

Matheus Felipe Marcon

**ESTUDO E COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO E  
REOLÓGICO ENTRE CONCRETOS ASFÁLTICOS  
MODIFICADOS POR POLÍMERO SBS, BORRACHA MOÍDA  
DE PNEU E NANOMATERIAIS**

Dissertação submetida ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil  
da Universidade Federal de Santa  
Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Glicério Trichês

Florianópolis  
2016

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

Marcon, Matheus Felipe

ESTUDO E COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO E REOLÓGICO  
DE CONCRETOS ASFÁLTICOS MODIFICADOS POR POLÍMERO SBS,  
BORRACHA MOÍDA DE PNEU E NANOMATERIAIS / Matheus Felipe  
Marcon ; orientador, Glicério Trichês - Florianópolis, SC,  
2016.

179 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Polímero SBS. 3. Borracha moída  
de pneu. 4. Vida de fadiga. 5. Estimativa de vida útil. I.  
Trichês, Glicério. II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.  
III. Título.

Matheus Felipe Marcon

**ESTUDO E COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO E  
REOLÓGICO ENTRE CONCRETOS ASFÁLTICOS  
MODIFICADOS POR POLÍMERO SBS, BORRACHA MOÍDA  
DE PNEU E NANOMATERIAIS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

---

Prof. Glicério Trichês, Dr.  
Coordenador do Curso

---

Prof. Glicério Trichês, Dr.  
Orientador

Banca Examinadora:

---

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

---

Prof. Orlando Martini de Oliveira, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof<sup>a</sup>. Liseane Padilha Thives, Dr<sup>a</sup>.  
Universidade Federal de Santa Catarina



## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer às pessoas que colaboraram para o desenvolvimento desse trabalho, diretamente ou indiretamente.

Primeiramente, ao professor Glicério Trichês, por ter confiado esse trabalho a mim, pela sua orientação, amizade, paciência, disposição para tirar dúvidas e por todo o conhecimento transmitido tanto durante a graduação quanto na pós-graduação.

Aos meus pais, Sérgio e Vera, e ao meu irmão, André, pelo apoio, incentivo e pelas cobranças, que fizeram com que eu não desviasse o foco da pesquisa.

Aos professores Luciano e Orlando, por aceitarem avaliar este trabalho. Também à professora Liseane, pelo aconselhamento durante a pesquisa e por aceitar participar da banca examinadora.

Aos meus colegas e amigos do Laboratório de Pavimentação, Quintero, Aduzindo, Jaqueline, Mayara, Gabriela, Emmanuelle, Emanuelle, Lídia, Ramon, João, Jonathan, Sárvia, Vanesa e Keyla, pelo constante apoio durante os ensaios, aprendizados e pela parceria no ambiente laboratorial.

Aos meus colegas e amigos do GTec, Paulo, Eduardo, Rudiele, Ronaldo, Paula, Regina, Lucas e Sakata, pela amizade e por sempre estarem à disposição para prestar apoio quando necessário. Ao professor Prudêncio, pela amizade e pelos constantes ensinamentos e recomendações.

Aos meus amigos tanto de Joinville quanto de Florianópolis, por sempre estarem comigo em momentos de diversão e descontração.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pela oportunidade concedida e por todo o aprendizado durante o mestrado.

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

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por proporcionar-me a bolsa de mestrado.

Finalmente, a Deus, por ter concedido a família ideal para mim, amizades verdadeiras e duradouras, uma educação de muita qualidade, enfim, a vida que eu sempre quis.

Muito obrigado!



## RESUMO

Grande parte das deficiências dos pavimentos se dá pela não conformidade dos materiais empregados em revestimentos asfálticos com a demanda de tráfego ao qual são submetidos. Nessa direção, a modificação dos ligantes asfálticos é uma alternativa para melhorar o desempenho desse material e, conseqüentemente, do concreto asfáltico, frente aos diversos mecanismos de degradação. Por isso, é fundamental o estudo das propriedades dos concretos asfálticos modificados, principalmente no que diz respeito à caracterização reológica e à fadiga e à resistência à deformação permanente, pois estes são considerados os principais mecanismos de degradação dos revestimentos asfálticos. Este trabalho teve como objetivo avaliar tanto o desempenho mecânico quanto o reológico de misturas asfálticas contendo quatro tipos diferentes de agentes modificadores: polímero SBS, borracha moída de pneu, nanoargila organofílica e nanotubo de carbono. As misturas nanomodificadas foram desenvolvidas na pesquisa de Melo (2014). As propriedades empíricas dos ligantes modificados foram avaliadas e, para cada mistura, foi obtido o teor de ligante de projeto a partir da dosagem Superpave. Na seqüência, procedeu-se à produção de misturas asfálticas modificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu, que foram submetidas ao dano por umidade induzida pelo ensaio de Lottman modificado, à deformação permanente no simulador de tráfego francês, módulo complexo e resistência à fadiga no aparato quatro pontos. Todas as misturas apresentaram desempenho satisfatório quanto ao dano por umidade induzida. Quanto à deformação permanente, os resultados obtidos foram todos superiores aos da mistura convencional, sendo que a mistura com nanotubo de carbono apresentou o menor afundamento. A verificação do comportamento reológico mostrou que as misturas modificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu apresentam valores de módulo complexo e ângulo de fase inferiores aos das misturas nanomodificadas. A respeito da resistência à fadiga, as misturas modificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu apresentaram desempenho consideravelmente superior às misturas nanomodificadas. A elevada resistência à fadiga dessas misturas refletiu no aumento de vida útil da estrutura de pavimento, obtido por meio de simulações numéricas. Portanto, em relação aos dois principais mecanismos de degradação de revestimentos asfálticos, o melhor desempenho à fadiga foi observado pela mistura modificada por polímero SBS e a maior resistência à deformação permanente foi obtida com a incorporação de nanotubo de carbono à mistura asfáltica.





## ABSTRACT

Many of the pavement deficiencies are due to non-compliance of the materials used in asphalt coatings with the traffic demand to which they are submitted. Therefore, asphalt binder modification is an alternative to improve the performance of this material and, consequently, of the asphalt concrete against various degradation mechanisms. The study of the properties of modified asphalt concrete is essential, especially with regard to the behavior to fatigue and resistance to permanent deformation, as these are considered the main degradation mechanisms of asphalt coatings. This study's main objective was to evaluate the mechanical and rheological performance of asphalt mixtures containing four different modifiers: SBS polymer, crumb rubber, organophilic nanoclay and carbon nanotube. The nanomodified asphalt mixtures were developed in Melo's research (2014). The empirical properties of the modified binders were evaluated and, for each asphalt mixture, the optimum asphalt binder content was determined in accordance with the Superpave mix design. Thus, production of modified asphalt mixtures with SBS polymer and crumb rubber was carried out. Those were subjected to moisture induced damage by the modified Lottman test, permanent deformation test in the French traffic simulator, complex modulus and fatigue life by the four point bending test. All the asphalt mixtures showed high resistance to moisture induced damage. The permanent deformation test results were all higher than those of the control asphalt mixture and the carbon nanotube asphalt mixture showed the best rutting resistance. The determination of rheological behavior showed that SBS and crumb rubber modified asphalt mixtures have lower complex modulus and lower phase angle than nanomodified asphalt mixtures. Regarding the fatigue life, the SBS and crumb rubber asphalt mixtures showed much better performance than the nanomodified asphalt mixtures. The increase in fatigue life, caused by the presence of modifying agents, induced an increment in the estimated life of the pavement structure, verified in numerical simulations. Therefore, concerning the two main degradation mechanisms of asphalt coatings, the best fatigue life performance was observed by the SBS modified asphalt mixture and the best rutting resistance was obtained with the carbon nanotube incorporation into asphalt mixture.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Variação da resistência mecânica dos polímeros em função do peso molecular.....	33
Figura 2 - Ângulo de fase <i>versus</i> Temperatura para ligante modificado por SBS. ....	42
Figura 3 - Ângulo de fase <i>versus</i> Temperatura para ligante modificado por PO. ....	42
Figura 4 - Diferença aparente entre asfalto-borracha estocável (à direita) e asfalto-borracha não-estocável (à esquerda).....	45
Figura 5 - Índices de modificação para ligantes modificados por borracha moída de pneu. ....	47
Figura 6 - Índices de modificação para ligantes modificados por polímero SBS. ....	47
Figura 7 - Variações no módulo complexo em decorrência da incorporação de diferentes teores de SBS e borracha moída de pneu. ..	48
Figura 8 - Variação no módulo complexo e no ângulo de fase dos ligantes modificados.....	49
Figura 9 - Variação na viscosidade rotacional dos ligantes modificados. ....	50
Figura 10 - Esquema das estruturas de nanocompósitos poliméricos. ..	52
Figura 11 - Viscosidades dos asfaltos modificados com MMT e OMMT a 135°C.....	53
Figura 12 - Curvas de $G^*$ para os asfaltos modificados com MMT e OMMT. ....	54
Figura 13 - Curvas de ângulo de fase para os asfaltos modificados com MMT e OMMT. ....	55
Figura 14 - Esquema de uma camada de NTC, formada por anéis aromáticos. ....	59
Figura 15 - Solicitações do tráfego e ação climática na estrutura de um pavimento flexível.....	62
Figura 16 - Desenho esquemático do comportamento viscoelástico sob carregamento harmônico. ....	67
Figura 17 - Exemplo de valores de módulo dinâmico de cisalhamento, deslocados ao longo do eixo da frequência. ....	69
Figura 18 - Deformação permanente no revestimento asfáltico. ....	71

Figura 19 - Formas de pulsos de carregamento utilizados em ensaios de fadiga.....	75
Figura 20 - Relação entre rigidez inicial e rigidez no ciclo "i" ( $E_0/E_i$ ) x número de ciclos, para os dois modos distintos de carregamento. ....	76
Figura 21 - Estrutura do programa experimental. ....	86
Figura 22 - Curva granulométrica da composição de agregados. ....	90
Figura 23 - Compactador Giratório Servopac, fabricado pela IPC Global®.....	95
Figura 24 - Simulador de tráfego <i>Orniéreur</i> , desenvolvido pelo LCPC. ....	100
Figura 25 - Pontos de leitura das deformações permanentes na placa de concreto asfáltico. ....	101
Figura 26 - Aparato 4 pontos, desenvolvido pela IPC Global®.....	102
Figura 27 - Curva de viscosidade dinâmica em função da temperatura do ligante FLEXPAVE 60/85. ....	113
Figura 28 - Curvas de viscosidade dinâmica em função da temperatura do CAP 50-70, FLEXPAVE 60/85 e dos nanocompósitos asfálticos. ....	114
Figura 29 - Curvas de compactação das misturas asfálticas contendo o ligante FLEXPAVE 60/85. ....	115
Figura 30 - Resultados de resistência à tração, RRT (razão de resistência à tração retida) e porcentagem de vazios. ....	119
Figura 31 - Resultados de resistência à tração e RRT, incluindo as misturas produzidas por Melo (2014). ....	120
Figura 32 - Compactação de uma placa de concreto asfáltico (50×18×5 cm). ....	121
Figura 33 - Compactação de uma placa de concreto asfáltico (60×40×9 cm). ....	123
Figura 34 - Corpos de prova prismáticos (400,0×50,8×63,5 mm) serrados de uma placa de concreto asfáltico (60×40×9 cm). ....	123
Figura 35 - Placa de concreto asfáltico durante ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego francês <i>Orniéreur</i> . ....	125
Figura 36 - Placas de mistura asfáltica modificada com polímero SBS, após ensaio no simulador de tráfego. ....	125
Figura 37 - Desempenho frente à deformação permanente das misturas asfálticas.....	126

Figura 38 - Isotermas das misturas asfálticas modificadas com polímero SBS e borracha moída de pneu.....	131
Figura 39 - Isócronas das misturas asfálticas modificadas com polímero SBS e borracha moída de pneu.....	132
Figura 40 - Curvas mestras das misturas modificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu, na temperatura de referência de 20°C. ....	134
Figura 41 - Espaço de Black das misturas asfálticas modificadas com polímero SBS e borracha moída de pneu. ....	135
Figura 42 - Isotermas do ângulo de fase em função da frequência de carregamento das misturas modificadas.....	136
Figura 43 - Plano complexo da mistura modificada por polímero SBS. ....	138
Figura 44 - Plano complexo da mistura modificada por borracha moída de pneu. ....	138
Figura 45 - Curvas mestras das misturas modificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu e da mistura convencional ( $T_R = 20^\circ\text{C}$ )....	140
Figura 46 - Curvas mestras das misturas modificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu e das misturas nanomodificadas ( $T_R = 20^\circ\text{C}$ ). ....	141
Figura 47 - Componentes elástica (E1) e viscosa (E2) do módulo complexo das misturas asfálticas ( $T = 0^\circ\text{C}$ ; $f = 10\text{ Hz}$ ).....	143
Figura 48 - Componentes elástica (E1) e viscosa (E2) do módulo complexo das misturas asfálticas ( $T = 5^\circ\text{C}$ ; $f = 10\text{ Hz}$ ).....	144
Figura 49 - Componentes elástica (E1) e viscosa (E2) do módulo complexo das misturas asfálticas ( $T = 10^\circ\text{C}$ ; $f = 10\text{ Hz}$ ).....	144
Figura 50 - Componentes elástica (E1) e viscosa (E2) do módulo complexo das misturas asfálticas ( $T = 15^\circ\text{C}$ ; $f = 10\text{ Hz}$ ).....	145
Figura 51 - Componentes elástica (E1) e viscosa (E2) do módulo complexo das misturas asfálticas ( $T = 20^\circ\text{C}$ ; $f = 10\text{ Hz}$ ).....	145
Figura 52 - Componentes elástica (E1) e viscosa (E2) do módulo complexo das misturas asfálticas ( $T = 25^\circ\text{C}$ ; $f = 10\text{ Hz}$ ).....	146
Figura 53 - Componentes elástica (E1) e viscosa (E2) do módulo complexo das misturas asfálticas ( $T = 30^\circ\text{C}$ ; $f = 10\text{ Hz}$ ).....	146
Figura 54 - Curvas de fadiga das misturas modificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu ( $T = 20^\circ\text{C}$ ; $f = 10\text{ Hz}$ ).....	149

Figura 55 - Curvas de fadiga das misturas modificadas, nanomodificadas e convencional ( $f = 10$ Hz).....	151
Figura 56 - Esquema da estrutura de pavimento do Segmento Monitorado 5.....	153
Figura 57 - Resultados de deformação específica na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico para a mistura modificada por polímero SBS. ....	154
Figura 58 - Resultados de deformação específica na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico para a mistura modificada por borracha moída de pneu. ....	155
Figura 59 - Resultados de deformação específica na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico para a mistura convencional com CAP 50-70. ....	155
Figura 60 - Resultados de deformação específica na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico para a mistura nanomodificada NTC-2%.....	156
Figura 61 - Resultados de deformação específica na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico para a mistura nanomodificada NA-3%.....	156
Figura 62 - Geometria adotada do Segmento Monitorado 5. ....	159
Figura 63 - Esquema da estrutura de pavimento do Segmento Monitorado 3.....	160
Figura 64 - Resultados de deformação específica na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico para a mistura modificada por polímero SBS. ....	161
Figura 65 - Resultados de deformação específica na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico para a mistura modificada por borracha moída de pneu. ....	162
Figura 66 - Geometria adotada do Segmento Monitorado 3. ....	163

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações técnicas para ligante modificado por polímero. ....	38
Tabela 2 - Composição típica em massa de um pneu. ....	44
Tabela 3 - Análise comparativa entre os modos de carregamento tensão controlada e deformação controlada. ....	77
Tabela 4 - Resultados do ensaio dinâmico por tração indireta. ....	82
Tabela 5 - Resultado da caracterização dos agregados. ....	88
Tabela 6 - Propriedades físicas e químicas da cal hidratada. ....	89
Tabela 7 - Porcentagem passante nas peneiras de controle. ....	90
Tabela 8 - Fracionamento dos agregados para a composição granulométrica das misturas asfálticas. ....	94
Tabela 9 - Temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas modificadas com polímero SBS e borracha moída de pneu. .	94
Tabela 10 - Parâmetros elásticos das camadas da estrutura de pavimento. ....	106
Tabela 11 - Resultados de penetração, ponto de amolecimento, recuperação elástica e viscosidade aparente do ligante FLEXPAVE 60/85. ....	110
Tabela 12 - Resultados de penetração, ponto de amolecimento, ponto de fulgor, recuperação elástica e viscosidade aparente do ligante ECOFLEX B. ....	111
Tabela 13 - Resultados de penetração, ponto de amolecimento, IST e viscosidade aparente do CAP 50-70. ....	112
Tabela 14 - Resultados de penetração, ponto de amolecimento, IST, compatibilidade e viscosidade aparente dos nanocompósitos asfálticos. ....	112
Tabela 15 - Parâmetros volumétricos de dosagem das misturas asfálticas contendo o ligante FLEXPAVE 60/85. ....	116
Tabela 16 - Propriedades volumétricas das misturas asfálticas contendo o ligante FLEXPAVE 60/85. ....	116
Tabela 17 - Parâmetros volumétricos de dosagem das misturas asfálticas contendo CAP 50-70 e nanocompósitos asfálticos. ....	117
Tabela 18 - Propriedades volumétricas das misturas contendo CAP 50-70 e nanocompósitos asfálticos. ....	117

Tabela 19 - Características e parâmetros volumétricos da mistura asfáltica contendo o ligante ECOFLEX B. ....	118
Tabela 20 - Caracterização das placas de mistura asfáltica (50×18×5 cm). ....	122
Tabela 21- Porcentagem de vazios dos corpos de prova prismáticos. ....	124
Tabela 22 - Afundamento aos 30000 ciclos das misturas com CAP 50-70, nanocompósitos, modificadas com polímero SBS e borracha moída de pneu. ....	127
Tabela 23 - Resultados de módulo complexo e ângulo de fase para a mistura modificada por polímero SBS. ....	129
Tabela 24 - Resultados de módulo complexo e ângulo de fase para a mistura modificada com borracha moída de pneu. ....	130
Tabela 25 - Valores percentuais de módulo complexo das misturas modificadas e nanomodificadas em relação à mistura com CAP 50-70 (f = 10 Hz). ....	142
Tabela 26 - Resultados do ensaio de fadiga da mistura asfáltica modificada por polímero SBS (T = 20°C; f = 10 Hz). ....	148
Tabela 27 - Resultados do ensaio de fadiga da mistura asfáltica modificada por borracha moída de pneu (T = 20°C; f = 10 Hz). ....	148
Tabela 28 - Parâmetros viscoelásticos de Huet-Sayegh, na temperatura de referência de 20°C. ....	153
Tabela 29 - Estimativa de vida útil do revestimento asfáltico para diferentes misturas asfálticas. ....	157
Tabela 30 - Preços dos ligantes asfálticos utilizados nas simulações do Segmento Monitorado 5, por metro linear de rodovia. ....	159
Tabela 31 - Estimativa de vida útil do revestimento asfáltico para a estrutura de pavimento do Segmento Monitorado 3. ....	162
Tabela 32 - Preços dos ligantes asfálticos utilizados nas simulações do Segmento Monitorado 3, por metro linear de rodovia. ....	163



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA .....	22
1.2 OBJETIVOS.....	23
1.2.1 Objetivo Geral .....	23
1.2.2 Objetivos Específicos .....	23
1.3 ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA .....	23
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>25</b>
2.1 LIGANTES ASFÁLTICOS .....	25
2.1.1 Composição química e estrutura interna .....	25
2.1.2 Envelhecimento do ligante asfáltico.....	28
2.1.3 Especificação Superpave® para caracterização de ligantes asfálticos.....	30
2.2 LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS.....	31
2.2.1 Polímeros.....	31
2.2.1.1 Peso Molecular.....	33
2.2.1.2 Forma, Estrutura e Configuração Molecular .....	34
2.2.1.4 Polímeros Utilizados na Pavimentação Asfáltica .....	35
2.2.2 Ligantes Asfálticos Modificados por Polímeros .....	36
2.2.3 Borracha Moída de Pneu .....	42
2.2.4 Ligantes Asfálticos Modificados por Borracha Moída de Pneu ...	44
2.2.5 Ligantes Asfálticos Modificados por Nanomateriais .....	50
2.2.5.1 Ligantes Asfálticos Modificados por Nanoargilas .....	50
2.2.5.2 Ligante Asfáltico Modificado por Nanotubos de Carbono.....	58
2.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO E REOLÓGICO DE MISTURAS DE CONCRETO ASFÁLTICO .....	60

2.3.1 Solicitações Impostas em Camadas de Concreto Asfáltico.....	61
2.3.2 Mecanismos de Degradação de Camadas de Concreto Asfáltico	62
2.3.3 Rigidez do Concreto Asfáltico .....	63
2.3.3.1 Fatores Externos que Influenciam a Rigidez do Concreto Asfáltico.....	63
2.3.3.2 Fatores Inerentes ao Concreto Asfáltico que Influenciam a Rigidez .....	64
2.3.3.3 Módulo Complexo do Concreto Asfáltico e Fundamentos de Viscoelasticidade Linear .....	65
2.3.4 Resistência à deformação permanente de misturas de concreto asfáltico .....	70
2.3.5 Resistência à fadiga de misturas de concreto asfáltico.....	73
2.4 SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	83
<b>3 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>85</b>
3.1 ETAPA 1 - CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS MINERAIS E DOS AGENTES MODIFICADORES .....	87
3.2 ETAPA 2 - CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS LIGANTES ASFÁLTICOS .....	91
3.3 ETAPA 3 - DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	93
3.3.1 Produção das misturas asfálticas .....	93
3.3.2 Dosagem Superpave.....	95
3.3.3 Dano por umidade induzida .....	98
3.4 ETAPA 4 - MOLDAGEM E CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS DE CONCRETO ASFÁLTICO .....	98
3.5 ETAPA 5 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO E DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS. ....	99
3.5.1 Desempenho à deformação permanente das misturas asfálticas ..	99

3.5.2 Comportamento reológico e desempenho à fadiga das misturas asfálticas.....	102
3.6 ETAPA 6 – SIMULAÇÃO DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO ASFÁLTICO.....	104
<b>4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>109</b>
4.1 ETAPA 2 – CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES EMPÍRICAS E REOLÓGICAS DOS LIGANTES ASFÁLTICOS ...	109
4.2 ETAPA 3 - DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS .....	114
4.2.1 Dosagem Superpave .....	115
4.2.2 Dosagem Marshall.....	118
4.2.3 Dano por umidade induzida .....	118
4.3 ETAPA 4 - MOLDAGEM E CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS DE CONCRETO ASFÁLTICO .....	121
4.3.1 Placas de concreto asfáltico destinadas ao ensaio de deformação permanente .....	121
4.3.2 Corpos de prova de concreto asfáltico destinados aos ensaios de fadiga e módulo complexo .....	122
4.4 ETAPA 5 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO E COMPORTAMENTO REOLÓGICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	124
4.4.1 Desempenho à deformação permanente das misturas asfálticas	125
4.4.2 Comportamento reológico das misturas asfálticas .....	128
4.4.3 Desempenho à fadiga das misturas asfálticas.....	147
4.5 ETAPA 6 - SIMULAÇÃO DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO ASFÁLTICO.....	152
4.5.1 Revestimento asfáltico em camada singular.....	152
4.5.2 Revestimento asfáltico em camadas integradas.....	159
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>165</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>167</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A rede rodoviária brasileira é composta de 12,4% de rodovias pavimentadas, 78,6% de rodovias não pavimentadas e 9,0% de rodovias planejadas. Esse setor é responsável pelo transporte de 61% das cargas movimentadas ao longo do país e apresenta números próximos de 140 milhões quando se trata do transporte anual de passageiros. Em relação à malha rodoviária federal, sua extensão cresceu 19,4% nos últimos dez anos (CNT, 2015).

A pesquisa da Confederação Nacional do Transporte realizou um levantamento, em 2015, das condições das rodovias brasileiras. Foi constatado que, dentre uma extensão de 100.763 quilômetros de rodovia estudada em campo, o estado do pavimento foi assim classificado: 41,6% em estado ótimo, 9,8% em estado bom, 35,4% em estado regular, 10,1% em estado ruim e 3,1% em péssimo estado.

Tais números refletem, além da importância das rodovias brasileiras para o transporte de cargas e de passageiros, a displicência perante as condições deficientes em que se apresentam as mesmas. Os defeitos e as irregularidades influenciam diretamente em maiores custos com a manutenção de veículos, no consumo de combustível e pneus, no aumento dos tempos de viagem e no crescimento do risco da ocorrência de acidentes.

Em relação ao tráfego nas rodovias brasileiras, tem-se registrado um aumento de volume expressivo, incompatível com as condições atuais dos pavimentos e extensão da rede pavimentada. A amplificação do volume de tráfego, principalmente em razão dos veículos comerciais, tem conduzido ao surgimento precoce de defeitos nos revestimentos asfálticos.

Tratando-se das rodovias pavimentadas, grande parte dos problemas observados em pavimentos flexíveis está relacionada tanto à insuficiente capacidade de suporte da estrutura do pavimento, quanto à má qualidade dos materiais utilizados no revestimento e nas camadas subjacentes. O descumprimento desses critérios técnicos induz a um processo de deformação mais acelerado da estrutura do pavimento, culminando em sua deterioração e, conseqüentemente, na redução de sua vida útil.

Embora pesquisadores tenham explorado o potencial da nanotecnologia por muitos anos, sua utilização tem sido relativamente limitada. Contudo, novos esforços relacionados ao desenvolvimento de nanomateriais para pavimentação, cujas funções seriam beneficiar as

propriedades mecânicas e físicas, bem como a durabilidade dos concretos asfálticos, oferecem uma perspectiva promissora (YANG; TIGHE, 2013).

A respeito da utilização de polímeros e borracha moída de pneu como agentes modificadores das misturas asfálticas, diversos pesquisadores já constataram efeitos benéficos desses materiais no desempenho dos concretos asfálticos. Embora a incorporação dos mesmos exija cuidados especiais, tratam-se de materiais cujas propriedades já estão consolidadas na literatura, ao contrário dos nanomateriais. No Brasil, no entanto, o uso de novos materiais em concretos asfálticos ainda carece de estudos do comportamento mecânico e reológico, limitando a previsão do desempenho dessas misturas como camadas de revestimentos.

Por essa razão, é fundamental o estudo das propriedades dos concretos asfálticos modificados, principalmente no que diz respeito ao comportamento à fadiga e à resistência à deformação permanente, pois estes são considerados os principais mecanismos de degradação dos revestimentos asfálticos brasileiros. A avaliação dessas propriedades é indispensável para a classificação dos agentes modificadores em termos de desempenho do concreto asfáltico.

## 1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Tendo em vista que parte das deficiências dos pavimentos se dá pela não conformidade dos materiais empregados em revestimentos asfálticos com a demanda de tráfego ao qual são submetidos, se fazem necessários o estudo e a aplicação de novas tecnologias que garantam as exigências técnicas durante o período de projeto das rodovias.

Nessa direção, a modificação dos ligantes asfálticos é uma alternativa de melhorar o desempenho desse material e, conseqüentemente, da mistura de concreto asfáltico, frente aos diversos mecanismos de degradação. Aliado a isso, o aumento da vida útil dos revestimentos asfálticos ainda deve suprir a carência de manutenção por parte dos órgãos responsáveis e suportar o expressivo crescimento do tráfego de veículos comerciais nas rodovias brasileiras.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar o desempenho mecânico e reológico de misturas asfálticas contendo quatro tipos diferentes de agentes modificadores: polímero SBS (Estireno-Butadieno-Estireno), borracha moída de pneu, nanoargila organofílica e nanotubo de carbono.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar as propriedades empíricas dos ligantes asfálticos;
- Avaliar o desempenho mecânico e reológico de misturas asfálticas modificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu;
- Comparar os efeitos decorrentes da incorporação dos modificadores citados com os efeitos proporcionados pelas nanomodificações de misturas asfálticas com nanoargila organofílica e nanotubo de carbono, realizadas por Melo (2014);
- Confrontar o desempenho dos concretos asfálticos modificados por meio da modelização de estruturas de pavimento, considerando o comportamento viscoelástico do material.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA

O presente trabalho foi estruturado em cinco capítulos, com o intuito de garantir uma ordenação correta entre os temas abordados e, conseqüentemente, facilitar o entendimento da pesquisa como um todo. Uma descrição sucinta dos assuntos abordados nos capítulos é exposta a seguir.

- Capítulo 1 – Introdução: Introduz o tema de estudo, revela a motivação da pesquisa, estabelece o objetivo geral do trabalho e seus inerentes objetivos específicos.
- Capítulo 2 – Revisão bibliográfica: Neste capítulo serão dissertados os fundamentos para a pesquisa. A revisão de literatura é realizada abordando tópicos referentes a todos os constituintes das misturas asfálticas modificadas do estudo,

além do comportamento mecânico e reológico apresentado por esses materiais. Também são discutidos fundamentos importantes de reologia, tratando especificamente do comportamento viscoelástico demonstrado pelo cimento asfáltico de petróleo. Ao longo do trabalho, serão citadas pesquisas relevantes aos temas abordados, bem como os resultados obtidos pelos pesquisadores. Em síntese, a revisão de literatura está fragmentada em três seções – ligantes asfálticos, ligantes asfálticos modificados e comportamento mecânico e reológico de misturas de concreto asfáltico.

- Capítulo 3 – Programa experimental: Este capítulo é dedicado à caracterização dos materiais empregados na pesquisa e à exposição dos métodos utilizados para alcançar os objetivos propostos pelo estudo.
- Capítulo 4 – Apresentação e análise dos resultados: Tem como fundamento a análise dos resultados obtidos por meio do cumprimento do programa experimental, assim como a reflexão sobre os mesmos, contrapondo-os com resultados de pesquisas relevantes ao tema.
- Capítulo 5 – Considerações finais: Apresenta as conclusões pertinentes ao estudo realizado, denotando se os objetivos propostos no capítulo de introdução foram alcançados.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 LIGANTES ASFÁLTICOS

Conforme o *Asphalt Institute* (2015), o asfalto é um material aglutinante de coloração escura, composto predominantemente por betume. Sua ocorrência pode ser natural, por meio de perdas de frações que compunham depósitos de petróleo, resultando em um “asfalto natural” contendo betume; ou pode ser obtido pela exploração de petróleo e posterior processamento em refinarias, onde as frações mais leves do petróleo são separadas do asfalto por vaporização, fracionamento e condensação.

É comum encontrar na literatura diferentes termos para designar o material proveniente do petróleo que é utilizado como ligante para os agregados na pavimentação asfáltica. Enquanto na literatura norte americana o ligante asfáltico é denominado *asphalt cement*, na literatura europeia é designado como *bitumen*. No Brasil, o ligante asfáltico é conhecido como cimento asfáltico de petróleo (CAP).

O ligante asfáltico é definido como uma complexa mistura de hidrocarbonetos derivada do petróleo e que apresenta comportamento termoviscoelástico, dependente da temperatura de serviço, do tempo de atuação de carga e da intensidade do carregamento. Embora esse material seja impermeável à água e pouco reativo, essas propriedades não o resguardam de sofrer um processo de envelhecimento por oxidação lenta devido ao contato com o ar e a água (BERNUCCI et al., 2010).

#### 2.1.1 Composição química e estrutura interna

A composição e a estrutura química de um ligante asfáltico são propriedades que regem fundamentalmente o comportamento reológico desse material (READ; WHITEOAK, 2003).

Em função da exploração de petróleo ser realizada em diversas localidades, esse produto apresenta variações em suas propriedades físicas e químicas. O ligante asfáltico, sendo um material derivado do petróleo, tem sua composição química dependente, portanto, da fonte de exploração do petróleo que o originou e do processo de destilação ao qual foi submetido (READ; WHITEOAK, 2003).

O cimento asfáltico de petróleo é uma dispersão coloidal de compostos de elevado peso molecular. Tanto o material disperso quanto

o solvente possuem, além de uma grande quantidade de hidrocarbonetos, compostos químicos contendo oxigênio, enxofre e nitrogênio. São presentes também traços de vanádio, níquel ferro, magnésio e cálcio (ROMBERG; NESMITH; TRAXLER, 1959).

Segundo Leite (1999), os CAPs são constituídos de 90 a 95% de hidrocarbonetos e 5 a 10% de heteroátomos, sendo que o número de átomos de carbono por molécula varia de 20 a 120.

Análises realizadas com ligantes asfálticos provindos de uma variedade de petróleos mostram que a maioria dos ligantes contém (READ; WHITEOAK, 2003):

- Carbono – 82 a 88%;
- Hidrogênio – 8 a 11%;
- Enxofre – 0 a 6%;
- Oxigênio – 0 a 1,5%;
- Nitrogênio – 0 a 1%.

Segundo a norma ASTM D 4124 (2009), é possível realizar a separação do CAP em quatro frações, denominadas: saturados, nafteno-aromáticos, polar-aromáticos (resinas) e asfaltenos. O método consiste inicialmente na precipitação dos asfaltenos, utilizando n-heptano como solvente e posteriormente na separação dos outros constituintes, que juntos correspondem ao grupo dos maltenos, por meio de cromatografia de adsorção.

Na Europa, o fracionamento químico utilizado é denominado SARA (saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos) e é semelhante ao proposto pela norma ASTM D 4124. Após a separação dos asfaltenos, o fracionamento dos maltenos é realizado por cromatografia de camada fina por ionização de chama (LEITE, 1999).

As principais características dos quatro grupos de componentes dos ligantes asfálticos são (READ; WHITEOAK, 2003; LEITE, 1999):

- Asfaltenos: São sólidos amorfos de coloração escura, insolúveis em n-heptano, constituídos de hidrocarbonetos naftênicos condensados e de cadeias saturadas curtas. São altamente polares, possuem peso molecular consideravelmente elevado e suas partículas abrangem tamanhos entre 5 e 30 nm. O teor de asfaltenos influencia significativamente as características reológicas de um ligante asfáltico: seu aumento tende a produzir um ligante que apresente maior viscosidade e ponto de

amolecimento, enquanto a medida de penetração é reduzida. Os asfaltenos constituem entre 5 e 25% do ligante asfáltico.

- Resinas: São compostos poliaromáticos sólidos ou semissólidos de coloração marrom escura, fortemente adesivos devido à sua polaridade. Possuem alto teor de heteroátomos e peso molecular inferior ao dos asfaltenos. São agentes dispersantes para os asfaltenos e, por isso, a proporção entre resinas e asfaltenos é responsável pelo tipo de estrutura interna apresentada pelo ligante asfáltico: Sol ou Gel.
- Aromáticos: São líquidos viscosos de coloração marrom escura, apresentam o menor peso molecular dentre os componentes do ligante e representam a maior parte do meio no qual os asfaltenos estão dispersos. Consistem em cadeias carbônicas apolares que possuem alta capacidade de dissolução para hidrocarbonetos de elevado peso molecular. Os aromáticos constituem entre 40 e 65% do ligante asfáltico.
- Saturados: São óleos viscosos apolares de coloração clara e peso molecular médio similar aos aromáticos. Seus componentes incluem saturados parafínicos e não-parafínicos, que consistem em cadeias lineares ou ramificadas de hidrocarbonetos alifáticos. Representam entre 5 e 20% do ligante asfáltico.

O modelo de Yen propõe que a estrutura interna do CAP pode ser considerada um sistema coloidal de asfaltenos, circundados por resinas que exercem a função de agentes dispersantes, dissolvidos em aromáticos e saturados (maltenos) (YEN, 1991 *apud*. LEITE, 1999).

Entretanto, pesquisas realizadas pelo *Strategic Highway Research Program* (SHRP) conduziram a um modelo da microestrutura do cimento asfáltico mais adequado para explicar o seu comportamento mecânico do que o tradicional modelo de micelas de Yen. Nesse modelo, nomeado *The Dispersed Polar Fluid Model* (DPF), o cimento asfáltico é considerado essencialmente um sistema monofásico, enquanto modelos coloidais o consideram um sistema bifásico, consistindo em uma fase contínua de baixa polaridade e uma fase dispersa (asfaltenos), de alta polaridade. De acordo com o modelo DPF, as propriedades mecânicas do cimento asfáltico não são dependentes da quantidade relativa de fases dispersas (asfaltenos) e contínuas (maltenos), mas sim da magnitude e dispersão dos pesos moleculares e das forças intermoleculares. A partir desse estudo, pôde-se gerar um

modelo matemático que descreve o comportamento viscoelástico linear de ligantes asfálticos em função de parâmetros de sua composição química (CHRISTENSEN; ANDERSON, 1992).

De acordo com Jones (1992), o cimento asfáltico é composto por apenas dois tipos funcionais de moléculas: polares e apolares. As moléculas polares e apolares constituem uma mistura homogênea, que não apresenta estruturas coloidais. As moléculas polares associam-se por meio de pontes de hidrogênio e ligações  $\pi$ - $\pi$  gerando redes tridimensionais que conferem ao cimento asfáltico suas propriedades elásticas. Já as moléculas apolares formam o corpo do material no qual a rede tridimensional se situa, contribuindo para as propriedades viscosas do cimento asfáltico. Uma vez que as ligações entre as moléculas polares são fracas (ao contrário das ligações covalentes que formam as moléculas), essas ligações são constantemente quebradas devido à submissão do cimento asfáltico a altas temperaturas ou a forças cisalhantes e são posteriormente reformuladas à medida que o material resfria ou que a força atuante cessa. A propriedade de formação e quebra de ligações entre as moléculas do cimento asfáltico é de grande importância para o entendimento das propriedades físicas desse material.

### **2.1.2 Envelhecimento do ligante asfáltico**

O cimento asfáltico está sujeito a um processo de envelhecimento durante a sua estocagem, manuseio, aplicação e serviço. Esse tipo de degradação se deve principalmente pela presença de oxigênio, pela exposição à radiação solar e por variações de temperatura. Ocorrem alterações nas características químicas e reológicas do ligante asfáltico, resultando em aumento de sua consistência e, conseqüentemente, em maior rigidez da mistura asfáltica. Isso torna os revestimentos asfálticos muito mais suscetíveis a fissuras e provoca a redução da vida útil do pavimento (TONIAL, 2001).

Segundo Read e Whiteoak (2003), quatro mecanismos são os principais responsáveis pelo envelhecimento do cimento asfáltico:

- **Oxidação:** A oxidação é considerada a principal causa do envelhecimento de ligantes asfálticos. Por ser uma substância orgânica, o cimento asfáltico é lentamente oxidado quando em contato com o oxigênio atmosférico. São formados grupos polares contendo oxigênio e esses tendem a se associar em micelas de elevado peso molecular, aumentando a viscosidade

do ligante e tornando-o menos flexível. O grau de oxidação é significativamente dependente da temperatura, do tempo e da espessura da película de ligante.

- Perda de voláteis: A evaporação de componentes voláteis depende majoritariamente da temperatura e das condições de exposição. O envelhecimento resultante da perda de voláteis é reduzido, já que os CAPs não são materiais voláteis.
- Endurecimento físico: Esse mecanismo de envelhecimento ocorre quando o ligante asfáltico está à temperatura ambiente e é atribuído à reorientação de suas moléculas e à lenta cristalização de parafinas. O endurecimento físico é reversível – sob aquecimento, o ligante retorna à sua viscosidade original.
- Endurecimento exsudativo: Sua ocorrência se deve ao movimento de componentes oleosos do ligante asfáltico para os agregados minerais. São fatores determinantes tanto a tendência de exsudação do ligante asfáltico quanto a porosidade dos agregados.

No processo de envelhecimento, a alteração da estrutura química do ligante asfáltico ocorre tanto em curto prazo (usinagem, manuseio e aplicação) quanto em longo prazo (serviço). O endurecimento é resultante da oxidação parcial dos aromáticos, que por sua vez se transformam em resinas; as resinas de maior peso molecular se transformam em asfaltenos e o teor de saturados se mantém praticamente inalterado (TONIAL, 2001).

Existem ensaios normatizados com o intuito de simular em laboratório e quantificar os efeitos causados pela temperatura e pelo ar ao ligante asfáltico, em diferentes estágios ao longo de sua vida útil.

O ensaio de envelhecimento em estufa de filme fino rotativo (RTFOT – *Rolling Thin-Film Oven Test*), cujos procedimentos são descritos na ASTM D 2872 (2012), foi desenvolvido para simular precisamente os efeitos da temperatura e do ar durante a usinagem a quente da mistura asfáltica. A partir desse ensaio, é possível monitorar em que condições o ligante asfáltico se encontra imediatamente antes de ser incorporado no pavimento. Esse teste também permite determinar a variação da massa do filme de ligante utilizado, o que representa uma medida da volatilidade do material.

Simular o envelhecimento do CAP a longo prazo em campo tem-se mostrado uma tarefa dificultosa em virtude do grande número de variáveis que podem influenciar no envelhecimento do ligante. A

especificação Superpave® utiliza o ensaio em estufa de filme fino rotativo (RTFOT) para simular o envelhecimento do ligante asfáltico a curto prazo e posteriormente utiliza um vaso de pressão de envelhecimento (PAV – *Pressure Aging Vessel*) com o propósito de simular o envelhecimento durante a vida em serviço do pavimento. São preconizados na norma ASTM D 6521 (2013) os procedimentos de ensaio para simular o envelhecimento a longo prazo com o vaso de pressão (READ; WHITEOAK, 2003).

### **2.1.3 Especificação Superpave® para caracterização de ligantes asfálticos**

O *Strategic Highway Research Program* (SHRP), cujo início se teve no ano de 1987 nos Estados Unidos, foi um plano de estudos com o intuito de construir pavimentos que apresentassem bom desempenho em serviço. Em decorrência desse programa de pesquisa, novas especificações e métodos de avaliação para ligantes asfálticos foram propostos, baseados em parâmetros de desempenho. Fundamentados nos ensaios tradicionais de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade, foram elaborados novos tipos de ensaios que avaliam as propriedades reológicas do ligante asfáltico e as associam aos mecanismos de ruptura do pavimento. Dessa forma, é possível estimar o potencial de contribuição do ligante asfáltico frente à deformação permanente, à falha por fadiga e ao trincamento por baixas temperaturas (BERNUCCI et al., 2010; READ; WHITEOAK, 2003).

Nessa especificação, os requisitos das propriedades físicas e viscoelásticas são constantes para todos os ligantes. O fator que classificará o ligante é a temperatura em que os resultados dos ensaios atendem aos requisitos estabelecidos. Os ligantes são agrupados de acordo com seu grau de desempenho (PG – *Performance Grade*) em uma faixa de temperatura, como por exemplo, um ligante com PG 64-22 apresenta propriedades físicas satisfatórias na faixa de temperatura entre -22°C e 64°C (MAGALHÃES, 2004).

Entretanto, no caso de ligantes modificados, a aplicabilidade das especificações Superpave® e dos métodos de ensaio propostos não foi validada. Isso se dá pelo fato do programa de pesquisa SHRP ter concentrado seus estudos quase que exclusivamente para cimentos asfálticos não modificados. Como resultado, a especificação não caracteriza adequadamente o desempenho dos ligantes asfálticos modificados e, na maior parte dos casos, o desempenho potencial do ligante é subestimado (BAHIA et al., 2001).

## 2.2 LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS

No âmbito de melhorar o desempenho das misturas asfálticas e aumentar o tempo de vida útil dos pavimentos, que sofrem degradação acelerada em virtude do crescente tráfego rodoviário e da deficiência em manutenções, se faz necessário o estudo de novas tecnologias que garantam as exigências técnicas durante o período de projeto das rodovias.

Atualmente, a aplicação de agentes modificadores no ligante asfáltico tem sido foco de diversos estudos, devido à capacidade de melhorar importantes propriedades que influenciam no desempenho das misturas de concreto asfáltico utilizadas em pavimentos, tanto a baixas, intermediárias ou altas temperaturas.

No presente trabalho, serão abordados três tipos de agentes modificadores para o cimento asfáltico: polímeros, borracha moída de pneu e nanomateriais.

### 2.2.1 Polímeros

Quando as moléculas se tornam muito grandes, contendo um elevado número de átomos encadeados, essas moléculas passam a apresentar propriedades diferenciadas e são nomeadas de macromoléculas. Essas propriedades demonstram intensa dependência das interações envolvendo segmentos intramoleculares e intermoleculares, ao contrário das micromoléculas, que dependem mais da natureza química dos átomos e dos grupamentos funcionais presentes em suas cadeias (MANO; MENDES, 2004).

A forma e o comprimento das ramificações presentes nas cadeias das macromoléculas exercem mudanças no que diz respeito à mobilidade das cadeias. Uma vez que as moléculas apresentam ramificações, o efeito sobre o aumento da viscosidade é prejudicado, devido à incapacidade de empacotamento das mesmas. Já no caso de micromoléculas, esse fenômeno não é observado. Ligações hidrogênicas, interações dipolo-dipolo e forças de Van der Waals, que atuam nas macromoléculas no estado sólido, são responsáveis por um pronunciado aumento da viscosidade. (MANO; MENDES, 2004).

Polímeros são macromoléculas que apresentam entidades estruturais denominadas como unidades “mero”. Essas unidades químicas estão ligadas entre si por meio de ligações interatômicas covalentes e se repetem sucessivamente ao longo da cadeia principal.

Quando as unidades químicas repetidas são do mesmo tipo, o polímero formado por elas é chamado de homopolímero. Caso as cadeias sejam compostas por duas ou mais unidades mero diferentes, o polímero formado é considerado um copolímero (CALLISTER, 2002).

Os copolímeros podem apresentar diferentes arranjos de formação de sequências ao longo de suas cadeias. Essa característica do material depende tanto do processo de polimerização quanto das frações relativas desses tipos de mero. Quando as duas unidades mero diferentes estão dispersas aleatoriamente ao longo da cadeia, o material é denominado copolímero aleatório. Caso as duas unidades mero alternem as suas posições na cadeia com perfeita regularidade, o copolímero é chamado de alternado. Um copolímero em bloco apresenta aglomerados de unidades químicas iguais, que se alternam sequencialmente (CALLISTER, 2002).

De acordo com Askeland e Phulé (2008), os polímeros podem ser classificados em três principais categorias em termos de seu comportamento mecânico e térmico:

- Os polímeros termoplásticos apresentam comportamento mecânico plástico e dúctil. Suas cadeias podem ou não ter ramificações e suas cadeias individuais podem estar entrelaçadas fisicamente. Amolecem e fundem sob aquecimento e posteriormente podem solidificar por resfriamento, em um processo reversível.
- Os polímeros termorrígidos são compostos por longas cadeias de moléculas que formam redes tridimensionais, em decorrência da grande quantidade de ligações cruzadas. Quando aquecidos, os termorrígidos não se fundem, mas começam a se degradar.
- Elastômeros são conhecidos como borrachas. São polímeros termoplásticos ou termorrígidos ligeiramente reticulados e que produzem grandes deformações elásticas, mesmo sob pequenos níveis de tensão.

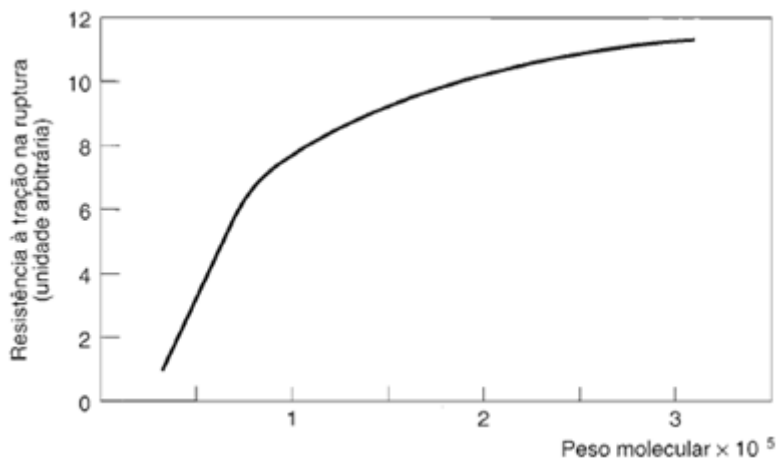
Na sequência, serão descritas características importantes que influenciam nas principais propriedades mecânicas dos polímeros.



### 2.2.1.1 Peso Molecular

As propriedades especiais apresentadas pelos polímeros não começam a surgir em um peso molecular definido. Nota-se que, para valores de peso molecular maiores que 1000, as moléculas começam a apresentar propriedades que se tornam cada vez mais evidentes à medida que se aumenta o peso molecular. A Figura 1 demonstra como o peso molecular influencia nas propriedades do material polimérico. Quando o peso molecular é relativamente baixo, o aumento do mesmo resulta em uma considerável variação da propriedade analisada. À medida que o peso molecular torna-se mais elevado, seu aumento não produz o mesmo efeito sob a propriedade do material polimérico, caracterizando a insensibilidade da propriedade ao tamanho molecular quando este se torna suficientemente grande (MANO; MENDES, 2004).

Figura 1 - Variação da resistência mecânica dos polímeros em função do peso molecular.



Fonte: Mano e Mendes (2004).

Quanto às propriedades afetadas pela variação do peso molecular médio, pode ser esperado um aumento na viscosidade das soluções, na resistência à tração, ao impacto, ao calor e a solventes. A magnitude do módulo de tração não demonstra ser afetada diretamente pela variação do peso molecular, mas sim o limite de resistência à tração, que consiste no nível de tensão o qual ocorre a fratura do material. Isso se deve ao aumento do número de embaraços e entrelaços

na cadeia, decorrente do aumento do peso molecular médio (CALLISTER, 2002; MANO; MENDES, 2004).

### 2.2.1.2 Forma, Estrutura e Configuração Molecular

As formas, as estruturas e as configurações apresentadas pelas moléculas de polímeros são características que atuam em conjunto e que influenciam de maneira significativa as propriedades do material.

As cadeias moleculares podem se contorcer, espiralar e se dobrar. Algumas das características mecânicas e térmicas dos polímeros dependem da capacidade dos segmentos da cadeia de exercer uma rotação em resposta a aplicações de tensões ou a vibrações térmicas. A flexibilidade rotacional depende da estrutura do mero: segmentos de cadeia podem apresentar ligações rígidas que restrinjam movimentos de rotação. O mesmo acontece quando há presença de grupos laterais volumosos (CALLISTER, 2002).

As estruturas moleculares podem ser lineares, ramificadas, com ligações cruzadas e em rede. Os polímeros lineares apresentam cadeias únicas, em que seus meros estão unidos ponta a ponta. A linearidade das cadeias permite que existam grandes quantidades de ligações de van der Waals entre as cadeias. Já os polímeros ramificados apresentam ramificações laterais conectadas às cadeias principais. Essas ramificações atrapalham a aproximação dos segmentos de cadeia e, por isso, atuam como plastificantes internos, resultando na diminuição da densidade do polímero. As cadeias lineares adjacentes podem também estar unidas umas às outras em diversas posições por meio de ligações covalentes, denominadas ligações cruzadas. Em situações que existam muitas ligações cruzadas entre as cadeias, ocorre a formação de redes tridimensionais, caracterizando assim um polímero em rede (CALLISTER, 2002; MANO; MENDES, 2004).

### 2.2.1.3 Grau de Cristalinidade

Para que os polímeros apresentem resistência mecânica satisfatória, suas macromoléculas devem estar posicionadas ordenadamente, assumindo conformações favoráveis à disposição de estruturas repetidas, e não apenas um embaraçamento aleatório das cadeias (MANO; MENDES, 2004).

A cristalinidade pode ser definida como sendo o empacotamento de cadeias moleculares de modo tal a produzir uma matriz atômica ordenada. No caso de polímeros, devido à complexidade

e tamanho de suas moléculas, esses materiais existem em estado amorfo ou cristalino e, na maioria dos casos, a estrutura polimérica se demonstra parcialmente cristalina (semicristalina). Quando semicristalino, o polímero apresenta regiões cristalinas dispersas no interior do material amorfo restante. Como a torção, a contorção e o espiralamento são condições comuns ao longo das cadeias poliméricas, a correta ordenação de todos os segmentos de todas as cadeias é restrita. Qualquer desordem ou falta de alinhamento entre as cadeias irá resultar em uma região amorfa (CALLISTER, 2002).

A influência da cristalinidade sobre as propriedades mecânicas dos polímeros se dá por meio da grande extensão de ligações secundárias intermoleculares evidenciadas nas regiões cristalinas, onde as cadeias se encontram densamente compactadas em um arranjo ordenado e paralelo. Nas regiões amorfas, essas ligações secundárias estão muito menos presentes, em decorrência do desalinhamento das cadeias. Como consequência, quanto maior for o grau de cristalinidade do polímero, mais significativo será o aumento de seu módulo de tração e maior será a tendência do material sofrer ruptura frágil (CALLISTER, 2002).

#### 2.2.1.4 Polímeros Utilizados na Pavimentação Asfáltica

Na pavimentação asfáltica, alguns polímeros merecem destaque em decorrência de suas características de miscibilidade na matriz asfáltica e da capacidade de reforço apresentada pelos mesmos (LEITE, 1999):

- SBS: Correspondem a copolímeros em bloco de estireno e butadieno, que apresentam características de elastômeros termoplásticos, escoando livremente quando aquecidos e demonstrando resistência mecânica e resiliência satisfatórias à temperatura ambiente. A capacidade de escoamento do SBS a altas temperaturas é um aspecto favorável no momento da mistura com o ligante asfáltico, por não promover um aumento significativo da viscosidade. Quando o SBS é disperso adequadamente em um cimento asfáltico compatível, o ligante modificado apresenta propriedades reológicas superiores em relação ao ligante convencional.
- SBR: São copolímeros aleatórios de estireno e butadieno que apresentam propriedades elastoméricas e boa compatibilidade

com os cimentos asfálticos. A dispersão do SBR na matriz asfáltica é facilitada por esse material se apresentar sob forma de látex. Devido ao elevado peso molecular desse material polimérico, o aumento da viscosidade do ligante modificado limita a incorporação de SBR à matriz asfáltica em aproximadamente 3%. Por isso, a melhoria das propriedades mecânicas proveniente da modificação com SBR é inferior quando comparada à incorporação de SBS.

- EVA: São copolímeros de etileno e acetato de vinila, cujo teor de acetato rege o comportamento apresentado por esse material. Isso porque o teor de acetato influencia na cristalinidade do EVA: a redução do teor de acetato de vinila resulta em um comportamento plastomérico do polímero e, conseqüentemente, no aumento da cristalinidade, da rigidez, das temperaturas de amolecimento e de fusão; por outro lado, quanto maior o teor de acetato, maior será o caráter amorfo do polímero, sendo que suas propriedades se aproximam às de um elastômero.

Muitos estudos já foram realizados utilizando esses polímeros como modificadores dos ligantes asfálticos. As alterações das propriedades dos ligantes serão tratadas na seção seguinte.

### **2.2.2 Ligantes Asfálticos Modificados por Polímeros**

A incorporação do polímero na matriz asfáltica pode ser realizada de três maneiras (LEITE, 1999):

- Produção do cimento asfáltico modificado em uma refinaria e posterior transporte do produto para a usina de asfalto;
- Preparo do ligante modificado em um misturador auxiliar na usina de asfalto;
- Incorporação do polímero diretamente na mistura asfáltica, durante o processo de mistura entre o ligante asfáltico e os agregados.

A escolha do método de incorporação depende das condições locais e do tipo de polímero. A incorporação do polímero ao ligante asfáltico realizada em refinaria reflete em melhor controle de qualidade e melhor dispersão do agente modificador na matriz asfáltica. No caso de polímeros que sejam difíceis de compatibilizar e instáveis

termicamente, a incorporação deve ser realizada imediatamente antes da aplicação do asfalto modificado, a fim de evitar decomposição e/ou separação de fases (LEITE, 1999).

A compatibilização entre o polímero e o ligante asfáltico é um ponto fundamental para que ocorram melhorias das propriedades desejadas, a fim de garantir o desempenho satisfatório do material. A compatibilidade é considerada um fator determinante durante o transporte, estocagem e aplicação do ligante asfáltico modificado (MORILHA, 2004).

De acordo com Read e Whiteoak (2003), no caso específico de modificação de ligantes asfálticos utilizando elastômeros termoplásticos do tipo SBS, a qualidade da dispersão atingida é influenciada por três fatores: a constituição do ligante asfáltico, o tipo e concentração de polímero e a taxa de cisalhamento aplicada pelo misturador.

Segundo Leite (1999), a granulometria do polímero também é uma característica importante no processo de mistura, já que o tempo de preparo do ligante pode ser reduzido utilizando um agente modificador de granulometria fina.

Na Tabela 1 podem ser visualizadas as especificações técnicas para ligantes modificados por polímeros comercializados no Brasil.

Tabela 1 - Especificações técnicas para ligante modificado por polímero.

<b>GRAU (ponto de amolecimento mín./Recuperação elástica mín.)</b>		<b>55/75</b>	<b>60/85</b>	<b>65/90</b>
<b>Ensaio na amostra virgem</b>	<b>Método ABNT</b>	<b>Limite de especificação</b>		
Penetração, (100g, 25°C, 5s), 0,1mm	NBR 6576	45 a 70	40 a 70	40 a 70
Ponto de amolecimento mín., °C	NBR 6560	55	60	65
Ponto de fulgor, mín.	NBR 11341	235	235	235
Viscosidade Brookfield a 135°C (spindle 21, 20 rpm, máx.), cP	NBR 15184	3000	3000	3000
Viscosidade Brookfield a 150°C (spindle 21, 50 rpm, máx.), cP	NBR 15184	2000	2000	2000
Viscosidade Brookfield a 175°C (spindle 21, 100 rpm, máx.), cP	NBR 15184	1000	1000	1000
Ensaio de separação de fase, máx., °C	NBR 15166	5	5	5
Recuperação Elástica a 25°C, 20cm, mín., %	NBR 15086	75	85	90
<b>Ensaio no resíduo RTFOT</b>				
Varição de massa máx., %	NBR 15235	1	1	1
Varição do PA, °C máx.	NBR 6560	-5 a +7	-5 a +7	-5 a +7
Porcentagem da penetração original, mín.	NBR 6576	60	60	60
Porcentagem de recuperação elástica original a 25°C, mín.	NBR 15086	80	80	80

Fonte: ANP (2005 *apud* Greca Asfaltos, 2016).

Zegarra (2007) comparou o desempenho de três diferentes ligantes asfálticos peruanos, dois modificados por polímeros do tipo SBS (Tipo I 60/60 e PG 76-22) e um convencional (PEN 60/70). Para isso, realizou testes convencionais para caracterizar as propriedades dos três ligantes, antes e após envelhecimento. Os resultados mostraram que os ligantes asfálticos retêm mais as suas propriedades (penetração, ponto

de amolecimento, recuperação elástica) após o envelhecimento a curto prazo.

Leite (1999) estudou a formulação, o preparo e a caracterização de asfaltos modificados com diferentes polímeros a partir de petróleos brasileiros. Foram preparadas e avaliadas formulações de asfaltos modificados por SBS, EVA, SBR, PE (poliestireno) e borracha moída de pneu. Alguns pontos principais podem ser destacados da pesquisa de Leite (1999):

- Os asfaltos modificados por SBS apresentaram maior resistência ao envelhecimento, devido à redução do tempo de mistura à alta temperatura com a utilização de equipamentos de alto cisalhamento.
- A resistência ao envelhecimento de asfaltos modificados por SBS é menor do que asfaltos modificados por EVA, em virtude da degradação térmica do polímero, que resulta na perda de elasticidade do ligante.
- Quanto aos asfaltos modificados por EVA, esses apresentam boa compatibilidade e propriedades reológicas satisfatórias. A mistura pode ser realizada com o uso do polímero em grânulos, de agitação de baixo cisalhamento, de baixa temperatura e de tempo de agitação inferior ao empregado na modificação por SBS. Por ser um copolímero plastomérico, o EVA não confere tão boas propriedades de resistência à fadiga e retorno elástico ao asfalto modificado como o copolímero de SBS, mas apresenta excelente resistência ao envelhecimento, mantendo boa resistência à deformação permanente mesmo após o envelhecimento no RTFOT.
- Os asfaltos modificados por SBR, além de dispensarem a utilização de equipamentos com agitação de alto cisalhamento, necessitaram de tempos relativamente curtos para incorporação adequada do polímero. A elasticidade demonstrada pelos ligantes modificados por SBR foi satisfatória, sendo superada apenas pela elasticidade dos ligantes modificados por SBS.
- As condições operacionais de preparo de asfalto modificado por poliestireno são mais flexíveis quando comparadas às empregadas com SBS. Não há necessidade de utilização de equipamentos sofisticados para que o ligante modificado apresente compatibilidade e propriedades reológicas satisfatórias. A incorporação de PE confere ao asfalto baixa

viscosidade a 135°C e maior ponto de amolecimento, sem a adição de diluentes.

Dong et al. (2014) estudaram as propriedades de cimentos asfálticos modificados por polímeros, com o intuito de investigar os efeitos causados pelas diferentes composições dos ligantes utilizados e pelos diferentes teores e estruturas dos polímeros SBS incorporados. Os resultados obtidos indicaram que a composição do asfalto interfere na dispersão do polímero SBS na matriz asfáltica, em virtude, principalmente, do teor de asfaltenos e de aromáticos. Tanto o aumento do teor de asfaltenos quanto a redução do teor de aromáticos prejudicam a compatibilidade entre o polímero e o ligante. No mesmo estudo, foi observado que a relação estireno/butadieno do polímero SBS também influencia na dispersão do mesmo na matriz asfáltica. A relação estireno/butadieno de 30/70 se mostrou a mais eficaz no que diz respeito à compatibilização do polímero com o cimento asfáltico, além de conferir à mistura melhoria em suas propriedades (aumento do ponto de amolecimento e da viscosidade).

O teor de SBS incorporado ao cimento asfáltico também produz grande efeito na dispersão do SBS e no desempenho do ligante modificado. Menores teores de SBS (1 a 3%) conduzem a misturas mais compatíveis, maior dispersão do polímero na matriz asfáltica, mas não conferem vantagens significativas ao desempenho do ligante modificado. Já para teores elevados de SBS, a dispersão do polímero é prejudicada, embora o ligante modificado apresente aumento do ponto de amolecimento e da viscosidade e redução da penetração e da ductilidade (DONG et al., 2014).

Alatas e Yilmaz (2013) estudaram os efeitos causados pela incorporação de polímeros SBS e EVA nas propriedades reológicas e mecânicas de cimentos asfálticos. O cimento asfáltico utilizado como referência foi modificado por dois tipos de SBS (Kraton D 1101 e Kraton MD 243) e um tipo de EVA (Evatane<sup>®</sup> 2805), sendo que o teor de polímero incorporado nas três misturas foi de 4%. Ensaios realizados com o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) mostraram que a adição de 4% de todos os três polímeros em questão conduziu ao aumento do grau a alta temperatura para PG 70-Y. Já os ensaios com o reômetro de viga à flexão evidenciaram o melhor comportamento a baixas temperaturas dos ligantes modificados por SBS frente ao ligante modificado por EVA: os dois ligantes modificados por SBS apresentaram PG 70-34, enquanto o ligante modificado por EVA apresentou PG 70-28. Foram realizados ensaios de viscosidade a 135°C



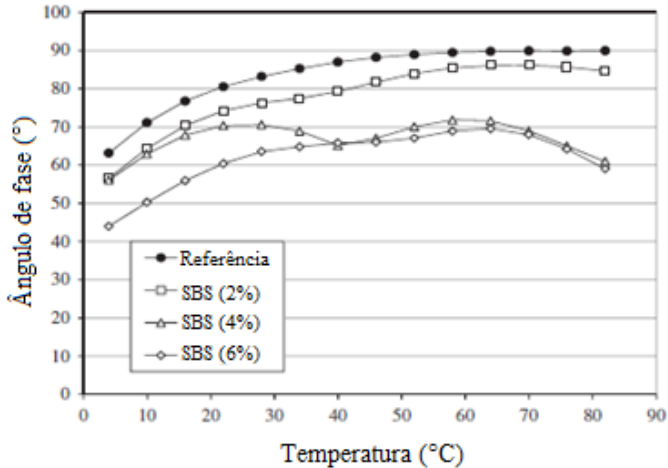
e 165°C com o auxílio do viscosímetro rotacional Brookfield, cujos resultados demonstraram que a adição dos polímeros aumentou a viscosidade dos ligantes e, conseqüentemente, as temperaturas necessárias para usinagem e compactação das misturas asfálticas.

Bringel (2007) estudou os efeitos da adição de polímeros e aditivos nas propriedades químicas e reológicas do ligante asfáltico. Por meio da construção de curvas mestras na temperatura de referência em 25°C, verificou-se que o efeito mais significativo da incorporação de polímeros SBS (4,5%) e EVA (4%, juntamente com a incorporação de 2% de cal hidratada) ao asfalto é a melhoria da elasticidade. Foi observado um aumento considerável no módulo complexo de cisalhamento ( $G^*$ ) em baixas frequências e um pequeno decréscimo no  $G^*$  em frequências mais altas. Em temperaturas mais elevadas, pôde-se notar uma redução significativa do parâmetro reológico  $\tan \delta$  dos ligantes modificados, tanto por EVA quanto por SBS, indicando que os polímeros proporcionam elasticidade ao ligante asfáltico. Além disso, a curva mestra da  $\tan \delta$  evidenciou a formação de um platô nas curvas correspondentes aos ligantes modificados por SBS e EVA, durante a faixa intermediária de frequência angular. Isso pode ser atribuído à constituição de uma rede polimérica no ligante asfáltico.

Estudos realizados por Cardone et al. (2014) mostraram a influência da modificação de asfaltos por polímeros SBS e PO (poliolefina) nas propriedades reológicas desses materiais. Foram utilizados teores de 2, 4 e 6% dos polímeros em questão. Com o auxílio do DSR, medidas dos parâmetros reológicos mostraram que a presença de uma rede de polímeros no ligante asfáltico conduz ao aumento da rigidez e das propriedades elásticas do material, assim como à redução da susceptibilidade térmica. A incorporação de SBS resultou em melhorias graduais das características do ligante asfáltico, à medida que o teor de polímero aumentava. Para a incorporação de poliolefina, foi observado que a utilização de um alto teor de polímero (6%) é necessária para se tenha uma melhoria significativa do desempenho do ligante asfáltico modificado. Além disso, a partir das curvas de módulo complexo e ângulo de fase, apresentadas na Figura 2 e na Figura 3, em função da temperatura (frequência constante de 1 rad/s), pôde-se notar que a formação da rede polimérica torna-se evidente à altas temperaturas, devido à redução da viscosidade do ligante asfáltico.

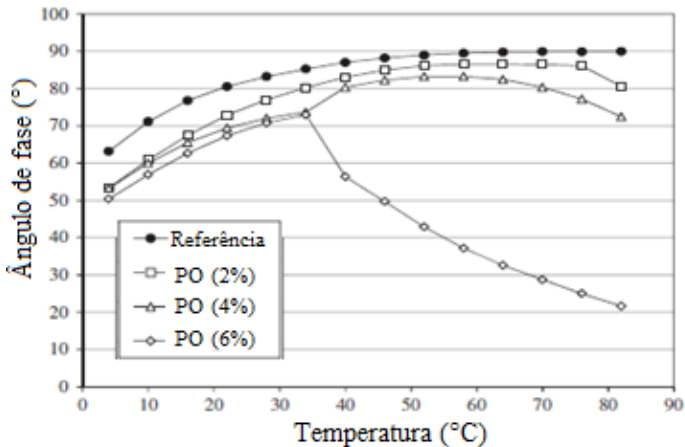
Essa redução na viscosidade permite que a rede elástica de polímeros possa influenciar nas propriedades mecânicas e reológicas do ligante asfáltico modificado (CARDONE et al, 2014).

Figura 2 - Ângulo de fase *versus* Temperatura para ligante modificado por SBS.



Fonte: Adaptado de Cardone et al. (2014).

Figura 3 - Ângulo de fase *versus* Temperatura para ligante modificado por PO.



Fonte: Adaptado de Cardone et al. (2014).

### 2.2.3 Borracha Moída de Pneu

Os pneus usados por automóveis e caminhões podem ser transformados mecanicamente em fragmentos e posteriormente reduzidos a pó, correspondendo a um material interessante ao reaproveitamento por diferentes indústrias. Aliado a isso, a coleta e

destino adequados de pneus inservíveis representam uma forma de preservação do meio ambiente, contribuindo com a saúde pública (FONTES, 2008).

De acordo com a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos - ANIP (2015), aproximadamente 69 milhões de unidades de pneus, englobando diversas categorias (passeio, carga, moto, avião), foram produzidos no ano de 2014. Em contrapartida, 445 mil toneladas de pneus inservíveis, equivalente a 89 milhões de unidades de pneus de carros de passeio, foram retirados das ruas, estradas e rios e destinados de forma ambientalmente correta.

Segundo Andrietta (2002), a borracha é o principal constituinte do pneu, representando aproximadamente 40% de sua massa. Dentro desse percentual, existe uma proporção entre borracha natural – polímero natural poli(cis-isopreno) (*NR - Natural Rubber*), extraído da seringueira – e borracha sintética – polímeros SBR de vários tipos, derivados do petróleo ou do gás natural.

A proporção entre borracha natural e borracha sintética varia de acordo com o tipo de pneu: a borracha natural é predominante nos pneus de caminhões em relação à borracha sintética, devido à sua maior resistência a cortes e lacerações; já a borracha sintética é presente em maior quantidade nos pneus de veículos leves, em razão de sua melhor resistência à abrasão e ao envelhecimento (ANIP, 2015).

Destaca-se também a presença de negro de fumo – ou carbono amorfo – que confere à borracha características anti-oxidantes e melhorias na resistência mecânica, durabilidade e desempenho. Essas características, provenientes da adição de negro de fumo à borracha, são transferidas ao ligante asfáltico, produzindo um material mais resistente ao envelhecimento e com maior resistência à fissuração (SPECHT, 2004; ANDRIETTA, 2002).

A composição dos pneus de veículos leves e de caminhões pode ser visualizada na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição típica em massa de um pneu.

<b>Componente</b>	<b>Veículo Leve (%)</b>	<b>Caminhão (%)</b>
Borracha natural	14	27
Borracha sintética	27	14
Negro de fumo	28	28
Aço	14 a 15	14 a 15
Tecidos, fílers, aceleradores, etc.	16 a 17	16 a 17

Fonte: Adaptado de RMA (2005).

### 2.2.4 Ligantes Asfálticos Modificados por Borracha Moída de Pneu

A borracha moída de pneu pode ser incorporada na mistura asfáltica de duas maneiras distintas: processo úmido e processo seco. No processo úmido, o cimento asfáltico e a borracha moída de pneu são misturados a elevadas temperaturas durante o tempo de reação previamente estabelecido e, posteriormente, o produto resultante, denominado asfalto-borracha, é adicionado aos agregados minerais. No processo seco, a borracha moída é considerada parte do agregado pétreo da mistura e é adicionada aos agregados antes da incorporação do ligante asfáltico (BERNUCCI et al., 2010; FONTES, 2009).

O ligante modificado por borracha moída de pneu por via úmida pode ser estocável ou não estocável, dependendo do seu processo de fabricação. No sistema não-estocável (*continuous blending*), a borracha é adicionada ao ligante asfáltico na própria obra, com o auxílio de um equipamento misturador. Devido à instabilidade do asfalto-borracha produzido, o ligante modificado deve ser aplicado imediatamente após sua produção. No sistema estocável (*terminal blending*), a borracha moída de pneu, é incorporada ao ligante asfáltico em uma refinaria ou terminal especial, produzindo um ligante relativamente homogêneo e que pode ser estocado em tanques por períodos de tempo mais longos, desde que esteja sob condições de temperatura e agitação adequadas. Durante o processo de fabricação do asfalto-borracha estocável, o operador retira amostras de ligante e realiza ensaios de solubilidade, a fim de garantir que a digestão da borracha se dê por completa. Quanto maior for a fração de borracha digerida pelo ligante asfáltico, maiores serão os benefícios às propriedades do ligante modificado, como por exemplo a elasticidade (HICKS; CHENG; DUFFY, 2010; MORILHA, 2004; FONTES, 2009).

A Figura 4 expõe a diferença aparente entre os ligantes provenientes do sistema estocável (à direita) e do sistema não-estocável (à esquerda).

Figura 4 - Diferença aparente entre asfalto-borracha estocável (à direita) e asfalto-borracha não-estocável (à esquerda).



Fonte: Hicks, Cheng e Duffy (2010).

Dantas Neto et al. (2003) estudaram o efeito da quantidade de borracha adicionada ao ligante asfáltico. Maiores teores de borracha moída incorporada no ligante convencional conduzem à produção de ligantes modificados que apresentam maior viscosidade rotacional, para todos os tempos de reação investigados.

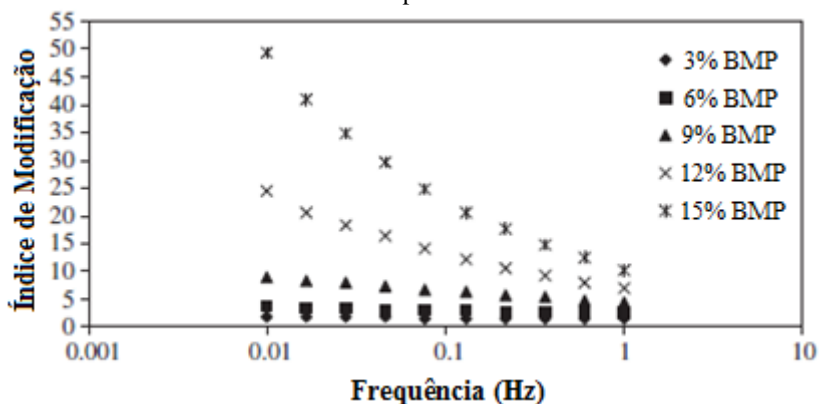
Fontes (2009) estudou as propriedades e o desempenho mecânico de misturas asfálticas produzidas com asfalto-borracha brasileiro e português, com o objetivo de aperfeiçoar uma mistura para que apresentasse melhor capacidade estrutural. Em relação ao ponto de amolecimento, a adição de borracha promoveu o aumento de, aproximadamente, 16°C nessa propriedade, relativamente ao ligante asfáltico convencional. Enquanto o ligante convencional não demonstrou recuperação elástica, a incorporação de borracha levou à recuperação elástica de 28%, para ambos ligantes modificados. Após o ensaio RTFOT, o asfalto-borracha não teve suas propriedades alteradas de forma impactante: o ponto de amolecimento sofreu um pequeno aumento para os dois asfaltos-borracha e a reduzida perda de massa mostrou que a incorporação de borracha assegurou a fixação dos

aromáticos durante o processo de envelhecimento. Não obstante, foi observado aumento da resiliência devido à interação entre as moléculas de borracha e de ligante, proporcionada pela continuidade do processo de fusão.

Para o aperfeiçoamento do ligante CAP 50/70 com borracha brasileira, produzido pelo sistema *continuous blend*, A análise dos resultados, realizada por Fontes (2009), levou à escolha do teor de borracha de 17% com um tempo de digestão de 90 minutos, para uma temperatura de 180°C. Quanto à análise do comportamento reológico dos ligantes estudados, foram elaboradas curvas mestras para cada ligante, tomando como referência a temperatura de 20°C. Analisando as curvas mestras em conjunto, observa-se que, para frequências inferiores a 10 Hz, o ligante convencional brasileiro CAP 50/70 apresenta os menores valores de módulo complexo, enquanto que o ligante português PEN 35/50, modificado por borracha criogênica portuguesa (*continuous blend*), apresenta os maiores valores de módulo complexo. Para frequências superiores a 10 Hz, as curvas mestras apresentam comportamentos semelhantes.

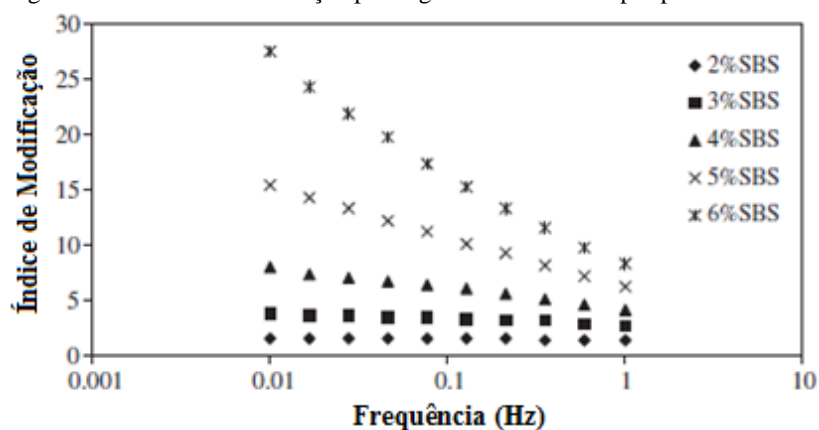
Kök e Çolak (2011) compararam as propriedades de ligantes modificados por SBS e por borracha moída de pneu. O ligante asfáltico convencional foi modificado por teores de 2, 3, 4, 5 e 6% de SBS e teores de 3, 6, 9, 12 e 15% de borracha moída de pneu, obtida pelo processo ambiente. Testes com o DSR foram executados sob as seguintes condições: varreduras de frequência entre 0,01 e 1 Hz e temperaturas entre 40 e 80°C. A partir dos resultados obtidos, foram calculados os índices de modificação dos ligantes modificados, que consistem da relação entre o módulo complexo do ligante modificado e o módulo complexo do ligante convencional, a 50°C. A influência da frequência no módulo complexo pode ser observada na Figura 5 e na Figura 6, as quais apresentam os efeitos benéficos de diferentes teores dos agentes modificadores.

Figura 5 - Índices de modificação para ligantes modificados por borracha moída de pneu.



Fonte: Adaptado de Kök e Çolak (2011).

Figura 6 - Índices de modificação para ligantes modificados por polímero SBS.



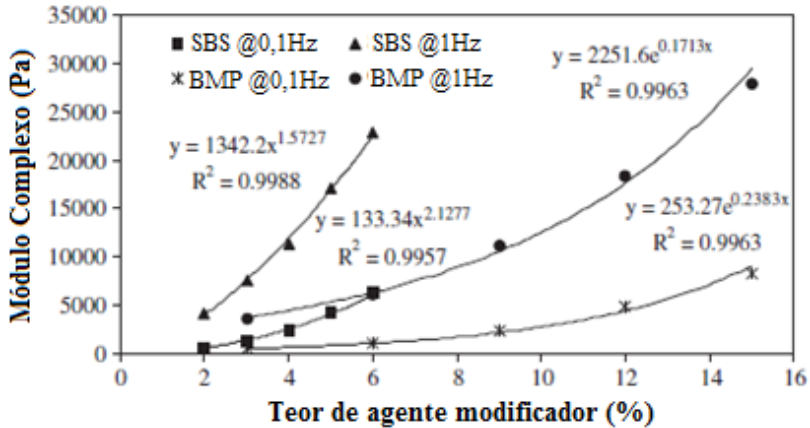
Fonte: Adaptado de Kök e Çolak (2011).

O módulo complexo de cisalhamento do ligante modificado com 5% de SBS foi quinze vezes e seis vezes maior que o módulo complexo do ligante convencional, para frequências de oscilação de 0,01 Hz e 1 Hz, respectivamente. Os valores correspondentes para o ligante modificado por 12% de borracha moída de pneu foram de vinte quatro vezes e seis vezes. Além disso, os resultados indicaram que ocorreram alterações consideráveis nos índices de modificação para

teores maiores que 4% de SBS e 9% de borracha. Por isso, esses valores podem ser considerados limiares da transição para ligantes de desempenho superior (KÖK; ÇOLAK, 2011).

As variações no módulo complexo de cisalhamento, promovidas pela incorporação de SBS e borracha moída de pneu ao ligante asfáltico, podem ser visualizadas para frequências de 0,1 Hz e 1 Hz na Figura 7.

Figura 7 - Variações no módulo complexo em decorrência da incorporação de diferentes teores de SBS e borracha moída de pneu.



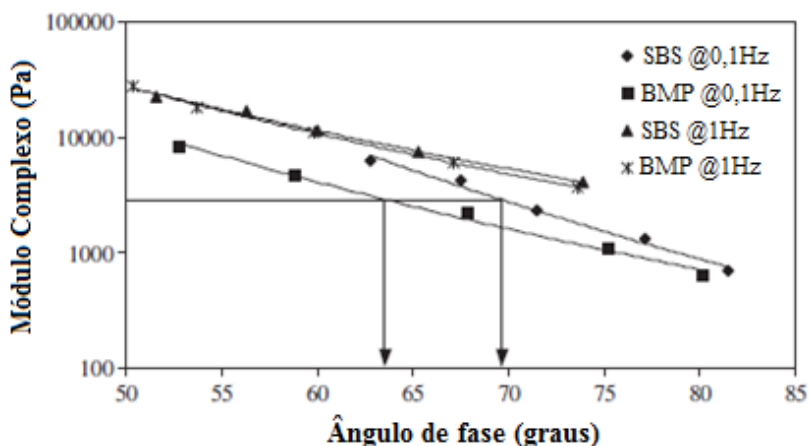
Fonte: Adaptado de Kök e Çolak (2011).

Os ensaios reológicos também demonstraram que os ângulos de fase, apresentados pelos ligantes modificados, diminuíram à medida que se aumentava a concentração de agentes modificadores. Para a frequência de oscilação de 1 Hz, as variações de módulo complexo e ângulo de fase, em decorrência da adição gradual de agentes modificadores, foram similares. Entretanto, para a frequência de oscilação de 0,1 Hz, foram notadas peculiaridades a respeito do ângulo de fase. Os ligantes modificados por borracha apresentaram menores ângulos de fase em relação aos ligantes modificados por SBS, sendo que os valores de módulo complexo se demonstraram semelhantes, entre os dois ligantes modificados. Para um módulo complexo de cisalhamento de 3 kPa, os ângulos de fase para os ligantes modificados por SBS e borracha foram, respectivamente, 69,8° e 63,5°. O reduzido ângulo de fase à baixa frequência, onde são típicos grandes carregamentos por parte dos veículos, indica uma resposta elástica mais efetiva. Portanto,



por apresentar menor ângulo de fase que o ligante modificado por SBS, o asfalto-borracha, com alto teor de incorporação, demonstrou comportamento mais flexível em baixas frequências, o que pode ser considerado um benefício potencial na resistência à deformação. As variações no ângulo de fase e no módulo complexo, pela incorporação gradual de agente modificador, estão expostas na Figura 8 (KÖK; ÇOLAK, 2011).

Figura 8 - Variação no módulo complexo e no ângulo de fase dos ligantes modificados.

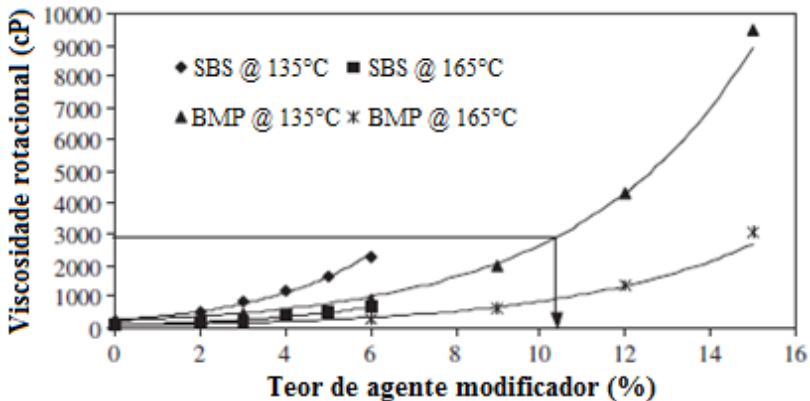


Fonte: Adaptado de Kök e Çolak (2011).

Os resultados de viscosidade rotacional mostraram que a incorporação de modificadores causou um aumento exponencial dessa propriedade. Teores de incorporação de borracha superiores a 10% induziram a um aumento excessivo da viscosidade rotacional, excedendo o limite de 3.000 cP, estabelecido pela especificação Superpave. Foi determinado que os teores de incorporação de SBS e borracha correspondentes à viscosidade de 3.000 cP foram de 6,7 e 10,5%, respectivamente. Comparando os módulos complexos do ligante com 6,7% de SBS e do ligante com 10,5% de borracha à frequência de 1 Hz, mesmo esses dois ligantes apresentando a mesma viscosidade, o módulo complexo do asfalto-borracha corresponde à metade do valor do ligante modificado por SBS. Isso indica que, para teores de borracha acima de 10%, esse material modifica apenas fisicamente o ligante asfáltico (como um filler), por meio da permanência de partículas de

borracha não dissolvidas (KÖK; ÇOLAK, 2011). Os resultados de viscosidade rotacional obtidos são apresentados na Figura 9.

Figura 9 - Variação na viscosidade rotacional dos ligantes modificados.



Fonte: Adaptado de Kök e Çolak (2011).

## 2.2.5 Ligantes Asfálticos Modificados por Nanomateriais

Nanotecnologia é o estudo e manipulação de átomos e moléculas com aplicações em diversos ramos da ciência. Muitos dos benefícios da nanotecnologia se devem à possibilidade de manejar a configuração da estrutura de um determinado material na escala nano, de modo que passe a apresentar propriedades específicas que aperfeiçoem o seu desempenho. Usando essa tecnologia, os materiais podem ser confeccionados efetivamente mais resistentes, mais leves e mais duráveis (NNI, 2014).

Apesar de o concreto asfáltico ser utilizado em grandes quantidades na construção de rodovias, muito de seu comportamento mecânico pode ser explicado por meio do estudo de elementos estruturais evidenciados nas micro e nano escalas (PARTL et al., 2003).

As nanopartículas de argila são consideradas o nanoproduto pioneiro na aplicação em misturas asfálticas. Outros nanoproductos que podem beneficiar o desempenho de misturas asfálticas são: nanotubos de carbono, nanopartículas de sílica, alumina, magnésio, cálcio e dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>) (YANG; TIGHE, 2013).

### 2.2.5.1 Ligantes Asfálticos Modificados por Nanoargilas

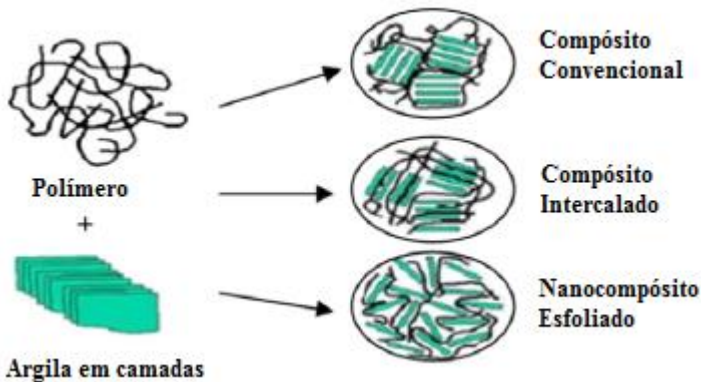
Nanoargilas são nanopartículas de silicatos minerais organizados em camadas. Dependendo da composição química e de sua morfologia, nanoargilas são classificadas como: montmorilonita, bentonita, caulinita, hectorita e haloisita. Desses materiais, o mais comumente encontrado na natureza é a montmorilonita, que possui uma espessura de camada da ordem de um nanômetro, sendo que suas outras dimensões são muito maiores. Separando-se os discos de montmorilonita, obtêm-se valores de superfície específica entre 700 e 800 m<sup>2</sup>/g, o que culmina em uma forte interação entre a nanoargila e o ligante asfáltico (YANG; TIGHE, 2013).

Para que essa separação seja realizada, deve-se alterar a polaridade presente entre as camadas da nanoargila, tornando-a organofílica. Isso se consegue através de uma força termodinâmica, introduzindo um revestimento das camadas de nanoargila com agentes surfactantes, que induzem o aumento da distância entre as mesmas. Esse processo amplifica a compatibilidade entre as nanoargilas e os polímeros, por exemplo, facilitando a entrada das mesmas nas matrizes poliméricas, na escala nanoscópica (THENG, 2006 *apud* JAHROMI; KHODAI, 2009).

Há duas possíveis estruturas de nanocompósitos formadas por meio da penetração dos polímeros entre as camadas de nanoargila, que podem ser visualizadas na Figura 10:

- Esfoliada: Cada camada de nanoargila se encontra separada de seu aglomerado inicial e dispersa uniformemente na matriz polimérica;
- Intercalada: O polímero se encontra inserido entre as camadas de nanoargila, de modo a expandir o espaço entre camadas. Entretanto, as camadas ainda apresentam uma relação espacial bem definida entre si, pela conservação da estrutura cristalográfica original (POLACCO et al., 2008).

Figura 10 - Esquema das estruturas de nanocompósitos poliméricos.



Fonte: Adaptado de Golestani et al. (2012).

Na formação de um nanocompósito intercalado, ocorre apenas um aumento do espaçamento interlamelar, demonstrando que o processo de dispersão não foi tão eficiente a ponto de vencer a energia de ligação entre as lamelas (MELO, 2014).

A elaboração de um nanocompósito com uma morfologia esfoliada é considerada ideal para que se atinja todo o potencial das nanoargilas, com o intuito de aperfeiçoar as propriedades mecânicas e térmicas de uma matriz (NGUYEN, 2007).

Yu et al. (2007) testaram dois métodos de preparo de asfaltos modificados com montmorilonita e estudaram as propriedades físicas e comportamentos dinâmicos reológicos apresentados pelos mesmos.

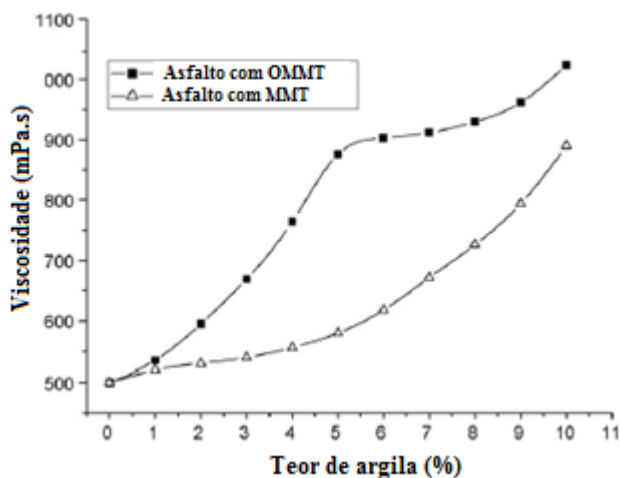
As modificações foram realizadas em substituição à massa do asfalto convencional (TZ70), da seguinte forma: 1, 5 e 10% de montmorilonita (MMT), e 1, 5 e 10% de montmorilonita organofílica (OMMT), modificada com agentes surfactantes. Os graus de esfoliação e dispersão no asfalto das camadas de silicato provenientes da MMT e da OMMT foram investigados utilizando conhecimentos de difração de raios-X. Por meio do estudo do espaçamento entre as camadas das nanoargilas, envolvidas pelo ligante, pôde-se constatar que o asfalto modificado com MMT é formado por uma estrutura intercalada, enquanto que o asfalto modificado com OMMT é formado por uma estrutura esfoliada. Essa diferença entre as microestruturas reflete nas propriedades físicas apresentadas pelos ligantes modificados.

O ponto de amolecimento do asfalto contendo MMT aumenta gradualmente com o teor de MMT empregado (48,9°C do asfalto

controle, 55,4°C com 10% MMT), enquanto com a modificação por OMMT, o ponto de amolecimento aumenta mais consideravelmente (58,1°C com 10% OMMT). Já as ductilidades dos asfaltos modificados diminuíram em relação ao asfalto de controle, sendo que o asfalto contendo MMT teve uma redução maior que o asfalto contendo OMMT.

Quanto à viscosidade, o asfalto modificado por OMMT teve um grande aumento com pequenos teores de nanoargila e a partir de 5% de OMMT, a taxa de aumento de viscosidade diminuiu. Já para o asfalto modificado por MMT, a taxa de aumento de viscosidade permaneceu baixa até o teor de 4% e, a partir desse teor, passou a aumentar a sua viscosidade rapidamente. Isso se deve aos diferentes graus de dispersão das nanoargilas no asfalto. As curvas de viscosidade estão expostas na Figura 11.

Figura 11 - Viscosidades dos asfaltos modificados com MMT e OMMT a 135°C.



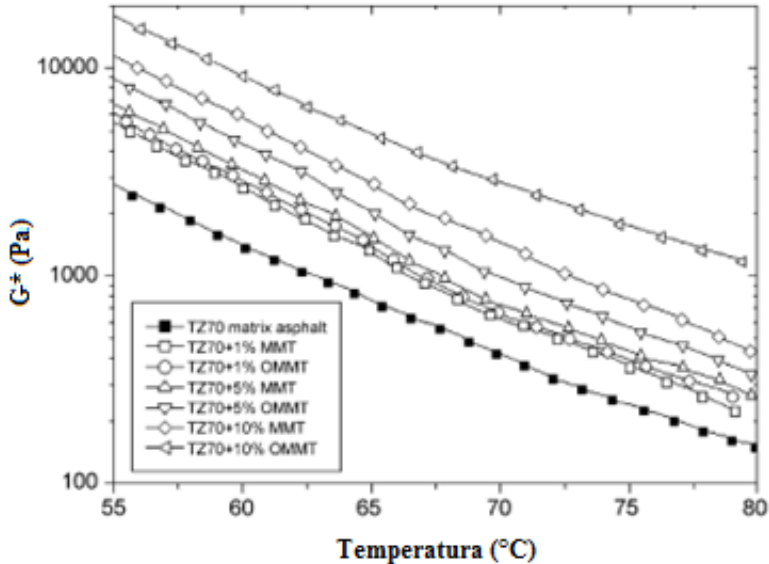
Fonte: Adaptado de Yu et al. (2007).

Foram também realizados ensaios com o reômetro de cisalhamento dinâmico, analisando o módulo complexo de cisalhamento e o ângulo de fase dos asfaltos modificados. Com o aumento do teor de MMT, foram obtidos valores gradualmente maiores de módulo complexo. Em comparação, os asfaltos contendo OMMT apresentaram valores ainda maiores.

Os valores de ângulo de fase seguiram a mesma tendência: valores menores que o asfalto de controle, sendo que a presença de OMMT causou uma maior redução do que MMT. As curvas de módulo complexo e ângulo de fase são apresentadas na Figura 12 e na Figura 13.

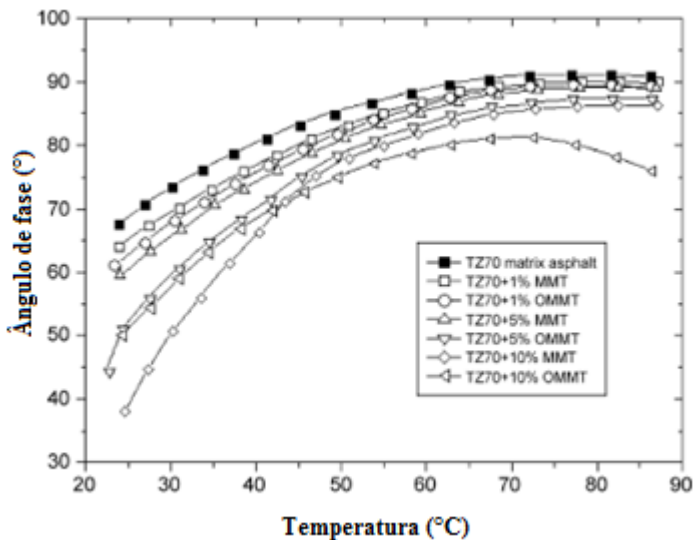
Os ensaios realizados revelam um comportamento mais elástico do ligante modificado com montmorilonita organofílica, resultando em um melhor desempenho em relação à deformação permanente.

Figura 12 - Curvas de  $G^*$  para os asfaltos modificados com MMT e OMMT.



Fonte: Adaptado de Yu et al. (2007).

Figura 13 - Curvas de ângulo de fase para os asfaltos modificados com MMT e OMMT.



Fonte: Adaptado de Yu et al. (2007).

El Shafie et al. (2012) estudaram a incorporação de nanoargila organofílica intercalada em ligantes asfálticos em comparação à incorporação de macropartículas de argila. Foram analisadas algumas propriedades como a viscosidade cinemática, penetração, ponto de amolecimento, e resistência à tração.

A viscosidade cinemática sofreu um aumento significativo em função da adição de macropartículas de argila e maior ainda nas misturas contendo adição de nanoargila, em relação ao ligante convencional de referência. A 135°C, o aumento de viscosidade cinemática dos ligantes contendo nanoargila foi, em média, de 222% em relação ao ligante convencional. Já a 150°C, o aumento foi de 145%. O valor de penetração foi reduzido em 25% pela adição de nanoargila, em relação ao ligante de controle, e o ponto de amolecimento aumentou 12°C (EL SHAFIE et al., 2012).

Quanto à resistência à tração e à deformação por tração, foram realizados ensaios a -7°C e a 25°C. O valor de resistência à tração aumentou 179% e a deformação observada foi 41% menor que no ligante referência, a -7°C. Nos ensaios realizados a 25°C, foram obtidos resultados de resistência à tração 370% superior e deformação por tração

35% inferior, comparados ao ligante de referência (EL SHAFIE et al., 2012).

Jahromi e Khodaii (2009) investigaram os efeitos da incorporação de dois tipos de nanoargilas em um ligante asfáltico convencional, com teores de 2, 4 e 7% de substituição em massa. Foram utilizadas as seguintes nanoargilas: Cloisite-15A e Nanofill-15, ambas organofílicas à base de montmorilonita. Os ensaios de penetração, ductilidade e ponto de amolecimento, realizados com os ligantes asfálticos, revelaram que o ligante modificado com a nanoargila Cloisite-15A apresenta menor valor de penetração, maior valor de ponto de amolecimento e menor valor de ductilidade, para todos os teores de incorporação, em relação ao ligante modificado com Nanofill-15. A nanoargila Nanofill-15 demonstrou ter pequeno efeito sobre as propriedades de penetração e ponto de amolecimento do ligante modificado. Em contraste, a incorporação de nanoargila Cloisite-15A apresentou efeitos relativamente mais pronunciados na penetração e no ponto de amolecimento. A adição de 7% de Cloisite-15A culminou na redução da penetração de 63 (ligante não modificado) para 45 e no aumento do ponto de amolecimento de 54 para 61°C. Os ensaios reológicos realizados no DSR foram conduzidos apenas com os ligantes modificados por teores de 7% de nanoargila. Foi observado que a nanoargila Nanofill-15 não teve efeito na redução do ângulo de fase do ligante asfáltico, para baixos níveis de frequência. Adversamente, para níveis de frequência maiores que 1 Hz, o ângulo de fase apresentou valores maiores do que para o ligante convencional, indicando que a parcela elástica da deformação sofrida pelo ligante modificado por Nanofill-15 é menor em comparação ao ligante não modificado. Contudo, após o envelhecimento a curto prazo desse ligante, não foi observado aumento no seu módulo complexo de cisalhamento, revelando um desempenho excepcional frente aos efeitos causados pelo envelhecimento.

Para o ligante modificado com a nanoargila Cloisite-15A, os resultados mostram que a incorporação de nanoargila aumentou o módulo complexo e reduziu o ângulo de fase, para baixos e médios níveis de frequência. O efeito do envelhecimento a curto prazo foi reduzido pela adição de Cloisite-15A, porém não foi tão considerável quanto a redução proporcionada pela adição de Nanofill-15 (JAHROMI; KHODAII, 2010).

Yao et al. (2012) compararam a atuação de dois tipos de nanomateriais – nanoargila não modificada e nanoargila modificada por polímero – utilizados como agentes modificantes do ligante asfáltico de



referência, PG 58-34. A nanoargila utilizada foi montmorilonita (hidrofílica), cuja estrutura tem a forma de placas organizadas em camadas. Foram apresentadas imagens que demonstram a aglomeração de nanopartículas de argila, culminando em fraca dispersão. Tal falta de dispersão pode influenciar negativamente nos resultados dos ensaios reológicos.

A nanoargila modificada com polímero (hidrofóbica e organofílica, devido à modificação por polissiloxano) apresentou uma melhor dispersão que a nanoargila não modificada, entretanto a dispersão atingida ainda está longe do nível nanoscópico. Os nanomateriais foram adicionados ao ligante asfáltico em teores de 2 e 4%, em relação à massa de ligante (YAO et al., 2012).

Fotos da microestrutura das misturas realizadas mostram que a nanoargila não modificada se apresenta em conglomerados cujos tamanhos variam entre 50 e 15  $\mu\text{m}$ . Já as fotos das misturas com nanoargila modificada com polímero mostram que esse material teve melhor dispersão e se encontra em conglomerados de aproximadamente 4  $\mu\text{m}$  (YAO et al., 2012).

Os resultados de viscosidade rotacional mostraram que a o ligante asfáltico com nanoargila não modificada apresentou viscosidade, em média, 250% maior do que a do ligante de referência ao longo de toda a gama de temperaturas, enquanto que a viscosidade do ligante com nanoargila modificada com polímero manteve-se igual à do ligante de referência (YAO et al., 2012).

Quanto ao ensaio de módulo de cisalhamento complexo, foi utilizado o reômetro de cisalhamento dinâmico para caracterizar o comportamento elástico e viscoso do ligante asfáltico a médias e altas temperaturas. Quanto maior o valor de  $G^*$  a altas temperaturas, maior será o seu potencial para resistir à deformação permanente. Também foi apresentado o trabalho dissipado por ciclo, que tem relação com a parcela viscosa do material e é convertido ao mesmo em forma de dano por deformação permanente, fadiga ou propagação de fissuras. Quanto menor a energia dissipada por ciclos de carregamento, maior é a resistência do ligante asfáltico à deformação permanente e à fadiga. O trabalho dissipado em forma de deformação permanente e fadiga são calculados a partir das Equações 2.1 e 2.2 (YAO et al., 2012):

$$\text{Deformação permanente:} \quad Wc = \pi\sigma_0^2 \left[ \frac{1}{G^*/\text{sen}\delta} \right] \quad (2.1)$$

Fadiga: 
$$Wc = \pi \sigma_0^2 \left( \frac{G^*}{\text{sen} \delta} \right) \quad (2.2)$$

sendo que:

$Wc$  = energia dissipada por ciclo de carregamento;

$\sigma_0$  = tensão de cisalhamento;

$G^*$  = módulo de cisalhamento complexo;

$\delta$  = ângulo de fase.

Os resultados do ensaio mostram que a adição de nanoargila não modificada aumentou o módulo de cisalhamento complexo do ligante asfáltico. Com a adição de 2%, o módulo complexo aumentou 45% e com a adição de 4% o módulo complexo aumentou 170%. Isso indica que a adição de nanoargila não modificada pode contribuir significativamente para a resistência à deformação permanente. Entretanto, quando se calcula o trabalho dissipado em forma de deformação permanente, os valores apresentados pelas misturas contendo nanoargila não modificada são maiores do que os do ligante de referência. A adição de 2% conduziu a um aumento de 10% da energia dissipada por ciclo, enquanto que a adição de 4% levou a um aumento de 40%, revelando redução na capacidade de recuperação do ligante (YAO et al., 2012).

Quanto aos resultados da adição de nanoargila modificada por polímero ao ligante asfáltico, a adição do material levou a menores valores de módulo de cisalhamento complexo. Com a adição de 4%, a redução do valor de módulo complexo foi de 33% em relação ao ligante de referência. Já a adição de 2% conduziu a uma redução de 6% (YAO et al., 2012).

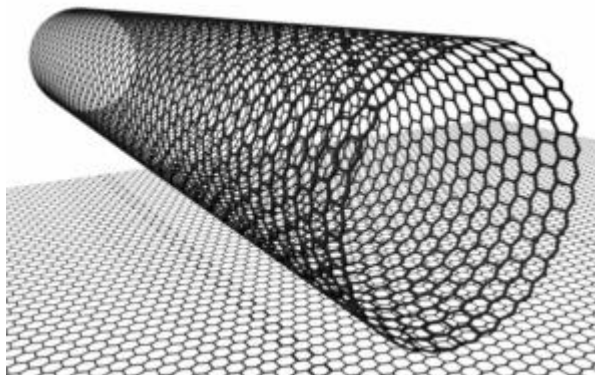
Os resultados de trabalho dissipado sob a perspectiva de deformação permanente demonstraram que a adição de nanoargila modificada com polímero ao ligante asfáltico resultou em uma menor dissipação de energia e, conseqüentemente, em um incremento na parcela elástica. A adição de 4% apresentou uma redução de 35% do trabalho dissipado, em relação ao ligante de referência, e a adição de 2% apresentou uma redução de 18% (YAO et al., 2012).

#### 2.2.5.2 Ligante Asfáltico Modificado por Nanotubos de Carbono

Um nanotubo de carbono é uma folha grossa de grafite monoatômica transparente, enrolada em forma de um cilindro vazio em

seu interior, com diâmetro de 1 a 10 nm (YANG; TIGHE, 2013). Na Figura 14 pode ser visualizado um esquema ilustrando a formação de um nanotubo de carbono.

Figura 14 - Esquema de uma camada de NTC, formada por anéis aromáticos.



Fonte: Ferreira e Rangel (2009).

Segundo de Heer (2004), o módulo de elasticidade desse material depende do seu raio. Para nanotubos de carbono com diâmetros menores que 5nm, o valor do módulo de elasticidade é aproximadamente 1000 GPa. Já a resistência à tração, para um nanotubo de 15nm de diâmetro, tem valor de 150 GPa.

Quanto à utilização de nanotubos de carbono em misturas asfálticas, é considerada uma alternativa potencialmente viável, porém ainda não foi estudada tão enfaticamente. A aplicação dessas nanopartículas ainda se concentra em sua adição apenas nos ligantes asfálticos, mas pressupõe-se que as misturas asfálticas modificadas apresentarão aperfeiçoamento de suas propriedades mecânicas e reterão a propagação de microfissuras (HUSSAIN et al., 2006; KHATTAK et al., 2012).

Tamanha complexidade de estudo e desenvolvimento desse nanocompósito se dá pela dificuldade de dispersão das nanopartículas homogeneamente dentro da matriz polimérica em que serão empregadas e também pela incompatibilidade química que podem apresentar. Isso porque os nanotubos tendem a se aglomerar em decorrência das forças intermoleculares de Van der Waals. Atingindo um grau de dispersão consistente, a matriz polimérica será capaz de transmitir o carregamento às nanopartículas (HUSSAIN et al., 2006).

Portanto, antes de visar ao desempenho ideal das misturas asfálticas reforçadas por nanotubos de carbono, deve-se melhorar a adesão entre as nanopartículas e a matriz polimérica e alcançar um grau de dispersão adequado (HUSSAIN et al., 2006).

Melo (2014) estudou os efeitos da adição de nanotubos de carbono e nanoargila organofílica no CAP 50/70. Os ligantes modificados apresentaram menor susceptibilidade térmica e maior ponto de amolecimento em relação ao ligante convencional. Entretanto, a viscosidade rotacional também se demonstrou superior à medida que se aumentava o teor de nanomateriais, culminando em maiores temperaturas de usinagem e compactação. O ensaio de DSR revelou que a incorporação de nanoargila e NTC, por conferirem aos ligantes maior valor no parâmetro  $G^*/\sin \delta$ , influencia positivamente na resistência à deformação permanente. Contudo, para teores de modificação maiores de NTC, foi observada queda no desempenho do ligante, possivelmente relacionada ao comprometimento da dispersão do agente modificador na matriz asfáltica. Sob a perspectiva do parâmetro  $G^*/\sin \delta$  no resíduo envelhecido a longo prazo, relacionado à resistência à fadiga, os nanocompósitos com NTC demonstraram desempenho inferior ao ligante 50-70 e ao ligante modificado por nanoargila.

### 2.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO E REOLÓGICO DE MISTURAS DE CONCRETO ASFÁLTICO

O concreto asfáltico é um material utilizado na pavimentação de estradas, constituído de ligante asfáltico, agregados minerais e, eventualmente, aditivos. O ligante asfáltico desempenha a função de aglutinante, estabelecendo ligação entre as partículas minerais, culminando na formação de uma mistura homogênea. Portanto, o comportamento apresentado pela mistura é afetado tanto pelas propriedades de seus componentes individuais, quanto pela relação entre eles. O sistema formado é aplicado, principalmente, em camadas superiores de pavimentos flexíveis e semirrígidos, denominadas revestimentos. Nessas ocasiões, os revestimentos asfálticos estão sujeitos a receber a carga dos veículos e mais diretamente a ação climática.

Em virtude da presença do cimento asfáltico em sua constituição, as misturas de concreto asfáltico demonstram comportamento viscoelástico e termossuscetível, sofrendo influencia, portanto, de diversas variáveis.

. Com o intuito de tornar exequível a análise do comportamento desse material, são estabelecidas suposições a respeito de certas propriedades. Portanto, para o estudo do concreto asfáltico, se considera que o material apresenta homogeneidade, isotropia e linearidade (DI BENEDETTO et al., 2004).

Para a compreensão dos mecanismos vinculados ao processo de degradação das camadas de concreto asfáltico, a análise global das solicitações impostas ao pavimento é considerada fundamental.

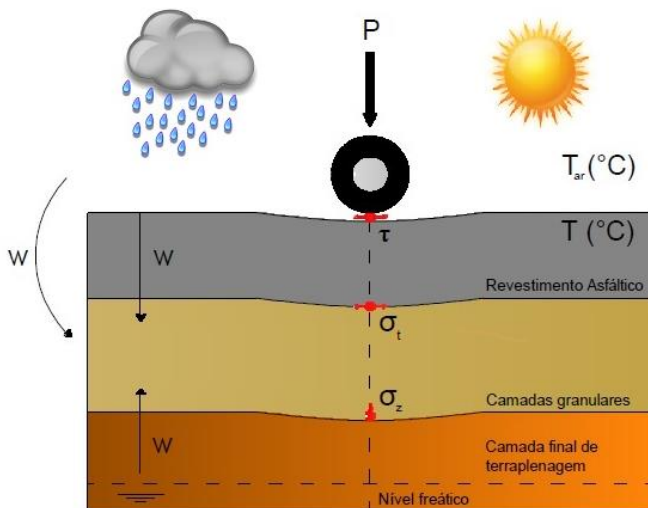
### **2.3.1 Solicitações Impostas em Camadas de Concreto Asfáltico**

O pavimento é constituído por uma estrutura estratificada em múltiplas camadas de espessuras finitas, assentes sobre uma camada semi-infinita de suporte, denominada camada final de terraplenagem. Essa estrutura tem como função resistir aos esforços provenientes do tráfego de veículos e do clima, proporcionando condições de segurança, conforto e economia aos usuários.

A cada passagem de um veículo, o pavimento é solicitado pela imposição da carga oriunda do mesmo, originando tensões que conduzirão ao desgaste dos seus materiais constituintes e à conseqüente redução de sua qualidade. Dessa forma, um pavimento está sujeito à deterioração cumulativa ao longo do seu período de vida. A representação da Figura 15 expõe a ação climática, as solicitações impostas pelo tráfego e as tensões decorrentes da carga de roda.

Analisando a Figura 15, nota-se a ação dos agentes atmosféricos, culminando no aumento da temperatura do revestimento asfáltico e na entrada de água nas camadas granulares do pavimento. As solicitações decorrentes do tráfego submetem o revestimento asfáltico à flexão, gerando esforços de tração ( $\sigma_t$ ) em suas fibras inferiores, responsáveis pelo trincamento por fadiga. Além disso, a camada de concreto asfáltico ainda está sujeita a tensões tangenciais ( $\tau$ ) em sua superfície, a contrações e expansões térmicas e a esforços de cisalhamento e compressão, intimamente ligados à formação de deformações permanentes por densificação e deformação plástica.

Figura 15 - Solicitações do tráfego e ação climática na estrutura de um pavimento flexível.



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

### 2.3.2 Mecanismos de Degradação de Camadas de Concreto Asfáltico

Tendo em vista o comportamento viscoelástico e termossuscetível das misturas de concreto asfáltico, a modelagem analítica de pavimentos flexíveis deve considerar dois principais aspectos em relação às propriedades do material: as características de tensão-deformação e as características de desempenho dos materiais, ligadas aos mecanismos de falha do concreto asfáltico. Os dois principais modos de degradação estrutural dos revestimentos asfálticos, vinculados ao desempenho desse material, são: trincamento por fadiga e deformação permanente (READ; WHITEOAK, 2003).

Diversos fatores afetam o comportamento tensão-deformação e a performance do concreto asfáltico, como o tempo, a temperatura, o estado de tensão, o modo de carregamento, o envelhecimento e a umidade (KIM, 2009).

Sendo assim, o entendimento do comportamento das misturas de concreto asfáltico, bem como as alterações desse comportamento com o tempo, tem como diretrizes quatro pontos fundamentais (DI BENEDETTO et al., 2008):

- A rigidez e a evolução da rigidez com o tempo;
- A fadiga e a lei da evolução do dano;
- A deformação permanente cumulativa;
- A iniciação, propagação e crescimento de microfissuras, atribuídas às baixas temperaturas.

Cada uma dessas propriedades ou mecanismos de degradação é evidenciada em um domínio de carregamento distinto e correspondendo a um tipo de comportamento específico das misturas asfálticas (DI BENEDETTO et al., 2008).

### **2.3.3 Rigidez do Concreto Asfáltico**

A rigidez do concreto asfáltico é uma propriedade cuja precisa caracterização é considerada imprescindível para a predição de seu comportamento em estruturas de pavimento. Fundamentalmente, a rigidez (ou módulo) corresponde à inclinação da curva tensão-deformação do concreto asfáltico. Assim como qualquer propriedade do material, a rigidez independe do dispositivo de teste utilizado para sua determinação, bem como do tamanho ou da geometria da amostra submetida ao ensaio (KIM, 2009).

Diversos fatores influenciam na medida da rigidez do concreto asfáltico, em decorrência do complexo comportamento apresentado pelo material. A temperatura e as condições de carregamento (estático ou dinâmico e o nível de tensão aplicado) são fatores externos importantes na determinação da rigidez. Quanto aos principais fatores inerentes à mistura de concreto asfáltico, têm-se: a natureza, o teor e a idade do ligante asfáltico, a distribuição das partículas de agregados e o volume de vazios da mistura (READ; WHITEOAK, 2003; KIM, 2009). Nas seções a seguir, será discutido de que maneira esses fatores afetam a rigidez das misturas de concreto asfáltico.

#### **2.3.3.1 Fatores Externos que Influenciam a Rigidez do Concreto Asfáltico**

Como discutido anteriormente, a rigidez do concreto asfáltico é suscetível à temperatura e à taxa de deformação decorrente do carregamento. Para uma temperatura estabelecida, o concreto asfáltico irá deformar-se lentamente e permanentemente se a taxa de deformação for pequena. Para uma taxa de deformação maior, o concreto asfáltico se

apresentará muito mais rígido e, conseqüentemente, estará sujeito à fratura. Da mesma forma, para uma taxa de deformação estabelecida, existe uma temperatura acima da qual o concreto asfáltico apresentará relaxamento suficientemente rápido a ponto de não acumular tensões na amostra (KIM, 2009).

De acordo com Read (1996), a rigidez do concreto asfáltico também é afetada pelo nível de tensão aplicado. Altos níveis de tensão resultam em menores valores de rigidez, enquanto baixos níveis de tensão culminam em maiores valores. Entretanto, a influência do nível de tensão aplicado é menos importante em comparação aos efeitos do tempo de carregamento e da temperatura.

Para carregamentos dinâmicos, a frequência de aplicação dos pulsos de carga é outro fator importante. Quanto maior a frequência de aplicação, menor é o tempo decorrido entre um pulso de carga e o subsequente (BERNUCCI et al., 2010).

### 2.3.3.2 Fatores Inerentes ao Concreto Asfáltico que Influenciam a Rigidez

O concreto asfáltico, sendo constituído por ligante asfáltico e agregados minerais, tem sua rigidez influenciada pela natureza e pelas condições em que esses materiais se situam na mistura asfáltica.

A consistência do ligante asfáltico está intimamente ligada à rigidez da mistura: quanto mais consistente, mais rígido será o concreto asfáltico. Tratando-se do teor de ligante, o aumento do mesmo até um teor ótimo proporciona maior compacidade da mistura, e há uma tendência de incremento no valor do módulo. Para teores de ligante acima do valor ótimo, a rigidez do concreto asfáltico tende a diminuir (FONTES, 2009).

Em virtude da presença de ligante na constituição do concreto asfáltico, esse material herda a capacidade de envelhecimento do CAP. Devido à exposição ao ar, a altas temperaturas e à radiação solar, o concreto asfáltico tem sua rigidez amplificada, bem como sua susceptibilidade de ruptura frágil (KIM, 2009).

No que se refere à influência dos agregados minerais na rigidez do concreto asfáltico, essa propriedade passa a apresentar caráter anisotrópico, em decorrência da orientação preferencial das partículas de agregado, assim como da distribuição não aleatória dos vazios (CHEN; PAN; HUANG, 2011).

Os vazios de ar, por sua vez, quando pequenos em volume e dispersos adequadamente, providenciam benefícios à mistura de



concreto asfáltico, pois agem como inibidores da propagação de microfissuras e permitem que o asfalto expanda quando submetido a altas temperaturas (KIM, 2009).

Os finos da mistura de concreto asfáltico compõem o mástique, em conjunto com o ligante asfáltico, e correspondem às partículas menores que 0,075mm. A rigidez da mistura é substancialmente afetada pela qualidade da interação entre os finos e o ligante asfáltico, pelo tamanho dessas partículas, pela dispersão das mesmas no mástique e pela compatibilidade de sua energia superficial com o asfalto na presença ou não da água (KIM, 2009).

### 2.3.3.3 Módulo Complexo do Concreto Asfáltico e Fundamentos de Viscoelasticidade Linear

As misturas de concreto asfáltico apresentam comportamento tanto elástico quanto viscoso em resposta aos carregamentos impostos. A proporção de cada uma dessas parcelas depende do tempo de carregamento e da temperatura na qual o carregamento é aplicado. Para condições de curtos tempos de carregamento ou de baixas temperaturas, o comportamento relativo à parcela elástica é predominante. Entretanto, para condições de longos tempos de carregamento ou de altas temperaturas, o comportamento viscoso torna-se mais pronunciado.

Tendo em vista todas as variáveis que podem influenciar a resposta do concreto asfáltico a um carregamento, o módulo complexo é um parâmetro de rigidez que permite contabilizar os efeitos causados pela temperatura e pela frequência do carregamento aplicado, bem como considerar o comportamento viscoelástico do material por meio da análise de suas componentes elástica e viscosa.

No entanto, a avaliação do módulo complexo requer que o procedimento de ensaio seja realizado sob o domínio das pequenas deformações, no qual se valida a hipótese do comportamento viscoelástico linear do concreto asfáltico. Por conseguinte, a relação tensão-deformação demonstrada pelo material torna-se linear. Para níveis de deformação elevados, o concreto asfáltico pode apresentar comportamento não linear, invalidando a proporcionalidade entre tensão e deformação e caracterizando o conceito de módulo complexo (BAHIA et al., 1999).

O módulo complexo  $E^*$  é um número complexo definido como a relação entre a amplitude complexa da tensão sinusoidal, aplicada no material com uma pulsação (ou velocidade angular)  $\omega$ , e a amplitude

complexa da deformação sinusoidal, resultante do carregamento. Devido ao comportamento viscoelástico do material, a deformação sofre uma defasagem em relação à tensão aplicada. Essa defasagem, por sua vez, é representada pelo ângulo de fase ( $\delta$ ), cujo valor fornece informações quanto à predominância elástica ou viscosa do concreto asfáltico. Dada essa definição, o módulo complexo não é diretamente dependente do tempo, mas sim da pulsação  $\omega$ , correspondente à frequência de carregamento ( $f$ ), para uma determinada temperatura. Por meio da matemática complexa, pode-se expressar a tensão aplicada, a deformação resultante e o módulo complexo conforme as Equações 2.3, 2.4 e 2.5, respectivamente. A velocidade angular é relacionada à frequência de acordo com a Equação 2.6 (DI BENEDETTO et al., 2001).

$$\sigma^* = \sigma_0 e^{i\omega t} \quad (2.3)$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 e^{i(\omega t - \delta)} \quad (2.4)$$

$$\frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = E^*(i\omega) = \left(\frac{\sigma^*}{\varepsilon^*}\right) e^{i\delta} = E_1 + iE_2 \quad (2.5)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (2.6)$$

sendo que:

$\sigma_0$  = amplitude da tensão aplicada;

$\varepsilon_0$  = amplitude da deformação;

$\omega$  = velocidade angular;

$i$  = número imaginário;

$\delta$  = ângulo de fase;

$f$  = frequência.

No plano complexo, a parcela real do módulo complexo  $E^*(i\omega)$  é denominada módulo de armazenamento ou módulo elástico ( $E_1$ ), enquanto que a parcela imaginária é chamada de módulo de perda ou módulo viscoso ( $E_2$ ). Para um material puramente elástico, o ângulo de fase  $\delta$  tem valor igual a  $0^\circ$  e para um material puramente viscoso, o ângulo de fase  $\delta$  tem valor igual a  $90^\circ$ . A relação entre as amplitudes de tensão e deformação definem o valor absoluto do módulo complexo, nomeado de módulo dinâmico  $|E^*|$ , da maneira apresentada na Equação 2.7.

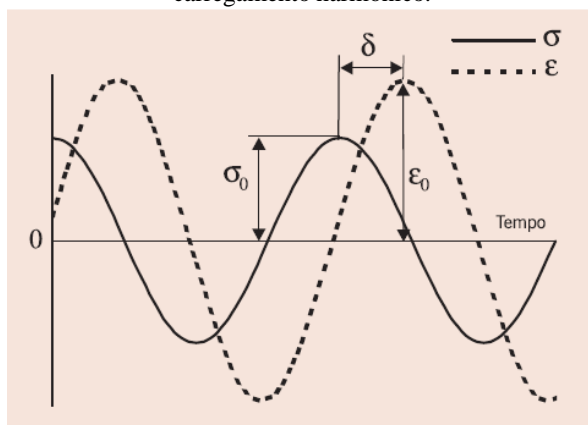
$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (2.7)$$

Dessa forma, o módulo de armazenamento  $E_1$  e o módulo de perda  $E_2$  podem ser expressos em função do ângulo de fase  $\delta$ , de acordo com as Equações 2.8 e 2.9. Na Figura 16, o comportamento viscoelástico é representado sob a atuação de um carregamento cíclico, envolvendo as variáveis analisadas no ensaio de módulo complexo.

$$E_1 = \frac{\sigma_0 \cos \delta}{\varepsilon_0} \quad (2.8)$$

$$E_2 = \frac{\sigma_0 \sin \delta}{\varepsilon_0} \quad (2.9)$$

Figura 16 - Desenho esquemático do comportamento viscoelástico sob carregamento harmônico.



Fonte: Bernucci et al. (2010).

O plano complexo, também conhecido como plano Cole-Cole, pode ser utilizado para avaliar as componentes do módulo complexo. No plano complexo, o módulo de armazenamento ( $E_1$ ) é plotado no eixo das abcissas (eixo real), enquanto que o módulo de perda ( $E_2$ ) é plotado no eixo das ordenadas (eixo imaginário). Os valores de módulo complexo plotados em um plano complexo devem formar uma curva única, independente da frequência e da temperatura (KIM, 2009).

No espaço de Black, os valores de módulo dinâmico são plotados em escala logarítmica, enquanto que os valores de ângulo de fase são plotados em escala aritmética. Da mesma forma que o plano

complexo, o espaço de Black mostra a relação entre o módulo complexo e o ângulo de fase, independente da frequência e da temperatura. A construção desse diagrama permite também a estimativa da componente puramente elástica do módulo complexo, para temperaturas baixas (KIM, 2009).

Sendo o comportamento viscoelástico e termossuscetível apresentado pelo concreto asfáltico dependente da frequência de aplicação do carregamento e da temperatura, para se obter uma caracterização completa do material, ensaios de rigidez devem ser realizados em um amplo espectro de frequências e temperaturas. Contudo, limitações dos equipamentos, aliadas aos longos períodos de ensaio podem inviabilizar essa tarefa. Nesse âmbito, o princípio da superposição tempo-temperatura propicia grande contribuição, reduzindo consideravelmente os tempos de ensaio (HOU, 2009).

Conforme o princípio da superposição, valores semelhantes de rigidez podem ser obtidos a partir de ensaios a baixas temperaturas e altas frequências ou a partir de altas temperaturas e baixas frequências. Em síntese, os efeitos do tempo e da temperatura podem ser combinados em um único parâmetro. Esse processo permite que valores de módulo a diferentes temperaturas sejam deslocados horizontalmente para uma temperatura de referência, resultando na construção de uma curva mestra (*máster curve*) (HOU, 2009; WOLDEKIDAN, 2011).

No domínio das frequências, a frequência deslocada é denominada frequência reduzida ( $f_{red}$ ), podendo ser calculada pela multiplicação da frequência original por um fator de translação. Matematicamente, o princípio da superposição tempo-temperatura é fundamentado conforme as Equações 2.10 e 2.11.

$$E(f, T) = E(f_{red}, T_{ref}) \quad (2.10)$$

$$f_{red} = f \times a_T \quad (2.11)$$

sendo que:

$f_{red}$  = Frequência reduzida;

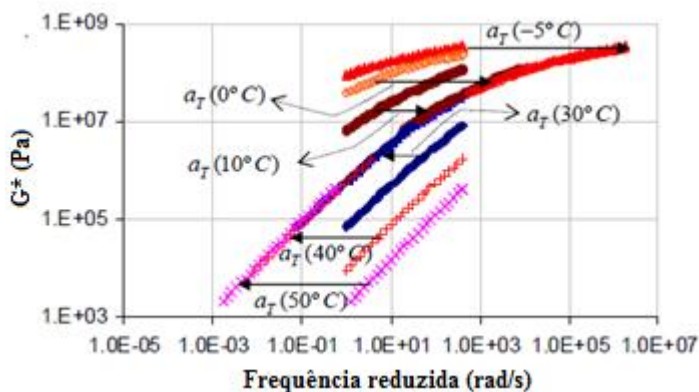
$T_{ref}$  = Temperatura de referência;

$a_T$  = Fator de translação horizontal para a temperatura T.

A Figura 17 ilustra, graficamente, o princípio da superposição tempo-temperatura, aplicado no domínio das frequências.

Um material cujo comportamento viscoelástico é descrito por uma curva mestra que obedece ao princípio da superposição tempo-temperatura é considerado um material termorreologicamente simples. No entanto, além da translação horizontal, alguns materiais necessitam de uma translação vertical. Esses materiais são definidos como termorreologicamente complexos. Para níveis de carregamento reduzidos, o concreto asfáltico é geralmente considerado um material termorreologicamente simples. Todavia, para elevados níveis de carregamento, os materiais asfálticos podem apresentar comportamento termorreologicamente complexo (MEDANI, 2006).

Figura 17 - Exemplo de valores de módulo dinâmico de cisalhamento, deslocados ao longo do eixo da frequência.



Fonte: Woldekidan (2009).

O fator de translação utilizado no princípio da superposição tempo-temperatura é uma propriedade básica do material. Isso implica que o mesmo fator continua a ser aplicável para todas as diversas propriedades viscoelásticas do material, como o módulo de cisalhamento. Na literatura, são propostos diversos modelos para a obtenção do fator de translação. Os modelos mais conhecidos são: o modelo de Arrhenius e o modelo de Williams-Landel-Ferry, apresentados, respectivamente, pelas Equações 2.12 e 2.13 (WOLDEKIDAN, 2011).

$$\text{Log } a_T = \frac{-E_a}{2,303 R} \left[ \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right] \quad (2.12)$$

sendo que:

$a_T$  = Fator de translação para uma dada temperatura T;  
 $E_a$  = Energia de Ativação [J/mol];  
 $R$  = Constante Universal dos Gases Perfeitos [J/mol/K];  
 $T_{ref}$  = Temperatura de referência [K].

$$\text{Log } a_T = \frac{C_1 (T - T_{ref})}{C_2 + T - T_{ref}} \quad (2.13)$$

sendo que:

$a_T$  = Fator de translação para uma dada temperatura T;  
 $C_1, C_2$  = Parâmetros do modelo;  
 $T_{ref}$  = Temperatura de referência [K].

Para materiais termorreologicamente complexos, a mudança na temperatura não pode mais ser modelada por meio de um fator de translação horizontal. Por isso, Ferry introduziu um fator de translação vertical ( $b_T$ ), aplicado a um módulo reduzido ( $E_p$ ), previamente corrigido pelo fator de translação horizontal ( $a_T$ ). A formulação geral desse princípio é demonstrada na Equação 2.14 (WOLDEKIDAN, 2011).

$$E(f, T) = b_T E_p(f \times a_T, T_{ref}) \quad (2.14)$$

sendo que:

$b_T$  = Fator de translação vertical para uma dada temperatura T;  
 $a_T$  = Fator de translação para uma dada temperatura T;  
 $E_p$  = Módulo reduzido, corrigido pelo fator de translação horizontal;  
 $T_{ref}$  = Temperatura de referência [K].

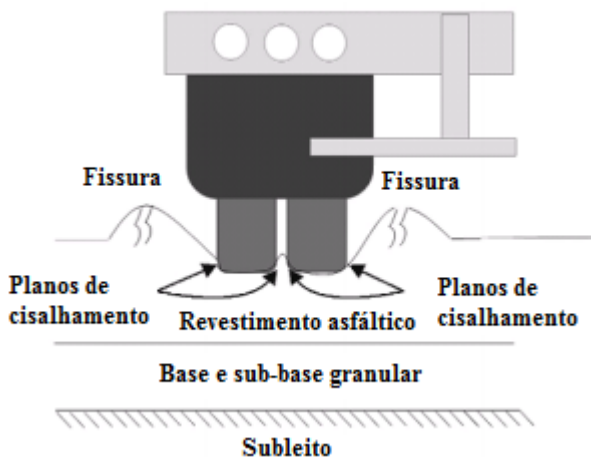
### **2.3.4 Resistência à deformação permanente de misturas de concreto asfáltico**

A deformação permanente excessiva é um defeito comum na pavimentação asfáltica, principalmente para pavimentos de concreto asfáltico submetidos à tráfego pesado. A deformação permanente progride com o crescente número de solicitações e se manifesta sob a

forma de depressões longitudinais nas trilhas de roda. Os afundamentos causados pela deformação permanente em uma rodovia afetam negativamente a segurança dos usuários, pois, além de dificultar o controle dos veículos, podem levar à ocorrência de hidroplanagens (SOUSA et al., 1994).

A deformação permanente pode ser atribuída ao revestimento asfáltico, às camadas subjacentes ou pode ser uma combinação de efeitos. Tratando especificamente da deformação permanente das misturas asfálticas, esse mecanismo de degradação é causado por uma combinação de densificação e de deformação por cisalhamento, proveniente da aplicação repetitiva de carregamentos decorrentes do tráfego. Essa situação é agravada em regiões mais quentes, onde a temperatura do pavimento atinge níveis elevados. Para pavimentos construídos adequadamente, as deformações por cisalhamento, resultantes de altos níveis de tensão de cisalhamento nas regiões superficiais das camadas de revestimento, são consideradas dominantes (SOUSA et al., 1994). Na Figura 18 é ilustrada, esquematicamente, a ocorrência de deformação permanente em um revestimento asfáltico.

Figura 18 - Deformação permanente no revestimento asfáltico.



Fonte: *Federation of Canadian Municipalities and Canadian National Research Council* (2003).

De acordo com Long (2001), sendo o concreto asfáltico uma composição de ligante, agregados e vazios, o comportamento frente à deformação permanente é diretamente influenciado pelo ligante asfáltico

e pelos agregados minerais, bem como pela proporção relativa entre mesmos na mistura. Tratando do ligante asfáltico, quanto maior a sua rigidez e quanto menor a sua susceptibilidade térmica, melhor será o seu desempenho frente à deformação permanente a altas temperaturas. Quanto ao agregado mineral, quanto mais irregular for a sua textura superficial e quanto mais angular for a forma de sua partícula, maior será a resistência à deformação permanente da mistura. As formulações das misturas asfálticas também são determinantes para o comportamento frente à deformação permanente. À medida que se aumenta o teor de ligante, a mistura asfáltica se torna mais suscetível à deformação permanente. Entretanto, teores insuficientes de ligante comprometem a trabalhabilidade das misturas, dificultando a compactação e resultando em um alto volume de vazios. Em síntese, uma mistura asfáltica resistente à deformação permanente deve conter um teor de ligante reduzido, a ponto de ainda garantir a trabalhabilidade da mistura, a durabilidade e a resistência à fadiga. A mistura deve conter, também, um baixo volume de vazios, mas não abaixo de 3%.

Conforme Read e Whiteoak (2003), para determinar as características relacionadas à deformação permanente das misturas asfálticas, devem ser analisadas situações em que o concreto asfáltico apresente baixa rigidez, como sob condições de altas temperaturas ou longos períodos de carregamento. Quando a rigidez do ligante asfáltico for menor que 0,5 MPa, o comportamento da mistura é muito mais complexo do que na região de elasticidade. Tendo em vista essas condições, a rigidez do concreto asfáltico não depende somente da rigidez do ligante asfáltico e da volumetria da mistura, mas sim de diversos fatores, como a distribuição granulométrica, a morfologia e a textura do agregado, o grau de intertravamento entre as partículas de agregados e o grau de compactação da mistura.

A incorporação de agentes modificadores nos ligantes asfálticos também pode influenciar a resistência à deformação permanente das misturas. Nesse sentido, a pesquisa de Moura (2010) demonstrou a melhoria do desempenho de misturas asfálticas em relação à deformação permanente, pela incorporação de polímero SBS, polímero RET ou borracha moída de pneu, em comparação ao CAP 30/45 e ao CAP 50/70.

Na mesma direção, estudos realizados por Kumar e Veeraragavan (2011) demonstraram que a resistência à deformação permanente de concretos asfálticos modificados por polímero SBS, nas temperaturas de 40 e 60°C, aumentou 1,1 e 4,8 vezes, respectivamente, em relação à mistura com ligante asfáltico convencional.



### 2.3.5 Resistência à fadiga de misturas de concreto asfáltico

A resistência à fadiga de uma mistura asfáltica corresponde à habilidade de suportar à flexão repetidamente, sem que o material sofra ruptura. A fadiga consiste em um mecanismo de degradação comum pavimentos de concreto asfáltico, manifestando-se na forma de trincamento devido ao carregamento repetitivo proveniente do tráfego.

Em decorrência do tráfego, a camada de concreto asfáltico é repetidamente submetida à flexão, resultando em deformações de tração em sua face inferior. O trincamento por fadiga abordado nessa pesquisa é originado pela iniciação de microfissuras na parte inferior da camada de concreto asfáltico, que ocasionalmente se propagam à superfície. No caso, corresponde à classificação “*Bottom-up fatigue cracking*”.

Durante o processo de degradação devido à fadiga, duas fases distintas podem ser consideradas. A primeira fase corresponde à degradação resultante do dano ocasionado uniformemente no material. Essa fase se manifesta sob a forma de iniciação e propagação de uma rede de microtrincas, que resultam na redução da rigidez do material sob o ponto de vista macroscópico. A segunda fase ocorre com a evolução das microtrincas, originadas na primeira fase. Nessa etapa, em virtude da coalescência das microtrincas, forma-se uma macrotrinca que se propaga pelo material (DI BENEDETTO et al., 2004).

A medida das características inerentes à fadiga para misturas asfálticas específicas, englobando uma gama de condições ambientais e de tráfego, é imprescindível para que considerações quanto a esse mecanismo de degradação possam ser incorporadas no processo de dimensionamento de pavimentos de concreto asfáltico (TAYEBALI et al., 1994).

As características de fadiga das misturas asfálticas são geralmente expressas como relações entre o valor inicial de tensão ou deformação e o número de repetições de carregamento até a falha do material – determinado pela realização de ensaios de flexão repetida, tração direta ou compressão diametral, sob diversos níveis de tensão ou deformação. As relações assumem formas conforme a equação 2.15 (TAYEBALI et al., 1994).

$$N_f = a \left( \frac{1}{\varepsilon_0} \right)^b \left( \frac{1}{E_0} \right)^c \quad (2.15)$$

sendo que:

$N_f$  = Vida de fadiga;

$\varepsilon_0$  = Deformação específica de tração;

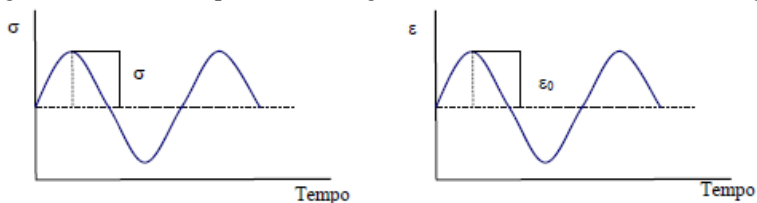
$E_0$  = Rigidez inicial do concreto asfáltico;

$a, b, c$  = Coeficientes determinados experimentalmente.

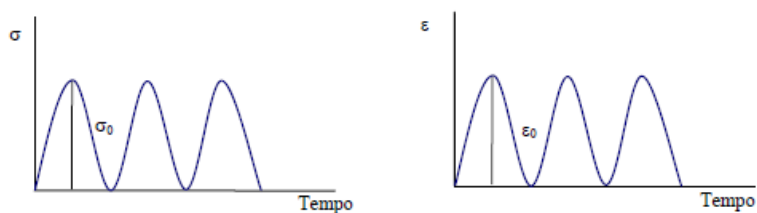
Fundamentados em ensaios laboratoriais, diversos modelos foram propostos para prever a vida de fadiga dos pavimentos. No desenvolvimento desses modelos, resultados de laboratório foram calibrados, utilizando fatores campo-laboratório, baseados em observações no campo. Dessa forma, essas análises fornecem estimativas razoáveis do ciclo de vida em serviço dos pavimentos, em função da limitação da severidade de trincamento proveniente do carregamento repetitivo. No entanto, diversas variáveis influenciam no comportamento à fadiga das misturas asfálticas, restringindo o uso de modelos consolidados na literatura. Os principais fatores que afetam o comportamento à fadiga do concreto asfáltico são descritos a seguir (MONISMITH, 1963; TANGELLA et al., 1990; TAYEBALI et al., 1994).

- Os ensaios de fadiga podem ser realizados a partir de diversos padrões de pulso de carga. Esse fator influencia no período de descanso e consequente relaxamento de tensões das misturas asfálticas. Os tipos de pulso de carga mais utilizados na caracterização do comportamento à fadiga de misturas asfálticas correspondem ao sinusoidal e o *haversine*, representados na Figura 19. O período de descanso do pulso de carga de forma sinusoidal permite a relaxação de tensões, semelhante às condições de carregamento em decorrência do tráfego em revestimentos asfálticos em serviço.

Figura 19 - Formas de pulsos de carregamento utilizados em ensaios de fadiga.



Sinusoidal (flexão alternada)



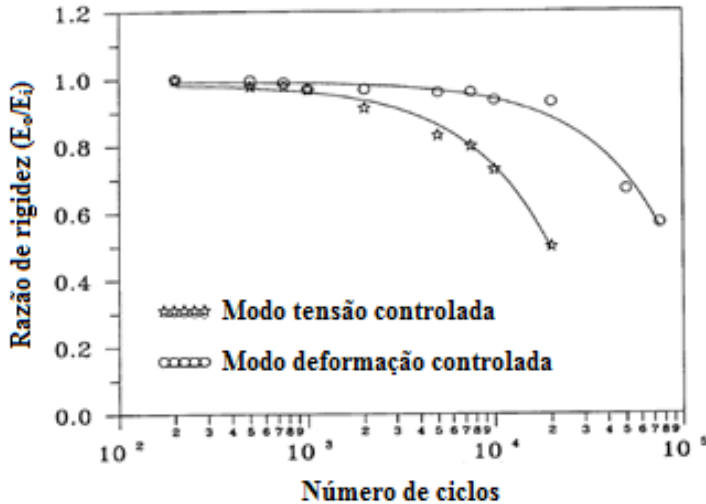
Pulsatório (*haversine*)

Fonte: Adaptado de Said (1988 *apud* FONTES, 2009).

- O modo de carregamento é um fator crítico no que diz respeito ao comportamento à fadiga das misturas asfálticas. Isso porque os efeitos relacionados à mistura são diferentes entre os modos de carregamento à tensão controlada e à deformação controlada. O efeito do modo de carregamento está mais atrelado às diferenças nas taxas de propagação de trincas do que às diferenças no tempo para a iniciação das trincas. Nesse sentido, a vida de fadiga é dependente da condição de modo de carregamento. Para o modo de tensão controlada, a falha é bem definida, tendo em vista que as amostras atingem evidentemente a ruptura, devido ao aparecimento de notáveis fissuras no material. Para o modo deformação controlada, a falha não é aparente: nesse método, considera-se que a amostra atingiu a falha a partir do critério de redução de sua rigidez inicial em 50%. Para condições iniciais de ensaio semelhantes, a vida de fadiga é tipicamente maior quando sob deformação controlada, em relação ao modo tensão controlada, como pode ser visualizado na Figura 20. Em geral, a vida de fadiga sob deformação controlada é, aproximadamente, 2,4 vezes maior. Além disso, misturas asfálticas de maior rigidez tendem a

apresentar melhores desempenhos no modo tensão controlada, ao contrário do que é observado no modo deformação controlada. O modo deformação controlada é mais propício para avaliar o desempenho de concretos asfálticos relativos a camadas finas de revestimento, assentes em camadas subjacentes rígidas. O modo tensão controlada é mais apropriado para a avaliação de camadas mais espessas e rígidas de revestimento asfáltico. A Tabela 3 apresenta uma análise comparativa entre o modo deformação controlada e tensão controlada.

Figura 20 - Relação entre rigidez inicial e rigidez no ciclo "i" ( $E_0/E_i$ ) x número de ciclos, para os dois modos distintos de carregamento.



Fonte: Tayebali et al. (1994).

Tabela 3 - Análise comparativa entre os modos de carregamento tensão controlada e deformação controlada.

<b>Variáveis</b>	<b>Tensão controlada</b>	<b>Deformação controlada</b>
Espessura comparativa da camada de concreto asfáltico	Camadas espessas	Camadas finas, < 3"
Definição da falha	Bem definida, o corpo de prova sofre fratura	Arbitrária, o ensaio é encerrado quando o carregamento é reduzido à uma dada proporção em relação ao valor inicial
Dispersão dos resultados	Menos disperso	Mais disperso
Número de corpos de prova necessários	Menor	Maior
Simulação da influência do envelhecimento	Envelhecimento leva a maior rigidez e maior vida de fadiga	Envelhecimento leva a maior rigidez e menor vida de fadiga
Magnitude da vida de fadiga	Geralmente menor magnitude	Geralmente maior magnitude
Efeitos das variáveis das misturas	Mais sensível	Menos sensível
Taxa de dissipação de energia	Maior	Menor
Taxa de propagação de fissuras	Maior do que ocorre em campo	Mais representativa das condições de campo
Efeito benéfico de períodos de repouso	Efeito benéfico maior	Efeito benéfico menor

Fonte: Tayebali et al. (1994).

- O volume de vazios e a natureza do ligante asfáltico influenciam significativamente a vida de fadiga das misturas asfálticas. Para um dado tipo de ligante asfáltico, a redução da rigidez proveniente do aumento do volume de vazios conduzirá à redução da vida de fadiga. No entanto, para um volume de vazios constante, a redução da rigidez em virtude da mudança do tipo de ligante asfáltico irá resultar em um aumento da vida de fadiga.

- A temperatura e o nível aplicado de tensão ou deformação também afetam a vida de fadiga do concreto asfáltico. Para o modo tensão controlada, a diminuição da temperatura conduz a um valor maior de vida de fadiga, em função do aumento da rigidez do material. Contudo, para o modo deformação controlada, a vida de fadiga sofre redução com a diminuição da temperatura. No que tange o nível de tensão ou deformação aplicado no ensaio, a vida de fadiga decresce com o aumento desse parâmetro.

Além da deterioração resultante da iniciação e propagação do dano causado pela fadiga, dois outros fenômenos, que não devem ser interpretados como fadiga, podem contribuir para a redução de rigidez durante um ensaio. Um dos fenômenos é o auto-aquecimento, ocasionado pela geração de energia dissipada, resultante da parcela viscosa do material. Outro fenômeno que pode causar a redução de rigidez do concreto asfáltico é a tixotropia do ligante asfáltico, observada sob estímulo mecânico (DI BENEDETTO et al., 2004).

Como alternativa ao critério de ruptura vinculado à redução de 50% no valor do módulo de rigidez inicial, para ensaios de vida de fadiga à deformação controlada, diversos pesquisadores utilizaram a abordagem da energia dissipada. Quando um material é submetido a um carregamento externo, a área sob a curva tensão-deformação representa a energia envolvida no processo de deformação. Para materiais viscoelásticos, os processos de carregamento e descarregamento estão associados à energia dissipada, visto que há uma defasagem entre a aplicação da tensão e a deformação resultante. Esse fenômeno é denominado histerese, e a área dentro do ciclo de histerese para o processo de carregamento e descarregamento indica a quantidade de energia dissipada para um ciclo de carregamento. Dessa forma, essa abordagem pode ser utilizada para prever o comportamento à fadiga do concreto asfáltico. Contudo, depende consideravelmente dos materiais empregados e deve ser específica para cada mistura, a fim de ser aplicada. A relação entre a energia dissipada acumulada e o número de ciclos até a falha por fadiga do material é caracterizada na forma da equação 2.16 (SHEN; CARPENTER, 2007).

$$W_N = A (N_f)^z \quad (2.16)$$

sendo que:

$W_N$  = Energia dissipada acumulada até a falha por fadiga;  
 $N_f$  = Número de ciclos de carregamento até a falha por fadiga;  
 $A, z$  = Coeficientes determinados experimentalmente.

Em um ensaio de fadiga realizado no modo deformação controlada, a energia dissipada por ciclo decresce à medida que o número de repetições de carregamento aumenta. Já para o ensaio realizado no modo tensão controlada, a energia dissipada por ciclo aumenta com o número de repetições de carga. A energia dissipada acumulada até a falha à fadiga do material corresponde à área sob a curva entre a energia dissipada e o número de ciclos de repetição de carga (TAYEBALI et al., 1994).

Um dos ensaios mais utilizados para avaliar o comportamento à fadiga é o realizado por meio da flexão alternada de uma viga de concreto asfáltico a quatro pontos. Esse ensaio permite a medição da vida de fadiga, ou das características de deterioração da rigidez de misturas específicas de concreto asfáltico, em diversas condições ambientais e de carregamento. Uma das vantagens de utilizar o 4PBB (*Four-Point Bending Beam test*), é que o terço médio da viga é teoricamente submetido a um momento fletor puro, sem qualquer deformação proveniente de esforços cisalhantes e, por isso, a fratura do corpo de prova se dá exclusivamente pelo momento fletor, sem influência dos esforços cortantes (WU; TSAI; HARVEY, 2009).

Klinsky et al. (2014) avaliaram a rigidez e o desempenho à fadiga de misturas asfálticas contendo diferentes agentes modificadores, por meio do ensaio de flexão de viga prismática a quatro pontos, no modo deformação controlada. Foram empregados quatro ligantes asfálticos no estudo: dois eram modificados por polímero – Polím 60/85 (ponto de amolecimento mínimo de 60°C e retorno elástico mínimo de 85%) e HiMA (*Highly Modified Asphalt* – teor de SBS = 7,5%); um por borracha moída de pneu e um ligante asfáltico de controle, CAP 30/45. Os resultados obtidos na pesquisa mostraram que a mistura asfáltica modificada por borracha apresentou a menor rigidez e o melhor desempenho à fadiga, seguida pela mistura contendo ligante asfáltico HiMA. O CAP 30/45 apresentou o maior valor de rigidez e o pior desempenho à fadiga.

Kim et al. (2013) investigaram a propagação de microfissuras e o desempenho à fadiga de misturas asfálticas SMA modificadas por polímero SBS, em comparação a uma mistura SMA convencional. Por meio de ensaios de flexão a 4 pontos, constatou-se que a incorporação

de polímero SBS resultou em uma resistência à fadiga consideravelmente maior. A relação entre o número de ciclos da mistura modificada e da mistura convencional, até a ruptura por fadiga (50% da rigidez inicial), foi de 19 a 273, entre 800 e 1200  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Além disso, verificou-se que, para elevadas amplitudes de deformação, o polímero SBS atuou como um agente retardador da propagação de fissuras. Dessa forma, concluiu-se que a incorporação de polímero SBS beneficia a resistência à fadiga de misturas asfálticas SMA, controlando a propagação de fissuras, principalmente, no estágio secundário e terciário da vida de fadiga.

A respeito da pesquisa de Fontes (2009), cujo objetivo foi o aperfeiçoamento de misturas asfálticas modificadas por borracha moída de pneu, demonstrou-se que, para as misturas produzidas com o CAP 50/70 modificado por borracha, o sistema *continuous blend* resultou em maiores valores de módulo dinâmico em comparação ao sistema *terminal blend*. Além disso, a utilização de borracha provinda do processamento ambiente promoveu incremento no valor do módulo dinâmico e redução no ângulo de fase, em relação à borracha criogênica. Quanto ao ângulo de fase, misturas produzidas com asfalto-borracha *terminal blend* apresentaram valores maiores de ângulo de fase, o que se traduz em uma menor componente elástica.

Relativamente ao desempenho frente à fadiga, Fontes (2009) mostrou que as misturas com asfalto-borracha *terminal blend* apresentaram desempenho superior em relação às misturas com asfalto-borracha *continuous blend*. A borracha moída proveniente do processamento ambiente também demonstrou melhor desempenho à fadiga, em comparação à borracha criogênica.

A incorporação de borracha moída de pneu em misturas asfálticas também influencia positivamente na resistência à deformação permanente, em relação à grande parte das misturas asfálticas convencionais empregadas no Brasil (FONTES et al., 2010).

Na pesquisa de Jahromi et al. (2010), foram realizados ensaios em misturas asfálticas com a incorporação das nanoargilas Nanofill-15 e Cloisite-15A.

Para o ensaio de resistência à tração indireta, os resultados mostram que, para as temperaturas de 5°C e 25°C, o aumento na resistência à tração em relação à mistura não modificada não chegou a 10%, para todos os teores de nanoargila. Entretanto, quando o ensaio foi realizado a 40°C, a mistura modificada com 7% de Cloisite-15A apresentou um incremento próximo de 40% em relação à mistura convencional. Já a mistura modificada com 7% de Nanofill-15,



apresentou um aumento próximo de 20%, a 40°C (JAHROMI et al., 2010).

No ensaio de módulo de resiliência, realizado nas temperaturas de 5°C, 25°C e 40°C e frequência de carregamento de 0,5 Hz, as misturas contendo nanoargilas apresentaram valores maiores que a mistura não modificada. O acréscimo no módulo em virtude da adição de 2% a 7% de Cloisite-15A variou de 3% a 40%, enquanto que nas misturas com Nanofill-15, variou de 0,65% a 18%, sendo que o incremento relativo de módulo resiliente foi maior para a temperatura de 40°C (JAHROMI et al., 2010).

Quanto ao ensaio de vida de fadiga, foi realizado o ensaio de tração indireta com compressão diametral, por meio de um carregamento repetitivo constante. Para baixas temperaturas (5°C), e para todas as condições de carregamento, a mistura não modificada apresentou melhor desempenho sob fadiga em comparação às misturas modificadas com nanoargila. Já para a temperatura de ensaio de 25°C, sob todas as condições de carregamento, as misturas modificadas apresentaram melhor desempenho do que a mistura não modificada. A proporção média de vida de fadiga em relação à mistura referência foi de 170% para a mistura com Cloisite-15A e de 145% para a mistura com Nanofill-15, a 25°C (JAHROMI et al., 2010).

O ensaio de *Creep* dinâmico foi realizado para a avaliação do desempenho à deformação permanente das misturas com 7% de nanoargila e a mistura não modificada, a 40 e 60°C. Foram ensaiados corpos de prova sob tensões de carregamento de 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa. Sob todos os níveis de tensão e temperaturas, as misturas modificadas por nanoargila apresentaram melhor comportamento frente à deformação permanente, em relação à mistura não modificada (JAHROMI et al., 2010).

A partir da análise dos resultados obtidos, Jahromi et al. (2010) concluíram que as misturas asfálticas modificadas com as nanoargilas estudadas apresentam maior rigidez, maior resistência à deformação permanente, maior resistência à tração indireta e maior módulo de resiliência. Entretanto, o desempenho à fadiga é reduzido a baixas temperaturas e há um acréscimo no teor de ligante de projeto em virtude do aumento do volume de vazios das misturas modificadas.

Khattak et al. (2013) estudaram as características de misturas asfálticas com ligantes modificados por nanofibra de carbono (CNF). A nanofibra de carbono difere do nanotubo pela ausência da cavidade interna e pelo seu maior diâmetro. A CNF utilizada possui diâmetros

entre 60 e 150 nm e comprimento entre 30 e 100  $\mu\text{m}$ . O módulo de elasticidade é de 600 GPa e a resistência à tração de 7 GPa.

Por meio da dosagem Superpave para o teor de 5,5% de CNF, em relação à massa de ligante, foi obtido o valor de 4,7% para o teor de projeto de ligante modificado. Os ensaios basearam-se na comparação entre a mistura modificada citada e a mistura não modificada, mas processada aperfeiçoadamente (KHATTAK et al., 2013).

O valor de módulo dinâmico da mistura modificada aumentou entre 24 e 46%, enquanto que o valor de ângulo de fase diminuiu entre 6 e 25%, em relação à mistura processada, ao longo da frequência de carregamento. Isso indica uma melhoria no desempenho à deformação permanente (KHATTAK et al., 2013).

No ensaio de resistência à tração indireta, tanto a mistura processada quanto a mistura modificada com 5,5% de CNFs atingiram valores de 950 kPa, porém a mistura modificada apresentou maior rigidez, devido à menor deformação (KHATTAK et al., 2013).

Os ensaios de vida de fadiga e resistência à deformação permanente foram realizados por meio de tração indireta, à frequência de carregamento de 10 Hz e à temperatura de 20°C. Sob um carregamento sinusoidal de tensão controlada (138 kPa, correspondente a 15% da resistência à tração), a mistura modificada apresentou melhores resultados nas duas propriedades avaliadas. Para a vida de fadiga, a mistura modificada obteve valor 98% maior que a mistura processada não modificada, enquanto que no ensaio de resistência à deformação permanente, o número de ciclos para atingir a deformação plástica acumulada de 0,25mm foi 545% maior do que a mistura processada. Os resultados estão expostos na Tabela 4 (KHATTAK et al., 2013).

Tabela 4 - Resultados do ensaio dinâmico por tração indireta.

Propriedades	Número de ciclos		Diferença (%)
	Convencional	5,5% CNF	
Vida de fadiga	71233	140956	98
0,25mm de ATR	20667	133333	545

Fonte: Adaptado de Khattak et al. (2013).

Esses resultados são atribuídos ao aumento do módulo dinâmico e à redução do ângulo de fase, caracterizando um material mais rígido e elástico. Acredita-se também que essas melhorias são provenientes da

capacidade de impedimento da formação e propagação de fissuras por parte das nanofibras de carbono (KHATTAK et al., 2013).

Melo (2014) verificou os efeitos causados pela incorporação de nanoargila e nanotubos de carbono (NTC) nas propriedades das misturas asfálticas.

Tratando-se da deformação permanente, a incorporação de nanomateriais melhorou o desempenho das misturas asfálticas. Verificou-se também que o NTC é mais eficiente que a nanoargila como agente de reforço para a resistência à deformação permanente. A utilização do ligante modificado por 3% de nanoargila reduziu a deformação permanente em 29,5%, enquanto que o efeito observado pela incorporação de 2% de NTC foi a redução de 51,6% no afundamento por trilha de roda, em relação à mistura com ligante convencional (MELO, 2014).

Quanto ao módulo complexo das misturas asfálticas, foi confirmada a maior rigidez das misturas nanomodificadas em relação à mistura convencional, sendo que há uma tendência de maiores ganhos com o aumento da temperatura e a redução da frequência de carregamento. Na mesma direção, em função da incorporação de nanomateriais, pôde-se observar a redução do ângulo de fase das misturas modificadas, em relação à convencional (MELO, 2014).

Além disso, a incorporação de nanomateriais promoveu benefícios ao comportamento à fadiga das misturas asfálticas, sendo que a adição de nanoargila e de NTC tiveram efeitos semelhantes nesse aspecto. A melhoria dessa propriedade pode estar relacionada à capacidade dos nanomateriais de impedir a propagação de microtrincas no material (MELO, 2014).

## 2.4 SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir, são apresentados os principais fundamentos do capítulo, para dar suporte ao desenvolvimento dessa pesquisa.

- Diversos estudos confirmam melhorias de desempenho das misturas asfálticas com a utilização de agentes modificadores no ligante asfáltico.
- O processo de incorporação dos agentes modificadores ao ligante asfáltico é um fator determinante para que ocorra melhoria das propriedades da mistura asfáltica.

- Os ligantes asfálticos modificados apresentam propriedades reológicas satisfatórias e que afetam positivamente o comportamento reológico apresentado pela mistura asfáltica.
- A adição de agentes modificadores promove a redução do ângulo de fase dos ligantes asfálticos, sendo que essa redução é mais expressiva com a utilização de materiais poliméricos.
- O módulo complexo é um parâmetro de rigidez cuja determinação permite antever o comportamento do concreto asfáltico em diferentes situações.
- Os benefícios ao comportamento à fadiga por meio da adição de agentes modificadores poliméricos são investigados por diversos autores ao longo do tempo.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A fim de alcançar os objetivos estabelecidos o programa experimental foi desenvolvido em seis etapas, descritas a seguir e ilustradas na Figura 21:

Etapa 1 - Caracterização dos agregados minerais e agentes modificadores: Apresenta-se a caracterização dos agregados realizada por Melo (2014), conforme a metodologia Superpave<sup>®</sup>, bem como a análise das propriedades químicas e mecânicas dos agentes modificadores dos ligantes asfálticos utilizados por Melo (2014). Além disso, é apresentada a curva granulométrica utilizada para a preparação das misturas de concreto asfáltico.

Etapa 2 – Caracterização das propriedades dos ligantes asfálticos: Nessa fase, as propriedades empíricas e a viscosidade dinâmica dos ligantes asfálticos foram avaliadas conforme as especificações brasileiras.

Etapa 3 - Dosagem das misturas asfálticas: Essa etapa corresponde ao procedimento de dosagem das misturas de concreto asfáltico denso, conforme a metodologia Superpave<sup>®</sup> para as misturas modificadas com nanocompósitos e polímero e conforme a metodologia Marshall para a mistura modificada com borracha moída de pneu.

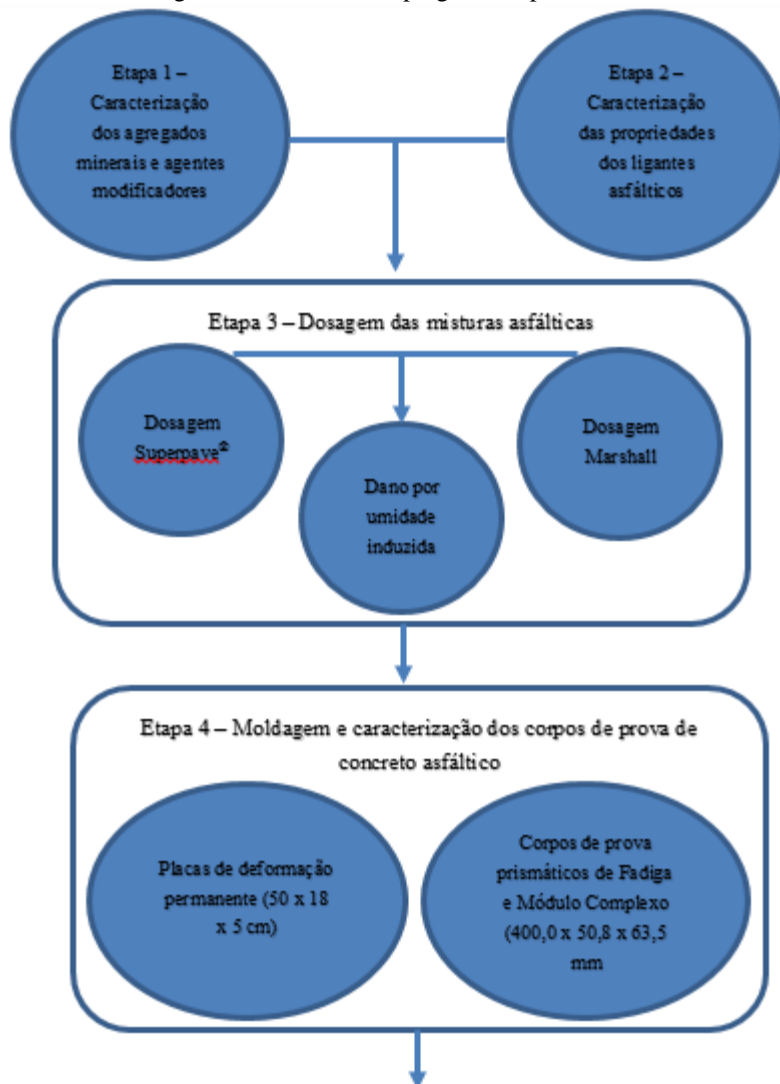
Etapa 4 - Moldagem e caracterização dos corpos de prova de concreto asfáltico: Essa fase teve como finalidade a produção de placas e corpos de prova prismáticos de concreto asfáltico, cujas características foram representativas das misturas formuladas na etapa de dosagem.

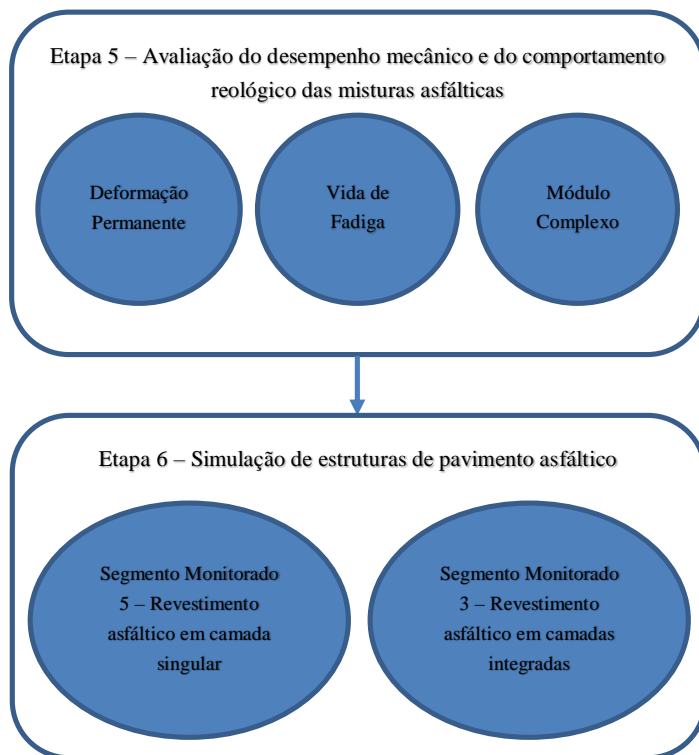
Etapa 5 - Avaliação do desempenho mecânico e do comportamento reológico das misturas asfálticas: Nesse estágio, foram avaliadas as propriedades mecânicas e reológicas das misturas de concreto asfáltico, por meio de ensaios de deformação permanente, vida de fadiga e módulo complexo.

Etapa 6 - Simulação de estruturas de pavimento asfáltico: Essa etapa teve como objetivo simular estruturas de pavimento com a camada de revestimento asfáltico constituída pelas misturas de concreto asfáltico estudadas nessa pesquisa. A partir dessa simulação, foram analisados os efeitos causados pela incorporação de agentes modificadores na

estimativa de vida útil do pavimento, estabelecendo como critério de ruptura o mecanismo de fadiga.

Figura 21 - Estrutura do programa experimental.





Fonte: Autor (2016).

### 3.1 ETAPA 1 - CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS MINERAIS E DOS AGENTES MODIFICADORES

Os agregados minerais utilizados na pesquisa são provenientes de uma pedra localizada no município de Sombrio-SC, instalada sobre basaltos. Estes agregados foram utilizados na execução do lote 29 da rodovia BR-101 no estado de Santa Catarina (contorno da cidade de Araranguá). Além disso, foram empregados na formulação das misturas asfálticas com nanocompósitos desenvolvidas por Melo (2014), cujos resultados de caracterização serão expostos na sequência.

Com base na metodologia Superpave<sup>®</sup>, foi realizada a caracterização das propriedades dos agregados (brita  $\frac{3}{4}$ ", pedrisco e pó de pedra), condizentes às duas categorias: propriedades de consenso e de origem. Os critérios da especificação Superpave<sup>®</sup> a serem atendidos são

relativos a um tráfego pesado, da ordem de  $10^8$  repetições do eixo padrão. Ademais, foram determinadas propriedades complementares, essenciais para o procedimento de dosagem das misturas asfálticas. A Tabela 5 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização, assim como as normas cujos procedimentos de ensaio foram adotados.

Tabela 5 - Resultado da caracterização dos agregados.

<b>Propriedades dos agregados</b>	<b>Norma</b>	<b>Resultado</b>	<b>Crítérios Superpave</b>
<b>Propriedades de consenso</b>			
Angularidade do agregado graúdo	ASTM D 5821	100%/100%	100%/100% mín.
Angularidade do agregado miúdo	ASTM C 1252	49,18%	45% mín.
Partículas planas e alongadas	NBR 6954	9,59%	10% máx.
Teor de argila	AASHTO T 176	61,20%	50% mín.
<b>Propriedades de origem</b>			
Resistência à abrasão	ASTM C 131	11,58%	35-45% máx.
Sanidade	ASTM C 88	2,14%	10-20% máx.
Materiais deletérios	AASHTO T 112	0%	0,2-10% máx.
<b>Propriedades complementares</b>			
Massa específica real do agregado graúdo	ASTM C 127	2,953 g/cm <sup>3</sup>	n/d
Massa específica aparente do agregado graúdo	ASTM C 127	2,880 g/cm <sup>3</sup>	n/d
Absorção do agregado miúdo	ASTM C 127	0,849%	n/d
Massa específica real do agregado miúdo	DNER-ME 084	2,974 g/cm <sup>3</sup>	n/d
Massa específica real do material pulverulento	DNER-ME 085	2,804 g/cm <sup>3</sup>	n/d

Fonte: Adaptado de Melo (2014).

A cal hidratada (CH-1) utilizada na pesquisa é de origem dolomítica e foi fabricada pela Pinocal Indústria e Comércio de Cal Ltda. As caracterizações física e química desse material são apresentadas na Tabela 6.



Tabela 6 - Propriedades físicas e químicas da cal hidratada.

<b>Propriedades da cal hidratada</b>	<b>Valor</b>
Perda ao fogo	18,60%
Resíduo insolúvel	1,90%
Anidrido carbônico (CO <sub>2</sub> )	2,50%
Óxido de cálcio (CaO)	45,10%
Óxido de magnésio (MgO)	33,50%
Óxidos totais não voláteis (CaO + MgO)	96,50%
Óxidos totais não hidratados	27,60%
Óxidos de CaO não hidratados	0%
Cálcio (Ca)	32,20%
Magnésio (Mg)	20,20%
Massa específica	3,0 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Melo (2014).

No que diz respeito à distribuição granulométrica, foi utilizada a mesma da mistura asfáltica de um trecho experimental em estudo, localizado na rodovia BR 101-Sul, lote 29 (entre os quilômetros 409 e 437 do contorno de Araranguá). Tal curva granulométrica corresponde também à utilizada na pesquisa de Melo (2014), visto que o intuito dessa pesquisa é avaliar os efeitos provenientes exclusivamente dos diferentes ligantes nas misturas de concreto asfáltico. Essa curva foi estabelecida pela composição dos agregados (brita ¾”, pedrisco e pó de pedra) e do fíler (cal hidratada) conforme os critérios da especificação Superpave<sup>®</sup>, para um tamanho nominal máximo de 19 mm<sup>1</sup>. A curva granulométrica se apresenta também dentro dos limites estabelecidos para a Faixa B do DNIT. A composição granulométrica é: 43% de brita ¾”, 15,5% de pedrisco, 40% de pó de pedra e 1,5% de cal hidratada. A Tabela 7 mostra a porcentagem passante de agregado nas peneiras de controle e a curva granulométrica pode ser visualizada na Figura 22, assim como os critérios da especificação Superpave<sup>®</sup> e a os limites da Faixa B do DNIT.

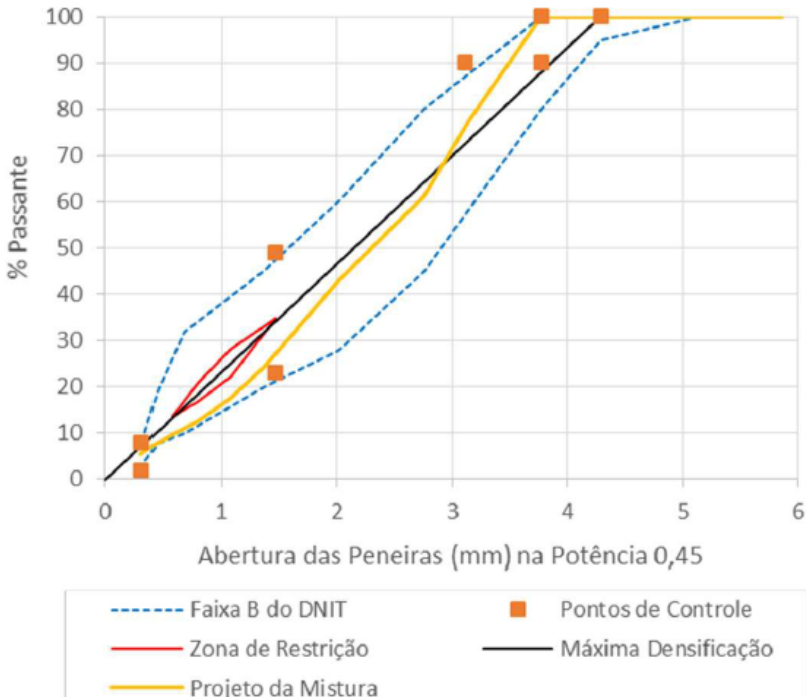
<sup>1</sup> Dosagens realizadas em 2010/2011 – A zona de restrição da especificação Superpave<sup>®</sup> foi extinta em revisão da norma AASHTO M-323, em 2012.

Tabela 7 - Porcentagem passante nas peneiras de controle.

<b>Peneiras - Série ASTM</b>	<b>Material passante (%)</b>
3/4"	100
1/2"	77,5
3/8"	61,3
Nº 4	43,3
Nº 10	24,3
Nº 16	17,4
Nº 30	12,6
Nº 50	9,8
Nº 100	7,6
Nº 200	5,4

Fonte: Melo (2014).

Figura 22 - Curva granulométrica da composição de agregados.



Fonte: Melo (2014).

Quanto aos nanomateriais utilizados na modificação dos ligantes asfálticos, Melo (2014) realizou a caracterização do nanotubo de carbono e da nanoargila. O nanotubo de carbono, fornecido pela Nanostructured & Amorphous Materials, Inc., apresenta múltiplas camadas, diâmetro externo de 50-80 nm, diâmetro interno de 5-15 nm, comprimento de 10-20  $\mu\text{m}$ , densidade de 2,1  $\text{g}/\text{cm}^3$  e superfície específica de 60-80  $\text{m}^2/\text{g}$ . Os principais constituintes desse material, identificados por meio de fluorescência de raios X com o auxílio de um espectrômetro, são: carbono (97,37%), níquel (1,86%), ferro (0,55%), cloro (0,20%) e enxofre (0,02%).

A nanoargila organicamente modificada, cujo nome comercial é Dellite 67G, foi fornecida pela Laviosa Chimica Mineraria S.p.A.. Melo (2014) identificou as principais características desse material, que apresenta tamanho de partícula de 7-9  $\mu\text{m}$ , tamanho de partícula após a dispersão de 500 nm e densidade de 1,7  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Os principais componentes químicos da nanoargila, identificados por meio de fluorescência de raios X, são: carbono (45,50%), silício (33,42%), alumínio (16,08%), ferro (3,60%), cloro (0,80%), titânio (0,31%), potássio (0,27%) e estrôncio (0,02%). A nanoargila Dellite 67G é derivada do argilomineral montmorilonita e modificada por elevadas porcentagens de sais quartenários de amônio, com o objetivo de aumentar os espaços entre as camadas interfoliares das argilas.

### 3.2 ETAPA 2 - CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS LIGANTES ASFÁLTICOS

Nessa etapa, foi realizada a caracterização das propriedades empíricas dos ligantes asfálticos e a determinação da viscosidade dinâmica, constantes nas especificações brasileiras.

Ambos os ligantes asfálticos modificados selecionados para estudo nessa pesquisa foram fornecidos pela empresa Greca Asfaltos S.A.. Os ligantes asfálticos são descritos, sucintamente, a seguir.

- FLEXPAVE 60/85: Ligante asfáltico modificado por polímero SBS, com ponto de amolecimento mínimo de 60°C e recuperação elástica mínima de 85%. O teor de incorporação de polímero SBS se situa em uma faixa em torno do valor de 3%, em decorrência da oscilação das propriedades dos ligantes asfálticos a serem modificados. A determinação do teor de

incorporação de SBS ocorre em função do cumprimento da recuperação elástica mínima de 85%;

- ECOFLEX B: Ligante asfáltico modificado pela incorporação de borracha moída de pneus inservíveis (AB8). O teor de incorporação desse agente modificador é de 15%.

As caracterizações das propriedades empíricas – ponto de amolecimento, penetração e recuperação elástica – foram realizadas nas amostras virgens dos ligantes asfálticos modificados por polímero SBS e borracha de pneu, assim como a verificação da viscosidade dinâmica (viscosímetro Brookfield) nas temperaturas de 135, 150 e 175°C.

Todos os ensaios realizados para a caracterização das propriedades empíricas dos ligantes asfálticos seguiram os procedimentos descritos nas normas apresentadas a seguir:

- ABNT NBR 6296: Produtos betuminosos semissólidos - Determinação da massa específica e densidade relativa;
- ABNT NBR 6560: Materiais betuminosos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola;
- ABNT NBR 6576: Materiais asfálticos - Determinação da penetração;
- ABNT NBR 11341: Derivados do petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland;
- ABNT NBR 15086: Materiais betuminosos - Determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro;
- ABNT NBR 15184: Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional;
- ABNT NBR 15529: Asfalto borracha - Propriedades reológicas de materiais não newtonianos por viscosímetro rotacional.

A caracterização das propriedades empíricas dos nanocompósitos asfálticos foi realizada na pesquisa de Melo (2014), assim como do ligante asfáltico de referência, CAP 50-70, proveniente da refinaria REPAR, localizada em Araucária - PR.

### 3.3 ETAPA 3 - DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

O procedimento de dosagem da mistura asfáltica modificada por polímero SBS foi realizado conforme a metodologia Superpave<sup>®</sup>. Essa metodologia difere no método de compactação em relação à metodologia Marshall e determina requisitos volumétricos da mistura asfáltica. Além disso, a metodologia Superpave<sup>®</sup> estabelece um teor de fíler a ser utilizado e contempla critérios quanto à sensibilidade à umidade (dano por umidade induzida).

As misturas compostas por nanocompósitos asfálticos e a mistura de referência (CAP 50-70) foram formuladas por Melo (2014), também em conformidade com a metodologia Superpave<sup>®</sup>. Nessa etapa de estudo, foram utilizados dois nanocompósitos asfálticos, um constituído de 2% de nanotubo de carbono e outro de 3% de nanoargila.

No que diz respeito à mistura asfáltica modificada por borracha moída de pneu, a dosagem foi realizada conforme a metodologia Marshall. Isso ocorreu devido à impossibilidade de operação do compactador giratório antes da execução do Segmento Monitorado 3<sup>2</sup>, uma vez que o equipamento havia sido recém adquirido pela UFSC.

#### 3.3.1 Produção das misturas asfálticas

O método de produção das misturas asfálticas dessa pesquisa, tanto para as misturas realizadas na etapa de dosagem quanto para as que se destinaram à moldagem de placas, seguiu os procedimentos estabelecidos pela norma AASHTO R 30.

A distribuição granulométrica dos agregados empregada foi determinada na etapa anterior e corresponde à mesma utilizada nas misturas da pesquisa de Melo (2014). Para o preparo das misturas, os agregados foram fracionados em oito peneiras de controle, conforme a metodologia de Melo (2014), de forma a compor precisamente a curva granulométrica estabelecida. O fracionamento dos agregados utilizado é apresentado na Tabela 8.

---

<sup>2</sup> Pesquisa: Desenvolvimento de Método para Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos. Fase 1: Trechos Experimentais e Materiais de Pavimentação – UFSC. O segmento foi executado em 2012 e aberto ao tráfego em março de 2014.

Tabela 8 - Fracionamento dos agregados para a composição granulométrica das misturas asfálticas.

<b>Fração passante</b>	<b>Fração retida</b>	<b>Quantidade de material (%)</b>
# 3/4"	# 1/2"	22,5
# 1/2"	# 3/8"	16,2
# 3/8"	# N° 4	18
# N° 4	# N° 10	19
# N° 10	# N° 16	6,9
# N° 16	# N° 50	7,6
# N° 50	# N° 200	4,4
# N° 200	Fundo	5,4

Fonte: Adaptado de Melo (2014).

Em relação aos ligantes asfálticos, estes foram condicionados em estufa à temperatura de usinagem, designada pela fornecedora Greca Asfaltos S.A., previamente à produção das misturas asfálticas. Cabe salientar que a curva viscosidade-temperatura não foi utilizada na determinação das temperaturas de usinagem e compactação, em virtude da elevada viscosidade apresentada pelos ligantes modificados. Portanto, nesse caso, as faixas de mistura e compactação ( $1,70 \pm 0,20$  e  $2,80 \pm 0,30$  poise, respectivamente) não se aplicam. Dessa forma, a Tabela 9 apresenta as temperaturas de usinagem e compactação recomendadas pelo fornecedor para a produção das misturas asfálticas, bem como a temperatura a qual os agregados foram condicionados.

Tabela 9 - Temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas modificadas com polímero SBS e borracha moída de pneu.

<b>Mistura asfáltica</b>	<b>Temperatura de usinagem (°C)</b>	<b>Temperatura dos agregados (°C)</b>	<b>Temperatura de compactação (°C)</b>
FLEXPAVE 60/85	165	175	160
ECOFLEX B	175	180	165

Fonte: Autor (2016).

Com o auxílio de um misturador mecânico, as misturas asfálticas foram produzidas e posteriormente levadas à estufa durante um período de duas horas, na temperatura de compactação, com o intuito de simular o envelhecimento do ligante a curto prazo. Após o período de duas horas, as misturas foram compactadas, por meio do

compactador giratório Superpave® ou pela mesa compactadora LCPC, desenvolvida pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*.

### 3.3.2 Dosagem Superpave

Com o auxílio do compactador giratório (*Superpave Giratory Compactor*), apresentado na Figura 23, foi possível determinar o teor de projeto de ligante asfáltico modificado por SBS para um tamanho nominal máximo de agregado de 19 mm e para um alto volume de tráfego.

Figura 23 - Compactador Giratório Servopac, fabricado pela IPC Global®.



Fonte: IPC Global (2016).

Para isso, foram produzidos corpos de prova com diferentes teores de ligante, conforme os procedimentos descritos nas normas AASHTO M 323 e AASHTO R 35. Três parâmetros foram estabelecidos para a moldagem dos corpos de prova: ângulo de rotação de  $1,25^\circ$ , velocidade de giro de 30 rotações por minuto e tensão de compressão vertical durante a rotação de 600kPa. Todos os corpos de prova foram produzidos com diâmetro de 150mm e altura de aproximadamente 110mm (variação decorrente dos diferentes teores de ligante asfáltico).

O teor de ligante inicial foi estimado em 4,0%, tendo como base a dosagem já realizada na pesquisa de Melo (2014), visto que a distribuição granulométrica dos agregados é a mesma.

Procedeu-se à moldagem de dois corpos de prova para cada um dos quatro teores de ligante estudados, correspondentes ao teor de ligante inicial (4,0%), e teores de  $\pm 0,5\%$  e  $+1,0\%$  em relação ao teor inicial. Tendo em vista que o tráfego estimado para a rodovia contemplada pela pesquisa é de  $N_{8,2t} = 1,64 \times 10^8$  (USACE), o esforço de compactação ( $N_{projeto}$ ) foi estabelecido em 125 giros, referente a um alto volume de tráfego, com  $N_{inicial}$  de 9 giros. Durante a moldagem, foi efetuado o controle de compactação por meio do registro das leituras da altura do corpo de prova em determinados ciclos. Os ciclos em que os registros de altura foram efetuados correspondem ao  $N_{inicial}$ ,  $N_{projeto}$  e aos ciclos múltiplos de 10 até a finalização do procedimento de moldagem, no  $N_{projeto}$ .

Após a moldagem dos oito corpos de prova, foi realizada a determinação da massa específica aparente ( $G_{mb}$ ) dos mesmos, conforme a ASTM D 2726. A partir da massa específica aparente e do controle da altura de cada corpo de prova durante a compactação, foi possível estabelecer um fator de correção de volume, singular para cada corpo de prova. Esse fator de correção consiste na razão entre a massa específica aparente ( $G_{mb}$ ) do corpo de prova no  $N_{projeto}$ , medida com o auxílio de uma balança hidrostática, e a massa específica estimada, que considera o volume do corpo de prova igual ao de um cilindro perfeito. Estabelecido o fator de correção, torna-se possível calcular a massa específica aparente do corpo de prova para qualquer número de giros durante a dosagem, em que se teve o controle de sua altura.

A massa específica máxima medida ( $G_{mm}$ ) foi determinada segundo o Método de Rice para cada uma das misturas com os diferentes teores de ligante, seguindo os procedimentos descritos na ASTM D 2041. Em posse dos resultados de massa específica máxima medida das misturas asfálticas para cada um dos teores de ligante citados e de massa específica aparente dos corpos de prova, tornou-se possível o cálculo das seguintes propriedades volumétricas dos corpos de prova produzidos: volume de vazios ( $V_v$ ), vazios do agregado mineral (VAM), relação betume/vazios (RBV), teor de ligante efetivo ( $P_{le}$ ) e proporção pó/asfalto (P/A), conforme as Equações 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5:

$$V_v = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \quad (3.1)$$



$$VAM = 100 - \frac{Gmb \times \sum \%n}{Gsb} \quad (3.2)$$

$$RBV = 100 \times \frac{VAM - Vv}{VAM} \quad (3.3)$$

$$P/A = \frac{Passante N^{\circ}200}{P_{le}} \quad (3.4)$$

$$P_{le} = -(P_{ag} \times G_l) \times \frac{(Gse - Gsb)}{(Gse \times Gsb)} + P_{l,estimado} \quad (3.5)$$

Sendo que:

$Vv$  = Volume de vazios [%];

$VAM$  = Vazios do agregado mineral [%];

$RBV$  = Relação betume/vazios [%];

$P/A$  = Proporção pó/asfalto;

$P_{le}$  = Teor de ligante efetivo [%];

$Gmm$  = Massa específica máxima medida [ $g/cm^3$ ];

$Gmb$  = Massa específica aparente [ $g/cm^3$ ];

$\sum \%n$  = Percentual em massa do agregado na mistura [%];

$Gsb$  = Massa específica aparente da composição de agregados [ $g/cm^3$ ];

$Passante N^{\circ}200$  = Material passante na peneira  $N^{\circ}200$  [%];

$Gse$  = Massa específica efetiva da composição de agregados [ $g/cm^3$ ];

$P_{ag}$  = Percentual de agregados na mistura [% em massa];

$G_l$  = Massa específica do ligante [ $g/cm^3$ ].

O teor de ligante de projeto é definido em função dos critérios volumétricos e de compactação da especificação Superpave<sup>®</sup>, para um tamanho máximo nominal dos agregados de 19mm e alto volume de tráfego. Tais requisitos são: porcentagem de vazios no  $N_{projeto}$  de 4%, no  $N_{inicial} > 11\%$  e no  $N_{máximo} > 2\%$ ;  $VAM > 13\%$ ;  $RBV$  entre 65 e 75% e proporção pó/asfalto efetivo entre 0,8 e 1,6.

Após a determinação do teor de ligante de projeto, foram moldados dois corpos de prova com o teor de projeto, sob esforço de compactação de 205 giros ( $N_{máximo}$ ), com o objetivo de verificar o critério de porcentagem de vazios no  $N_{máximo}$ , referente à condição de compactação da mistura ao fim de sua vida de serviço.

### 3.3.3 Dano por umidade induzida

A última etapa da dosagem Superpave consistiu em avaliar a sensibilidade à umidade da mistura asfáltica. Para isso, foi empregado o ensaio de Lottman modificado, constante na norma ABNT NBR 15617:2015.

Esse ensaio foi realizado para a mistura asfáltica modificada por polímero e para a mistura asfáltica modificada por borracha moída de pneu, com os teores de ligante de projeto definidos nos estudos de dosagem. Para cada mistura, foram moldados seis corpos de prova com diâmetro de 100mm, altura de 63,5mm e porcentagem de vazios entre 6 e 8%. Os corpos de prova foram subdivididos em dois conjuntos e levados à ruptura para determinação da resistência à tração por compressão diametral, sendo que um dos conjuntos de três corpos de prova foi submetido a um condicionamento prévio. Tal condicionamento consistiu na saturação com água dos corpos de prova entre 55 e 80%, resfriamento à temperatura de -18°C durante 16 horas e banho de água a 60°C, por um período de 24 horas.

A sensibilidade à água da mistura asfáltica é definida como a razão de resistência à tração retida (RRT), que corresponde à relação entre a resistência à tração média do conjunto de corpos de prova que sofreu condicionamento ( $RT_2$ ) e a resistência à tração média do conjunto não-condicionado ( $RT_1$ ). Para que a mistura asfáltica seja aprovada no critério de sensibilidade à água, o valor de resistência à tração retida deve ser superior a 70% (ABNT NBR 15617, 2015).

Uma vez estabelecida a formulação da mistura asfáltica, passa-se à próxima etapa, correspondente à produção de corpos de prova para os ensaios de desempenho.

## 3.4 ETAPA 4 - MOLDAGEM E CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS DE CONCRETO ASFÁLTICO

Após a formulação das misturas asfálticas, foram moldadas placas de concreto asfáltico para a realização dos ensaios de deformação permanente, módulo complexo e vida de fadiga.

Para avaliar a resistência à deformação permanente, foram moldadas duas placas de 50×18×5 cm, por mistura estudada, totalizando quatro placas (duas com asfalto-borracha e duas com asfalto modificado por polímero SBS).

Quanto à avaliação do módulo complexo e da vida de fadiga, foram moldadas três placas de 60×40×9 cm para cada mistura asfáltica estudada, totalizando seis placas.

A moldagem das placas destinadas aos ensaios de desempenho foi realizada na mesa compactadora LCPC, com o intuito de simular a compactação de misturas asfálticas em campo, para uma condição de tráfego pesado. A moldagem das placas seguiu os procedimentos descritos na norma francesa AFNOR NF P 98-250-2, a qual especifica, para tráfego pesado, o nível de compactação forte “*tipo 2 bis*” para as placas que foram serrados os corpos de prova para os ensaios de módulo complexo e fadiga, e o nível de compactação forte “*tipo 2*” para as placas de deformação permanente.

Após a compactação das placas de fadiga e módulo complexo, foram extraídos cinco corpos de prova prismáticos por placa, com dimensões aproximadas de 400,0×50,8×63,5 mm, por meio da utilização de uma serra de corte. Os corpos de prova prismáticos foram extraídos na mesma direção que foi realizada a compactação da placa.

Posteriormente, os corpos de prova prismáticos e as placas de deformação permanente foram caracterizados em termos de geometria e porcentagem de vazios.

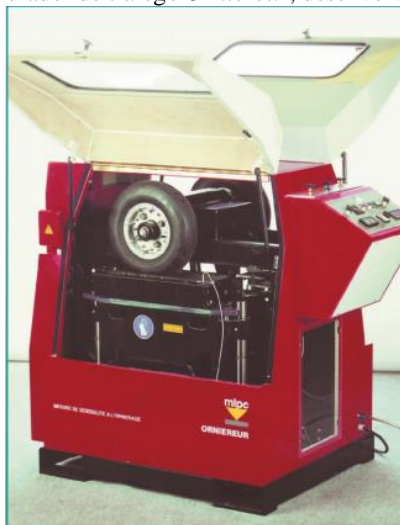
Cabe salientar que, após a obtenção das placas para deformação permanente e dos corpos de prova prismáticos, os mesmos tiveram um período de descanso de 20 dias, anterior à realização dos ensaios de desempenho.

### 3.5 ETAPA 5 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO E DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

#### 3.5.1 Desempenho à deformação permanente das misturas asfálticas

O desempenho das misturas de concreto asfáltico frente à deformação permanente foi avaliado com a utilização do simulador de tráfego *Orniéreur*, apresentado na Figura 24, conforme os procedimentos da norma francesa AFNOR NF P 98-253-1.

Figura 24 - Simulador de tráfego *Orniéreur*, desenvolvido pelo LCPC.



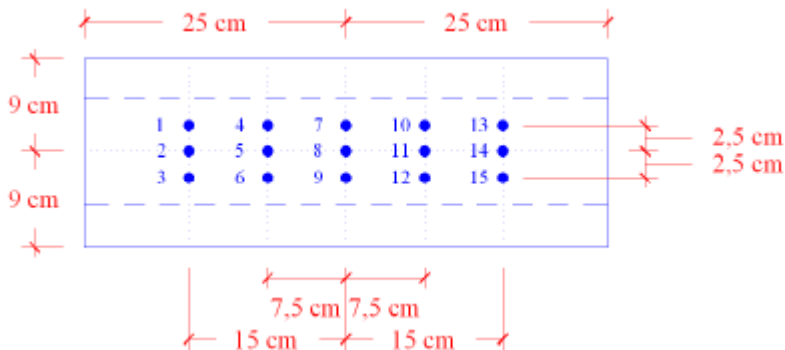
Fonte: VECTRA France (2016).

Cada mistura asfáltica estudada foi representada por duas placas, que foram submetidas a passagens consecutivas de um eixo simples de roda simples, na mesma trilha de roda. Nesse ensaio, o pneu fica permanentemente em contato com a placa e aplica carregamento em ciclos longitudinais com frequência de 1 Hz, sendo que um ciclo é referente a duas passagens do eixo na trilha de roda (ida e volta). O carregamento aplicado é padronizado em 5 kN, com a pressão de insuflagem dos pneus de 0,6 MPa. O equipamento permite a realização do ensaio em duas placas simultaneamente, sendo que em uma das placas se instala um controlador de temperatura. Previamente ao início do ensaio, as placas foram submetidas a dois condicionamentos: o primeiro condicionamento correspondeu à aplicação de 1000 ciclos de carregamento a uma temperatura entre 15 e 25°C, com a finalidade de acomodar adequadamente as placas nos moldes de ensaio; no segundo condicionamento, as placas foram submetidas à temperatura de 60°C por um período de 8 a 12 horas, para garantir a uniformidade de temperatura em todas as regiões das placas a serem ensaiadas.

Após os condicionamentos, foram realizadas as primeiras leituras das distâncias da superfície das placas em relação a um gabarito referencial, para que fosse quantificada a evolução da medida de deformação permanente ao longo do ensaio. Foram também realizadas leituras nos ciclos 100, 300, 1000, 3000, 10000 e 30000, em 15 pontos

distintos de cada placa, sendo que, após cada leitura, o simulador de tráfego permaneceu inoperante até que as placas atingissem novamente a temperatura de ensaio de 60°C. A Figura 25 identifica os pontos de leitura das deformações permanentes nas placas de concreto asfáltico.

Figura 25 - Pontos de leitura das deformações permanentes na placa de concreto asfáltico.



Fonte: Adaptado de AFNOR NF P 98-253-1 (1993 *apud* Melo, 2014).

A profundidade da deformação permanente em cada número de ciclos de controle foi calculada pela diferença entre a média das profundidades medidas nos 15 pontos de leitura e a média das leituras referenciais, realizadas no ciclo zero. No entanto, a deformação permanente é mais comumente analisada em termos percentuais, sendo calculada conforme a equação 3.5.

$$A_i = 100 \times \frac{\sum(m_{ij} - m_{0j})}{15 \times e} \quad (3.5)$$

sendo que:

$A_i$  = Afundamento médio na superfície da placa no ciclo  $i$  [%];

$m_{ij}$  = Leitura da profundidade no ciclo  $i$  no ponto  $j$ ;

$m_{0j}$  = Leitura da profundidade no ciclo zero no ponto  $j$ ;

$e$  = Espessura da placa de concreto asfáltico.

Após a obtenção dos resultados de afundamento médio para cada número de ciclos de controle, confeccionou-se a curva de evolução da deformação permanente em função do número de ciclos, em escala logarítmica.

Os resultados foram julgados conforme o critério francês para deformação permanente, o qual limita o afundamento na trilha de roda em 10%, para camadas de concreto asfáltico utilizadas como revestimento. Há critérios mais rigorosos, como o estabelecido pelo grupo europeu COST 333, limitando o afundamento na trilha de roda em 5% para misturas asfálticas densas.

### 3.5.2 Comportamento reológico e desempenho à fadiga das misturas asfálticas

Tanto para a caracterização do comportamento reológico quanto para o ensaio de vida de fadiga das misturas asfálticas modificadas por borracha moída de pneu e por polímero SBS, foi utilizado o aparato 4 pontos, fabricado pela empresa australiana IPC Global<sup>®</sup>, que pode ser visualizado na Figura 26.

Figura 26 - Aparato 4 pontos, desenvolvido pela IPC Global<sup>®</sup>.



Fonte: IPC Global<sup>®</sup> (2016).

Esse equipamento é capaz de aplicar pulsos de carga sinusoidais consecutivos nos terços médios de corpos de prova prismáticos, resultando em esforços de flexão alternada (tração e compressão), medindo além da força máxima aplicada, o deslocamento máximo no meio do vão do corpo de prova prismático. Para que a temperatura durante os ensaios seja constante, o aparato 4 pontos permanece em uma câmara adiabática controlada.

Os testes realizados foram conduzidos com o auxílio de um software disponibilizado pela IPC Global®, denominado UTS 018. A partir do software, é possível obter os valores de ângulo de fase, módulo complexo, amplitude da deformação, amplitude da tensão, energia dissipada e temperatura a cada ciclo de carregamento.

O comportamento reológico das misturas de concreto asfáltico foi avaliado por meio do ensaio de módulo complexo, a diversas frequências de carregamento e temperaturas, conforme prescreve a norma europeia EN 12697-26. Foram testados dois corpos de prova por mistura asfáltica estudada. Para que o ensaio fosse representativo, a seleção dos corpos de prova procedeu da seguinte forma: em posse dos resultados dos parâmetros volumétricos, foram selecionados para o ensaio de módulo complexo os corpos de prova com valores de porcentagem de vazios mais próximos do valor médio calculado desse parâmetro. Para o cálculo do valor médio da porcentagem de vazios, foram considerados todos os corpos de prova prismáticos de uma determinada mistura. A rigidez dos corpos de prova foi determinada nas seguintes frequências: 0,1 Hz, 0,2 Hz, 0,5 Hz, 1,0 Hz, 2,0 Hz, 5 Hz, 10 Hz e 20 Hz. Foram aplicados 100 ciclos de carregamento por frequência de estudo, a uma reduzida amplitude de deformação controlada de 50  $\mu\text{m/m}$ , de modo a não danificar o corpo de prova e garantir o comportamento viscoelástico linear do concreto asfáltico. O resultado do módulo complexo de uma mistura asfáltica, decorrente da aplicação de ciclos de carregamento à determinada frequência e temperatura, corresponde à média dos valores obtidos no centésimo ciclo dos dois corpos de prova testados. Os ensaios foram realizados nas seguintes temperaturas: 0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30°C.

Em posse dos resultados dos ensaios de módulo complexo, foram realizadas análises do comportamento reológico das diferentes misturas asfálticas, gerando curvas mestras e contemplando as propriedades viscoelásticas do material.

O ensaio de fadiga, também realizado com a utilização do aparato 4 pontos, foi executado pela aplicação de carregamento sinusoidal sob deformação controlada, seguindo os procedimentos descritos na norma europeia EN 12697-24. A temperatura de ensaio seria determinada com base no comportamento reológico das diferentes misturas, por meio da análise do plano complexo (Cole-Cole) de cada mistura asfáltica. Entretanto, tendo em vista o intento de comparar os resultados de vida de fadiga da mistura modificada por borracha moída de pneu com os resultados obtidos de outros segmentos monitorados,

cujos ensaios de vida de fadiga foram realizados na temperatura de 20°C, os ensaios de resistência à fadiga dessa pesquisa também foram realizados nessa temperatura, tanto para as misturas modificadas por borracha moída de pneu quanto para a mistura modificada por polímero SBS. A frequência de carregamento foi definida em 10 Hz, valor equivalente à velocidade de tráfego de 72 km/h.

Portanto, os testes foram conduzidos com a mesma temperatura e frequência de carregamento para todos os corpos de prova representativos de uma mistura asfáltica, variando somente a amplitude de deformação imposta.

O critério de seleção de corpos de prova para o ensaio de fadiga correspondeu à porcentagem de vazios. Para que o conjunto de corpos de prova fosse homogêneo, foram selecionados dez de um total de quinze corpos de prova confeccionados, sendo que os escolhidos possuíam valores de porcentagens de vazios mais próximos do valor médio desse parâmetro, calculado para uma determinada mistura.

Estabelecidos os parâmetros de carregamento, o ensaio de vida de fadiga se dá por finalizado quando o corpo de prova prismático apresentar uma redução de 50% em relação ao valor do módulo complexo inicial, determinado no centésimo ciclo de carregamento.

Após os ensaios de vida de fadiga, foram obtidas as equações características desse comportamento, relacionando os níveis de deformação e o número de solicitações de carga, para cada mistura asfáltica estudada. A formulação das equações é apresentada na equação 3.6.

$$N = a \times \varepsilon^b \quad (3.6)$$

sendo que:

$N$  = Número de solicitações de carga para atingir o critério de finalização do ensaio;

$\varepsilon$  = Deformação específica de tração;

$a, b$  = Constantes determinadas experimentalmente.

### 3.6 ETAPA 6 – SIMULAÇÃO DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO ASFÁLTICO

Com o objetivo de evidenciar os efeitos proporcionados pela incorporação de agentes modificadores nas misturas asfálticas, foram



simuladas estruturas de pavimento que diferem na constituição da camada de revestimento asfáltico. Com o auxílio do software ViscoRoute (desenvolvido pela IFSTTAR/França), foram simuladas sete estruturas de pavimento, contemplando todas as misturas asfálticas estudadas. O software considera o comportamento viscoelástico do revestimento asfáltico, ponderando a influência da velocidade de tráfego e da temperatura do revestimento asfáltico, por meio dos parâmetros viscoelásticos do modelo de Huet-Sayegh. A expressão do módulo complexo em função dos parâmetros de Huet-Sayegh, determinados a partir do software ViscoAnalyse, é apresentada na equação 3.7.

$$|E^*(i\omega t(\theta))| = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega t(\theta))^{-k} + (i\omega t(\theta))^{-h}} \quad (3.7)$$

sendo que:

$|E^*|$  = Módulo complexo;

$E_\infty$  = Módulo complexo infinito;

$E_0$  = Módulo estático;

$i$  = Número complexo;

$\tau$  = Tempo de relaxação;

$\omega$  = Frequência angular;

$f$  = Frequência de carregamento;

$k, h$  = Parâmetros dos elementos parabólicos;

$\delta$  = Constante adimensional;

As estruturas de pavimento definidas fazem parte de dois segmentos monitorados da BR-101 Sul, lote 29, localizado no contorno de Araranguá-SC, entre os quilômetros 411,5 e 412,5. O tráfego estimado para a rodovia é de  $N_{8,2t} = 1,64 \times 10^8$  (USACE). Tanto os agregados minerais quanto a composição granulométrica empregados nessa pesquisa foram os mesmos aplicados na execução do revestimento asfáltico dos Segmentos Monitorados. O ligante asfáltico utilizado para a execução do revestimento asfáltico do Segmento Monitorado 5 foi o CAP 50-70, cujas propriedades foram investigadas na pesquisa de Melo (2014). Quanto ao Segmento Monitorado 3, foram utilizados os ligantes asfálticos CAP 50-70 e ECOFLEX B (asfalto-borracha). Os módulos de elasticidade das camadas de base, sub-base e camada final de terraplenagem foram estimados por Melo (2014) a partir da retroanálise

de bacias deflectométricas medidas em 2014 com o FWD (*Falling Weight Deflectometer*), com o auxílio do software BAKFAA.

As estruturas de pavimento dos segmentos monitorados, assim como os materiais constituintes das camadas que o compõe, podem ser descritos da seguinte forma:

- Camada de revestimento asfáltico: Mistura de concreto asfáltico com 17 cm de espessura;
- Camada de base: Camada de 18 cm de espessura, executada em brita graduada de composição granulométrica em conformidade com a Faixa B do DNIT;
- Camada de sub-base: Camada de 20 cm de espessura, executada em macadame seco, conforme especificação do DEINFRA/SC;
- Camada final de terraplenagem: Camada executada em solo de páleo duna provindo de jazida. Os últimos 60 cm foram executados em três camadas, sendo que as duas camadas inferiores foram compactadas a 100% do Proctor Normal e a camada superior compactada a 100% do Proctor Intermediário.

As estruturas de pavimento dos Segmentos Monitorados 3 e 5 diferem quanto à composição da camada de revestimento: o Segmento Monitorado 3 possui 11,4 cm de concreto asfáltico com CAP 50-70 e uma camada subjacente de asfalto-borracha de espessura 5,6 cm; o Segmento Monitorado 5 possui 17 cm de concreto asfáltico com CAP 50-70.

Os parâmetros elásticos (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson) utilizados para as simulações numéricas são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Parâmetros elásticos das camadas da estrutura de pavimento.

<b>Parâmetros elásticos</b>	<b>Base (Brita graduada)</b>	<b>Sub-base (Macadame seco)</b>	<b>Subleito (Páleo duna)</b>
E (MPa)	260	210	180
$\nu$	0,35	0,35	0,35

Fonte: Adaptado de Melo (2014).

A respeito da temperatura do revestimento asfáltico e da velocidade de tráfego, esses foram determinados de acordo com os parâmetros estabelecidos nos ensaios de fadiga – temperatura de 20°C e

velocidade de tráfego de 72 km/h (equivalente à frequência de 10 Hz). Salienta-se que a temperatura média anual da região onde está inserido o Contorno de Araranguá é de 19,1°C.

Quanto à configuração do carregamento para as simulações, utilizando o software ViscoRoute, foi definido o semieixo do eixo padrão de 8,2 toneladas, sendo que o mesmo é composto por rodas duplas. A distância entre rodas é de 32 cm e a carga por roda é de 2050 kgf, sendo que a área de contato pneu-pavimento foi considerada como circular, de raio 10,8 cm. A pressão de contato pneu-pavimento foi estabelecida em 5,6 kgf/cm<sup>2</sup>.

Para cada simulação, foi obtido o valor da deformação específica de tração na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico. A partir das curvas de fadiga, obtidas na etapa anterior, foi estimado o número de solicitações do eixo padrão de 8,2 toneladas que causará a ruptura por fadiga do revestimento asfáltico, considerando, nesse momento, o fator campo-laboratório igual a 1.



## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Por meio da realização dos ensaios apresentados no programa experimental desse estudo, foram obtidos resultados que serão discutidos nas seções seguintes. Estas estão organizadas de acordo com a sequência de etapas disposta no programa experimental. Uma vez que a Etapa 1 trata da caracterização dos agregados minerais e dos agentes modificadores, já apresentada no capítulo anterior, a discussão dos resultados terá início a partir da Etapa 2.

### 4.1 ETAPA 2 – CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES EMPÍRICAS E REOLÓGICAS DOS LIGANTES ASFÁLTICOS

Os ligantes asfálticos estudados foram caracterizados, em termos de suas propriedades empíricas, conforme preconizam as normas brasileiras. Quanto à viscosidade dinâmica, esta foi determinada também conforme a norma brasileira.

O ligante FLEXPAVE 60/85, modificado por polímero SBS, teve dez determinações de suas propriedades, em função da realização de um estudo independente<sup>3</sup> envolvendo as diferentes partidas de amostras desse ligante. A Tabela 11 apresenta a média das dez determinações realizadas de cada propriedade estudada. Em cada uma das dez amostras desse ligante, foram feitas cinco medidas de penetração, duas medidas de ponto de amolecimento, três medidas de recuperação elástica e nove medidas de viscosidade dinâmica (três medidas de viscosidade em cada temperatura, 135, 150 e 175°C). Os resultados apresentados após o envelhecimento do ligante a curto prazo (RTFOT) foram obtidos de um estudo realizado pela Greca Asfaltos S.A. (2012).

---

<sup>3</sup> Ensaios realizados com ligantes e mistura aplicados na Ponte de Laguna (BR-101). Relatório de Ensaio, abril de 2015. Restrito.

Tabela 11 - Resultados de penetração, ponto de amolecimento, recuperação elástica e viscosidade aparente do ligante FLEXPAVE 60/85.

<b>Propriedades</b>	<b>Norma</b>	<b>Resultado</b>	<b>Especificação</b>
Penetração, (100g, 25°C, 5s), 0,1mm	NBR 6576	50	40 a 70
Ponto de Amolecimento, °C	NBR 6560	73	Mín. 60
Viscosidade Brookfield a 135°C (spindle 21, 20 rpm), cP	NBR 15184	1910	Máx. 3000
Viscosidade Brookfield a 150°C (spindle 21, 50 rpm), cP		640	Máx. 2000
Viscosidade Brookfield a 175°C (spindle 21, 100 rpm), cP		290	Máx. 1000
Recuperação Elástica a 25°C, 20cm, %	NBR 15086	90	Mín. 85
<b>Resultados das propriedades no resíduo do RTFOT</b>			
Varição de massa do RTFOT, %	NBR 15235	0,0417	Máx. 1,0
Varição do ponto de amolecimento, °C	NBR 6560	5	-5 a +7
Porcentagem da penetração original, %	NBR 6576	67,5	Mín. 60

Fonte: Autor (2016).

Os resultados dos ensaios de caracterização do ligante asfáltico modificado por borracha moída de pneu, ECOFLEX B, conduzidos por Trichês (2014)<sup>4</sup>, podem ser visualizados na Tabela 12. Assim como para o ligante FLEXPAVE 60/85, os resultados do resíduo do RTFOT são provenientes do estudo da Greca Asfaltos S.A. (2012).

<sup>4</sup> Ensaios de caracterização do ligante asfáltico executado na construção do Segmento Monitorado de Araranguá.

Tabela 12 - Resultados de penetração, ponto de amolecimento, ponto de fulgor, recuperação elástica e viscosidade aparente do ligante ECOFLEX B.

<b>Propriedades</b>	<b>Norma</b>	<b>Resultado</b>	<b>Especificação</b>
Penetração, (100g, 25°C, 5s), 0,1mm	NBR 6576	50	30-70
Ponto de amolecimento, °C	NBR 6560	60	Mín. 55
Viscosidade Brookfield a 175°C (spindle 3, 20 rpm), cP	NBR 15529	1520	800-2000
Ponto de fulgor, °C	NBR 11341	>240	Mín. 235
Recuperação Elástica a 25°C, 20cm, %	NBR 15086	78	Mín. 50
<b>Resultados das propriedades no resíduo do RTFOT</b>			
Varição de massa do RTFOT, %	NBR 15235	0,0357	Máx. 1,0
Varição do ponto de amolecimento, °C	NBR 6560	5	Máx. 10
Porcentagem da penetração original, %	NBR 6576	75	Mín. 55

Fonte: Adaptado de Trichês (2014).

A partir da Tabela 11 e da Tabela 12, pode-se verificar que, apesar de possuírem resultados similares de penetração, os ligantes modificados apresentam disparidades quanto à recuperação elástica e quanto ao ponto de amolecimento. O ligante modificado por polímero SBS, por apresentar maior ponto de amolecimento, está sujeito a oferecer maior resistência às tensões cisalhantes decorrentes do tráfego, reduzindo a ocorrência de afundamento nas trilhas de roda. A respeito da recuperação elástica, por apresentar resultado mais satisfatório, o ligante modificado por polímero SBS tende a demonstrar melhor desempenho frente à deformação permanente e ao dano por fadiga, em relação ao ligante modificado por borracha moída de pneu. Isso está associado à redução da componente viscosa do material, visto que, para o ligante FLEXPAVE 60/85, a componente elástica é predominante.

Quanto aos resultados após envelhecimento a curto prazo, os ligantes asfálticos modificados mantiveram suas propriedades em conformidade com os limites estabelecidos pelas normas vigentes.

A respeito do ligante asfáltico convencional CAP 50-70 e dos nanocompósitos asfálticos, cujas caracterizações foram realizadas por Melo (2014) e são respectivamente apresentadas na Tabela 13 e na Tabela 14, algumas distinções podem ser apontadas em relação às propriedades dos ligantes modificados por polímero SBS e borracha moída de pneu. Cabe salientar que na Tabela 14 estão expostas as caracterizações dos dois nanocompósitos asfálticos que apresentaram melhor desempenho no ensaio de deformação permanente, e que,

portanto, foram os selecionados para o estudo do comportamento reológico e desempenho à fadiga das misturas asfálticas, segundo o autor. O nanocompósito asfáltico NA-3% foi modificado por meio da adição de 3% de nanoargila organofílica, enquanto o outro, NTC-2%, pela adição de 2% de nanotubo de carbono.

Tabela 13 - Resultados de penetração, ponto de amolecimento, IST e viscosidade aparente do CAP 50-70.

<b>Propriedades</b>	<b>Norma</b>	<b>Resultado</b>	<b>Especificação</b>
Penetração, (100g, 25°C, 5s), 0,1mm	NBR 6576	57	50-70
Ponto de amolecimento, °C	NBR 6560	47,9	Mín. 46
Índice de Susceptibilidade Térmica	-	-1,44	(-1,5) a (+0,7)
Viscosidade Brookfield a 135°C (spindle 21, 20 rpm), cP	NBR 15184	290	Mín. 274
Viscosidade Brookfield a 150°C (spindle 21, 50 rpm), cP		150	Mín. 112
Viscosidade Brookfield a 175°C (spindle 21, 100 rpm), cP		60	57 a 285

Fonte: Adaptado de Melo (2014).

Tabela 14 - Resultados de penetração, ponto de amolecimento, IST, compatibilidade e viscosidade aparente dos nanocompósitos asfálticos.

<b>Propriedades</b>	<b>Norma</b>	<b>Resultados</b>	
		<b>NA-3%</b>	<b>NTC-2%</b>
Penetração, (100g, 25°C, 5s), 0,1mm	ASTM D 5	55	54
Ponto de amolecimento, °C	ASTM D 36	50,2	51,9
Índice de Susceptibilidade Térmica	-	-0,92	-0,55
Compatibilidade (24h): diferença de PA, °C	NBR 15166	1,0	0,0
Viscosidade Brookfield a 135°C (spindle 21, 20 rpm), cP	ASTM D 4402	420,0	410,0
Viscosidade Brookfield a 150°C (spindle 21, 50 rpm), cP		220,0	210,0
Viscosidade Brookfield a 175°C (spindle 21, 100 rpm), cP		86,0	84,0

Fonte: Adaptado de Melo (2014).

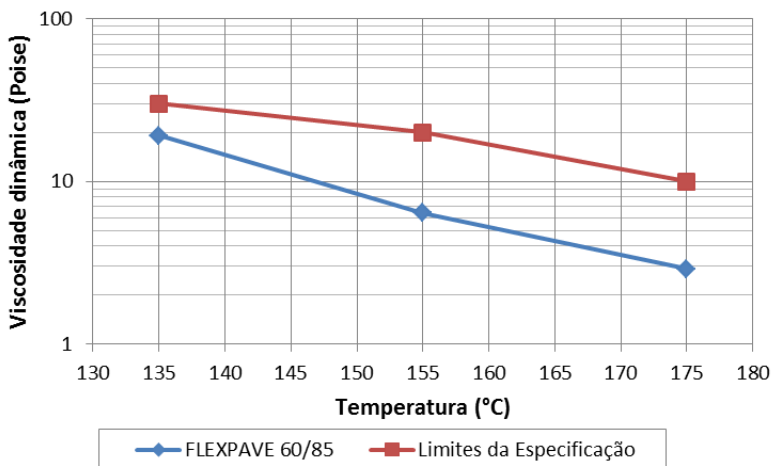
Em termos de comparação, os resultados de penetração e ponto de amolecimento indicam que o CAP 50-70 e os nanocompósitos



asfálticos demonstram menor consistência e maior susceptibilidade à variação de temperatura em relação aos ligantes modificados por polímero SBS e por borracha moída de pneu. Por conseguinte, destaca-se a tendência das misturas produzidas com ligante convencional ou com nanocompósitos asfálticos em apresentar maiores deformações plásticas em relação aos ligantes modificados. Embora a determinação das propriedades empíricas tenha sido fundamental para a predição do comportamento das misturas asfálticas convencionais, estas não remetem claramente ao comportamento apresentado pelas misturas asfálticas produzidas com ligantes modificados.

Tratando-se da viscosidade dinâmica, o ensaio com o viscosímetro rotacional Brookfield foi realizado nas temperaturas de 135, 150 e 175°C para o ligante asfáltico modificado por polímero SBS, utilizando o *spindle* 21 e diferentes frequências oscilatórias, e na temperatura de 175°C para o ligante modificado por borracha moída de pneu, com o *spindle* 3 a 20 rpm. Constatou-se que essa propriedade reológica dos ligantes estudados se enquadra nas respectivas especificações brasileiras. A Figura 27 mostra a curva de viscosidade dinâmica em função da temperatura de ensaio do ligante modificado por polímero SBS, FLEXPAVE 60/85 e os limites máximos da especificação brasileira, ABNT NBR 15184:2004.

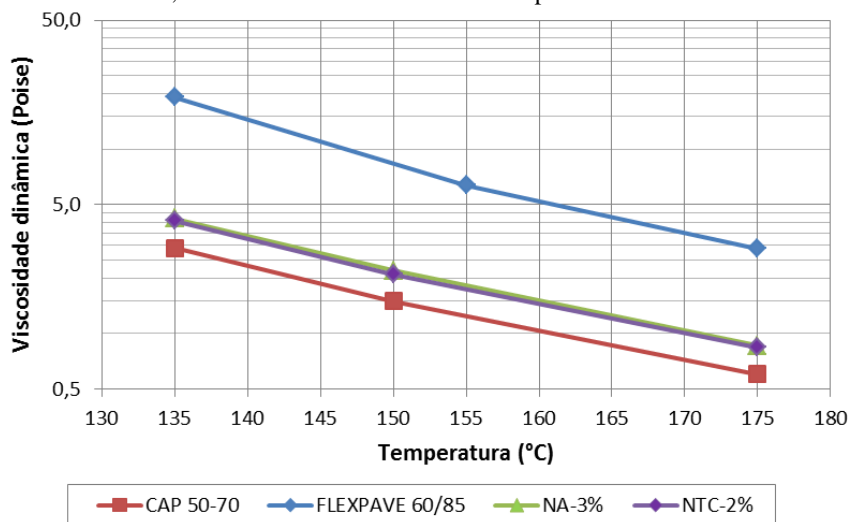
Figura 27 - Curva de viscosidade dinâmica em função da temperatura do ligante FLEXPAVE 60/85.



Fonte: Autor (2016).

Confrontando os resultados obtidos de viscosidade dinâmica do ligante FLEXPAVE 60/85 com os resultados do CAP 50-70 e dos nanocompósitos asfálticos, expostos por Melo (2014), nota-se uma considerável diferença em termos da resistência ao fluxo dos ligantes. Enquanto os nanocompósitos asfálticos demonstraram um acréscimo de 45% em relação ao valor de viscosidade dinâmica do CAP 50-70, o ligante modificado por polímero SBS apresentou um valor de viscosidade 559% maior, em comparação ao ligante convencional. Esses resultados refletem a necessidade de altas temperaturas para fazer uso do ligante modificado por polímero SBS e garantir o adequado envolvimento das partículas de agregados de uma mistura asfáltica. Na Figura 28 são apresentadas as curvas de viscosidade dinâmica em função da temperatura dos ligantes asfálticos mencionados.

Figura 28 - Curvas de viscosidade dinâmica em função da temperatura do CAP 50-70, FLEXPAVE 60/85 e dos nanocompósitos asfálticos.



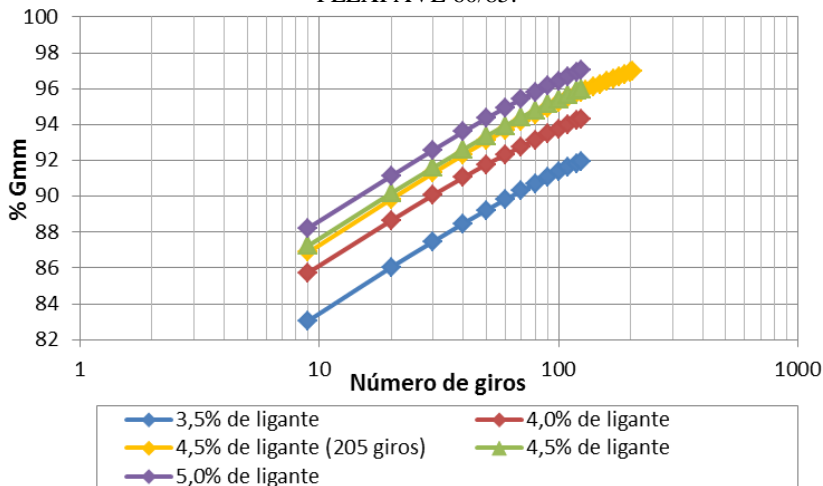
#### 4.2 ETAPA 3 - DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Nessa etapa, serão apresentados os resultados obtidos pela dosagem Superpave, realizada com o ligante asfáltico modificado por polímero SBS (FLEXPAVE 60/85), e, posteriormente, os resultados encontrados nas dosagens realizadas por Melo (2014) e por Trichês (2013), respectivamente.

### 4.2.1 Dosagem Superpave

A dosagem Superpave foi efetuada estimando-se o teor de ligante inicial de 4,0%. A partir desse teor inicial estimado, foram estabelecidos mais três teores de ligante para a moldagem dos corpos de prova:  $\pm 0,5$  e  $+1,0\%$ . Foram moldados, inicialmente, dois corpos de prova para cada teor de ligante estabelecido, com esforço de compactação de 125 giros, correspondente ao  $N_{projeto}$ . A partir das determinações da massa específica aparente dos corpos de prova e da massa específica máxima medida das misturas produzidas, foi possível definir o teor de ligante de projeto correspondente à porcentagem de vazios de 4,0%. Então, foi realizada a moldagem de dois corpos de prova com esforço de compactação de 205 giros, no teor de projeto, para verificar o requisito volumétrico no  $N_{máximo}$ . Na Figura 29 são apresentadas as curvas de compactação das misturas asfálticas contendo diferentes teores do ligante modificado FLEXPAVE 60/85.

Figura 29 - Curvas de compactação das misturas asfálticas contendo o ligante FLEXPAVE 60/85.



Fonte: Autor (2016).

Os resultados dos parâmetros volumétricos obtidos por meio da dosagem, assim como os critérios volumétricos estabelecidos pela especificação Superpave, podem ser visualizados na Tabela 15.

Tabela 15 - Parâmetros volumétricos de dosagem das misturas asfálticas contendo o ligante FLEXPAVE 60/85.

Teor de ligante (%)	Gmm (g/cm <sup>3</sup> )	Gmb no N <sub>projeto</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	% Gmm		
			N <sub>inicial</sub> (9 giros)	N <sub>projeto</sub> (125 giros)	N <sub>máximo</sub> (205 giros)
3,5	2,743	2,522	83,06	91,95	-
4,0	2,720	2,565	85,75	94,32	-
4,5	2,695	2,587	87,25	96,00	96,95
5,0	2,679	2,599	88,23	97,01	-
<b>Critérios Superpave</b>			< 89 ✓	= 96 ✓	< 98 ✓

Fonte: Autor (2016).

Os resultados apresentados na Tabela 15 indicam que o teor de ligante de 4,5% produz uma mistura asfáltica com 4% de vazios no N<sub>projeto</sub>. Além disso, a mistura asfáltica produzida com esse teor de ligante se enquadra nos demais critérios volumétricos relacionados ao esforço de compactação, estabelecidos pela especificação Superpave no N<sub>inicial</sub> e no N<sub>máximo</sub>.

No que concerne às propriedades volumétricas das misturas asfálticas produzidas, calculadas a partir dos resultados da dosagem apresentados na Tabela 15, estas se encontram dentro dos limites estabelecidos pela especificação Superpave®, para o teor de ligante de projeto de 4,5%. Na Tabela 16 constam os resultados das propriedades volumétricas referentes às misturas asfálticas produzidas na etapa de dosagem.

Tabela 16 - Propriedades volumétricas das misturas asfálticas contendo o ligante FLEXPAVE 60/85.

Teor de ligante (%)	Volume de vazios (%)	VAM (%)	RBV (%)	P <sub>e</sub> (%)	P / A
3,5	8,05	15,19	47,02	2,87	1,88
4,0	5,68	14,20	59,99	3,37	1,60
4,5	4,00	13,90	71,20	3,88	1,39
5,0	2,99	13,96	78,60	4,38	1,23
<b>Critérios Superpave</b>	4,00 ✓	mín. 13 ✓	65-75 ✓	-	0,8-1,6 ✓

Fonte: Autor (2016).

Quanto à dosagem das misturas asfálticas compostas pelo CAP 50-70 e pelos nanocompósitos asfálticos, estas foram realizadas conforme a metodologia Superpave®. Os resultados dos parâmetros volumétricos atingidos por Melo (2014), para as misturas asfálticas com o teor de projeto, podem ser observados na Tabela 17 e na Tabela 18.

Tabela 17 - Parâmetros volumétricos de dosagem das misturas asfálticas contendo CAP 50-70 e nanocompósitos asfálticos.

Identificação	Teor de ligante (%)	% Gmm		
		N <sub>inicial</sub> (9 giros)	N <sub>projeto</sub> (125 giros)	N <sub>máximo</sub> (205 giros)
CAP 50-70	4,35	86,50	95,99	97,22
NA-3%	4,10	86,58	96,00	97,29
NTC-2%	4,10	86,35	95,96	97,27
<b>Crítérios Superpave</b>		< 89 ✓	= 96 ✓	< 98 ✓

Fonte: Adaptado de Melo (2014).

Tabela 18 - Propriedades volumétricas das misturas contendo CAP 50-70 e nanocompósitos asfálticos.

Identificação	Teor de ligante (%)	VAM (%)	RBV (%)	P / A
CAP 50/70	4,35	14,12	71,57	1,37
NA-3%	4,10	13,73	70,84	1,39
NTC-2%	4,10	13,84	70,79	1,38
<b>Crítérios Superpave</b>		mín. 13 ✓	65-75 ✓	0,8-1,6 ✓

Fonte: Adaptado de Melo (2014).

Os teores de ligante de projeto definidos no estudo de dosagem para as misturas NA-3% e NTC-2% foram ambos 4,10%, enquanto que o teor de ligante de projeto para a mistura de referência foi de 4,35%. Como a finalidade do estudo de Melo (2014) foi investigar as alterações nas características reológicas e mecânicas provenientes da utilização de diferentes tipos de ligantes, a adoção de diferentes teores de ligantes seria uma variável que afetaria os resultados. Por isso, com o intuito de garantir a mesma proporcionalidade de materiais das misturas de concreto asfáltico, Melo (2014) estabeleceu o teor de ligante de projeto de 4,35% para todas as misturas estudadas.

## 4.2.2 Dosagem Marshall

Em relação à dosagem da mistura asfáltica contendo ligante modificado por borracha moída de pneu, ECOFLEX B, a determinação do teor de ligante de projeto foi realizada conforme a metodologia Marshall. As características da mistura asfáltica modificada com borracha moída de pneu, bem como os parâmetros volumétricos obtidos pela metodologia Marshall, podem ser visualizados na Tabela 19.

Tabela 19 - Características e parâmetros volumétricos da mistura asfáltica contendo o ligante ECOFLEX B.

<b>Características</b>	<b>Resultado</b>	<b>DNIT-ES 031/2004</b>
Massa específica máxima medida [g/cm <sup>3</sup> ]	2,662	-
Massa específica aparente [g/cm <sup>3</sup> ]	2,565	-
Teor de ligante de projeto [%]	5,4	-
Porcentagem de vazios [%]	3,8	3 - 5
VAM [%]	17,6	mín. 15
RBV [%]	78	75 - 82
Fluência [mm]	3,2	-
Estabilidade [kgf]	1535	mín. 500
Temperatura de trabalho do ligante [°C]	170-177	-
Temperatura de trabalho da mistura [°C]	155-165	-

Fonte: Trichês (2014).

Tendo como base a norma DNIT-ES 031/2004, conclui-se que os resultados de porcentagem de vazios, VAM, RBV e estabilidade Marshall estão em conformidade com os requisitos normativos estabelecidos.

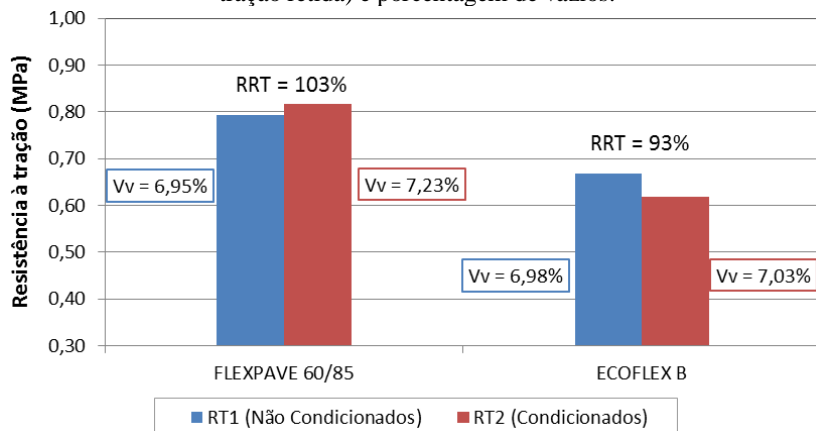
## 4.2.3 Dano por umidade induzida

A avaliação do dano por umidade induzida foi realizada para as misturas asfálticas modificadas com polímero SBS e com borracha moída de pneu. Para isso, foi empregado o ensaio de Lottman modificado, constante na norma ABNT NBR 15617:2015.

As misturas asfálticas foram produzidas com seus respectivos teores de ligante de projeto, definidos nos procedimentos de dosagem,

4,5% para a mistura modificada com polímero SBS e 5,4% para a mistura modificada com borracha moída de pneu. Na Figura 30 são apresentados os resultados de resistência à tração média dos conjuntos de corpos de prova, assim como a média da porcentagem de vazios dos mesmos.

Figura 30 - Resultados de resistência à tração, RRT (razão de resistência à tração retida) e porcentagem de vazios.



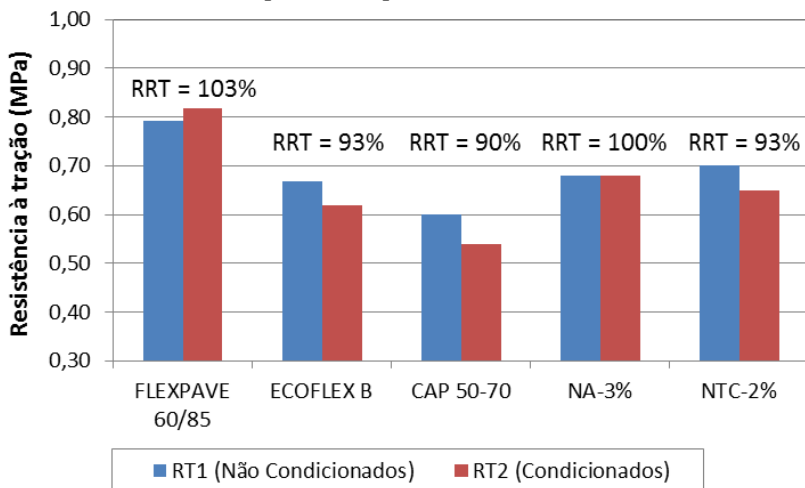
Fonte: Autor (2016).

Analisando os resultados de resistência à tração das duas misturas asfálticas, nota-se que, quanto à essa propriedade mecânica, há superioridade da mistura asfáltica modificada com polímero SBS, em relação à mistura asfáltica modificada com borracha moída de pneu.

Tratando-se do dano por umidade induzida, os resultados de RRT indicam que as misturas asfálticas apresentam desempenho satisfatório nesse aspecto, tendo em vista que os valores obtidos são superiores ao limite estabelecido de 70%.

O comportamento satisfatório observado está relacionado às propriedades químicas do agregado basáltico utilizado na pesquisa. Aliado a isso, a incorporação de cal hidratada na mistura asfáltica influencia positivamente na adesão do ligante asfáltico ao agregado. Esse desempenho favorável também foi apontado na pesquisa de Melo (2014), tanto para as misturas nanomodificadas quanto para a mistura de referência, com o CAP 50-70. Em termos comparativos, na Figura 31 são expostos os resultados previamente apresentados e os obtidos por Melo (2014).

Figura 31 - Resultados de resistência à tração e RRT, incluindo as misturas produzidas por Melo (2014).



Fonte: Autor (2016).

Conforme a Figura 31, é possível observar o desempenho superior da mistura asfáltica modificada com polímero SBS em termos de resistência à tração. No entanto, a mistura modificada com borracha moída de pneu demonstrou baixa resistência à tração, superior somente à mistura convencional, com CAP 50-70. Constatam-se também os elevados valores de RRT de todas as misturas asfálticas, comprovando a influência positiva do agregado utilizado e do filler ativo, dado que tanto os materiais granulares quanto a curva granulométrica de todas as misturas são os mesmos. Entretanto, destaca-se a ausência de dano por umidade induzida na mistura modificada por polímero SBS e na mistura contendo nanoargila organofílica. Isso indica que esses materiais podem auxiliar a inibir a ação deletéria da água.

Tratando-se especificamente da mistura asfáltica modificada com polímero SBS, a adição desse agente modificador também demonstrou resultados satisfatórios na pesquisa de Yilmaz e Çeloglu (2013). A resistência ao dano por umidade induzida da mistura modificada com 3,8% de polímero SBS apresentou resultados superiores às misturas modificadas com asfaltos naturais e à mistura de controle, com ligante convencional PG 58-34.



### 4.3 ETAPA 4 - MOLDAGEM E CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS DE CONCRETO ASFÁLTICO

Essa etapa é referente à produção e à caracterização das placas e dos corpos de prova destinados aos ensaios de desempenho. Tendo como conhecido o volume das placas, a moldagem foi realizada almejando a massa específica aparente correspondente à porcentagem de vazios de 4%, parâmetro esse obtido nos procedimentos de dosagem.

#### 4.3.1 Placas de concreto asfáltico destinadas ao ensaio de deformação permanente

A moldagem das placas de deformação permanente (50×18×5 cm) foi executada na mesa compactadora LCPC, utilizando um molde com as dimensões específicas para esse tipo de placa. Entretanto, mostrou-se demasiadamente dificultoso atingir a porcentagem de vazios designada de 4%. Esse impedimento foi decorrente de variações milimétricas na espessura final placa, cujo controle é complicado, uma vez que um aumento na espessura da placa de apenas 1 mm pode corresponder a um acréscimo de, aproximadamente, 2% no percentual de vazios. Na Figura 32 pode ser visualizada uma das placas de concreto asfáltico durante o processo de compactação.

Figura 32 - Compactação de uma placa de concreto asfáltico (50×18×5 cm).



Fonte: Autor (2016).

As caracterizações em termos das propriedades volumétricas das placas de mistura asfáltica produzidas são apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20 - Caracterização das placas de mistura asfáltica (50×18×5 cm).

Identificação	Gmb (g/cm <sup>3</sup> )	Gmm (g/cm <sup>3</sup> )	Vv (%)	Grau de compactação (%)
FLEXPAVE 60/85 (1)	2,537	2,695	5,87	98,1
FLEXPAVE 60/85 (2)	2,545		5,57	98,4
ECOFLEX B (1)	2,507	2,658	5,68	98,2
ECOFLEX B (2)	2,526		4,97	99,0

Fonte: Autor (2016).

Conforme a Tabela 20, a porcentagem de vazios das placas de concreto asfáltico varia de 4,97% a 5,87%. Embora não tenha sido possível atingir a porcentagem de vazios determinada em 4%, as placas de concreto asfáltico apresentam graus de compactação compatíveis com os limites estabelecidos pela norma brasileira que define a sistemática de execução de camadas de pavimentos flexíveis, DNIT-ES 031/2006. O grau de compactação é determinado pela relação entre a massa específica aparente da mistura compactada e a massa específica aparente de projeto, sendo que, segundo o órgão regulamentador, esse valor deve se situar entre 97 e 101%.

#### **4.3.2 Corpos de prova de concreto asfáltico destinados aos ensaios de fadiga e módulo complexo**

Inicialmente, foi realizada a moldagem das placas de concreto asfáltico de medidas 60×40×9 cm, com o auxílio da mesa compactadora LCPC, ilustrada na Figura 33.

Figura 33 - Compactação de uma placa de concreto asfáltico (60×40×9 cm).



Fonte: Autor (2016).

Na Figura 34 pode-se observar um conjunto com cinco corpos de prova serrados de uma placa de concreto asfáltico.

Figura 34 - Corpos de prova prismáticos (400,0×50,8×63,5 mm) serrados de uma placa de concreto asfáltico (60×40×9 cm).



Fonte: Autor (2016).

Com o desígnio de selecionar os corpos de prova prismáticos a serem ensaiados, foi realizada a determinação das dimensões e da porcentagem de vazios dos mesmos. Para a determinação dos vazios, foi necessária a obtenção dos parâmetros volumétricos para o cálculo da

massa específica aparente dos corpos de prova (Gmb), utilizando uma balança hidrostática. Na Tabela 21 são apresentados os resultados referentes à caracterização volumétrica dos corpos de prova prismáticos modificados com polímero SBS e borracha moída de pneu. Apresenta-se, também, a média e desvio padrão dos corpos de prova ensaiados, assim como para qual ensaio o corpo de prova teve destino.

Tabela 21- Porcentagem de vazios dos corpos de prova prismáticos.

Polímero SBS			Borracha moída de pneu		
Identificação	Vv (%)	Ensaio	Identificação	Vv (%)	Ensaio
P1 CP1	5,73	-	B1 CP1	3,13	Fadiga
P1 CP2	4,82	-	B1 CP2	3,16	Fadiga
P1 CP3	4,16	Fadiga	B1 CP3	3,16	Fadiga
P1 CP4	5,42	-	B1 CP4	3,29	Fadiga
P1 CP5	4,66	Fadiga	B1 CP5	3,53	Fadiga
P2 CP1	3,90	Fadiga	B2 CP1	4,22	Fadiga
P2 CP2	4,43	Mód + Fad	B2 CP2	5,79	Fadiga
P2 CP3	5,09	Fadiga	B2 CP3	5,19	Fadiga
P2 CP4	4,82	Fadiga	B2 CP4	5,27	Fadiga
P2 CP5	4,93	Fadiga	B2 CP5	5,19	Fadiga
P3 CP1	5,11	Fadiga	B3 CP1	5,72	-
P3 CP2	4,56	Fadiga	B3 CP2	5,26	-
P3 CP3	5,35	-	B3 CP3	5,48	-
P3 CP4	3,79	-	B3 CP4	5,72	Mód + Fad
P3 CP5	4,54	Mód + Fad	B3 CP5	4,96	Mód + Fad
<b>Média</b>	4,62		<b>Média</b>	4,38	
<b>Desvio Padrão</b>	0,390		<b>Desvio Padrão</b>	1,08	

Fonte: Autor (2016).

#### 4.4 ETAPA 5 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO E COMPORTAMENTO REOLÓGICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Nas seguintes seções, serão apresentados e discutidos os resultados referentes aos ensaios de desempenho mecânico – deformação permanente e fadiga – e ao ensaio de módulo complexo, empregado para caracterizar o comportamento reológico das misturas asfálticas.

#### 4.4.1 Desempenho à deformação permanente das misturas asfálticas

Para a avaliação da resistência das misturas asfálticas à deformação permanente, as placas de concreto asfáltico foram submetidas ao ensaio de simulação de tráfego, executado com o auxílio do equipamento francês *Orniéreur*. Na Figura 35 pode ser visualizada uma placa de concreto asfáltico durante o ensaio de deformação permanente e na Figura 36 são expostas as duas placas de mistura asfáltica modificada com polímero SBS, após a passagem dos 30000 ciclos.

Figura 35 - Placa de concreto asfáltico durante ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego francês *Orniéreur*.



Fonte: Autor (2016).

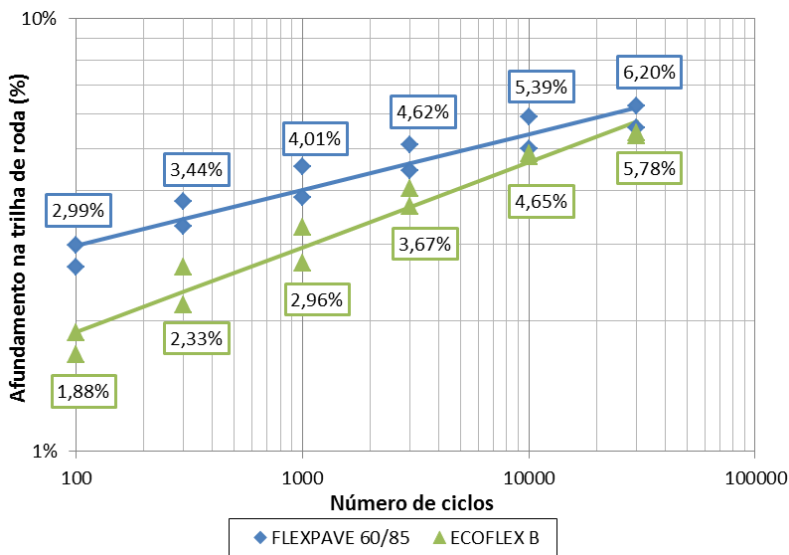
Figura 36 - Placas de mistura asfáltica modificada com polímero SBS, após ensaio no simulador de tráfego.



Fonte: Autor (2016).

O desempenho das misturas de concreto asfáltico frente à deformação permanente foi quantificado em termos do afundamento na trilha de roda, verificado em ciclos pré-estabelecidos de passagem do eixo de roda simples, sendo que cada mistura asfáltica foi representada por duas placas distintas. Na Figura 37 são apresentados os resultados de deformação permanente em relação à espessura das placas de concreto asfáltico, para a mistura contendo polímero SBS (FLEXPAVE 60/85) e para a mistura contendo borracha moída de pneu (ECOFLEX B). Os valores de afundamento na trilha de roda, expostos na Figura 37, correspondem às retas de regressão das respectivas misturas asfálticas.

Figura 37 - Desempenho frente à deformação permanente das misturas asfálticas.



Fonte: Autor (2016).

Analisando a Figura 37, destaca-se a pequena diferença entre os afundamentos das duas misturas asfálticas para 30000 ciclos, em relação às espessuras iniciais das placas: 6,20% para a mistura modificada por polímero SBS e 5,78% para a mistura modificada por borracha moída de pneu. Ressalta-se que as placas de concreto asfáltico foram moldadas com seus respectivos teores de projeto, ou seja, mesmo com um teor de ligante superior em 0,9%, a mistura modificada com borracha moída de pneu demonstrou maior resistência à deformação permanente.

Em referência às especificações, as duas misturas asfálticas atenderam ao critério estabelecido pela especificação francesa, o qual limita a deformação permanente em 10% para rodovias de tráfego pesado.

Os resultados obtidos estão em conformidade com a pesquisa realizada pela empresa Greca Asfaltos S.A. (2012), que teve como objetivo avaliar a influência dos diferentes ligantes comercializados pela mesma na deformação permanente. Utilizando o mesmo agregado mineral e a mesma composição granulométrica (Faixa C do DNIT), enquanto a mistura asfáltica com CAP 50-70 apresentou 6,2% de afundamento, as misturas com os ligantes modificados FLEXPAVE 60/85 e ECOFLEX B apresentaram ambas 3,2%.

Comparando o desempenho das duas misturas asfálticas mencionadas acima com as misturas produzidas por Melo (2014), é possível afirmar que as misturas com polímero SBS e com borracha moída de pneu demonstraram-se mais resistentes à deformação permanente do que as misturas com 3% de nanoargila e com o CAP 50-70. Em contrapartida, as misturas elaboradas nesse estudo apresentaram maior susceptibilidade à deformação permanente do que a mistura com o nanocompósito NTC-2%. A Tabela 22 apresenta os valores de afundamento aos 30000 ciclos de todas as misturas asfálticas, assim como a redução no afundamento em relação à mistura referência, produzida com o CAP 50-70.

Tabela 22 - Afundamento aos 30000 ciclos das misturas com CAP 50-70, nanocompósitos, modificadas com polímero SBS e borracha moída de pneu.

<b>Identificação</b>	<b>Afundamento (%)</b>	<b>Afundamento (mm)</b>	<b>Redução no afundamento (%)</b>
CAP 50-70	9,5	4,85	-
FLEXPAVE 60/85	6,2	3,15	34,74
ECOFLEX B	5,8	2,67	38,95
NA-3%	6,7	3,42	29,47
NTC-2%	4,6	2,35	51,58

Fonte: Autor (2016).

Salienta-se que, tratando da mistura modificada com polímero SBS e das misturas com os nanocompósitos asfálticos, cujos teores de ligante de projeto são de 4,5% e de 4,35%, respectivamente, a diferença nos valores de afundamento está associada às características dos ligantes

asfálticos e à adesão dos mesmos aos agregados minerais. Essa constatação torna-se possível em virtude da proximidade dos teores de ligante de projeto e da correspondência da composição granulométrica das misturas.

Por conseguinte, pode-se elencar o desempenho frente à deformação permanente em termos dos ligantes asfálticos estudados: o melhor desempenho foi observado pelo nanocompósito asfáltico NTC-2%, seguido do ligante modificado por polímero SBS e do nanocompósito NA-3%. Quanto ao ligante modificado por borracha moída de pneu, pode-se afirmar que este é mais eficaz na resistência à deformação permanente que o nanocompósito asfáltico NA-3% e que o ligante modificado por polímero SBS.

No que compreende à predição da deformação permanente em função das propriedades empíricas dos ligantes asfálticos, estas não retrataram corretamente a hierarquia observada nos ensaios de desempenho. O ligante modificado por polímero SBS, embora tenha se mostrado muito mais consistente e menos suscetível termicamente que os nanocompósitos asfálticos, promoveu à mistura asfáltica uma resistência à deformação permanente inferior em comparação ao nanocompósito asfáltico com 3% de nanotubo de carbono.

#### **4.4.2 Comportamento reológico das misturas asfálticas**

O comportamento reológico das misturas asfálticas foi caracterizado por meio do ensaio de módulo complexo, realizado com o aparato 4 pontos, equipamento fabricado pela IPC Global®.

Cada mistura asfáltica foi representada por dois corpos de prova prismáticos, sendo que os resultados a serem expostos correspondem à média dos valores obtidos de cada conjunto. Os corpos de prova prismáticos destinados ao ensaio de módulo complexo, foram os seguintes:

- Mistura asfáltica modificada por polímero SBS: P2 CP2 ( $V_v = 4,43\%$ ) e P3 CP5 ( $V_v = 4,54\%$ );
- Mistura asfáltica modificada por borracha moída de pneu: B1 CP4 ( $V_v = 3,29\%$ ) e B1 CP5 ( $V_v = 3,53\%$ ).

Os corpos de prova foram submetidos a ciclos de carregamento em um amplo espectro de temperaturas (0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30°C) e frequências (0,1, 0,2, 0,5, 1, 2, 5, 10 e 20 Hz). Os valores de módulo



complexo e ângulo de fase são apresentados na Tabela 23, para a mistura modificada por polímero SBS e na Tabela 24, para a mistura modificada por borracha moída de pneu.

Tabela 23 - Resultados de módulo complexo e ângulo de fase para a mistura modificada por polímero SBS.

<b>Módulo Complexo <math> E^* </math> (MPa)</b>							
<b>Freq. (Hz)</b>	<b>T = 0°C</b>	<b>T = 5°C</b>	<b>T = 10°C</b>	<b>T = 15°C</b>	<b>T = 20°C</b>	<b>T = 25°C</b>	<b>T = 30°C</b>
<b>0,1</b>	12153	8810	4982	3017	1312	621	301
<b>0,2</b>	13443	10033	6051	3730	1748	847	421
<b>0,5</b>	15113	11748	7534	4997	2560	1281	673
<b>1,0</b>	16385	13069	8850	6070	3335	1739	905
<b>2</b>	17681	14355	10086	7203	4198	2329	1217
<b>5</b>	19464	16203	11971	9064	5620	3309	1799
<b>10</b>	20742	17724	13484	10495	6881	4262	2383
<b>20</b>	22254	19350	14886	11980	8233	5251	3025

<b>Ângulo de fase <math>\delta</math> (°)</b>							
<b>Freq. (Hz)</b>	<b>T = 0°C</b>	<b>T = 5°C</b>	<b>T = 10°C</b>	<b>T = 15°C</b>	<b>T = 20°C</b>	<b>T = 25°C</b>	<b>T = 30°C</b>
<b>0,1</b>	12,6	17,5	25,4	31,3	39,2	40,7	36,7
<b>0,2</b>	11,2	15,5	23,0	29,4	38,1	41,6	39,0
<b>0,5</b>	9,5	13,5	20,1	26,4	35,3	41,0	41,6
<b>1,0</b>	8,5	12,0	17,9	23,7	32,9	39,7	42,5
<b>2</b>	7,8	10,8	16,1	21,5	30,2	37,5	42,0
<b>5</b>	6,6	9,3	13,9	18,6	26,7	34,0	40,0
<b>10</b>	5,8	8,3	12,5	16,7	24,1	31,5	38,4
<b>20</b>	5,5	7,9	11,5	15,4	22,1	29,3	37,7

Fonte: Autor (2016).

Tabela 24 - Resultados de módulo complexo e ângulo de fase para a mistura modificada com borracha moída de pneu.

<b>Módulo Complexo <math> E^* </math> (MPa)</b>							
<b>Freq. (Hz)</b>	<b>T = 0°C</b>	<b>T = 5°C</b>	<b>T = 10°C</b>	<b>T = 15°C</b>	<b>T = 20°C</b>	<b>T = 25°C</b>	<b>T = 30°C</b>
<b>0,1</b>	10669	7725	4556	2497	1294	637	366
<b>0,2</b>	12112	8891	5512	3173	1697	851	465
<b>0,5</b>	13786	10493	6868	4256	2369	1236	657
<b>1,0</b>	15053	11859	8111	5207	3123	1652	899
<b>2</b>	16393	13190	9330	6232	3900	2136	1230
<b>5</b>	18293	15110	11151	7857	5163	2963	1834
<b>10</b>	19680	16623	12709	9308	6350	3861	2427
<b>20</b>	20899	17929	14174	10649	7395	4719	3055

<b>Ângulo de fase <math>\delta</math> (°)</b>							
<b>Freq. (Hz)</b>	<b>T = 0°C</b>	<b>T = 5°C</b>	<b>T = 10°C</b>	<b>T = 15°C</b>	<b>T = 20°C</b>	<b>T = 25°C</b>	<b>T = 30°C</b>
<b>0,1</b>	13,9	18,7	25,3	31,3	36,9	35,6	34,2
<b>0,2</b>	12,2	16,8	23,4	29,8	36,1	37,0	36,5
<b>0,5</b>	10,5	15,0	21,0	27,3	34,1	37,6	38,9
<b>1,0</b>	9,5	13,3	18,9	25,2	32,1	37,5	39,8
<b>2</b>	8,7	12,1	17,2	23,3	29,8	35,9	39,5
<b>5</b>	7,5	10,6	15,1	20,6	26,7	33,7	38,2
<b>10</b>	6,7	9,5	13,5	18,6	24,4	31,7	37,2
<b>20</b>	5,8	8,5	12,2	16,8	22,4	29,8	36,6

Fonte: Autor (2016).

A partir dos resultados obtidos com o ensaio de módulo complexo, foram elaborados gráficos que explicitam as características reológicas das misturas por meio de isotermas e isócronas, expostos na Figura 38 e na Figura 39. Nesses gráficos, a mistura asfáltica modificada por polímero SBS é identificada como “SBS”, enquanto a mistura modificada por borracha moída de pneu corresponde à “BMP”.

Figura 38 - Isotermas das misturas asfálticas modificadas com polímero SBS e borracha moída de pneu.

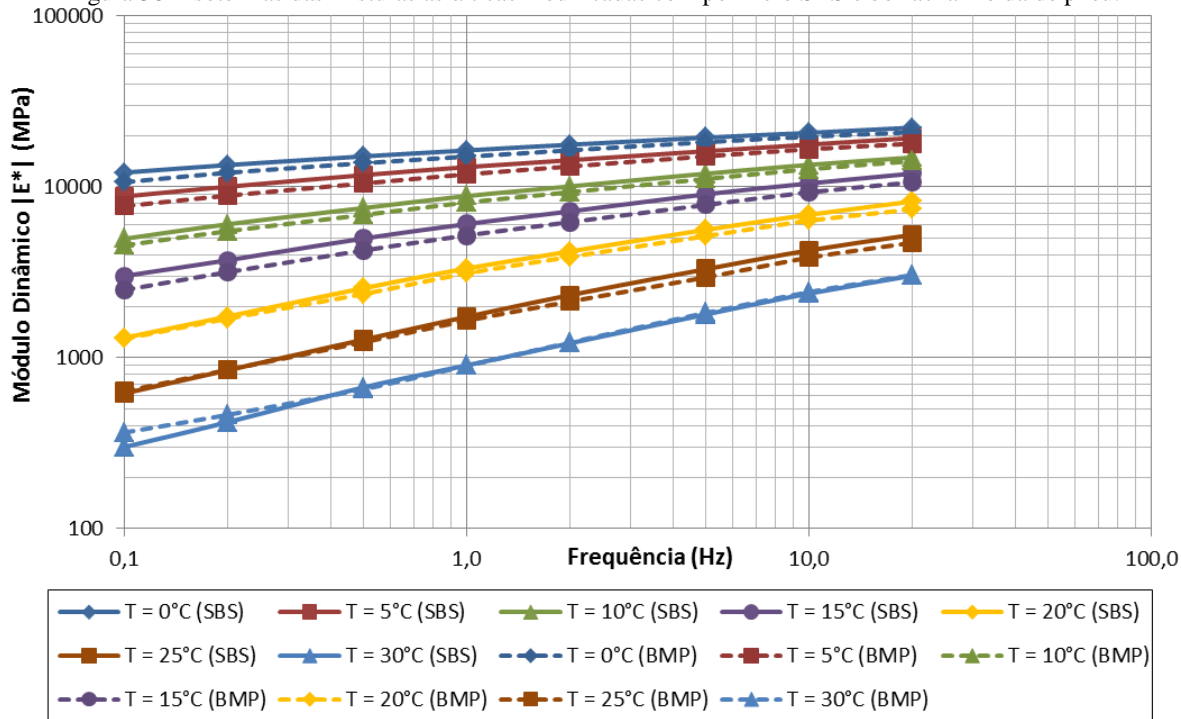
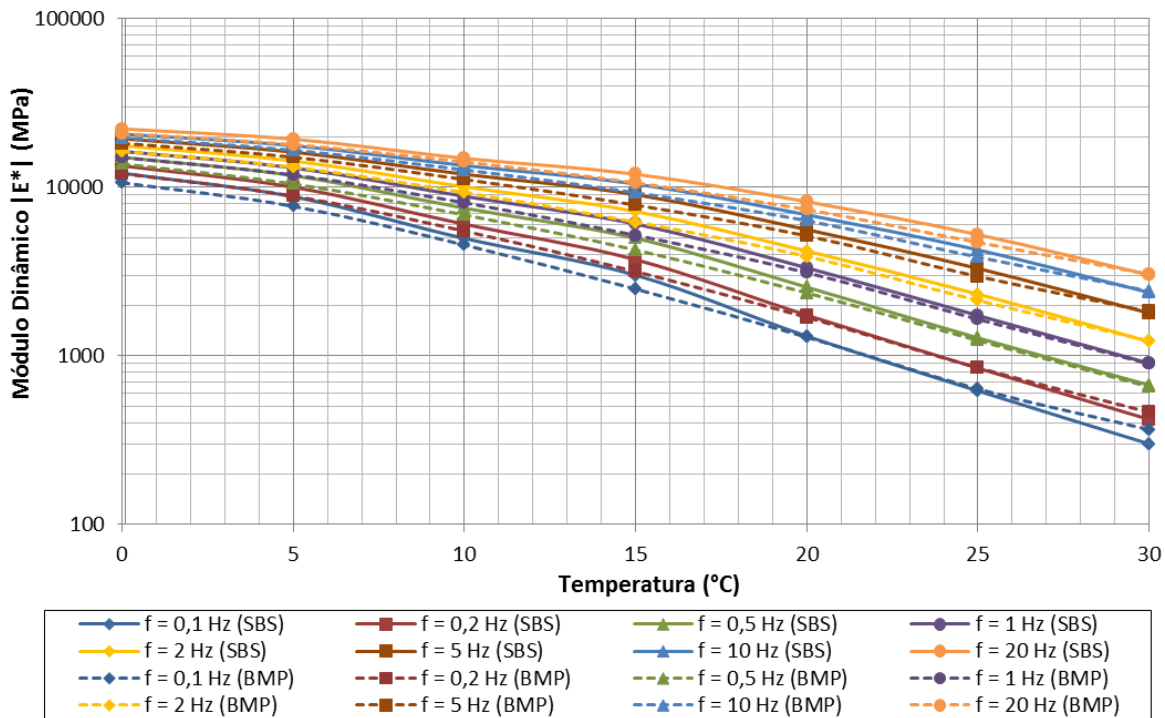


Figura 39 - Isócronas das misturas asfálticas modificadas com polímero SBS e borracha moída de pneu.



Fonte: Autor (2016).

Na Figura 38, percebe-se o ligeiro contraste entre as isotermas das misturas asfálticas modificadas por polímero SBS e por borracha moída de pneu. A mistura modificada com polímero SBS apresenta valores de módulo complexo pouco maiores que os valores observados para a mistura modificada com borracha moída de pneu. Comparando os valores dos módulos na frequência de 10 Hz, correspondente à velocidade de 72 km/h, a mistura modificada por polímero SBS apresentou, nas temperaturas de 15, 20 e 25°C, valores 12,8%, 8,4% e 10,4% maiores que a mistura modificada por borracha moída de pneu, respectivamente. Considerando os resultados de teores de projeto obtidos a partir do estudo de dosagem, pode-se conjecturar que a distinção nos valores de módulo complexo está atrelada à diferença dos teores de ligante das misturas asfálticas. No entanto, sabendo que o ligante asfáltico é um material termossuscetível e que a sua consistência reduz com o aumento da temperatura, as isotermas das duas misturas deveriam apresentar maiores defasagens com o aumento da temperatura. Dessa maneira, pode-se dizer que, contanto que atingida a porcentagem de vazios de 4%, a avaliação do comportamento reológico de diferentes misturas asfálticas não é prejudicada pela desconformidade dos teores de projeto, para pequenas variações no teor.

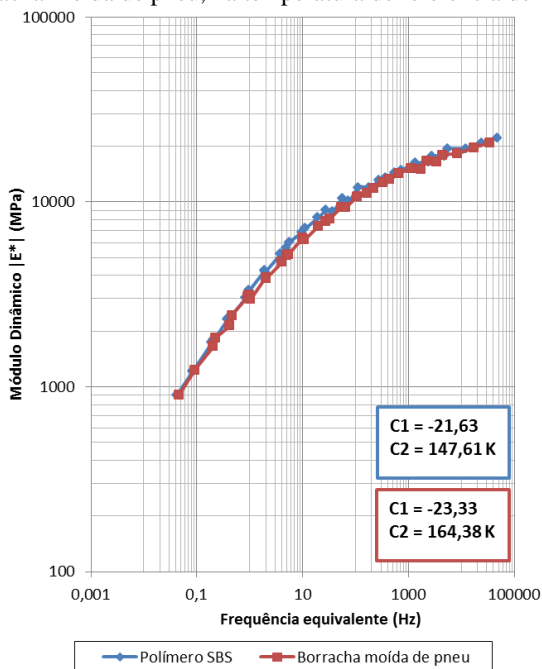
Salienta-se também que, à medida que se aumenta a temperatura, o módulo complexo das misturas torna-se mais suscetível à variação da frequência de carregamento. Em termos numéricos, enquanto o módulo complexo da mistura modificada por polímero SBS aumentou 83% – entre a frequência de 0,1 e 20 Hz na temperatura de 0°C – a mesma mistura demonstrou um ganho de 905% no valor do módulo complexo na temperatura de 30°C. Como as inclinações das curvas isotermas das duas misturas asfálticas são aparentemente similares, pode-se dizer que o tempo de carregamento produz os mesmos efeitos no comportamento reológico de ambos os materiais.

Observando-se as curvas isócronas da Figura 39, nota-se a redução do módulo complexo com o aumento da temperatura de ensaio, sendo que as curvas das duas misturas asfálticas modificadas mostraram-se bastante semelhantes, com uma pequena redução do módulo complexo da mistura modificada por borracha moída de pneu. Evidencia-se, também, a redução da suscetibilidade térmica à medida que se aumenta a frequência de carregamento. Para a mistura modificada por polímero SBS, a redução de módulo complexo entre as temperaturas de 0 e 30°C foi de 86,4%, para a frequência de 20 Hz, enquanto que para a frequência de 0,1 Hz a redução foi de 97,5%. Para a

mistura modificada por borracha moída de pneu, as reduções obtidas foram de 85,4% e 96,6%, respectivamente. Isso indicaria que as duas misturas apresentariam desempenho semelhante frente à variação de temperatura.

Com o intuito de caracterizar o comportamento reológico das misturas asfálticas em um espectro de frequências bastante amplo, o princípio da superposição tempo-temperatura foi empregado para combinar os efeitos desses importantes parâmetros. Foram elaboradas curvas mestras no domínio das frequências, após a obtenção das constantes  $C_1$  e  $C_2$  da equação de Williams-Landel-Ferry (Equação 2.13), necessárias para o cálculo do fator de translação horizontal correspondente à temperatura de referência ( $T_R$ ). Na Figura 40, são apresentadas as curvas mestras das misturas asfálticas modificadas na temperatura de referência de 20°C, assim como os valores das constantes  $C_1$  e  $C_2$ .

Figura 40 - Curvas mestras das misturas modificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu, na temperatura de referência de 20°C.

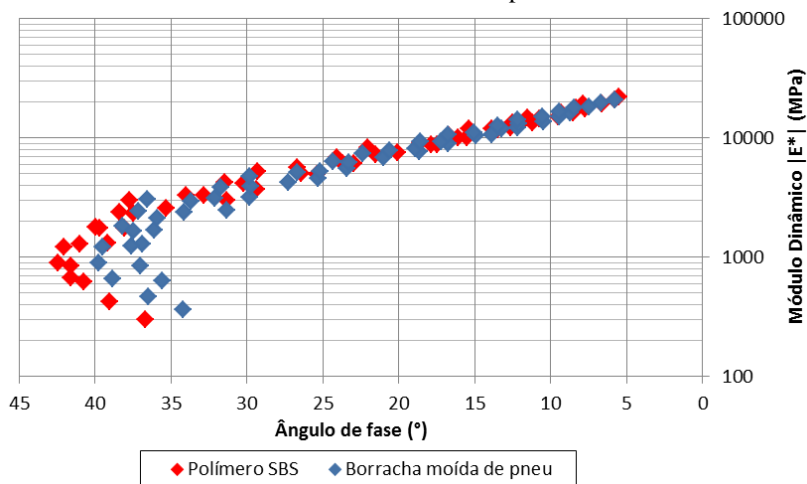


Fonte: Autor (2016).

Observando-se a Figura 40, nota-se pequena superioridade da mistura modificada por polímero SBS em relação à mistura modificada por borracha moída de pneu, no que tange aos valores de rigidez, principalmente para valores intermediários de frequência de carregamento. Para valores de frequência extremamente altos e baixos, os valores de módulo complexo das misturas modificadas são praticamente similares.

Na Figura 41 é apresentado o espaço de Black para as misturas modificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu. O espaço de Black relaciona todos os ângulos de fase com os respectivos valores de módulo complexo, obtidos no espectro de frequência e temperatura empregado na análise do comportamento reológico dos materiais.

Figura 41 - Espaço de Black das misturas asfálticas modificadas com polímero SBS e borracha moída de pneu.

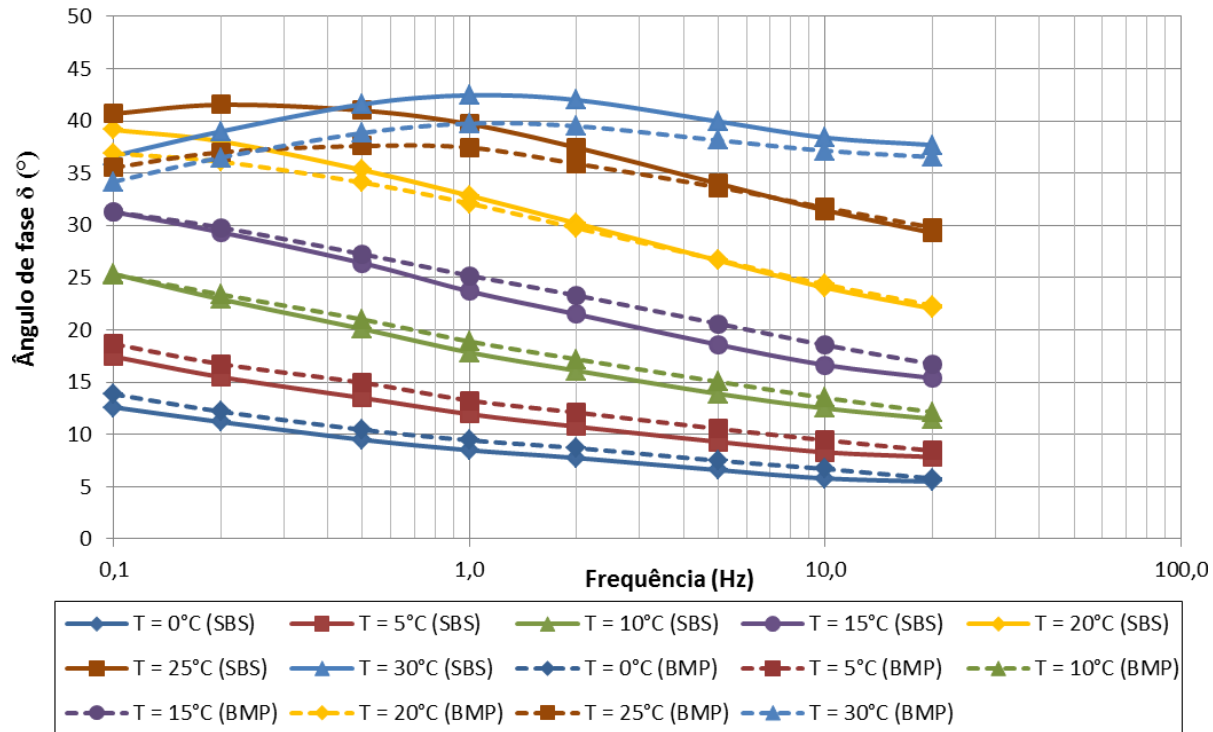


Fonte: Autor (2016).

A partir da Figura 41, pode-se notar o encurtamento do espaço de Black da mistura modificada por borracha moída de pneu em relação à mistura modificada por polímero SBS, para valores reduzidos de módulo complexo. No entanto, constata-se maior número de observações de valores baixos de ângulo de fase para a mistura modificada por polímero SBS.

Com o intuito de analisar o fenômeno citado com mais clareza, foram elaboradas curvas isotermas que relacionam o ângulo de fase com a frequência de carregamento, expostas na Figura 42.

Figura 42 - Isotermas do ângulo de fase em função da frequência de carregamento das misturas modificadas.



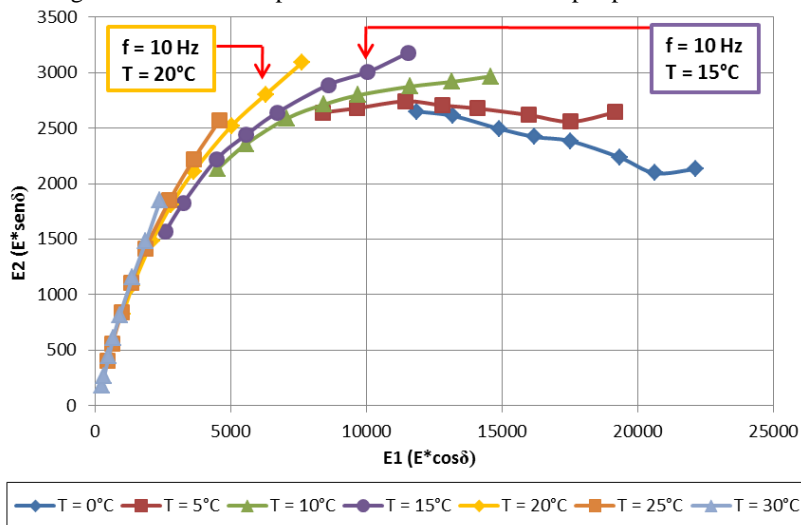
Fonte: Autor (2016).



Na Figura 42, pode-se observar que os valores de ângulo de fase obtidos para a mistura modificada com polímero SBS são menores que os valores da mistura com borracha moída de pneu, para as temperaturas de 0, 5, 10 e 15°C. No entanto, para as curvas de 20, 25 e 30°C, nota-se a inversão da dominância de uma mistura sobre a outra. Em razão disso, evidencia-se o encurtamento do espaço de Black da mistura modificada com borracha moída de pneu, tendo em vista que o valor do módulo complexo é reduzido em temperaturas elevadas. Essa característica reflete na resposta do material aos carregamentos impostos, sendo que quanto menor o ângulo de fase, mais predominante é a componente elástica do módulo complexo. A partir das isotermas da Figura 42, observa-se, também, uma mudança na trajetória das curvas de 25 e 30°C, das duas misturas asfálticas, em relação às curvas de outras temperaturas. As curvas de 30°C, em particular, apresentam um nítido ponto de inflexão na frequência de 1 Hz, sendo que tal singularidade não é notada nas curvas subjacentes. Essa particularidade indica que, a partir de certa temperatura, o comportamento reológico das misturas asfálticas modificadas é alterado, de modo que o aumento da frequência de carregamento induz a ângulos de fase maiores, até certo ponto.

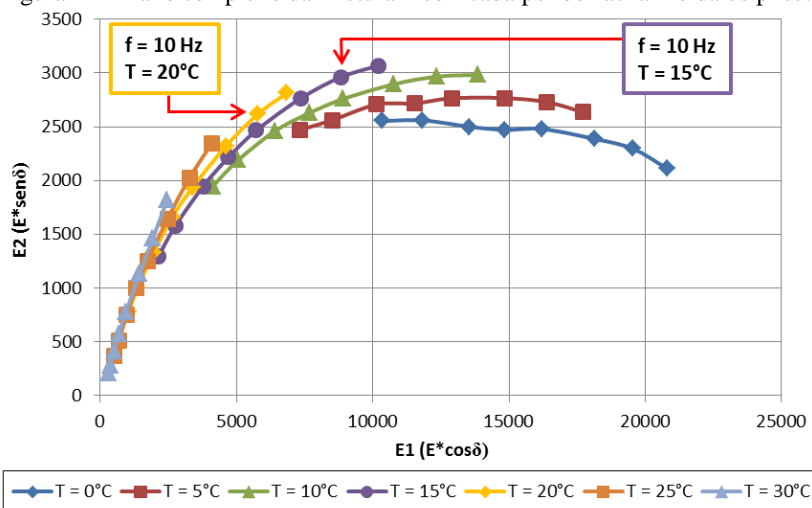
Para avaliar as componentes do módulo complexo, foram elaborados planos complexos (planos Cole-Cole) e gráficos que apresentam a evolução das componentes com a variação da temperatura. A análise do plano complexo permite verificar a situação na qual ocorre máxima dissipação de energia, que corresponde à maior componente viscosa ( $E_2 = |E| \text{ sen } \delta$ ) observada. Na Figura 43 e na Figura 44 são apresentados os planos complexos das misturas modificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu, respectivamente.

Figura 43 - Plano complexo da mistura modificada por polímero SBS.



Fonte: Autor (2016).

Figura 44 - Plano complexo da mistura modificada por borracha moída de pneu.

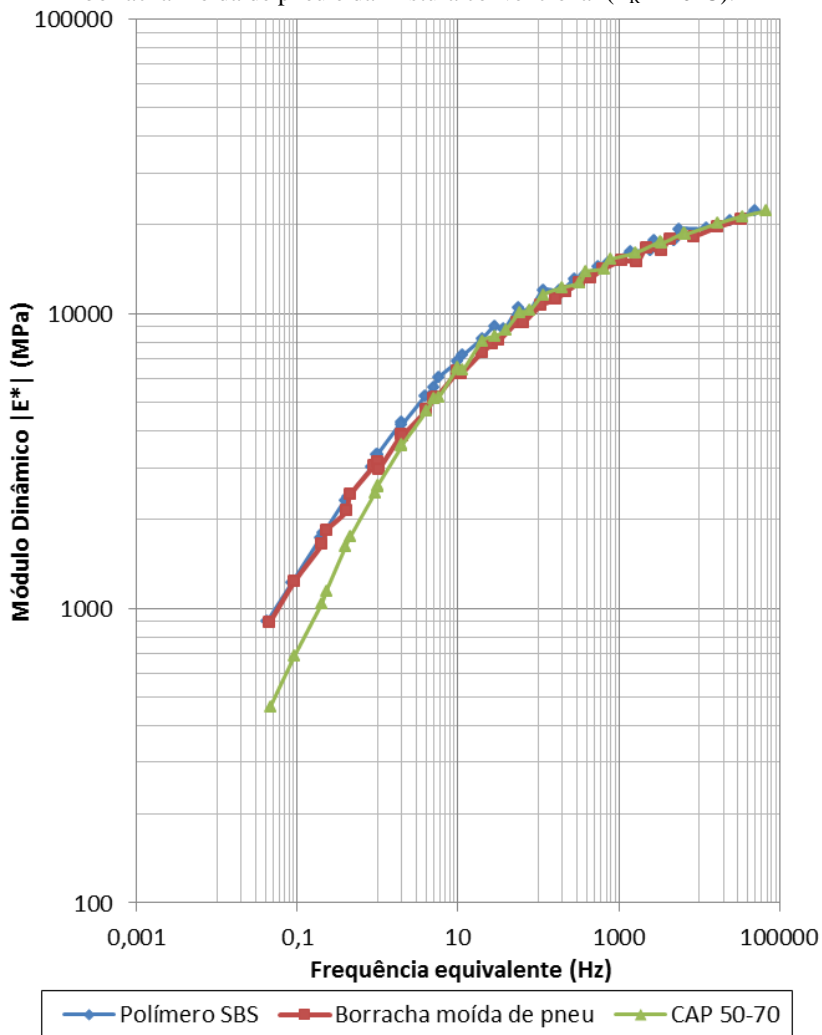


Fonte: Autor (2016).

Com base nos planos complexos evidenciados na Figura 43 e na Figura 44, pode-se afirmar que, para a frequência de 10 Hz, a temperatura de 15°C é a que ocasiona a maior dissipação de energia por ciclo de carregamento para ambas as misturas asfálticas, em decorrência da observação da componente viscosa. Os pontos destacados contrastam os valores da componente viscosa da temperatura a qual ocorre a maior dissipação de energia e da temperatura em que foi realizado o ensaio de vida de fadiga (20°C). Assim sendo, caso a temperatura dos ensaios de vida de fadiga fosse estabelecida em 15°C, o número de ciclos até a falha seria menor e, conseqüentemente, os ensaios durariam menos tempo do que na temperatura de 20°C.

Contraopondo os resultados obtidos de módulo complexo para as misturas modificadas com os resultados das misturas nanomodificadas e da mistura convencional, evidenciados por Melo (2014), pode-se observar diferença considerável nos valores desse parâmetro. A Figura 45 apresenta as curvas mestras das misturas modificadas e da mistura de referência, com o CAP 50-70 estudado por Melo (2014), na temperatura de referência de 20°C.

Figura 45 - Curvas mestras das misturas modificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu e da mistura convencional ( $T_R = 20^\circ\text{C}$ ).

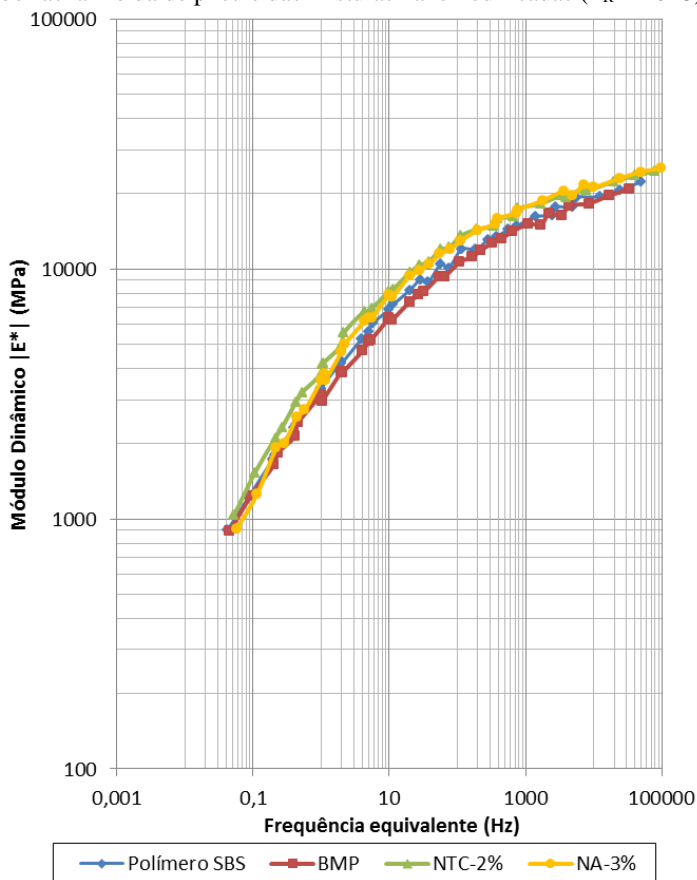


Comparando as curvas mestras das misturas modificadas com a da mistura convencional, nota-se que, para valores baixos do domínio de frequências, as misturas modificadas apresentam maior rigidez. No entanto, quando se trata de valores intermediários e altos de frequência,

as curvas mestras demonstram valores de módulo complexo muito próximos.

Quanto às misturas com nanocompósitos, foram constatados na pesquisa de Melo (2014) ganhos expressivos de rigidez em relação à mistura convencional. Na Figura 46 podem ser visualizadas as curvas mestras das misturas modificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu e das misturas nanomodificadas, na temperatura de referência de 20°C.

Figura 46 - Curvas mestras das misturas modificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu e das misturas nanomodificadas ( $T_R = 20^\circ\text{C}$ ).



Fonte: Autor (2016).

Analisando a Figura 46, verifica-se que as misturas com nanocompósitos asfálticos apresentam maior rigidez do que as misturas modificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu em todo o domínio de frequências, exceto para frequências extremamente baixas, nas quais se observa valores análogos.

Com o intuito de comparar o comportamento reológico na frequência de 10 Hz, parâmetro constante no ensaio de vida de fadiga, a Tabela 25 expõe os valores de módulo complexo das misturas modificadas e nanomodificadas em relação à mistura de referência com CAP 50-70, em termos percentuais.

Tabela 25 - Valores percentuais de módulo complexo das misturas modificadas e nanomodificadas em relação à mistura com CAP 50-70 ( $f = 10$  Hz).

<b>T (°C)</b>	<b>NTC-2%</b>	<b>NA-3%</b>	<b>SBS</b>	<b>BMP</b>
<b>0</b>	10,4	14,5	-3,0	-7,9
<b>5</b>	12,6	16,8	1,1	-5,2
<b>10</b>	14,6	15,0	-2,7	-8,3
<b>15</b>	19,0	14,5	4,6	-7,2
<b>20</b>	24,6	20,6	5,1	-3,0
<b>25</b>	54,8	39,7	19,1	7,9
<b>30</b>	83,1	55,2	35,9	38,4

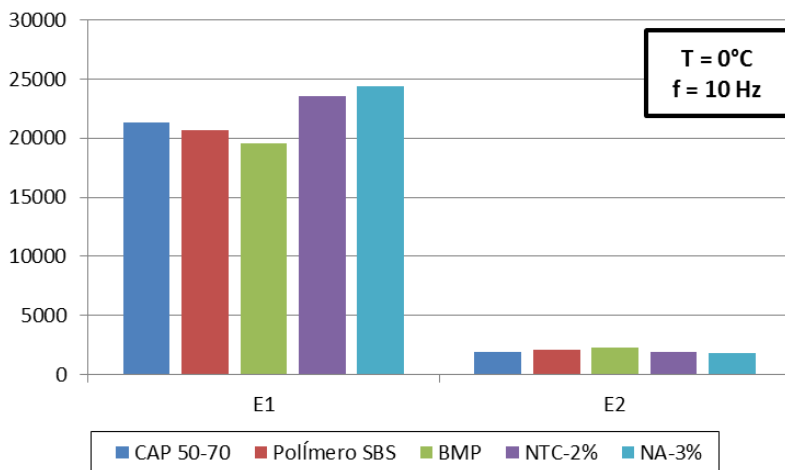
Fonte: Autor (2016).

Observa-se o ganho de rigidez de todas as misturas asfálticas, em relação à mistura com CAP 50-70, com o aumento da temperatura. Entretanto, as misturas modificadas por SBS e borracha moída de pneu demonstraram valores de módulo substancialmente menores que as misturas nanomodificadas. Essa diferença possivelmente está atrelada à presença de polímeros elastoméricos nesses ligantes modificados, tendo em vista que esses agentes modificadores apresentam valores de módulo de elasticidade reduzidos em comparação aos nanomateriais utilizados na pesquisa de Melo (2014).

Tratando sobre os efeitos na estrutura de pavimento, valores elevados de módulo complexo remetem à ocorrência de menores deformações na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico. No entanto, segundo diversos autores, os danos ocasionados pelo fenômeno da fadiga podem ser maiores, tendo em vista que a porcentagem de vazios é constante (MONISMITH, 1963; TANGELLA et al., 1990; TAYEBALI et al., 1994).

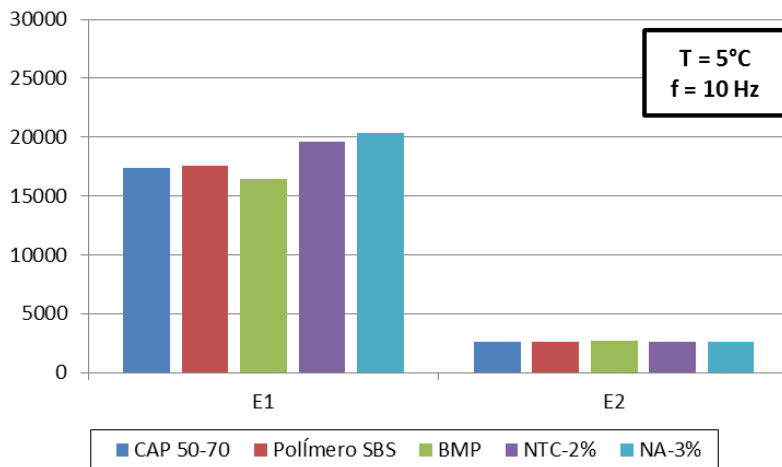
Nesse sentido, a verificação do ângulo de fase pode ser apontada como um prognóstico do comportamento à fadiga das misturas asfálticas. Então, foram confeccionados gráficos que apresentam a evolução das componentes elástica ( $E1 = |E| \cos \delta$ ) e viscosa ( $E2 = |E| \sin \delta$ ) do módulo complexo com o aumento da temperatura. Esses gráficos contemplam as misturas modificadas, nanomodificadas e a mistura convencional, sob frequência de carregamento de 10 Hz e são expostos a seguir, na Figura 47, Figura 48, Figura 49, Figura 50, Figura 51, Figura 52 e Figura 53.

Figura 47 - Componentes elástica (E1) e viscosa (E2) do módulo complexo das misturas asfálticas ( $T = 0^{\circ}\text{C}$ ;  $f = 10 \text{ Hz}$ ).



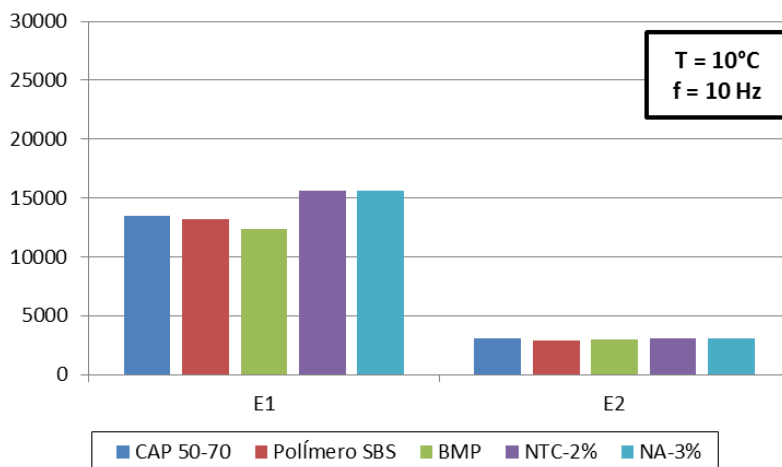
Fonte: Autor (2016).

Figura 48 - Componentes elástica (E1) e viscosa (E2) do módulo complexo das misturas asfálticas ( $T = 5^{\circ}\text{C}$ ;  $f = 10\text{ Hz}$ ).



Fonte: Autor (2016).

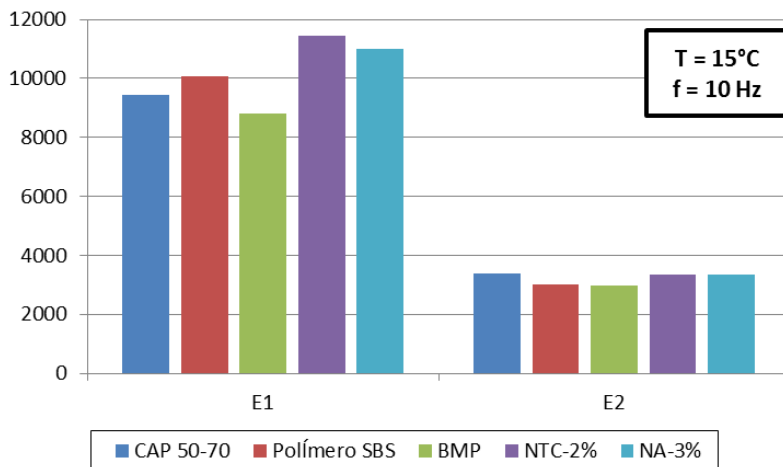
Figura 49 - Componentes elástica (E1) e viscosa (E2) do módulo complexo das misturas asfálticas ( $T = 10^{\circ}\text{C}$ ;  $f = 10\text{ Hz}$ ).



Fonte: Autor (2016).

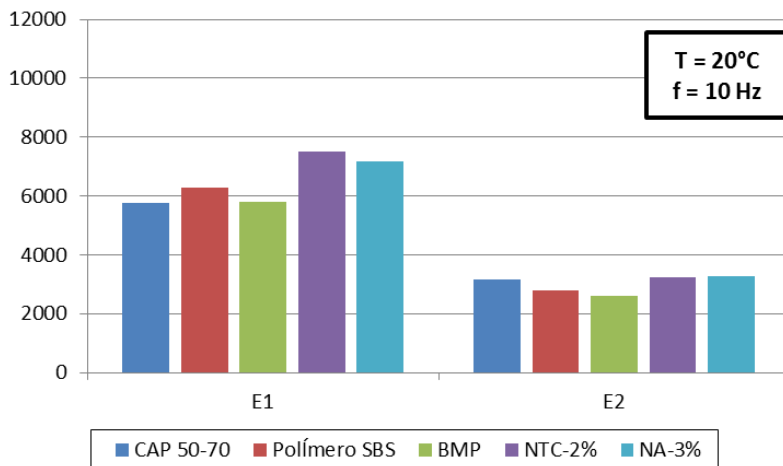


Figura 50 - Componentes elástica (E1) e viscosa (E2) do módulo complexo das misturas asfálticas ( $T = 15^{\circ}\text{C}$ ;  $f = 10\text{ Hz}$ ).



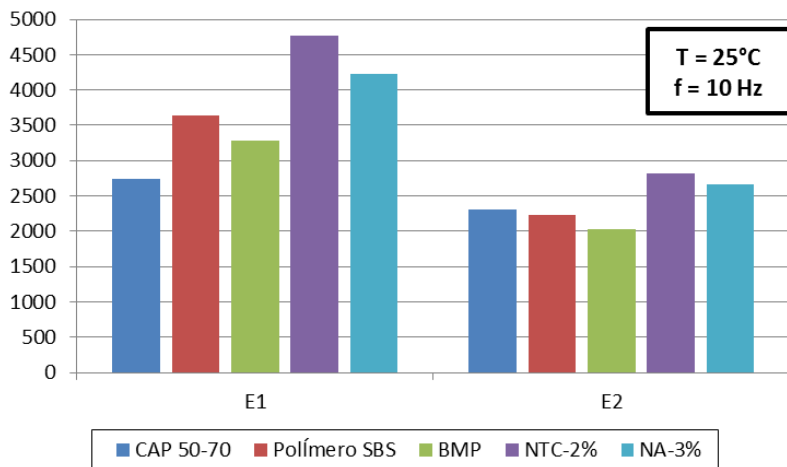
Fonte: Autor (2016).

Figura 51 - Componentes elástica (E1) e viscosa (E2) do módulo complexo das misturas asfálticas ( $T = 20^{\circ}\text{C}$ ;  $f = 10\text{ Hz}$ ).



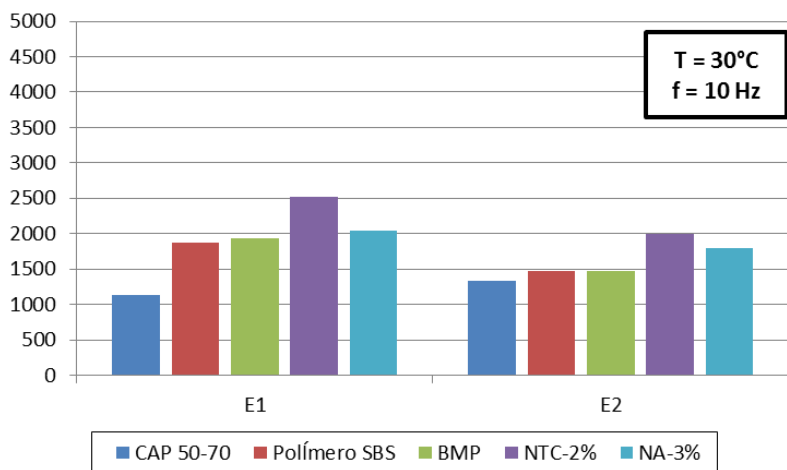
Fonte: Autor (2016).

Figura 52 - Componentes elástica (E1) e viscosa (E2) do módulo complexo das misturas asfálticas (T = 25°C; f = 10 Hz).



Fonte: Autor (2016).

Figura 53 - Componentes elástica (E1) e viscosa (E2) do módulo complexo das misturas asfálticas (T = 30°C; f = 10 Hz).



Fonte: Autor (2016).

Examinando as componentes do módulo complexo ao longo da evolução da temperatura, nota-se, primeiramente, a redução nos valores tanto da componente elástica quanto da componente viscosa.

Além disso, é possível observar que, a partir da temperatura de 15°C, as componentes viscosas das misturas asfálticas modificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu evoluem menos e apresentam menor valor em comparação às outras misturas. No entanto, as componentes elásticas dessas mesmas misturas têm valores inferiores às das misturas nanomodificadas, ao longo de todo o espectro de temperatura. Tratando apenas das misturas modificadas por polímero SBS e por borracha moída de pneu, essas apresentam valores consideravelmente próximos de componente elástica, bem como de componente viscosa.

Em relação à resistência à fadiga, a Figura 51 apresenta as componentes do módulo complexo na temperatura de 20°C. Nota-se que as componentes viscosas das misturas modificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu são menores que as componentes viscosas das demais misturas. Com base nos conceitos de energia dissipada, as misturas asfálticas que apresentam menores componentes viscosas sofrem menos dissipação de energia por ciclo de carregamento, o que culminaria com a tendência de apresentarem melhor desempenho à fadiga.

#### **4.4.3 Desempenho à fadiga das misturas asfálticas**

O desempenho à fadiga das misturas asfálticas foi avaliado com a utilização do aparato 4 pontos. A mistura asfáltica modificada por polímero SBS foi representada por dez corpos de prova prismáticos, enquanto a mistura asfáltica modificada por borracha moída de pneu foi representada por 12 corpos de prova. A temperatura de ensaio foi estabelecida em 20°C e a frequência de carregamento foi definida em 10 Hz, valor correspondente à velocidade de tráfego de 72 km/h. Os ensaios foram conduzidos sob pulsos de carga sinusoidais e modo de carregamento de deformação controlada, sendo que o critério de ruptura adotado foi a redução do módulo complexo inicial em 50%. Este, por sua vez, foi determinado no centésimo ciclo de carregamento.

A Tabela 26 e a Tabela 27 apresentam a identificação e porcentagem de vazios dos corpos de prova prismáticos, bem como a deformação imposta e os resultados obtidos a partir do ensaio de vida de fadiga das misturas asfálticas modificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu, respectivamente. Na Figura 54, são apresentadas as curvas de fadiga relativas às misturas modificadas, assim como o

coeficiente de correlação ( $R^2$ ) e a deformação para um milhão de ciclos ( $\epsilon^6$ ) das mesmas.

Tabela 26 - Resultados do ensaio de fadiga da mistura asfáltica modificada por polímero SBS (T = 20°C; f = 10 Hz).

Identificação	Vv (%)	Deformação ( $\times 10^{-6}$ )	Módulo Inicial (MPa)	Ângulo de fase (°)	Número de ciclos
P2 CP3	5,09	186	6195	27,5	917930
P2 CP4	4,82	210	5700	30,7	805646
P3 CP5	4,54	185	5942	28,9	1311111
P1 CP5	4,66	227	5899	31,4	138263
P2 CP5	4,93	250	5425	31,2	96430
P2 CP2	4,43	265	6907	28,8	136144
P2 CP1	3,9	289	6088	31,7	43085
P1 CP3	4,16	311	5294	34,3	55089
P3 CP2	4,56	335	5365	33,6	43723
P3 CP1	5,11	375	4850	32,5	16549

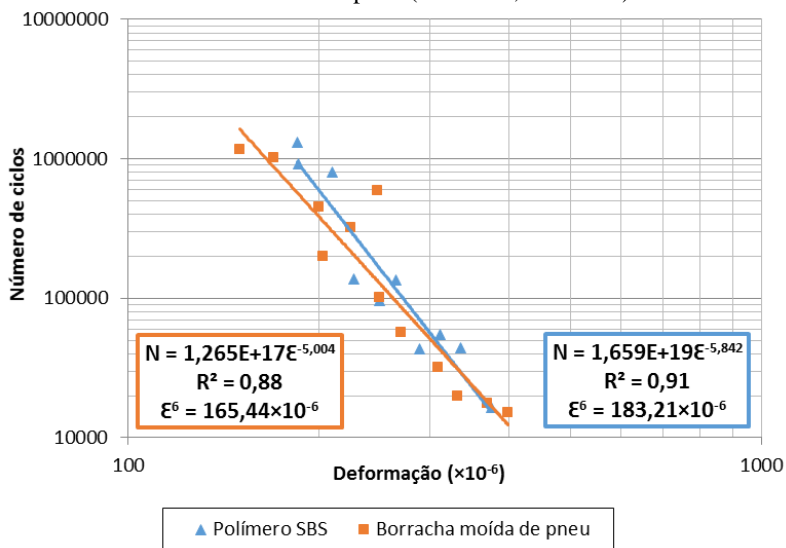
Fonte: Autor (2016).

Tabela 27 - Resultados do ensaio de fadiga da mistura asfáltica modificada por borracha moída de pneu (T = 20°C; f = 10 Hz).

Identificação	Vv (%)	Deformação ( $\times 10^{-6}$ )	Módulo Inicial (MPa)	Ângulo de fase (°)	Número de ciclos
B2 CP4	5,27	150	6404	29,6	1165915
B3 CP1	5,72	170	6241	31,6	1016251
B3 CP5	4,96	200	6180	31	452883
B3 CP4	5,72	203	6921	32,7	200391
B2 CP5	5,19	225	5762	33,4	318901
B1 CP4	3,29	248	5770	30,4	595109
B2 CP3	5,19	250	5774	34	100780
B3 CP3	5,48	270	5532	34	56510
B2 CP2	5,79	309	4457	37,5	31958
B2 CP1	4,22	331	4916	35,2	19725
B1 CP5	3,53	369	4589	34,5	17636
B3 CP2	5,26	398	4589	36,6	15000

Fonte: Autor (2016).

Figura 54 - Curvas de fadiga das misturas modificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu ( $T = 20^{\circ}\text{C}$ ;  $f = 10\text{ Hz}$ ).



Fonte: Autor (2016).

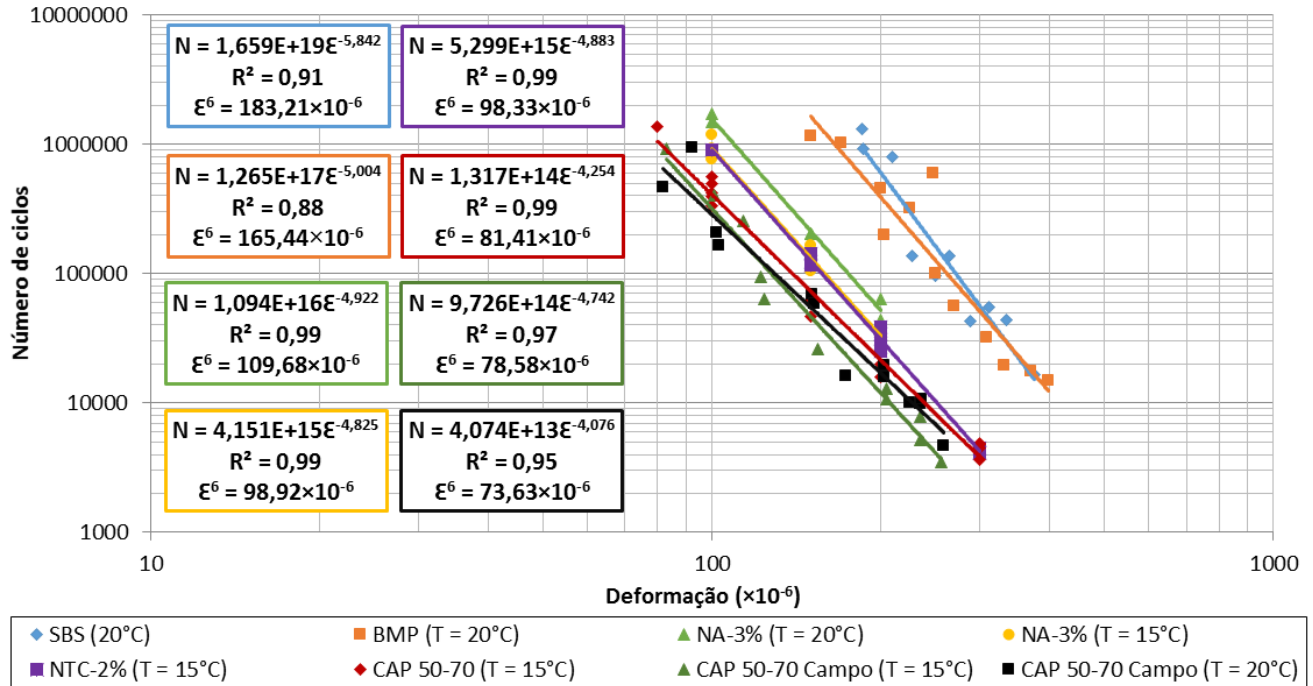
Conforme a Figura 54, observa-se maior resistência à fadiga da mistura modificada por polímero SBS em relação à mistura com borracha moída de pneu. Essa superioridade é mais notável na medida em que se diminui o valor da deformação imposta às misturas modificadas, em decorrência da inclinação das curvas de fadiga. Enquanto o valor da inclinação da curva da mistura modificada por polímero SBS é  $-5,842$ , o mesmo parâmetro para a curva da mistura modificada por borracha moída de pneu é de  $-5,004$ . Misturas que apresentam valores maiores desse parâmetro são consideradas mais suscetíveis à deformação de tração. O melhor desempenho à fadiga demonstrado pela mistura modificada por polímero SBS está atrelado aos menores valores observados de ângulo de fase no início do ensaio, expostos na Tabela 26 e na Tabela 27. Esses valores remetem à predominância da componente elástica do módulo complexo durante o ensaio de vida de fadiga e, portanto, à menor dissipação de energia por ciclo de carregamento. Quanto menor for o ângulo de fase observado para um corpo de prova de concreto asfáltico, maior será a dominância da componente elástica sobre a componente viscosa.

Outro critério para avaliação da resistência à fadiga é a abordagem da deformação para um milhão de ciclos ( $\epsilon^6$ ). Ao passo que

a mistura modificada por borracha moída de pneu apresentou um valor de  $165,44 \times 10^{-6}$  para esse parâmetro, o valor apresentado pela mistura modificada por polímero SBS foi de  $183,21 \times 10^{-6}$ , que equivale a um ganho de 14,1%.

Com a finalidade de comparar o desempenho à fadiga das misturas modificadas com o desempenho das misturas nanomodificadas e convencional, investigadas por Melo (2014), as curvas de fadiga das misturas asfálticas mencionadas são apresentadas na Figura 55. São apresentadas, também, na Figura 55, curvas de fadiga elaboradas por Trichês (2014), a partir de placas de mistura asfáltica convencional extraídas de campo, provenientes do Segmento Monitorado de Araranguá.

Com base na Figura 55, nota-se grande diferença entre a resistência à fadiga das misturas asfálticas. Cabe salientar que, tanto para a mistura convencional de laboratório quanto para a mistura com o nanocompósito NTC-2%, os ensaios de fadiga realizados por Melo (2014) contemplaram somente a temperatura de 15°C. Para a mistura com o nanocompósito NA-3%, foram elaboradas curvas de fadiga a 15°C e 20°C. Tendo em vista que na pesquisa de Melo (2014) o comportamento à fadiga a 15°C demonstrado pela mistura com NA-3% foi similar ao da mistura com NTC-2% e superior ao da mistura convencional, é possível presumir que a resistência à fadiga dessas misturas, na temperatura de 20°C, segue a mesma diretriz de classificação. Assumindo que a mistura convencional e a mistura com NTC-2% apresentam desempenho à fadiga da forma mencionada, pode-se definir uma hierarquia entre as misturas asfálticas quanto à essa propriedade, na temperatura de 20°C. Dessa forma, a mistura modificada por polímero SBS foi a que apresentou o melhor comportamento à fadiga, seguida pela mistura modificada por borracha moída de pneu, das misturas com os nanocompósitos NA-3% e NTC-2% e, por último, das misturas convencionais. Além disso, a mistura modificada por polímero SBS demonstra ganhos maiores de resistência à fadiga em relação às outras misturas, à medida que se diminui a amplitude de deformação. Tal susceptibilidade à deformação é traduzida pela maior inclinação da curva de fadiga, cujo valor é de -5,842, consideravelmente superior aos valores de inclinação das curvas das demais misturas asfálticas. Tendo como base as curvas de fadiga da mistura com o nanocompósito NA-3%, nota-se um tênue aumento na susceptibilidade à deformação com o acréscimo de temperatura.

Figura 55 - Curvas de fadiga das misturas modificadas, nanomodificadas e convencional ( $f = 10$  Hz).

Fonte: Autor (2016).

Comparando as amplitudes de deformação correspondentes a um milhão de ciclos ( $\epsilon^6$ ), as misturas modificadas por polímero SBS e por borracha moída de pneu apresentaram, respectivamente, valores 67,0% e 50,8% maiores que a mistura com o nanocompósito NA-3%, na temperatura de 20°C.

Analisando somente as curvas de fadiga das misturas convencionais com CAP 50-70, nota-se que a mistura asfáltica produzida em laboratório apresentou desempenho à fadiga ligeiramente maior em relação às misturas produzidas em campo. Essa diferença pode estar atrelada à dificuldade de garantir a precisão e uniformidade da porcentagem de vazios de 4%, em campo.

A respeito da previsão do comportamento à fadiga das misturas asfálticas, embasada nos conceitos de energia, a superioridade das misturas asfálticas modificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu concretizou-se. No entanto, considerando os valores das componentes viscosas das respectivas misturas, constata-se que a hierarquia observada por meio das curvas de fadiga não corresponde à prevista pela análise da energia dissipada.

## 4.5 ETAPA 6 - SIMULAÇÃO DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTO ASFÁLTICO

### 4.5.1 Revestimento asfáltico em camada singular

Nesta simulação, considerou-se como camada singular a condição em que toda a espessura do revestimento é executada com um único tipo de mistura asfáltica, que é o caso do Segmento Monitorado 5.

Com o intuito de considerar o comportamento viscoelástico do concreto asfáltico nas simulações numéricas, foi necessária a determinação dos parâmetros viscoelásticos do modelo de Huet-Sayegh. Os parâmetros foram calculados por meio de iterações, utilizando o software Viscanalyse, desenvolvido pelo LCPC. Os parâmetros obtidos para as misturas asfálticas modificadas por polímero SBS, por borracha moída de pneu e para as misturas elaboradas na pesquisa de Melo (2014), na temperatura de referência de 20°C, são apresentados na Tabela 28.



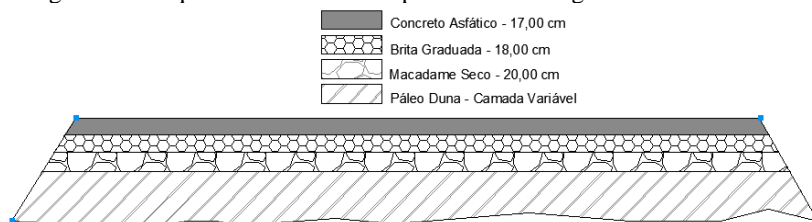
Tabela 28 - Parâmetros viscoelásticos de Huet-Sayegh, na temperatura de referência de 20°C.

Parâmetros	SBS	BMP	CAP 50-70	NTC-2%	NA-3%
<b>E0</b>	7,2476	7,70798	17,2093	1,6124	1,4469
<b>Einf</b>	52562,4	49323,0	26911,9	33048,5	31521,3
<b>delta</b>	2,68891	2,47254	1,97925	1,73915	1,59239
<b>k</b>	0,10163	0,10543	0,23892	0,17326	0,18152
<b>h</b>	0,50227	0,478810	0,68435	0,57129	0,58419
<b>tau</b>	0,00130	0,000970	0,01002	0,00973	0,00809
<b>A0</b>	1,149960	0,493797	3,50920	3,61205	3,635970
<b>A1</b>	-0,441513	-0,416128	-0,475846	-0,498711	-0,524310
<b>A2</b>	0,002565	0,002202	0,0034526	0,0042336	0,0049616

Fonte: Autor (2016).

A partir dos parâmetros viscoelásticos de Huet-Sayegh, foram realizadas simulações de estruturas de pavimento com todas as misturas asfálticas estudadas. Para isso, foram considerados os efeitos do tempo de carregamento ( $v = 72 \text{ km/h}$ ) e da temperatura da camada de revestimento asfáltico ( $T = 20^\circ\text{C}$ ). A primeira estrutura de pavimento simulada, apresentada na Figura 56, corresponde ao Segmento Monitorado 5 da BR-101 Sul, lote 29, localizado no contorno de Araranguá-SC. As simulações desse Segmento Monitorado tiveram como objetivo comparar as deformações específicas de tração na fibra inferior das camadas de revestimento, contemplando as diferentes misturas asfálticas.

Figura 56 - Esquema da estrutura de pavimento do Segmento Monitorado 5.



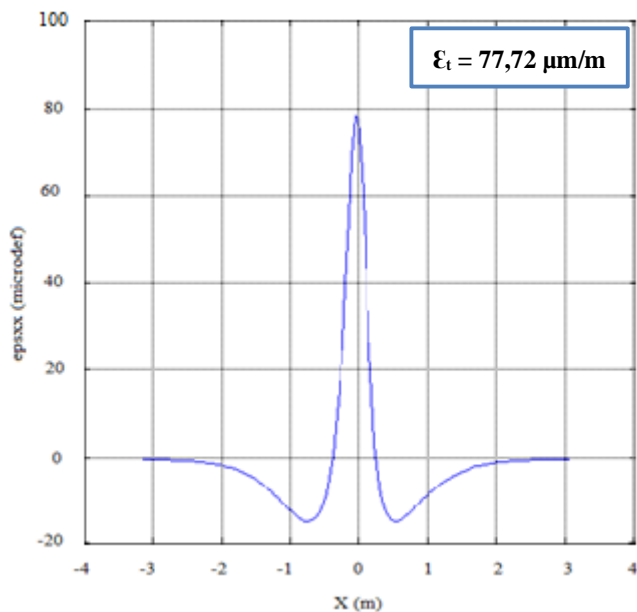
Fonte: Autor (2016).

Nas figuras a seguir (Figura 57, Figura 58, Figura 59, Figura 60 e Figura 61) podem ser observados os resultados das simulações

numéricas no ponto médio entre as rodas com a movimentação do carregamento, no que tange à deformação específica na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico.

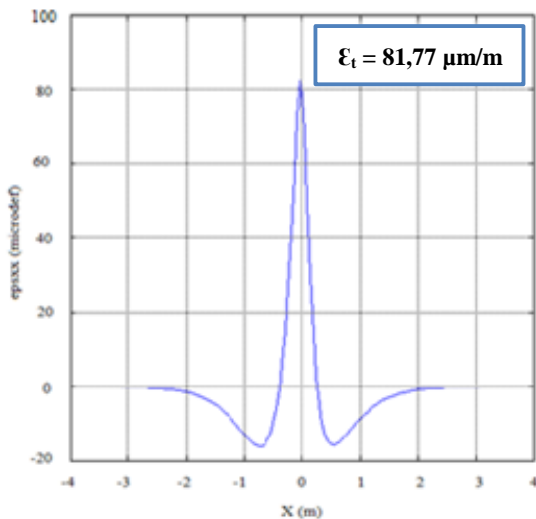
Observa-se que, à medida que o carregamento se aproxima do ponto médio entre rodas, originam-se tensões de compressão atuando no ponto (0,0). Quando o carregamento está a, aproximadamente, 0,8m de distância do ponto (0,0), evidencia-se um ponto de inflexão, no qual a tensão de compressão é máxima. Então, quando o carregamento chega ao ponto (0,0), ocorre o valor máximo de deformação específica de tração.

Figura 57 - Resultados de deformação específica na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico para a mistura modificada por polímero SBS.



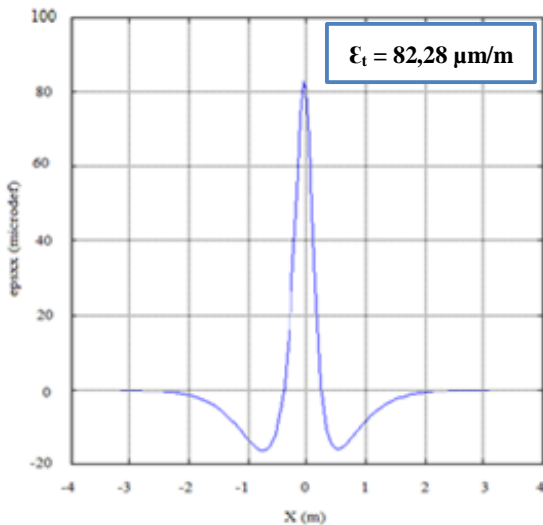
Fonte: Autor (2016).

Figura 58 - Resultados de deformação específica na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico para a mistura modificada por borracha moída de pneu.



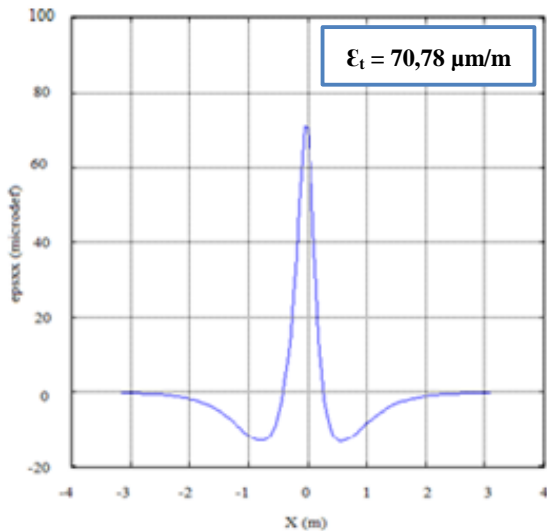
Fonte: Autor (2016).

Figura 59 - Resultados de deformação específica na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico para a mistura convencional com CAP 50-70.



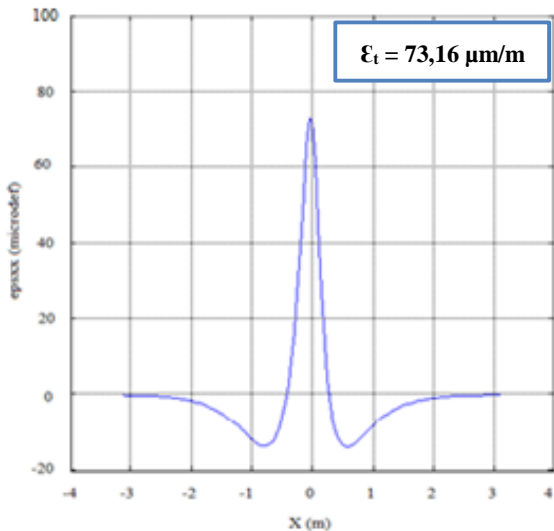
Fonte: Adaptado de Melo (2014).

Figura 60 - Resultados de deformação específica na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico para a mistura nanomodificada NTC-2%.



Fonte: Adaptado de Melo (2014).

Figura 61 - Resultados de deformação específica na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico para a mistura nanomodificada NA-3%.



Fonte: Adaptado de Melo (2014).

Os resultados das simulações numéricas mostram que as misturas nanomodificadas apresentam menor deformação específica de tração na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico. Essa constatação possivelmente está atrelada aos elevados valores de módulo dinâmico demonstrados pelas misturas nanomodificadas, em relação às outras misturas estudadas.

Na estimativa da vida útil da camada de revestimento asfáltico quanto ao critério de ruptura por fadiga, para a estrutura de pavimento do Segmento Monitorado 5, foram considerados os modelos de fadiga apresentados na seção anterior. No entanto, as temperaturas abordadas para a elaboração dos modelos de fadiga das misturas modificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu ( $T = 20^{\circ}\text{C}$ ) são diferentes das utilizadas nos modelos apresentados na pesquisa de Melo (2014) ( $T = 15^{\circ}\text{C}$ ), com exceção da mistura asfáltica com nanoargila organofílica. Na Tabela 29, podem ser visualizados os modelos de fadiga, suas respectivas temperaturas de referência, as deformações específicas de tração e a estimativa de vida útil do revestimento para cada mistura asfáltica, calculada a partir dos modelos obtidos, considerando fator campo-laboratório, por ora, igual a 1.

Tabela 29 - Estimativa de vida útil do revestimento asfáltico para diferentes misturas asfálticas.

Misturas Asfálticas	Equação de fadiga	$\xi_t$ ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	$N_{8,2t}$
<b>SBS (<math>T = 20^{\circ}\text{C}</math>)</b>	$N = 1,66 \times 10^{19} \epsilon^{-5,842}$	77,72	$1,50 \times 10^8$
<b>BMP (<math>T = 20^{\circ}\text{C}</math>)</b>	$N = 1,26 \times 10^{17} \epsilon^{-5,004}$	81,77	$3,39 \times 10^7$
<b>NA-3% (<math>T = 20^{\circ}\text{C}</math>) *</b>	$N = 1,09 \times 10^{16} \epsilon^{-4,922}$	73,16	$7,27 \times 10^6$
<b>NA-3% (<math>T = 15^{\circ}\text{C}</math>) *</b>	$N = 4,15 \times 10^{15} \epsilon^{-4,825}$	59,08	$1,18 \times 10^7$
<b>NTC-2% (<math>T = 15^{\circ}\text{C}</math>) *</b>	$N = 5,30 \times 10^{15} \epsilon^{-4,883}$	56,58	$1,47 \times 10^7$
<b>CAP 50-70 (<math>T = 15^{\circ}\text{C}</math>) *</b>	$N = 1,32 \times 10^{14} \epsilon^{-4,254}$	64,20	$2,70 \times 10^6$

\* Adaptado de Melo (2014)

Fonte: Autor (2016).

Analisando os resultados apresentados na Tabela 29, para a temperatura de referência de  $20^{\circ}\text{C}$ , nota-se que a mistura modificada por polímero SBS foi a que apresentou a maior estimativa de vida útil para o revestimento asfáltico. Relativamente, a mistura modificada por polímero SBS apresenta vida útil 4,4 vezes maior que a mistura modificada por borracha moída de pneu e 20,6 vezes maior que a

mistura com nanoargila organofílica. A mistura modificada por borracha moída de pneu, apresentou estimativa de vida útil 4,7 vezes maior que a mistura com nanoargila organofílica. Esta superioridade está relacionada aos resultados de ângulo de fase, tendo em vista que os valores de deformação específica máxima de tração, tanto para a mistura modificada por polímero SBS quanto para a modificada por borracha moída de pneu, são maiores que o valor obtido para a mistura com nanoargila organofílica. A nanomodificação dos ligantes asfálticos não propicia aumento da recuperação elástica. Como consequência, as misturas nanomodificadas tendem a apresentar vida de fadiga reduzida em relação às misturas em que se tem a incorporação de um elastômero ao ligante.

Além disso, comparando as estimativas de vida útil de todas as misturas asfálticas, observa-se que, mesmo as misturas nanomodificadas tendo apresentado menores valores de deformação específica de tração, as estimativas de vida útil do revestimento asfáltico referentes a essas misturas não foram superiores às misturas modificadas produzidas nessa pesquisa.

Traduzindo o desempenho à fadiga do revestimento asfáltico em termos de espessura dessa camada, para que a mistura modificada por borracha moída de pneu e a mistura com nanoargila apresentassem a mesma vida útil da camada de 17 cm de mistura modificada por polímero SBS, essas deveriam ser construídas com 22,5 e 27,6 cm de espessura, respectivamente.

Salienta-se também que, embora o plano Cole-Cole da mistura asfáltica com nanoargila organofílica, elaborado na pesquisa de Melo (2014), tenha apontado maior dissipação de energia para a temperatura de 15°C, a estimativa de vida útil do revestimento asfáltico, na temperatura de 15°C, mostrou-se maior do que na temperatura de 20°C.

Do ponto de vista econômico, assumindo que a camada de revestimento asfáltico do Segmento Monitorado 5 tem a geometria apresentada na Figura 62 e considerando os valores comerciais dos ligantes asfálticos fornecidos pela Greca Asfaltos S.A. em janeiro de 2017, pode-se comparar os preços dos ligantes asfálticos por metro de rodovia, apresentados na Tabela 30.

Figura 62 - Geometria adotada do Segmento Monitorado 5.



Fonte: Autor (2016).

Tabela 30 - Preços dos ligantes asfálticos utilizados nas simulações do Segmento Monitorado 5, por metro linear de rodovia.

Ligante Asfáltico	Preço unitário (R\$/t)	Espessura (cm)	Teor de projeto (%)	Massa de ligante (kg)	Preço total (R\$)	$N_{8,2t}$
FLEXPAVE 60/85	3120,00	17	4,5	192,32	600,04	$1,50 \times 10^8$
ECOFLEX B	2760,00	17	5,4	228,82	631,54	$3,39 \times 10^7$
ECOFLEX B	2760,00	22,5	5,4	309,57	854,41	$1,50 \times 10^8$
CAP 50-70	2360,00	17	4,35	185,19	437,05	$2,70 \times 10^6$

Fonte: Autor (2016).

Analisando a Tabela 30, nota-se que, embora o preço do revestimento asfáltico contendo somente o CAP 50-70 seja menor, a estimativa de vida útil desse material é consideravelmente menor do que a dos ligantes asfálticos modificados e não atenderia ao período de projeto. Em relação aos ligantes modificados, o preço do ligante FLEXPAVE 60/85 é menor do que o preço do ligante ECOFLEX B, em virtude da diferença entre os teores de ligante de projeto. Para que o revestimento asfáltico constituído de ligante modificado por borracha moída de pneu tenha a mesma vida útil do revestimento contendo ligante modificado por polímero SBS, têm-se um gasto 42,4% maior, por metro linear de rodovia.

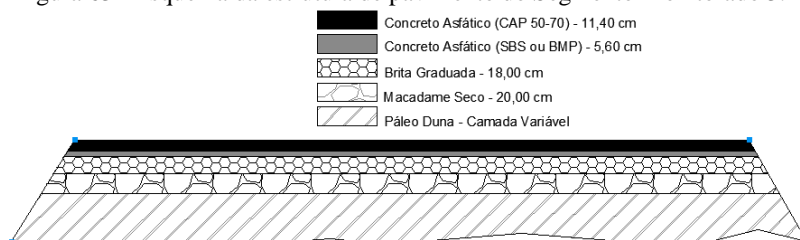
#### 4.5.2 Revestimento asfáltico em camadas integradas

Nesta simulação, considerou-se o revestimento executado em camadas integradas com dois tipos de misturas asfálticas, sendo a camada superior em mistura convencional, que é o caso do Segmento Monitorado 3.

Foram realizadas duas simulações numéricas, sendo que em ambas a temperatura do revestimento asfáltico foi considerada 20°C. A primeira simulação considera o material da camada inferior do revestimento asfáltico como sendo a mistura modificada por polímero SBS, enquanto que a segunda considera esse material como sendo a

mistura modificada por borracha moída de pneu, que é o segmento efetivamente executado. Em ambas as simulações, a camada superior do revestimento asfáltico é constituída pela mistura asfáltica convencional, com CAP 50-70. Os parâmetros de Huet-Sayegh foram os mesmos considerados para as simulações da estrutura de pavimento do Segmento Monitorado 5, apresentados na Tabela 28. Na Figura 63 pode ser visualizada uma representação da estrutura de pavimento do Segmento Monitorado 3.

Figura 63 - Esquema da estrutura de pavimento do Segmento Monitorado 3.



Fonte: Autor (2016).

Na Figura 64 e Figura 65 são apresentados os resultados de deformação específica de tração na fibra inferior da camada de mistura asfáltica modificada (SBS ou BMP), obtidos a partir das simulações numéricas do Segmento Monitorado 3, no ponto médio entre as rodas com a movimentação do carregamento. Foi considerada a temperatura de referência de 20°C para as duas camadas de concreto asfáltico.

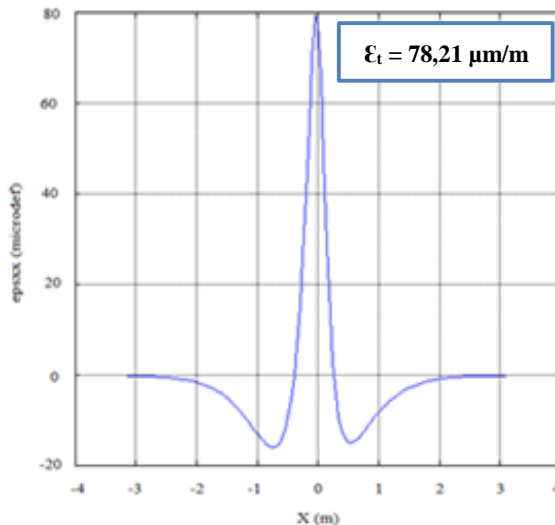
É importante ressaltar que as deformações específicas de tração na fibra inferior da camada de concreto asfáltico convencional mostraram-se reduzidas quando comparadas às deformações específicas de tração na fibra inferior da camada de concreto asfáltico modificado. Para o revestimento asfáltico composto pela mistura convencional e mistura modificada por SBS, o resultado de deformação específica na fibra inferior da camada de mistura convencional foi de 24,6  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Para o mesmo ponto de análise, o valor de deformação específica obtido para o revestimento asfáltico que contém a camada subjacente de mistura modificada por borracha moída de pneu foi de 27,0  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

As simulações das estruturas de pavimento do Segmento Monitorado 3 apresentaram resultados de deformações específicas semelhantes às do Segmento Monitorado 5, para os respectivos revestimentos asfálticos construídos integralmente com as misturas modificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu.



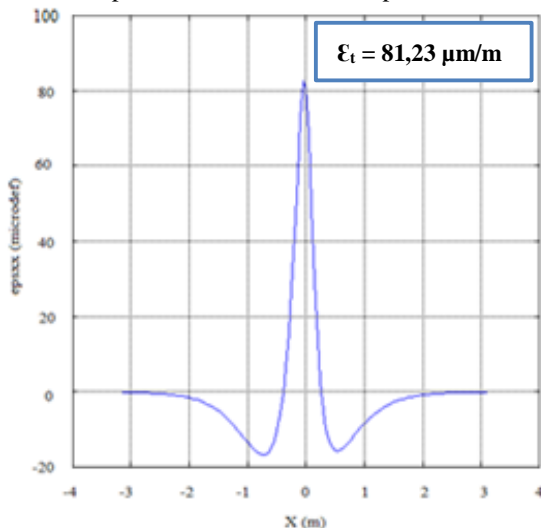
Para a estimativa de vida útil das estruturas de pavimento do Segmento Monitorado 3, foram considerados os modelos de fadiga obtidos nessa pesquisa, para a temperatura de 20°C. Na Tabela 31 podem ser visualizadas as estimativas de vida útil das estruturas de pavimento, em termos de solicitações do eixo padrão de 8,2 toneladas.

Figura 64 - Resultados de deformação específica na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico para a mistura modificada por polímero SBS.



Fonte: Autor (2016).

Figura 65 - Resultados de deformação específica na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico para a mistura modificada por borracha moída de pneu.



Fonte: Autor (2016).

Tabela 31 - Estimativa de vida útil do revestimento asfáltico para a estrutura de pavimento do Segmento Monitorado 3.

Misturas Asfálticas	Equação de fadiga	ε <sub>t</sub> (μm/m)	N <sub>8,2t</sub>
<b>SBS (T = 20°C)</b>	$N = 1,66 \times 10^{19} \epsilon^{-5,842}$	78,21	$1,44 \times 10^8$
<b>BMP (T = 20°C)</b>	$N = 1,26 \times 10^{17} \epsilon^{-5,004}$	81,23	$3,50 \times 10^7$

Fonte: Autor (2016).

Considerando a estrutura de pavimento do Segmento Monitorado 3, com a camada subjacente do revestimento asfáltico constituída pela mistura modificada com polímero SBS, a estimativa de vida útil sofreu uma pequena redução de 4% em relação à estrutura de pavimento do Segmento Monitorado 5. Levando em conta o modelo de fadiga da mistura convencional a 15°C, elaborado por Melo (2014), e o valor de deformação específica de tração na fibra inferior da camada de mistura convencional de 24,6 μm/m, a ruptura por fadiga ainda ocorre na camada de mistura modificada. Portanto, a estimativa de vida útil do revestimento asfáltico é de  $N_{8,2t} = 1,44 \times 10^8$ .

Analisando a estrutura de pavimento com a camada subjacente do revestimento constituída pela mistura modificada por borracha moída

de pneu, a estimativa de vida útil do Segmento Monitorado 3 apresentou um acréscimo de 3%, em relação ao Segmento Monitorado 5. Da mesma forma que a estrutura de pavimento com mistura asfáltica modificada por polímero SBS, considerando o critério de ruptura por fadiga da camada superior de mistura convencional, o revestimento asfáltico sofre ruptura por fadiga primeiramente na camada de asfalto-borracha. A estimativa de vida útil da camada superior de mistura convencional é de  $N_{8,2t} = 1,08 \times 10^8$ , enquanto que a camada inferior de asfalto borracha apresenta estimativa de vida útil de  $N_{8,2t} = 3,50 \times 10^7$ .

Analisando economicamente, considerando que a camada de revestimento asfáltico do Segmento Monitorado 3 tem a geometria apresentada na Figura 66 e assumindo os valores comerciais dos ligantes asfálticos fornecidos pela Greca Asfaltos S.A. em janeiro de 2017, os preços dos ligantes asfálticos, por metro linear de rodovia, são apresentados na Tabela 32.

Figura 66 - Geometria adotada do Segmento Monitorado 3.



Fonte: Autor (2016).

Tabela 32 - Preços dos ligantes asfálticos utilizados nas simulações do Segmento Monitorado 3, por metro linear de rodovia.

Ligante Asfáltico	Preço unitário (R\$/t)	Espessura (cm)	Teor de projeto (%)	Massa de ligante (kg)	Preço total (R\$)	$N_{8,2t}$
FLEXPAVE 60/85	3120,00	5,6	4,5	71,99	504,62	$1,44 \times 10^8$
CAP 50-70	2360,00	11,4	4,35	118,65	506,94	$3,50 \times 10^7$
ECOFLEX B	2760,00	5,6	5,4	82,22		
CAP 50-70	2360,00	11,4	4,35	118,65		

Fonte: Autor (2016).

A partir dos resultados das simulações numéricas e dos preços dos ligantes asfálticos, apresentados na Tabela 30 e na Tabela 32, evidencia-se que a execução do revestimento asfáltico em camadas integradas é economicamente viável, tendo em vista que não ocorre redução significativa da estimativa de vida útil da estrutura de pavimento. Essa configuração apresenta grande potencial para a redução dos custos de implantação de revestimentos asfálticos com ligantes modificados. O acompanhamento do Segmento Monitorado 3, que tem

vido feito desde a sua construção, poderá validar as simulações numéricas desenvolvidas nessa pesquisa.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa pesquisa teve como objetivo a avaliação do desempenho mecânico e reológico de misturas asfálticas modificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu. Nesse âmbito, as propriedades das misturas asfálticas produzidas foram comparadas com os resultados apresentados pelas misturas nanomodificadas e convencional, elaboradas por Melo (2014).

A partir da realização do programa experimental deste trabalho, pôde-se analisar, principalmente, o comportamento reológico, a resistência à fadiga e o desempenho à deformação permanente das misturas modificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu. Em posse desses resultados, tornou-se possível, também, a simulação de estruturas de pavimento, com a camada de revestimento constituída pelas misturas asfálticas produzidas nessa pesquisa.

Inicialmente, foi realizada a caracterização das propriedades empíricas dos ligantes asfálticos. Os resultados satisfatórios de penetração, ponto de amolecimento e recuperação elástica indicaram que as misturas asfálticas confeccionadas com os ligantes modificados apresentariam desempenhos promissores à deformação permanente. No entanto, os elevados níveis de viscosidade rotacional, demonstrados pelos ligantes modificados, conduziram a elevadas temperaturas de usinagem e compactação, durante a produção das misturas asfálticas.

Durante a etapa de dosagem, constatou-se que o teor de ligante de projeto da mistura modificada por polímero SBS, que atendeu todos os requisitos da especificação Superpave, foi de 4,50%. Não obstante, evidenciou-se, também, a elevada resistência ao dano por umidade induzida das misturas modificadas tanto por polímero SBS quanto por borracha moída de pneu. Cabe salientar que a mistura modificada por polímero SBS apresentou resistência à tração consideravelmente superior às demais misturas asfálticas, inclusive às nanomodificadas.

No que tange à resistência à deformação permanente, as misturas modificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu demonstraram desempenhos satisfatórios e atenderam aos critérios estabelecidos pela especificação francesa. Os desempenhos à deformação permanente das misturas modificadas foram somente inferiores ao da mistura com nanotubo de carbono, superando a mistura convencional com CAP 50-70 e a mistura com nanoargila organofílica.

Em relação ao comportamento reológico das misturas asfálticas, as misturas modificadas apresentaram módulo complexo reduzido em

relação às misturas nanomodificadas e convencional, principalmente para temperaturas baixas. À medida que se eleva a temperatura, os valores de módulo das misturas modificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu não sofrem tanta redução quanto os módulos das outras misturas e, por isso, tornam-se superiores ao da mistura convencional a partir de 20°C. Observou-se também que, com o aumento da temperatura, a componente viscosa das misturas asfálticas manifestou-se maior. Entretanto, o aumento da componente viscosa não foi tão considerável nas misturas modificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu, em relação as outras misturas.

Quanto à resistência à fadiga, as misturas modificadas produzidas nessa pesquisa apresentaram desempenhos melhores que as misturas asfálticas estudadas por Melo (2014). O desempenho da mistura modificada por polímero SBS foi superior ao da mistura modificada por borracha moída de pneu, sendo que os ensaios foram realizados na temperatura de 20°C e com frequência de carregamento de 10 Hz. É importante destacar que, à medida que se diminui a amplitude de deformação, o desempenho à fadiga da mistura modificada por polímero SBS torna-se superior.

A estimativa de vida útil dos revestimentos asfálticos mostrou que o ganho em termos de vida de serviço, em relação à mistura asfáltica com nanoargila organofílica produzida por Melo (2014), foi de 20,6 e 4,7 vezes mais, para as misturas modificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu, respectivamente. Além disso, a partir das simulações de estruturas de pavimento de dois diferentes Segmentos Monitorados, pôde-se concluir que o emprego de misturas modificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu, em camadas inferiores e de menor espessura constitutivas do revestimento asfáltico, mostra-se como uma alternativa tecnicamente e economicamente viável.

Como sugestão para pesquisas futuras, o desenvolvimento de nanocompósitos com elevada recuperação elástica é uma alternativa considerável para reduzir o ângulo de fase, aumentar a componente elástica e reduzir a componente viscosa de misturas asfálticas nanomodificadas.

Considerando todas as análises dos resultados dessa pesquisa, pode-se concluir que a utilização de ligantes modificados por polímero SBS ou por borracha moída de pneu conduziria a melhores desempenhos frente aos principais mecanismos de degradação de revestimentos asfálticos, observados para as rodovias brasileiras.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION **AASHTO M 323**: Standard specification for Superpave volumetric mix design. Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC, 2012.

\_\_\_\_\_. **AASHTO R 30** - Standard practice for mixture conditioning of hot-mix asphalt (HMA). Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC, 2012.

\_\_\_\_\_. **AASHTO R 35** - Standard practice for Superpave volumetric design for hot-mix asphalt (HMA). Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 6296**: Produtos betuminosos semissólidos - Determinação da massa específica e densidade relativa. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 6560**: Materiais betuminosos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 6576**: Materiais asfálticos - Determinação da penetração. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 11341**: Derivados do petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 15086**: Materiais betuminosos - Determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR 15184**: Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_. **NBR 15529**: Asfalto borracha - Propriedades reológicas de materiais não newtonianos por viscosímetro rotacional. Rio De Janeiro, 2007.

\_\_\_\_. **NBR 15617** - Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION **AFNOR NF P 98-250-2** - Essais relatifs aux chaussées - préparation des mélanges hydrocarbonés, partie 2: compactage des plaques. France, 1991.

\_\_\_\_. **AFNOR NF P 98-253-1** - Préparation des mélanges hydrocarbonés, partie 1: essai d'orniérage. France, 1993.

ALATAŞ, T.; YILMAZ, M. **Effects of different polymers on mechanical properties of bituminous binders and hot mixtures**. Construction and Building Materials, Volume 42, February 2013, Pages 161-167, ISSN 0950-0618.

ANDRIETTA, A. J. **Pneus e Meio Ambiente: Um Grande Problema Requer uma Grande Solução**. Disponível em <<http://www.reciclarepreciso.hpg.ig.com.br/recipientes.htm>>. Acesso em Abril de 2014.

ANIP – Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos. **Produção e Vendas 2014**. Disponível em <<http://www.anip.com.br>>. Acesso em Abril de 2015.

ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **RESOLUÇÃO ANP N°19**. Disponível em <<http://anp.gov.br/>>. Acesso em Abril de 2016.

ASKELAND, D.R.; PHULÉ, P. P. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. 1. ed. São Paulo: CENGAGE Learning, 2008.

ASPHALT INSTITUTE **Glossary of Terms**. Disponível em <<http://www.asphaltinstitute.org/engineering/>>. Acesso em Fevereiro de 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS **D 2041**: Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures. United States, 2011. 4 p.



\_\_\_\_. **ASTM D 2726**: Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures. United States, 2014.

\_\_\_\_. **ASTM D 2872**: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). United States, 2012. 6 p.

\_\_\_\_. **ASTM D 4124**: Standard Test Method for Separation of Asphalt into Four Fractions. United States, 2009. 8 p.

\_\_\_\_. **ASTM D 4402**: Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer. United States, 2013. 4 p.

\_\_\_\_. **ASTM D 6373**: Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder. United States, 2015. 5 p.

\_\_\_\_. **ASTM D 6521**: Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV). United States, 2013. 6 p.

\_\_\_\_. **ASTM D 6648**: Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR). United States, 2008. 15 p.

\_\_\_\_. **ASTM D 6723**: Standard Test Method for Determining the Fracture Properties of Asphalt Binder in Direct Tension (DT). United States, 2012. 13 p.

\_\_\_\_. **ASTM D 6816**: Standard Practice for Determining Low-Temperature Performance Grade (PG) of Asphalt Binders. United States, 2011. 9 p.

\_\_\_\_. **ASTM D 7175**: Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. United States, 2008. 16 p.

BAHIA, H.U. et al. **Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design**. NCHRP Report 459. Transportation Research Board – National Research Council, Washington, D.C., 2001.

BAHIA, H. U. et al. **Non-Linear Viscoelastic and Fatigue Properties of Asphalt Binders**. Journal of the Asphalt Paving Technologists, Volume 68, 1999, Pages 1-34.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. – Publicado por PETROBRAS E ABEDA, 3ª ed., Rio de Janeiro, 2010. 504f.

BRINGEL, R. M. **Estudo Químico e Reológico de Ligantes Asfálticos Modificados por Polímeros e Aditivos**. 2007. 174 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Química Inorgânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CARDONE, F. et al. **Influence of polymer modification on asphalt binder dynamic and steady flow viscosities**. Construction and Building Materials, Volume 71, September 2014, Pages 435-443, ISSN 0950-0618.

CHEN, J.; PAN, T.; HUANG, X. **Numerical investigation into the stiffness anisotropy of asphalt concrete from a microstructural perspective**. Construction and Building Materials, Volume 25, February 2011, Pages 3059-3065, ISSN 0950-0618.

CHRISTENSEN, D. W.; ANDERSON, D. A. **Chemical-Physical property Relationships for Asphalt Cements and the Dispersed Polar Fluid Model**. American Chemical Society Preprints, Volume 37, Washington, August 1992, Pages 1279-1291.

CNT – Confederação Nacional de Transporte **PESQUISA CNT DE RODOVIAS 2015: Relatório gerencial**. Brasília – DF, 2015.

DANTAS NETO, S. A. et al. **Properties of asphalt-rubber binders related to characteristics of the incorporated crumb rubber**. In:

ASPHALT RUBBER CONFERENCE, 2003, Brasília. **Asphalt Rubber 2003 Proceedings**, p. 297-310.

DE HEER, W. A. **Nanotubes and the Pursuit of Applications**. MRS Bulletin, April 2004, Pages 281-285.

DI BENEDETTO et al. **Fatigue of bituminous mixtures**. Materials and Structures, Volume 37, April 2004, Pages 202-216, ISSN 1359-5997.

DI BENEDETTO et al. **Stiffness testing for bituminous mixtures**. Materials and Structures, Volume 34, March 2001, Pages 66-70, ISSN 1359-5997.

DI BENEDETTO et al. **Time-Temperature Superposition Principle for Bituminous Mixtures – Three Dimensional Approach and Extension in the Non-Linear Domain**. First International Conference on Transport Infrastructure, Beijing, 2008. Pages 178-188.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes **MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO**. 3 ed., 274p., Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **DNIT-ES 031: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2004.

DONG, F. et al. **Influence of SBS and asphalt on SBS dispersion and the performance of modified asphalt**. Construction and Building Materials, Volume 62, April 2014, Pages 1-7, ISSN 0950-0618.

EL SHAFIE, M.; IBRAHIM, I. M.; ABD EL RAHMAN, A. M. M. **The addition effects of macro and nano clay on the performance of asphalt binder**. Egyptian Journal of Petroleum, Volume 21, 2012, Pages 149-154, ISSN 1110-0621.

EUROPEAN STANDARD **EN 12697-24**: Bituminous mixtures - test methods for hot mix asphalt, part 24: Resistance to fatigue. CEN, Brussels, 2004.

\_\_\_\_\_. **EN 12697-26**: Bituminous mixtures - test methods for hot mix asphalt, part 26: Stiffness. CEN, Brussels, 2004.

FAXINA, A. L. **Estudo de viabilidade técnica do uso do resíduo do óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha.** 2006. 308 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

FEDERATION OF CANADIAN MUNICIPALITIES AND NATIONAL RESEARCH COUNCIL **Rut Mitigation at Intersections.** Roads and Sidewalks, September 2003.

FERREIRA, H. S.; RANGEL, M. C. **Nanotecnologia: Aspectos gerais e potencial de aplicação em catálise.** Quim. Nova, Volume 32, No. 7, 2009, Páginas 1860-1870.

FONTES, L. P. T. L. **Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos.** 2009. 541 f. Tese (Doutorado) – Universidade do Minho/ Universidade Federal de Santa Catarina.

FONTES, L. P. T. L.; TRICHÊS, G.; PAIS, J. C.; PEREIRA, P. A. A. **Evaluating permanent deformation in asphalt rubber mixtures.** Construction and Building Materials, Volume 24, January 2010, Pages 1193-1200, ISSN 0950-0618.

GRECA ASFALTOS S.A. **Estudo comparativo de deformação permanente de concretos asfálticos confeccionados com ligantes asfálticos diversos.** 16º Encontro Técnico do Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná (DER), Curitiba, 2012.

HICKS, R. G.; CHENG, D.; DUFFY, T. **Evaluation of Terminal Blend Rubberized Asphalt in Paving Applications.** Report Number: CP2C – 2010 – 102 Technical Memo, California Pavement Preservation Center, Chico, California, 2010. 82 p.

HICKS, R. G.; EPPS, J. A. **Quality control for asphalt rubber binders and mixes.** Rubber Pavement Association, Tempe, Arizona, 2000. 26 p.

HUSSAIN, F. et al. **Review article: Polymer-matrix Nanocomposites, Processing, Manufacturing, and Application: An Overview.** Journal of Composite Materials, Volume 40, No. 17, August 2006, Pages 1511-1575.

IPC Global®. Disponível em <<http://www.ipc-global.com>>. Acesso em Março de 2016.

JAHROMI, S. G.; ANDALIBIZADE, B.; KHODAII, A. **Mechanical Behavior of Nanoclay Modified Asphalt Mixtures**. Journal of Testing and Evaluation, Volume 38, Issue 5, September 2010.

JAHROMI, S. G.; KHODAII, A. **Effects of nanoclay on rheological properties of bitumen binder**. Construction and Building Materials, Volume 23, March 2009, Pages 2894-2904, ISSN 0950-0618.

JONES, D. R. **Understanding How the Origin and Composition of Paving-Grade Asphalt Cements Affect Their Performance**. SHRP Asphalt Research Program Memorandum #4, The University of Texas Austin, Tx, 1992.

JUN, Y.; TIGHE, S. **A review of advances of Nanotechnology in asphalt mixtures**. Procedia – Social and Behavioral Sciences, Volume 96, 2013, Pages 1269-1276, ISSN 1877-0428.

KHATTAK, M. J.; KHATTAB, A.; RIZVI, H. R. **Characterization of carbon nano-fiber modified hot mix asphalt mixtures**. Construction and Building Materials, Volume 40, 2013, Pages 738-745, ISSN 0950-0618.

KHATTAK, M. J. et al. **The impact of carbon nano-fiber modification on asphalt binder rheology**. Construction and Building Materials, Volume 30, 2012, Pages 257-264, ISSN 0950-0618.

KIM, T. W. et al. **Fatigue performance evaluation of SBS modified mastic asphalt mixtures**. Construction and Building Materials, Volume 48, 2013, Pages 908-916, ISSN 0950-0618.

KIM, Y. R. **Modeling of Asphalt Concrete**. 1<sup>st</sup> ed. USA: American Society of Civil Engineers, McGraw-Hill Construction, 2009.

KLINSKY, L. M. G. et al. **Avaliação da Influência do Tipo de Ligante Asfáltico na Vida de Fadiga de Misturas Asfálticas**. In: 21<sup>o</sup> Encontro do Asfalto, Rio de Janeiro, 2014.

KÖK, B. V.; ÇOLAK, H. **Laboratory comparison of the crumb-rubber and SBS modified bitumen and hot mix asphalt.** Construction and Building Materials, Volume 25, 2011, Pages 3204-3212, ISSN 0950-0618.

KUMAR, S. A.; VEERARAGAVAN, A. **Dynamic mechanical characterization of asphalt concrete mixes with modified asphalt binders.** Materials, Science and Engineering A, Volume 528, May 2011, Pages 6445-6454, ISSN 0921-5093.

LEITE, L. F. M. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros.** 1999. 266 f. Tese (Doutorado) – Curso de Ciência e Tecnologia de Polímeros, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

LO PRESTI, D. **Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review.** Construction and Building Materials, Volume 49, 2013, Pages 863-881, ISSN 0950-0618.

LONG, F. M. **Permanent Deformation of Asphalt Concrete Pavements: A Nonlinear Viscoelastic Approach to Mix Analyses and Design.** 2001. 318 p. Tese (Doutorado) – Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, 2001.

MAGALHÃES, S. T. **Misturas Asfálticas de Módulo Elevado Para Pavimentos de Alto Desempenho.** 2004. 184 p. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MANO, E. B; MENDES, L. C. **Introdução a polímeros.** 2. Ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 2004, 202 p.

MEDANI, T. O. **Design Principles of Surfacing on Orthotropic Steel Bridge Decks.** 2006. 300 p. Dissertação (Mestrado) – Civil Engineering, Section of Road and Railway Engineering, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Netherlands.

MELO, J. V. S. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos.** 2014. 414 p. Tese (Doutorado) –

Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MONISMITH, C. L. **Asphalt Mixture Behavior in Repeated Flexure**. Technical Report TE-63-2. Institute of Transportation and Traffic Engineering, University of California, California, November 1963.

MORILHA JR., A. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas**. 2004. 165 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MOURA, E. **Estudo de Deformação Permanente em Trilha de Roda de Misturas Asfálticas em Pista e em Laboratório**. 2010. 299 p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

NGUYEN, Q. T. **Process for Improving the Exfoliation and Dispersion of Nanoclay Particles into Polymer Matrices Using Supercritical Carbon Dioxide**. 2007. 179 p. Tese (Doutorado) – Chemical Engineering, Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Va.

NNI – **National Nanotechnology Initiative**. Disponível em <<http://nano.gov>>. Acesso em Abril de 2014.

OLIVER, J. W. H. **Modification of Paving Asphalts by Digestion with Scrap Tire Rubber**. Transportation Research Record 821, Transportation Research Board, 1981.

PARTL, M. N.; GUBLER, R.; HUGENER, M. **Nano-science and – Technology for Asphalt Pavement**. In: Proc. 1<sup>st</sup> Int. Symp. On Nanotechnology in Construction, Paisley, Scotland, 2003, Pages 343-355.

POLACCO, G.; et al. **Rheological properties of asphalt/SBS/clay blends**. European Polymer Journal, Volume 44, September 2008, Pages 3512-3521, ISSN 0014-3057.

READ, J. M. **Fatigue Cracking of Bituminous Paving Mixtures**. 1996. 317 p. Tese (Doutorado) – Department of Civil Engineering, University of Nottingham, Nottingham.

READ, J; WHITEOAK, D. **The Shell Bitumen Handbook**. Published by Thomas Telford Ltd, 5<sup>th</sup> ed., London, 2003. 464 p.

RECICLANIP. Disponível em <<http://www.reciclanip.org.br>>. Acesso em Abril de 2015.

RESCHNER, K. **Scrap tire recycling: A Summary of Prevalent Disposal and Recycling Methods**. 16 p. Berlin, Germany, July 2008.

RRI – Recycling Research Institute. **Crumb Rubber Information**. Disponível em <<http://www.scraptirenews.com>>. Acesso em Abril de 2015.

RMA – Rubber Manufacturers Association. Disponível em <<http://www.rma.org>>. Acesso em Abril de 2014.

SHEN, S.; CARPENTER, S. H. **Dissipated Energy Concepts for HMA Performance: Fatigue and Healing**. COE Report No. 29, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois, Illinois, March 2007.

SOUSA, J. B. et al. **Test Method Selection**. SHRP-A-415 – Permanent Deformation Response of Asphalt Mixes, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC, 1994.

TANGELLA, S. C. S. et al. **Summary Report on Fatigue Response of Asphalt Mixtures**. TM-UCB-A-003A-89-3 prepared for SHRP-A-003-A, Institute of Transportation Studies, University of California, California, 1990.

TAYEBALI, A. A. et al. **Test Method Selection**. SHRP-A-404 – Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixes, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC, 1994.

TONIAL, I. A. **Influência do envelhecimento do revestimento asfáltico na vida de fadiga de pavimentos**. 1991. 248 f. Dissertação



(Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

TRICHÊS, G. **Desenvolvimento de Método para Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos. Fase 1: Trechos Experimentais e Materiais de Pavimentação** – UFSC: Informações do Segmento de Araranguá/SC. Florianópolis, 2013.

TRICHÊS, G. Informações do Segmento de Araranguá/SC. Florianópolis, 2014.

VECTRA France. Disponível em <<http://vectrafrance.com>>. Acesso em Fevereiro de 2016.

WOLDEKIDAN, M. F. **Response Modeling of Bitumen, Bituminous Mastic and Mortar**. 2011. 260 f. Dissertação (Mestrado) – Civil Engineering, Section of Road and Railway Engineering, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Netherlands.

WU, R.; TSAI, B. W.; HARVEY, J. T. **Using four-point bending tests in calibration of the California mechanistic-empirical pavement design system**. In: 2<sup>nd</sup> Workshop on Four Bending Point, University of Minho, 2009.

YAO, H. et al. **Performance of asphalt binder blended with non-modified and polymer-modified nanoclay**. Construction and Building Materials, Volume 35, 2012, Pages 159-170, ISSN 0950-0618.

YEN, T. F.; ERDMAN, J. G.; POLLACK, S. S. **Investigation of the Structure of Petroleum Asphaltenes by X-Ray Diffraction**. Analytical Chemistry, Volume 33, 1961, Pages 1587-1594.

YILMAZ, M.; ÇELOGLU, M. E. **Effects of SBS and different natural asphalts on the properties of bituminous binders and mixtures**. Construction and Building Materials, Volume 44, 2013, Pages 533-540, ISSN 0950-0618.

YU, J. et al. **Preparation and properties of montmorillonite modified asphalts**. Materials Science and Engineering A, Volume 447, 2007, Pages 233-238, ISSN 0921-5093.

ZEGARRA, J. R. E. **Avaliação de misturas produzidas com ligantes asfálticos peruanos convencional PEN 60/70 e modificados por polímero SBS TIPO I 60/60 e PG 76 -22**. 2007. 264 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

