten *et al.* (2011), Klinsky *et al.* (2015) e Klutz *et al.* (2016), em relação às misturas com o CAP HiMA.

Em relação ao número $N_{8,2t}$, obtido do Projeto de Reabilitação da Rodovia SC-114, determinado pela metodologia USACE, cujo valor é $1,07 \times 10^7$, para a estrutura da simulação e desconsiderando o fator campo laboratório, a mistura HiMA-6,0% seria 7,37 vezes mais resistente à fadiga enquanto que a mistura SBS-6,0% 3,63 vezes mais resistente para o número de ciclos previsto no décimo ano.

4.2.2 Relação entre custo e vida útil das misturas asfálticas

A viabilidade técnica e econômica da restauração de pavimentos com misturas asfálticas modificadas deve ser investigada através do desempenho dos materiais em relação ao custo de execução.

O desempenho das misturas asfálticas modificadas com o CAP HiMA e CAP 60/85-E foi determinado ao longo desta pesquisa. Em termos práticos, a mistura HiMA-6,0% apresenta desempenho superior à mistura SBS-6,0%, quanto à fadiga. Porém o custo de aquisição do ligante HiMA assim como o custo de usinagem podem superar o benefício observado na utilização deste material, em comparação aos custos da mistura SBS-6,0%. Outros custos observados no processo de restauração do pavimento como fresagem, pintura de ligação, transporte de materiais, lançamento e compactação não são influentes pois não há variação no processo para ambas as misturas.

Os custos de aquisição dos ligantes modificados CAP HiMA e CAP 60/85-E diferem entre si, pois utiliza-se materiais poliméricos diferentes em tipo e proporção, na composição dos ligantes.

A fim de estabelecer a relação entre custo e benefício destes ligantes, realizou-se pesquisa do preço de aquisição destes ligantes junto a distribuidora que disponibilizou os ligantes utilizados na execução dos segmentos experimentais. Desta forma, o custo de aquisição dos ligantes asfálticos na Compasa do Brasil Distribuidora de Derivados de Petróleo, no mês de novembro de 2017, está apresentado na Tabela 59, sem custos de transporte.

Tabela 59 - Preço de aquisição dos ligantes em novembro de 2017.

Tipo de ligante asfáltico	Custo do ligante (R\$/t)
CAP HiMA	3.535,00
CAP 60/85-E	2.850,00

Fonte: Compasa do Brasil Distribuidora de Derivados de Petróleo (2017).

A usinagem de misturas asfálticas com ligantes de viscosidade diferente demanda de temperaturas diferentes para este processo. Por consequência, há diferença na energia necessária para atingir temperaturas maiores, logo o custo do processo de usinagem varia com a temperatura necessária, sendo mais caro na proporção do aumento da temperatura. A mistura com o ligante HiMA demanda de maior temperatura de usinagem já que o ligante é mais viscoso em comparação ao CAP 60/85-E. Desta forma, a usinagem da mistura HiMA-6,0% é mais onerosa pois demanda de mais energia. O DNIT (2017), através das composições de custo unitário dos serviços de usinagem presentes no Sistema de Custos Referenciais de Obras – SICRO, demonstra esta relação de custos.

O custo da usinagem de misturas asfálticas com o ligante HiMA pode ser obtido pela correlação entre as composições de custo apresentadas na Tabela 60 , já que o SICRO não prevê a usinagem de misturas com este tipo de ligante.

Tabela 60 - Demonstrativo do custo de usinagem.

Código	Usinagem	Temperatura de misturação (°C)	Custo (R\$/tonelada)
6416248	Mistura asfáltica com CAP polímero	165	95,76
6416213	Mistura asfáltica com CAP borracha	175	105,58
-	Mistura asfáltica com CAP HiMA	179	109,50

Fonte: Sistema de Custos Referenciais de Obras (2017).

As informações referentes ao custo de usinagem foram obtidas do SICRO, com referência ao mês de maio de 2017, para o Estado de Santa Catarina. As temperaturas de usinagem demonstradas na Tabela 60 são aquelas obtidas nesta pesquisa, com exceção do CAP borracha, onde utilizou-se a temperatura apresentada por Marcon (2016), com relação a misturação.

De forma comparativa, é possível determinar uma estrutura diferente na qual a vida útil (número N) destas misturas seja igual. Considerando a estrutura executada no segmento experimental com a mistura HiMA-6,0%, cuja espessura é de 4,0 cm, deformação de tração na fibra inferior de 98 $\mu\epsilon$, na qual a curva de fadiga prevê um número de ciclos igual a $7,89 \times 10^7$ na ruptura, será necessária uma espessura de 12,5 cm da mistura asfáltica SBS-6,0% para atingir o mesmo número de ciclos ($7,89 \times 10^7$) na ruptura, conforme demonstra a Tabela 61.

Tabela 61 - Espessuras de mistura asfáltica para o mesmo número N.

Mistura asfáltica	Espessura (cm)	Deformação ($\mu\epsilon$)	Número N
HiMA-6,0%	4,0	98	$7,89E+07$
SBS-6,0%	12,5	86	$7,76E+07$

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Nota-se na Tabela 61 que o número N para as camadas não é idêntico, mas sim muito próximo, não é usual a definição de espessuras não múltiplas de 5, assim seria heresia aproximar a espessura da mistura SBS-6,0% até obter-se uma microdeformação na qual concedesse exatamente o mesmo número N da mistura HiMA-6,0%.

As espessuras das camadas de mistura asfáltica, bem como os custos de aquisição e usinagem permitem estabelecer uma relação entre o custo e o benefício de aplicação destes materiais. A Tabela 62, Tabela 63 e Tabela 64 demonstram a evolução deste processo.

Tabela 62 - Custo do ligante por tonelada de mistura asfáltica.

Tipo de ligante asfáltico	Custo do ligante (R\$/t)	Teor (%)	Peso/tonelada de mistura asfáltica (t)	Custo/tonelada de mistura asfáltica (R\$/t)
CAP HiMA	3.535,00	6,00	0,06	212,10
CAP 60/85-E	2.850,00	6,00	0,06	171,00

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 63 - Quantidade de mistura asfáltica para 1 km de pista.

Mistura asfáltica	Volume (m ³) (espessura x largura x compr.)	Densidade (t/m ³)	Massa para 1 km de pista (t)
HiMA-6,0%	0,04 x 3,50 x 1.000,0	2,423	339
SBS-6,0%	0,125 x 3,50 x 1.000,0	2,455	1.074

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 64 - Comparativo final do custo para 1 km de pista.

Mistura asfáltica	Massa para 1 km de pista (t)	Custo do ligante + usinagem	Custo final para 1 km de pista
HiMA-6,0%	339	321,60	R\$109.093,15
SBS-6,0%	1.074	266,76	R\$286.516,91

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Os demonstrativos da evolução dos custos apresentados na Tabela 62, Tabela 63 e Tabela 64 demonstraram que a mistura HiMA-6,0% torna-se 61,92% menos onerosa que a mistura SBS-6,0% para atingir a mesma vida útil.

Isto demonstra grandes vantagens ao utilizar o ligante HiMA, em especial para locais de fluxo intenso, onde o número de passagem de eixos é elevado. Para locais de baixo tráfego, onde o número N é menor para o ciclo de vida do pavimento, há de ser considerada a utilização da mistura SBS-6,0% que apesar do desempenho inferior ao da mistura HiMA-6,0% também atenderia a um número de passagem de eixos pequeno, pois locais de baixo tráfego, geralmente recaem em espessura mínima pelos métodos de dimensionamento vigentes.

Neste contexto, onde se conhece o desempenho dos materiais, existe a possibilidade de reduzir a espessura da camada asfáltica, principalmente para rodovias cujo número N é elevado, através do dimensionamento mais racional, onde se conhece o estado de tensão e

deformação do pavimento através de análise mecânica. Isto vai ao encontro do conceito de sustentabilidade, uma vez que com espessura menor da camada asfáltica há a economia de recursos materiais como agregados e ligantes asfálticos e por consequência a redução de impactos ambientais relacionados a produção de agregados, extração de betume e ao processo de usinagem.

Cabe ainda, deixar em evidência que se considerou, para efeito de comparação, o fator campo-laboratório igual a 1, ou seja, o desempenho das curvas de fadiga obtidas em laboratório igual ao desempenho esperado no campo. Sabe-se que o fator campo-laboratório pode não ser este, desta forma o monitoramento dos segmentos experimentais ao longo do tempo torna-se muito importante a fim de aferir este fator.

Além disso, o fato da mistura SBS-6,0% demandar de 12,5 cm de mistura asfáltica demandaria da execução em pelo menos 2 camadas e por consequência disso seria necessário a execução de uma nova pintura de ligação, porém para efeito de comparação, desconsiderou-se este serviço. No entanto se fosse considerado, haveria uma diferença ainda maior em relação aos custos. Outro custo que não está relacionado é o referente as emissões de gases pelos processos de usinagem, quanto maior for a necessidade de mistura asfáltica, maior será a emissão, sendo então outro aspecto positivo com relação à mistura com o ligante HiMA.

4.3 SEGMENTOS EXPERIMENTAIS

O objetivo do monitoramento é acompanhar a evolução do dano causado pelo tráfego e pelo clima da região. Para isso, foram obtidas as deflexões da camada de rolamento através de ensaio com a viga Benkelman e executado levantamento das condições de superfície inicial.

4.3.1 Monitoramento deflectométrico

No que se refere ao acompanhamento deflectométrico, executou-se o levantamento da deflexão com a viga Benkelman, a cada 20 m, no período inicial e após um ano de abertura ao tráfego. A

Tabela 65 e Tabela 66 apresentam os resultados do acompanhamento deflectométrico no período inicial e após 1 ano de abertura (novembro/2016).

Os segmentos experimentais possuem 2 pistas de mesmo sentido cada, a da esquerda é a faixa considerada para o tráfego pesado, a da

direita é a pista disponível para ultrapassagem, todas as leituras foram obtidas considerando o trilho externo das pistas.

Na Tabela 67 é possível comparar a evolução das deflexões nos dois segmentos experimentais com um período de 11 meses de abertura ao tráfego. A Figura 37 e Figura 38 ilustram este comportamento ao longo dos segmentos experimentais.

Tabela 65 - Deflexões ($D_0 \times 10^{-2}$ mm) medidas em diferentes períodos na pista direita - Segmento experimental SBS-6,0%.

Km	Pista direita		Pista esquerda	
	Revestimento asfáltico período inicial (jan./2016)	Revestimento asfáltico (nov./2016)	Revestimento asfáltico período inicial (jan./2016)	Revestimento asfáltico (nov./2016)
270+640	32,0	30,0	10,0	4,0
270+660	57,0	58,0	30,0	10,0
270+680	25,0	20,0	30,0	26,0
270+700	50,0	50,0	50,0	58,0
270+720	50,0	40,0	55,0	66,0
270+740	69,0	74,0	65,0	70,0
270+760	25,0	40,0	40,0	30,0
270+780	30,0	36,0	40,0	40,0
270+800	30,0	22,0	35,0	34,0
270+820	39,0	46,0	50,0	54,0
270+840	36,0	36,0	20,0	20,0
270+860	36,0	40,0	20,0	30,0
270+880	28,0	30,0	25,0	22,0
270+900	30,0	20,0	29,0	16,0
270+920	30,0	30,0	30,0	36,0
Média	37,8	38,1	35,3	34,4
Desvio Padrão	13,0	14,7	14,8	19,9
Deflexão característica	50,8	52,8	50,1	54,3
Número de amostras	15	15	15	15

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 66 - Deflexões ($D_0 \times 10^{-2}$ mm) medidas em diferentes períodos na pista direita - Segmento experimental HIMA-6,0%

Km	Pista direita		Pista esquerda	
	Revestimento asfáltico período inicial (jan./2016)	Revestimento o asfáltico (nov./2016)	Revestimento asfáltico período inicial (jan./2016)	Revestimento o asfáltico (nov./2016)
271+220	35,0	36,0	40,0	35,0
271+240	34,0	38,0	35,0	44,0
271+260	36,0	35,0	40,0	38,0
271+280	37,0	32,0	37,0	30,0
271+300	33,0	31,0	32,0	32,0
271+320	30,0	30,0	33,0	36,0
271+340	28,0	30,0	35,0	41,0
271+360	29,0	31,0	30,0	35,0
271+380	37,0	35,0	38,0	32,0
271+400	37,0	33,0	39,0	35,0
271+420	38,0	37,0	39,0	32,0
271+440	40,0	32,0	42,0	30,0
271+460	42,0	33,0	35,0	29,0
271+480	44,0	34,0	30,0	29,0
Média	35,7	33,4	36,1	34,1
Desvio Padrão	4,7	2,6	3,8	4,5
Deflexão característica	40,4	35,9	39,9	38,7
Número de amostras	14	14	14	14

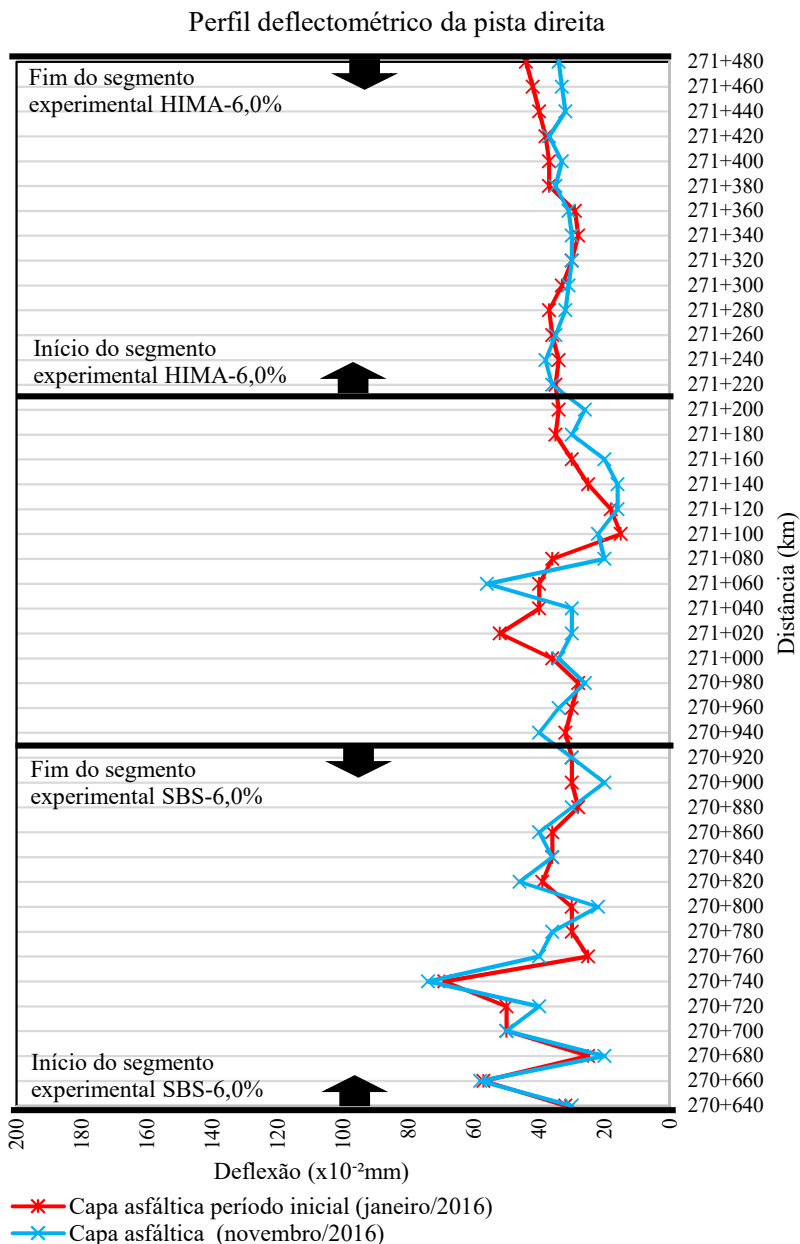
Fonte: Elaboração do autor (2018).

Tabela 67 - Resumo das deflexões características ($\times 10^{-2}$ mm).

Segmento	Capa asfáltica período inicial (jan./2016)		Capa asfáltica (nov./2016)	
	Pista Esquerda	Pista Direita	Pista Esquerda	Pista Direita
SBS-6,0%	50,1	50,8	54,3	52,8
HiMA-6,0%	39,9	40,4	38,7	35,9

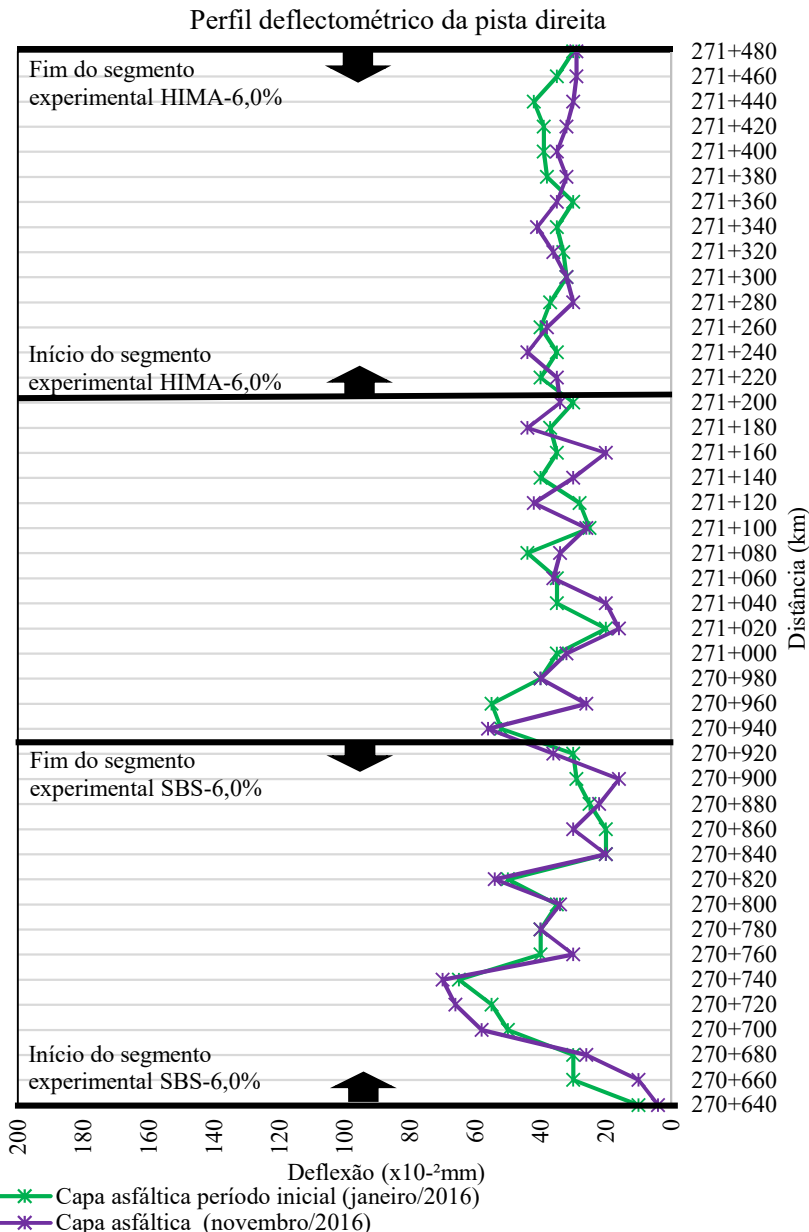
Fonte: Elaboração do autor (2018).

Figura 37 - Perfil deflectométrico longitudinal da pista direita.



Fonte: Elaboração do autor (2018).

Figura 38 - Perfil deflectométrico longitudinal da pista esquerda.



Fonte: Elaboração do autor (2018).

A deflexão característica obtida para cada segmento nos meses de janeiro de 2016 e novembro de 2016, são muito semelhantes e não configuram evolução de dano estrutural, quando observados cada trecho.

É possível notar que o segmento experimental HiMA-6,0% apresenta a deflexão característica em torno de 38×10^{-2} mm, semelhante ao calculado na simulação numérica (35×10^{-2} mm). No segmento experimental SBS-6,0%, a deflexão característica fica em torno de 52×10^{-2} mm, motivada pelo maior desvio padrão em torno de 15×10^{-2} mm, em ambos os períodos. Acredita-se que esta diferença nas deflexões seja dada pelas camadas inferiores do pavimento, pela heterogeneidade nos materiais que as compõem, e não pelas camadas de misturas asfálticas.

Contudo, a continuidade do monitoramento destes segmentos experimentais ao longo de sua vida será fator preponderante ao entendimento de seu comportamento. As deflexões observadas até então, são consideradas de baixos valores, espera-se que com estes níveis de deflexão os segmentos experimentais atinjam sua vida de serviço com poucos danos. Mas somente com o acompanhamento e monitoramento ao longo dos anos será possível confirmar este desempenho e então, obter uma correlação com os resultados de desempenho obtidos em laboratório com aquele que acontecerá em campo.

4.3.2 Monitoramento dos defeitos na superfície do pavimento

Executou-se o levantamento visual sobre toda a superfície dos segmentos experimentais no período inicial (janeiro de 2016) e passados 2 anos (janeiro de 2018) de abertura ao tráfego. Nestes dois períodos, não se constatou a presença de nenhum tipo de defeito, exceto a presença de um leve afundamento em ambos os segmentos experimentais. Assim, até janeiro de 2018 não há presença de trincas, panelas, exsudações e segregações. Porém, observou-se uma deformação no trilho de roda externo na ordem de 2 mm nos dois segmentos experimentais. Entende-se que este nível de deformação é baixo e trata-se de uma acomodação da mistura asfáltica devido ao maior nível de compactação proporcionado pela passagem dos veículos de carga.

Pelo curto período de avaliação, fica difícil correlacionar esta deformação plástica com o desempenho observado no simulador de tráfego, mesmo que os corpos de prova tenham sido retirados dos segmentos experimentais. Um período de avaliação mais longo pode demonstrar se o melhor desempenho da mistura SBS-6,0% observado no simulador francês também ocorrerá em campo. Outra hipótese é que a deformação permanente em campo é mais dependente das camadas

inferiores, haja visto que a deflexão característica no segmento SBS-6,0% é um pouco maior que no trecho da mistura HiMA-6,0% e por conta disso o segmento em SBS-6,0% possa deformar mais ou então deformar de forma igual nos dois segmentos.

Em relação as condições de macrotextura superficial, pode-se classificar como fina ou fechada para os dois segmentos experimentais. As menores alturas da mancha de areia foram da mistura SBS-6,0%, oriundas do pequeno índice de vazios desta mistura. Segundo a especificação do DEINFRA, com relação a condição a condição de segurança, a altura da mancha de areia deve situar-se entre 0,60 e 1,2 mm, diferindo do existente nos segmentos experimentais. Apesar desta constatação, os segmentos experimentais estão executados em local com pouca variação geométrica horizontal, sendo confortável ao rolamento e favorável a segurança. Espera-se que não haja evolução no sentido de diminuir ainda mais a altura da mancha, pois esta evolução poderia causar a instabilidade de veículos pela criação de lâmina d'água sobre a pista em dias chuvosos. Neste contexto, torna-se ainda mais importante a continuidade no monitoramento dos segmentos experimentais, a fim de propiciar o entendimento quanto ao comportamento das misturas asfálticas bem como a manutenção da segurança dos usuários. Na Figura 39 e Figura 40 está apresentada a condição de superfície do segmento experimental SBS-6,0%, que apresenta deformação permanente média de 2,0 milímetros na trilha de roda externa. Na Figura 41 e Figura 42 está apresentada a condição de superfície do segmento experimental HiMA-6,0%, que apresenta deformação permanente média de 2,0 milímetros na trilha de roda externa.

Tabela 68 - Resultado do ensaio de mancha de areia.

Local (km)	Diâmetro médio (mm)	HS (mm)	Classificação	Mistura asfáltica
270+700	315,0	0,32	Fina ou fechada	SBS-6,0%
270+780	345,0	0,27	Fina ou fechada	SBS-6,0%
270+840	410,0	0,19	Muito fina ou muito fechada	SBS-6,0%
271+220	327,5	0,30	Fina ou fechada	HiMA-6,0%
271+300	322,5	0,31	Fina ou fechada	HiMA-6,0%
271+380	312,5	0,33	Fina ou fechada	HiMA-6,0%

Fonte: Elaboração do autor (2018).

Figura 39 - Deformação no segmento SBS-6,0%.



Fonte: Elaboração do autor (2018).

Figura 40 - Aspecto do segmento SBS-6,0%, em janeiro de 2018.



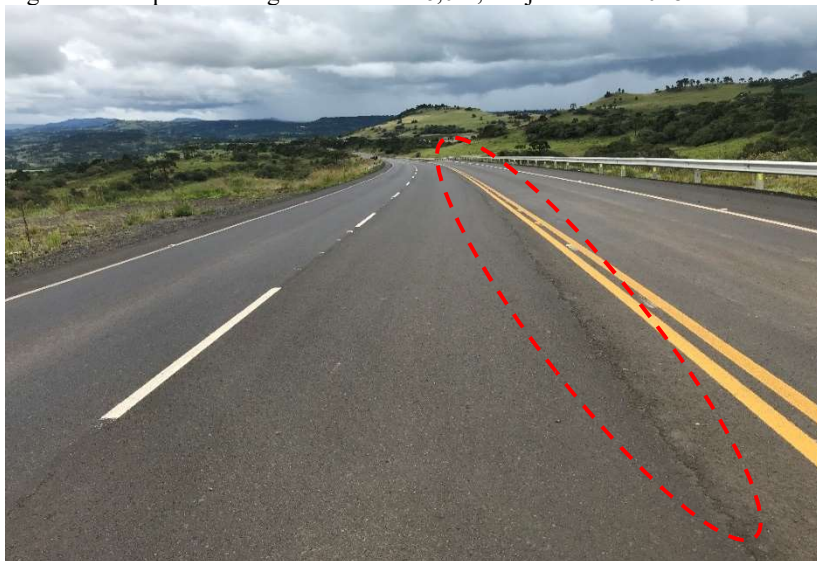
Fonte: Elaboração do autor (2018).

Figura 41 - Deformação no segmento HiMA-6,0%.



Fonte: Elaboração do autor (2018).

Figura 42 - Aspecto do segmento HiMA-6,0%, em janeiro de 2018.



Fonte: Elaboração do autor (2018).

Na Figura 42 é possível notar que a junta longitudinal está desencontrada com a pintura horizontal de eixo, isto se deve a largura adotada para as pistas. As pistas da rodovia possuíam a largura de 3,30m em média, depois da obra de restauração as pistas passaram para 3,50m, compensando esta diferença na execução da nova pista de declive.

5 CONCLUSÕES

A investigação do desempenho mecânico das misturas asfálticas com CAP HiMA e CAP AMP 60/85-E aplicadas na restauração rodoviária demonstrou que a mistura HiMA-6,0% possui um desempenho superior ao da mistura SBS-6,0% quanto à fadiga.

As previsões de alto desempenho quanto a fadiga, pronunciadas pela literatura, para misturas asfálticas que utilizam o ligante HiMA confirmaram-se também nesta pesquisa. O ensaio de fadiga demonstrou que as ambas as misturas podem ser consideradas de alto desempenho. A comparação da vida de fadiga com outras misturas da literatura, na mesma faixa de frequência, temperatura e tipo de ensaio, também evidenciou o desempenho superior destas misturas, em especial o da mistura HiMA-6,0%. Porém, duas misturas propostas por Klinsky *et al.* (2015) apresentaram curva de fadiga muito superior a mistura HiMA-6,0% e a todas as outras literaturas, o que de certa forma indica a necessidade de melhor estudá-las e compreendê-las já que uma destas curvas utiliza como ligante o CAP HiMA e a outra o CAP borracha.

O ensaio no simulador de tráfego francês demonstrou o melhor desempenho a deformação permanente para a mistura SBS-6,0%, exatamente ao contrário do desempenho à fadiga. Acredita-se que este melhor desempenho à deformação permanente tenha origem no baixo volume de vazios.

A determinação do dano por umidade induzida das misturas asfálticas empregadas nos segmentos experimentais evidenciou certa tendência para perda de resistência à tração por compressão, mesmo o ensaio não atingindo o grau de saturação mínimo proposto na norma. Isto indica a necessidade do monitoramento dos segmentos experimentais, para acompanhar uma possível evolução na perda de resistência a tração por compressão ao longo dos anos, já que o pavimento pode estar sujeito ao congelamento e a umidade no período de inverno, por conta das características da região.

A execução dos segmentos experimentais foi essencial para o desenvolvimento deste estudo. Ao longo do período desta pesquisa não foram observados defeitos na estrutura do pavimento. Na superfície da camada asfáltica também não há defeitos significativos. Contudo, entende-se que o período monitorado é curto em relação a vida útil do pavimento e ao entendimento do seu comportamento em campo.

Com o desempenho observado no ensaio de fadiga, espera-se que ambos os segmentos experimentais atinjam a vida de serviço sem grandes problemas com relação ao trincamento.

O comparativo do custo e vida útil das misturas asfálticas HiMA-6,0% e SBS-6,0% demonstrou o quanto vantajoso pode ser a utilização de misturas asfálticas de alto desempenho para obras de restauração rodoviária, desde que dimensionadas de forma racional. Na relação custo-benefício, apresentada nas condições dos segmentos experimentais, ficou evidente que a mistura HiMA-6,0% pode custar menos da metade do investimento necessário quando comparado com utilização da mistura SBS-6,0% para uma mesma vida útil. Retrata-se então, a importância de investigar o desempenho dos materiais aplicados na pavimentação, o que pode contribuir significativamente para a economia de recursos materiais e financeiros na construção ou restauração de rodovias.

É evidente que em campo as misturas asfálticas estão sujeitas às variações de carregamento e condições climáticas. Assim, deve-se considerar um fator de ponderação, para correlacionar o desempenho obtido em laboratório com o desempenho de campo. No entanto, este fator ainda é alvo de investigação e demanda de monitoramento do comportamento das misturas asfálticas em campo, sendo este um trabalho que exige muito tempo e que, por muitas vezes, acaba se perdendo antes que se tenha alcançado o objetivo. Neste contexto, pesquisas como esta representam um esforço em contribuir com a pavimentação rodoviária, dando condições para que se possa construir com mais racionalidade. No entanto, é preciso empenho de todos para que tenhamos uma boa e eficaz infraestrutura no nosso País. Desta forma, espera-se que esta pesquisa não só contribua, mas tenha continuidade em relação ao monitoramento dos segmentos experimentais.

O desenvolvimento desta pesquisa evidenciou a possibilidade da realização dos seguintes trabalhos futuros:

- Investigação das propriedades reológicas do ligante HiMA e do ligante AMP 60/85;
- Comparar o comportamento à fadiga e à deformação permanente da mistura HiMA-6,0% com uma nova mistura com ligante SBS no mesmo volume de vazios que a mistura HiMA-6,0%;
- Estudar e comparar o desempenho de misturas com o ligante HiMA e com o CAP borracha, em condição de igual teor ou de igual volume de vazios, já que algumas misturas com CAP borracha poderiam ter melhor desempenho, segundo a literatura;
- Investigar o dano por umidade induzida da mistura HiMA-6,0% e SBS-6,0% com corpos de prova moldados em laboratório ao invés de amostras de campo;

- Continuidade no monitoramento dos segmentos experimentais desta pesquisa a fim de calibrar o desempenho obtido em laboratório, com o comportamento em campo.

REFERÊNCIAS

AKBARZADEH, H.; BAYAT, A.; SOLEYMANI, H.R. **Analytical Review of the HMA Temperature Correction Factors from Laboratory and Falling Weight Deflectometer Tests**. 30^o International Journal of Pavement Research and Technology Vol.5, N^o1. 2012.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 283-14** Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage. 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5858**: Standard Guide for Calculating In Situ Equivalent Elastic Moduli of Pavement Materials Using Layered Elastic Theory, 2015.

_____. **ASTM D 6373**: Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR: 12583** Agregado graúdo - Verificação da adesividade a ligante betuminoso - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR: 15617** Misturas asfálticas – determinação do dano por umidade induzida. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR: 16018** Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR: 16208** Misturas asfálticas – Determinação do teor de betume pelo Soxhlet, pelo Rotarex e pelo refluxo duplo. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR: 16504** Misturas asfálticas – determinação da profundidade mediada macrotextura superficial de pavimentos asfálticos por volumetria – Método da mancha de areia. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NARMALISATION. **AFNOR NF P 98-253 -1**. Essais relatifs aux chaussées. Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés. Partie 1: Essai d'orniérage. France, 1991.

BAAJ, H. **Comportement a la fatigue des materiaux granulaires traites aux liants hydrocarbones**. Tese. L'institut National des Sciences Appliquees de Lyon. France, 2002.

BARKSDALE, R. D.; ALBA, J.; KHOSLA, N. P.; KIM, R.; LAMBE, P. C.; RAHMAN, M. S. **Laboratory determination of resilient modulus for flexible pavement design**. Nacional Cooperative Highway Research Program, 1997.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobras Asfaltos, ABEDA, 2010.

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

BONNOT, J. **Asphalt Aggregate Mixtures**. Transportation Research Record 1096, 1986.

BORGES, C. B. S. **Estudo comparativo entre medidas de deflexão com viga Benkelman e FWD em pavimentos da malha rodoviária Estadual de Santa Catarina**. 185 f. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

CALTRANS – Califórnia Department of Transportation. **Methods of test to obtain flexible pavement deflection measurements for determining pavement rehabilitation requirements**. Sacramento, Califórnia, EUA, 2004.

CERATTI, J. A. P.; REIS, R. M. M. **Manual de dosagem de concreto asfáltico**. São Paulo: Oficina de Livros, 2011.

CERTIFICADO DE CONTROLE DE QUALIDADE COMPASA. Curitiba, 2015.

CLYNE, T. R.; LI, X; MARASTEANU, M. O.; SKOK, E. L. **Dynamic and resilient modulus of asphalt mixtures. Final report**. Minnesota Department of Transportation. Minnesota, EUA, February, 2003.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de Rodovias 2017: Relatório Gerencial**. 2017. Brasília, Brasil.

CONG, P.; CHEN, S.; YU, J. **Investigation of the properties of epoxy resin-modified asphalt mixtures for application to orthotropic bridge decks**. Journal Polymer Science, v. 121, p. 2310-2316, 2011.

COOLEY JR, L. A; KANDHAL, P. S.; BUCHANAN, M. S.; FEE, F.; EPPS, A. **Loaded Wheel Testers in the United States: State of the Practice**. Transportation Research E-Circular N° E-C016, July, 2000.

COMPASA DO BRASIL DISTRIBUIDORA DE DERIVADOS DE PETRÓLEO. **Preço dos ligantes asfálticos modificados**. [mensagem pessoal] em 10 de nov. 2017.

DEINFRA – Departamento Estadual de Infraestrutura do Estado de Santa Catarina. **ES-P 05/16 Camadas de misturas asfálticas Usinadas a Quente**. Florianópolis, 2016.

_____. **IS-02** – Instrução de serviço – Estudo de tráfego. Florianópolis, 1998.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 006 - PRO** – Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **DNIT 008 - PRO** – Levantamento Visual Contínuo para Avaliação de Pavimentos Asfálticos. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **DNIT 031- ES** – Especificação de serviço - Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **DNIT 035 - ME** - Método de Ensaio - Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **DNIT 043 - ME** - Método de Ensaio - Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **DNIT 053 - ME** - Método de Ensaio - Misturas betuminosas - percentagem de betume. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNIT 054 - ME** - Método de Ensaio - Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997.

____. **DNIT 078** - ME - Método de Ensaio - Agregado graúdo - adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994.

____. **DNIT 081** - ME - Método de Ensaio - Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998.

____. **DNIT 086** - ME - Método de Ensaio - Agregados - determinação do índice de forma. Rio de Janeiro, 1994.

____. **DNIT 089** - ME - Método de Ensaio - Agregados - avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro, 1994.

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

____. **DNIT 158** - ME - Método de Ensaio - Determinação da porcentagem de betume em mistura asfáltica utilizando o extrator Soxhlet. Rio de Janeiro, 2011.

____. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. 2ª ed., 310p., Rio de Janeiro, 2005.

____. **SICRO** - Sistema de Custos Referenciais de Obras. Brasília, 2017.

DI BENEDETTO, H.; DE LA ROCHE, C.; BAAJ, H.; RIJKWATERSTAAT, A. P.; LUNDSTRÖM, R. **Fatigue of bituminous mixtures: diferent approaches and RILEM group contribution**. 6th RILEM Symposium. Performance testing and evaluation of bituminous materials, Zurich, 2003.

DI BENEDETTO, H.; PARTL, M. N.; FRANCKEN, L.; DE LA ROCHE, C. **Stiffness testing for bituminous mixtures**. RILEM Symposium. Performance testing and evaluation of bituminous materials. Materials and Structures Vol. 34, pages 66-70, March, 2001.

ESTUDO PARA SUBSTITUIÇÃO DO PROJETO DE REABILITAÇÃO DO PAVIMENTO NA SC-114 (PAINEL / SÃO

JOAQUIM). Centro Tecnológico de Infraestrutura Viária Ltda - CTVIAS. Curitiba 2014.

EKINGEN, E. R. **Determining gradation and creep effects in mixtures using de complex modulus test**. Dissertação. University of Florida, EUA, 2004.

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

EUROPEAN STANDARD **EN 12697-24** Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt Part 24: Stiffness, 2004.

_____. **EN 12697-26** Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt Part 26: Stiffness, 2004.

FANG, C. *et al.* **Aging properties and mechanism of the modified asphalt by packaging waste polyethylene and waste rubber powder**. Polymers advanced technologies, v. 24, p. 51-55, 2013.

FONTES, L. P. T. L. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos**. Tese de doutoramento. Universidade do Minho/Universidade Federal de Santa Catarina. 541 p. 2009.

GARBA, R. **Permanent deformation properties of asphalt concrete mixtures**. Thesis. Norwegian University of Science and Technology. Noruega, August, 2002.

GARCIA, G.; THOMPSON, M. **HMA Dynamic Modulus-Temperature relations**. ICT-R39 Illinois Center for Transportation. April 2007.

HUANG, H. Y. **Pavement Analysis and Design**. 2ª ed. Upper Saddle River, New Jersey, EUA. Pearson Education, Inc., 2004.

HUNTER, R. N; SELF, A; READ, J. **The shell bitumen handbook**. Sixth edition, Shell Bitumen UK, Thomas Telford Publishing, London. 2015.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Dados de Temperatura e Pluviosidade.** 2016. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/inicio.php>> Acesso em: Julho de 2016.

KANDHAL S. P.; MALLICK R. B. **FHWA Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments.** Federal Highway Administration, U. S. Department of Transportation. FHWA-SA-98-042. Washington, 1997.

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-FAD-RTF. 2015.

KLUTZ, R. Q.; DONGRÉ, R.; POWELL, R. B.; WILLIS, J. R.; TIMM, D. H. **Long term performance of a highly modified asphalt pavement and application to perpetual pavement design.** 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress. Prague, Czech Republic, jun. 2016.

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

LABORATÓRIO DE ASFALTOS E MATERIAIS PARA PAVIMENTAÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. **Ensaio de módulo de resiliência.** Curitiba, 2015.

LCPC. **Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés à chaud.** Groupe de travail RST Formulation des enrobés à chaud. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. France, 2007.

LUVIZÃO, G. **Avaliação do desempenho da reciclagem na Rodovia SC-355: caracterização da mistura reciclada e avaliação estrutural de segmentos monitorados executados.** 413 f. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

MACCARRONE, S.; JAMESON, G.W. **Fatigue and elastic characteristics of asphalt concrete mixes.** 14th ARRB Conference. Canberra, Austrália, 1988.

MAHER, A. BENNERT, T. **Evaluation of Poisson's Ratio for use in the Mechanistic Empirical Pavement Design Guide (MEPDG)**. Final Report. United Estates. June 2008.

MAPA MULTIMODAL DE SANTA CATARINA. **Mapas Multimodais**. 2013. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/download/mapas-multimodais/mapas-multimodais/sc.pdf>> Acesso em: julho de 2016.

MARCON, M. F. **Estudo e comparação do desempenho mecânico e reológico entre concretos asfáltico modificados por polímero SBS, borracha moída de pneu e nanomateriais**. 179 f. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

MARTINS, A. T. **Contribuição para a validação do ensaio de resistência ao dano por fadiga para ligantes asfálticos**. 114 f. Dissertação. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

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

MELO, J. V. S. D. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos**. 414 f. Tese. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

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

MUKHTAR, M. T.; DEMPSEY, B. J. **Interlayer stress absorbing composite (ISAC) for mitigating reflection cracking in asphalt concrete overlays**. Illinois Cooperative Highway and Transportation. Transportation Engineering Series N° 94. Jun. 1996.

NASCIMENTO, F. A. C.; GUIMARÃES, A. C. R.; CARNEIRO, L. A. V. **Análise da influência das propriedades do ligante asfáltico e do esqueleto pétreo na deformação permanente de misturas asfálticas**. 44ª Reunião Anual de Pavimentação. 18º encontro nacional de Conservação Rodoviária. Foz do Iguaçu, 2015.

PASETTO, M.; BALDO, N. **Fatigue Performance of Recycled Hot Mix Asphalt: A Laboratory Study**. Advances in Materials Science and Engineering. Article ID 4397957. Italy, 2016.

PROJETO DE MISTURA ASFÁLTICA. **Dosagem de mistura asfáltica para rodovia SC-114, trecho Painel-São Joaquim**. São Joaquim, 2015.

SAID, S. F. **Fatigue Characteristics of Asphalt Concrete Mixtures**. VT1 Meddelande 83A, Vag-6ch Traffic Institute, Swedish, november, 1988.

SANTOS, R. C *et al.* **Estudo comparativo para avaliação do comportamento a fadiga de misturas asfálticas elaboradas com o CAP TLA e convencionais**. Estudos no Brasil – IV SINAPRE, 2009.

SCHOLTEN, E. J.; TIMM, D. H.; WILLIS, J. R.; POWELL, R. B.; KLUTTZ, R. Q.; VONK, W. C. **Accelerated loading test results of two NCAT sections with highly modified asphalt**. 14th International Flexible Pavements Conference. Sydney, Australia, 2011.

SEED, H.B.; FEAD J.W.N. **Apparatus for repeated load tests of soils**. 62^a Annual Meeting. Symposium on time rates of loading in soil testing, June, 1960.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 2^a Ed. São Paulo. PINI, 2007.

SISTEMA NACIONAL DE VIAÇÃO – SNV. **Resumo das rodovias e trechos**. 2016. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/sistema-nacional-de-viacao/sistema-nacional-de-viacao>> Acesso em: novembro de 2017.

STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM - **SHRP-A-415** Permanent deformation response of asphalt aggregate mixes. University of California, Institute of Transportation Studies, Washington, DC, EUA, 1994.

TANCAL. **Cal Hidratada**. 2016. Disponível em: <<http://www.tancal.com.br/construcao.asp>> Acesso em julho de 2016.

VIVONI, A. M. **Especificação por desempenho de ligantes asfálticos SUPERPAVE: Novos Ensaios**. 11ª Ed. São Paulo SINICESP. 2016.

WILLIAMS, M. L.; LANDEL, R. F.; FERRY, J. D. **The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquidis**. Department of Chemistry, University of Wisconsin, EUA, February, 1955.

WORLD ECONOMIC FORUM. **The Global Competitiveness Report**. 2017. Disponível em: < <https://www.weforum.org/reports>> Acesso em: novembro de 2017.

YANG, F. *et al.* **Performance of the heavy fraction of pyrolysis oil derived from waste printed circuit boards in modifying asphalt**. Journal of Environmental Management, v. 126, p. 1-6, 2013.

YING, G.; FAN, G.; YONGLI, Z. **Thermal oxidative aging characterization of SBS modified asphalt**. Journal of Wuhan University of Technology-Mater, v. 28, No. 1, p. 88-91, 2013.

YOU, Z. *et al.* **Nanoclay-modified asphalt materials: Preparation and characterization**. Construction and Building Materials, EUA, 2010.

ZHANG, F.; HU, C. **The research for high-elastic modified asphalt**. Journal of Applied Polymer Science, fev. 2014.