

Gabriela Ceccon Carlesso

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE MISTURA ASFÁLTICA  
MODIFICADA POR NANOARGILA E POLÍMERO SBS**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.  
Orientador: Prof. Dr. Glicério Trichês.

Florianópolis  
2017

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

Carlesso, Gabriela Ceccon

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE MISTURA ASFÁLTICA  
MODIFICADA POR NANOARGILA E POLÍMERO SBS / Gabriela  
Ceccon Carlesso ; orientador, Glicério Trichês,  
2017.

162 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de  
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

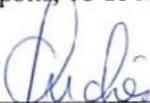
1. Engenharia Civil. 2. Misturas asfálticas  
modificadas. 3. Nanomateriais. 4. Polímeros. 5.  
Comportamento reológico e mecânico. I. Trichês,  
Glicério. II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Civil. III. Título.

Gabriela Ceccon Carlesso

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE MISTURA ASFÁLTICA  
MODIFICADA POR NANOARGILA E POLÍMERO SBS**

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

Florianópolis, 08 de Março de 2017.



---

Prof. Glicério Trichês, Dr.  
Coordenador do Curso



---

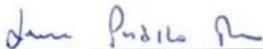
Prof. Glicério Trichês, Dr.  
Orientador

**Banca Examinadora:**



---

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



---

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



---

Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Aos meus pais, Claire e Edson, ao meu irmão, Edson Junior, e ao meu namorado, Marcel, com o amor mais sincero que há no mundo. Este trabalho é por vocês e para vocês.



## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, pelas pessoas especiais que a compartilham comigo e por ser a minha força de sempre. Por ter me mostrado, inúmeras vezes, que tudo é possível para quem nEle crê.

Aos meus pais, Claire e Edson, e ao meu irmão, Edson Junior, por serem meu grande suporte. Agradeço pelo amor e carinho que deles recebi durante esta caminhada e pelo apoio incondicional. Por não medirem esforços para me verem feliz.

Ao meu namorado, Marcel, por estar ao meu lado nos momentos de alegria e por permanecer durante as dificuldades. Obrigada pelo amor, pela paciência e pela compreensão. Certamente, um dia olharemos para trás e veremos que nossas renúncias valeram a pena.

Aos meus avós, Catarina, Cely (*in memoriam*), Luiz José e Ricieri, pela preocupação e pelas doces demonstrações de carinho.

Ao Prof. Glicério, por ser minha referência na área de pavimentação e por todos os ensinamentos a mim transmitidos. Agradeço também pela amizade que perdura desde a época da Graduação.

À Prof.<sup>a</sup> Liseane, pelo conhecimento partilhado e por todas as contribuições feitas ao trabalho.

Ao Prof. João Victor e ao colega Matheus, pela realização das pesquisas que permitiram as análises comparativas aqui apresentadas.

Aos colegas, amigos e agregados do Laboratório de Pavimentação da UFSC: Adosindro, Allan, Ângela, Camilo, Cândida, Cristine, Drielle, Emanuelle, Emmanuelle, Estefânio, Job, Jonathan, José Marcos, Keyla, Lídia, Lucas, Matheus, Quintero, Ramon, Sarvia, Thomas e Vanesa. Obrigada pela parceria e por terem tornado esta jornada mais leve. Agradeço, em especial, ao Adosindro, pelo suporte na serragem das placas e na realização dos ensaios; ao Allan, pelo auxílio com a obtenção do polímero SBS; e ao Quintero, pela ajuda durante o período de moldagens.

Ao PPGEC/UFSC, pela oportunidade de realizar esta pesquisa.

Ao CNPq, pela bolsa de estudos a mim concedida.

À Rede Temática de Tecnologia do Asfalto/Petrobras, pelos investimentos na capacitação do Laboratório de Pavimentação da UFSC.

Ao Laboratório de Caracterização Microestrutural (LCM/UFSC), pela realização dos ensaios de DRX, e ao Laboratório Multiusuário de Estudos em Biologia (LAMEB/UFSC), pela realização dos ensaios de microscopia.



## RESUMO

No Brasil, o desenvolvimento e o estudo de misturas asfálticas de alto desempenho são justificados em virtude do elevado contingente de defeitos precoces identificados nas rodovias, que contrastam com a notável importância do meio de transporte rodoviário para o País. A partir deste contexto, este trabalho tem como objetivo a avaliação do comportamento reológico e a previsão de desempenho de uma mistura asfáltica modificada simultaneamente por nanoargila e por polímero SBS. Com esta finalidade, foi adaptado um procedimento de laboratório para a modificação de um ligante asfáltico convencional, por meio do qual a nanoargila e o polímero foram incorporados à matriz asfáltica em teores de 3% e de 2%, respectivamente. Posteriormente, a mistura produzida com o ligante modificado (3% NA + 2% SBS) foi investigada em relação à dosagem, à ação deletéria da água, à deformação permanente, ao módulo e à fadiga (aparato 4 pontos) e a simulações numéricas de estruturas de pavimentos. Os resultados foram comparados àqueles obtidos por Melo (2014) e por Marcon (2016), que avaliaram misturas asfálticas análogas, porém produzidas com ligante convencional (CAP 50-70), modificado somente por nanoargila (3% NA) e somente por SBS (SBS 60/85). Como resultado, o estudo de dosagem indicou um teor de ligante de projeto equivalente ao obtido para a mistura produzida com CAP 50-70 e intermediário se comparado àqueles obtidos para as misturas 3% NA e SBS 60/85. Na avaliação do efeito da ação deletéria da água e do fenômeno de deformação permanente, a mistura 3% NA+ 2% SBS mostrou-se superior às demais. No estudo reológico, apresentou módulos complexos relativamente elevados e os menores valores de ângulo de fase. Os resultados dos ensaios de resistência à fadiga, entretanto, mostraram o comportamento superior da mistura SBS 60/85, seguido pelo comportamento das misturas 3% NA+ 2% SBS, 3% NA e convencional. Contudo, com base nas simulações numéricas, evidenciou-se que a substituição de revestimentos com as misturas convencional, 3% NA e SBS 60/85 por revestimentos com a mistura 3% NA+2% SBS é tecnicamente adequada e também pode ser economicamente viável. Desta maneira, tendo em vista o comportamento da mistura modificada por nanoargila e SBS, evidenciado ao longo desta pesquisa, conclui-se que a mesma possui potencial para proporcionar melhorias ao setor rodoviário brasileiro.

**Palavras-chave:** Misturas asfálticas modificadas. Nanomateriais. Polímeros. Comportamento reológico e mecânico.



## ABSTRACT

In Brazil, the development and study of high-performance asphalt mixtures are justified because of the high contingency of early distresses identified on roads, which contrast with the remarkable importance of road transportation to the country. From this context, this work aims to evaluate the rheological behavior and to predict the performance of an asphalt mixture simultaneously modified by nanoclay and SBS polymer. For this purpose, a laboratory procedure was adapted for the modification of a conventional asphalt binder whereby nanoclay and polymer were incorporated into the asphalt matrix in amounts of 3% and 2%, respectively. Subsequently, the mixture produced with the modified binder (3% NA + 2% SBS) was investigated in relation to design, to deleterious effects of water, to permanent deformation, to modulus and fatigue (four point bending test) and to numerical simulations of pavement structures. The results were compared to those obtained by Melo (2014) and by Marcon (2016), who evaluated similar asphalt mixtures but these produced with conventional binder, with binder modified only by nanoclay (3% NA) and with binder modified only by SBS (SBS 60/85). As a result, the dosage study indicated a level of project binder equivalent to that obtained for the mixture with CAP 50-70 and intermediate if compared to those obtained for the mixtures 3% NA and SBS 60/85. In the evaluation of the deleterious action of water effect and the phenomena of permanent deformation, the mixture 3% NA + 2% SBS showed to be superior to the others. In the rheological study, it presented relatively high complex modulus and the smallest phase angle values. The results of the fatigue strength tests, however, demonstrated the superior behavior of the mixture SBS 60/85 followed by the behavior of the mixtures 3% NA + 2% SBS, 3% NA and conventional. However, based on the numerical simulations, it has been found that the replacement of surfaces with conventional mixtures, 3% NA and SBS 60/85 by surfaces with the mixture 3% NA + 2% SBS is technically appropriate and can also be economically viable. Thus, considering the behavior of the mixture modified by nanoclay and SBS evidenced throughout this study, it is concluded that it has potential to provide improvements to Brazilian road sector.

**Keywords:** Modified asphalt mixtures. Nanomaterials. Polymers. Rheological and mechanical behavior.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Comportamento viscoelástico dos ligantes asfálticos.....	30
Figura 2.2 - Unidades estruturais dos filossilicatos.....	34
Figura 2.3 - Estrutura de filossilicatos do tipo 2:1.....	35
Figura 2.4 - Ilustração das diferentes estruturas formadas a partir da dispersão de argilas organofílicas em matrizes poliméricas.....	36
Figura 2.5 - Exemplo das diferentes estruturas formadas a partir da dispersão de argilas organofílicas em matrizes poliméricas: (a) resultados de microscopia eletrônica de transmissão e (b) resultados de difratometria de raios X.....	37
Figura 2.6 - Influência da incorporação de nanoargilas na viscosidade dos ligantes asfálticos.....	38
Figura 2.7 - Influência da incorporação de nanoargilas na rigidez ( $G^*$ ) dos ligantes asfálticos.....	39
Figura 2.8 - Desempenho à deformação permanente das misturas asfálticas modificadas com nanoargila e de referência.....	41
Figura 2.9 - Curvas de fadiga das misturas asfálticas modificada (com 3% de nanoargila) e de referência.....	42
Figura 2.10 - Representação esquemática do polímero SBS.....	46
Figura 2.11 - Estrutura tridimensional formada pelas moléculas de SBS.....	47
Figura 2.12 - Influência da incorporação de polímeros na viscosidade dos ligantes asfálticos.....	48
Figura 2.13 - Influência da incorporação de polímeros: (a) no ângulo de fase ( $\delta$ ) e (b) no parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ dos ligantes asfálticos.....	50
Figura 2.14 - Desempenho à deformação permanente das misturas asfálticas modificadas por polímero SBS e por borracha moída de pneu.....	51
Figura 2.15 - Curvas de fadiga das misturas asfálticas modificadas (com polímero SBS e com borracha moída de pneu) (MARCON, 2016) e de referência (MELO, 2014).....	53
Figura 2.16 - Imagens de microscopia de fluorescência de ligantes modificados por polímero SBS (aumento de 100×).....	54
Figura 2.17 - Princípio de retardamento de envelhecimento dos ligantes asfálticos a partir da incorporação de nanoargila.....	61
Figura 3.1 - Fluxograma do método da pesquisa.....	67
Figura 3.2 - Resultados da micrografia (a) dos grãos de pó de pedra com ampliação de 2.000 vezes e (b) da cal hidratada com ampliação de 20.000 vezes.....	70

Figura 3.3 - Curva granulométrica da composição de agregados. ....	73
Figura 3.4 - Aspecto visual da nanoargila organofílica Dellite 67G. ....	75
Figura 3.5 - Resultado da micrografia da nanoargila com ampliação de 10.000 vezes.....	76
Figura 3.6 - Resultados da difratometria de raios X para o pó de nanoargila.....	77
Figura 3.7 - Aspecto visual do polímero SBS Kraton D1101 B em grânulos.....	78
Figura 3.8 - Misturador de alto cisalhamento Silverson L5M-A e cuba térmica. ....	80
Figura 3.9 - Ilustração esquemática do plano de corte.....	89
Figura 3.10 - Estruturas simuladas com revestimentos em camadas singulares (S) e integradas (I). ....	93
Figura 3.11 - Configuração do carregamento adotado nas simulações. 95	
Figura 4.1 - Resultados da difratometria de raios X para o pó da nanoargila (referência) e para o ligante modificado com diferentes períodos de compatibilização.....	98
Figura 4.2 - Resultados da microscopia de fluorescência para o ligante 50-70 (referência) e para os ligantes modificados com diferentes tempos de compatibilização. ....	99
Figura 4.3 - Curvas viscosidade <i>versus</i> temperatura dos ligantes asfálticos. ....	106
Figura 4.4 - Massa específica máxima medida ( <i>Gmm</i> ) da mistura asfáltica em função do teor de ligante.....	108
Figura 4.5 - Massa específica aparente ( <i>Gmb</i> ) da mistura asfáltica no <i>Nprojeto</i> em função do teor de ligante.....	108
Figura 4.6 - Curvas de compactação da mistura asfáltica. ....	109
Figura 4.7 - Porcentagem do volume de vazios ( <i>Vv</i> ) em função do teor de ligante, no <i>Nprojeto</i> .....	109
Figura 4.8 - Resultados da avaliação em ensaios Lottman modificado para as diferentes misturas asfálticas. ....	112
Figura 4.9 - Curvas isotérmicas (3% NA + 2% SBS e Convencional 50-70). ....	119
Figura 4.10 - Curvas isotérmicas (3% NA + 2% SBS e 3% NA). ....	120
Figura 4.11 - Curvas isotérmicas (3% NA + 2% SBS e SBS 60/85). .	121
Figura 4.12 - Curvas mestras das diferentes misturas na temperatura de referência de 20 °C.....	123
Figura 4.13 - Curvas isócronas (3% NA + 2% SBS e Convencional 50-70). ....	125

Figura 4.14 - Curvas isócronas (3% NA + 2% SBS e 3% NA).....	126
Figura 4.15 - Curvas isócronas (3% NA + 2% SBS e SBS 60/85).....	127
Figura 4.16 - Espaços de Black das diferentes misturas asfálticas.....	128
Figura 4.17 - Curvas ângulo de fase <i>versus</i> frequência de carregamento (3% NA + 2% SBS e Convencional 50-70). ....	130
Figura 4.18 - Curvas ângulo de fase <i>versus</i> frequência de carregamento (3% NA + 2% SBS e 3% NA).....	131
Figura 4.19 - Curvas ângulo de fase <i>versus</i> frequência de carregamento (3% NA + 2% SBS e SBS 60/85). ....	132
Figura 4.20 - Planos Cole-Cole das diferentes misturas asfálticas.....	133
Figura 4.21 - Componentes elásticas ( $E_1$ ) e viscosas ( $E_2$ ) das diferentes misturas asfálticas (frequência de 10 Hz e temperatura de 20 °C).....	134
Figura 4.22 - Curva do ensaio de deformação permanente da mistura asfáltica .....	135
Figura 4.23 - Resultados dos ensaios de deformação permanente aos 30.000 ciclos para as diferentes misturas asfálticas. ....	136
Figura 4.24 - Curvas dos ensaios de deformação permanente das diferentes misturas asfálticas.....	136
Figura 4.25 - Plano Cole-Cole da mistura 3% NA + 2% SBS. ....	138
Figura 4.26 - Curvas de fadiga das diferentes misturas asfálticas.....	140
Figura 4.27 - Modelo de Huet-Sayegh ajustado para os dados experimentais da mistura asfáltica 3% SBS + 2% NA.....	143
Figura 4.28 - Estado da superfície do revestimento dos Segmentos Monitorados de Araranguá com estrutura (a) 1S e (b) 5I.....	148



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação dos nanomateriais de acordo com o número de dimensões nanométricas.....	33
Tabela 3.1 - Caracterização dos agregados.....	71
Tabela 3.2 - Caracterização da cal hidratada.....	72
Tabela 3.3 - Composição granulométrica: porcentagem passante em cada peneira.....	73
Tabela 3.4 - Caracterização do ligante asfáltico convencional (CAP 50-70).....	74
Tabela 3.5 - Caracterização do polímero SBS Kraton D1101 B.....	78
Tabela 3.6 - Propriedades tradicionais avaliadas na caracterização do ligante modificado.....	83
Tabela 3.7 - Parâmetros elásticos das camadas de base, sub-base e subleito.....	94
Tabela 4.1 - Influência do tempo (180 minutos) e da temperatura (180 °C) de modificação no envelhecimento do ligante asfáltico.....	101
Tabela 4.2 - Penetração e ponto de amolecimento dos ligantes asfálticos.....	102
Tabela 4.3 - Recuperação elástica dos ligantes asfálticos.....	104
Tabela 4.4 - Separação de fase (estabilidade à estocagem).....	105
Tabela 4.5 - Verificação dos parâmetros de dosagem para o teor de ligante de projeto de 4,3%.....	110
Tabela 4.6 - Resultados das dosagens de misturas com o emprego da mesma granulometria e ligantes asfálticos distintos.....	110
Tabela 4.7 - Resultados de resistência à tração ( <i>RT</i> ) e porcentagem de volume de vazios ( <i>Vv</i> ) dos corpos de prova avaliados no ensaio Lottman modificado.....	112
Tabela 4.8 - Caracterização das placas compactadas para ensaios de deformação permanente.....	114
Tabela 4.9 - Caracterização volumétrica dos corpos de prova para ensaios de módulo complexo e de fadiga.....	115
Tabela 4.10 - Resultados de módulo complexo e ângulo de fase obtidos para a mistura 3% NA + 2% SBS.....	117
Tabela 4.11 - Módulo complexo e ângulo de fase da mistura Convencional.....	117
Tabela 4.12 - Módulo complexo e ângulo de fase da mistura 3% NA.....	118
Tabela 4.13 - Módulo complexo e ângulo de fase da mistura SBS 60/85.....	118

Tabela 4.14 - Parâmetros $C1$ e $C2$ da Equação de Williams-Landel-Ferry para as diferentes misturas (temperatura de referência = 20 °C). .....	122
Tabela 4.15 - Resultados dos ensaios de fadiga da mistura asfáltica 3% NA + 2% SBS. ....	139
Tabela 4.16 - Tabela resumo dos resultados dos ensaios de fadiga das diferentes misturas asfálticas. ....	141
Tabela 4.17 - Parâmetros reológicos do modelo de Huet-Sayegh obtidos para as diferentes misturas asfálticas. ....	142
Tabela 4.18 - Resultados das simulações numéricas e previsão da vida útil à fadiga dos revestimentos. ....	144

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
AAT	<i>Advanced Asphalt Technologies</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CENPES	Centro de Pesquisas de Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello / Petrobras
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
DRX	Difratometria de Raios X
ESALs	<i>Equivalent Single Axle Loads of 8.2 tons</i>
EVA	<i>Ethylene-Vinyl Acetate</i>
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LAMEB	Laboratório Multiusuário de Estudos em Biologia / UFSC
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
LCM	Laboratório de Caracterização Microestrutural / UFSC
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MSCR	<i>Multiple Stress Creep and Recovery</i>
NA	Nanoargila
NBR	Norma Brasileira
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
OxPE	<i>Oxidized Polyethylene</i>
PCG	Prensa de Cisalhamento Giratório
PG	<i>Performance Grade</i>
PPA	<i>PolyPhosphoric Acid</i>
PP-MAH	<i>Polypropylene-maleic anhydride</i>
REPAR	Refinaria do Paraná
RTFOT	<i>Rolling Thin Film Oven Test</i>
SB	<i>Styrene-Butadiene</i>
SBS	<i>Styrene-Butadiene-Styrene</i>
Superpave	<i>Superior Performing Asphalt Pavement</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>23</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	23
1.2	OBJETIVOS .....	25
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>25</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>25</b>
1.3	JUSTIFICATIVA .....	25
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	26
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>29</b>
2.1	LIGANTES ASFÁLTICOS.....	29
<b>2.1.1</b>	<b>Considerações iniciais</b> .....	<b>29</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Comportamento viscoelástico dos ligantes asfálticos</b> .....	<b>29</b>
2.2	LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS POR NANOMATERIAIS.....	31
<b>2.2.1</b>	<b>Ciência dos nanomateriais</b> .....	<b>31</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Argilas, argilominerais e nanoargilas</b> .....	<b>33</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Modificação de ligantes por nanomateriais</b> .....	<b>38</b>
2.3	LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS POR POLÍMEROS .....	44
<b>2.3.1</b>	<b>Ciência dos polímeros</b> .....	<b>44</b>
<b>2.3.2</b>	<b>O polímero SBS</b> .....	<b>46</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Modificação de ligantes por polímeros</b> .....	<b>47</b>
2.4	LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS POR POLÍMEROS E POR NANOMATERIAIS .....	55
2.5	RESUMO DA REVISÃO DE LITERATURA .....	64
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODO DA PESQUISA</b> .....	<b>67</b>
3.1	ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	69
<b>3.1.1</b>	<b>Agregados e composição granulométrica</b> .....	<b>69</b>
3.1.1.1	Agregados .....	70
3.1.1.2	Composição granulométrica .....	72
<b>3.1.2</b>	<b>Ligante asfáltico convencional</b> .....	<b>74</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Modificadores do ligante asfáltico</b> .....	<b>75</b>
3.1.3.1	Nanoargila organofílica .....	75
3.1.3.2	Polímero SBS.....	77
3.2	ETAPA 2 – MODIFICAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO CONVENCIONAL E CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE MODIFICADO .....	78

3.3	ETAPA 3 – PROJETO DA MISTURA ASFÁLTICA.....	84
3.3.1	<b>Determinação do teor de ligante de projeto .....</b>	<b>84</b>
3.3.2	<b>Avaliação do dano por umidade induzida .....</b>	<b>87</b>
3.4	ETAPA 4 – MOLDAGEM DAS PLACAS E SERRAGEM DOS CORPOS DE PROVA .....	87
3.4.1	<b>Moldagem das placas de concreto asfáltico.....</b>	<b>88</b>
3.4.2	<b>Serragem de corpos de prova prismáticos.....</b>	<b>88</b>
3.5	ETAPA 5 – AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO E MECÂNICO.....	89
3.5.1	<b>Comportamento reológico .....</b>	<b>89</b>
3.5.2	<b>Comportamento mecânico .....</b>	<b>90</b>
3.5.2.1	Deformação permanente.....	90
3.5.2.2	Fadiga .....	91
3.6	ETAPA 6 – SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E PREVISÃO DO DESEMPENHO À FADIGA.....	92
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>97</b>
4.1	ETAPA 2 – MODIFICAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO CONVENCIONAL E CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE MODIFICADO.....	97
4.2	ETAPA 3 – PROJETO DA MISTURA ASFÁLTICA.....	107
4.2.1	<b>Determinação do teor de ligante de projeto .....</b>	<b>107</b>
4.2.2	<b>Avaliação do dano por umidade induzida .....</b>	<b>111</b>
4.3	ETAPA 4 – MOLDAGEM DAS PLACAS E SERRAGEM DOS CORPOS DE PROVA .....	113
4.3.1	<b>Moldagem das placas de concreto asfáltico.....</b>	<b>113</b>
4.3.2	<b>Serragem de corpos de prova prismáticos.....</b>	<b>114</b>
4.4	ETAPA 5 – AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO E MECÂNICO.....	115
4.4.1	<b>Comportamento reológico .....</b>	<b>115</b>
4.4.2	<b>Comportamento mecânico .....</b>	<b>135</b>
4.4.2.1	Deformação permanente.....	135
4.4.2.2	Fadiga .....	137
4.5	ETAPA 6 – SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E PREVISÃO DO DESEMPENHO À FADIGA.....	142
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>149</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>153</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Segundo pesquisa da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2016), realizada no ano de 2016, 61,1% do transporte de cargas no Brasil são realizados através do meio rodoviário, seguidos por 20,7% do ferroviário, 13,6% do aquaviário, 4,2% do dutoviário e apenas 0,4% do meio aéreo. Em termos de transportes de pessoas, a mesma pesquisa aponta que 95% são realizados por meio de rodovias.

Para tanto, no País, dispõe-se de um total de 1.720.756 km de rodovias, das quais 211.468 km (isto é, apenas 12,3%) são pavimentadas (BRASIL, 2015). Destas, em 2016, a CNT avaliou as condições de 103.259 km. Como resultado, constatou que em 48,3% da extensão avaliada a rodovia apresentou algum tipo de problema no pavimento, sendo 35,8% dos pavimentos classificados como de qualidade regular, 9,9% como ruins e 2,6% como péssimos (CNT, 2016).

Nota-se, assim, que as condições verificadas para os pavimentos brasileiros não condizem com sua importância econômica para o País, além de apresentarem riscos à segurança dos usuários, desconforto e perdas de recursos e renda. Esta realidade está diretamente relacionada ao crescente aumento do volume de tráfego de veículos e das cargas aplicadas pelos mesmos, à falta de controle eficiente da magnitude destas cargas e a aspectos relacionados às deficiências no dimensionamento, na caracterização e na escolha de materiais, notadamente para troncos de maior volume de tráfego.

Neste sentido, a evolução da ciência de materiais asfálticos modificados se apresenta como uma alternativa para se buscar o desenvolvimento de misturas asfálticas que possam atender ao elevado desempenho exigido para estas rodovias de tráfego pesado.

A partir do contexto apresentado, este estudo se insere na continuidade de trabalhos desenvolvidos nesta linha de pesquisa do Grupo Rodovias Verdes/Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina. É o caso das pesquisas desenvolvidas por Fontes (2009), por Melo (2014) e por Marcon (2016).

Fontes (2009) avaliou a influência da modificação de ligantes asfálticos por meio da incorporação de borracha moída de pneu. No trabalho de Melo (2014), foram investigados os efeitos da modificação de ligantes a partir da adição de nanomateriais (nanoargila e nanotubo de carbono). Marcon (2016), por sua vez, estudou a influência de

ligantes modificados por polímero SBS (*Styrene-Butadiene-Styrene*) e também por borracha moída de pneu.

Nos trabalhos desenvolvidos por Melo (2014) e por Marcon (2016), para a produção e avaliação do comportamento mecânico e reológico dos concretos asfálticos convencional (de referência) e modificados, foram utilizados os mesmos agregados e a mesma curva granulométrica empregados nos Segmentos Monitorados executados no Contorno de Araranguá<sup>1</sup>, BR-101 Sul, no estado de Santa Catarina.

Dado o desempenho elevado verificado por Melo (2014) e por Marcon (2016), respectivamente, para as misturas asfálticas modificadas por nanomateriais e por polímero do tipo SBS, o presente estudo trata da modificação de ligantes asfálticos por meio da incorporação simultânea de nanoargila e de SBS. A adição de um polímero elastomérico, além da adição do nanomaterial, teve como objetivo conferir recuperação elástica ao ligante nanomodificado (e consequentes melhorias no desempenho mecânico das misturas asfálticas), uma vez que não se verificou aumentos consideráveis neste parâmetro quando da adição exclusiva de nanoargila.

Neste trabalho, foram avaliadas tanto as propriedades do ligante asfáltico modificado quanto o comportamento da respectiva mistura asfáltica. A avaliação da mistura foi conduzida a partir de estudo de dosagem (metodologia Superpave), de ensaios de deformação permanente, módulo e fadiga e de simulações numéricas.

Deste modo, a partir dos resultados obtidos nesta pesquisa, bem como dos resultados verificados por Melo (2014) e por Marcon (2016), foi possível o desenvolvimento de uma análise comparativa entre o desempenho de misturas asfálticas convencionais, modificadas exclusivamente por nanoargila, exclusivamente por polímero SBS e, de modo simultâneo, por nanoargila e por SBS, tendo-se como referência as estruturas de pavimento executadas nos Segmentos Monitorados de Araranguá.

---

<sup>1</sup> Os Segmentos Monitorados do Contorno de Araranguá são parte de um Projeto de Pesquisa coordenado pela Rede Temática de Tecnologia do Asfalto, patrocinado pela Petrobras, que tem como objetivo o desenvolvimento de um novo método brasileiro para o dimensionamento de pavimentos flexíveis.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar o comportamento reológico e o desempenho mecânico de uma mistura asfáltica modificada, simultaneamente, por polímero SBS e por nanoargila organofílica.

### 1.2.2 Objetivos específicos

De modo a ser atingido o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar, em termos das propriedades empíricas, a influência da adição simultânea de um polímero SBS e de uma nanoargila em um CAP convencional;
- Mensurar o efeito da adição paralela destes modificadores na determinação do teor de ligante de projeto e na resposta da mistura asfáltica modificada frente à ação deletéria da água;
- Investigar o comportamento e prever o desempenho da mistura modificada por polímero e por nanoargila a partir de resultados de ensaios de deformação permanente, módulo e fadiga;
- Comparar os resultados obtidos na presente pesquisa com os resultados verificados nos trabalhos de Melo (2014) e de Marcon (2016) que, conforme mencionado anteriormente, também desenvolveram estudos na área de ligantes asfálticos modificados por nanomateriais e por polímeros, respectivamente;
- Avaliar a estimativa de vida útil dos Segmentos Monitorados de Araranguá, caso o revestimento viesse a ser executado com as misturas estudadas.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Devido à importância do meio rodoviário para o País, bem como às condições em que se encontram os pavimentos asfálticos brasileiros, é evidente a necessidade de que sejam estudadas e desenvolvidas soluções que agreguem desempenho aos materiais convencionais utilizados na pavimentação rodoviária.

Neste sentido, no trabalho de Melo (2014), verificou-se o desempenho elevado das misturas asfálticas modificadas por nanomateriais quando comparadas à convencional. No entanto, observou-se que a nanoargila, quando incorporada ao CAP 50-70, proporciona apenas um pequeno acréscimo à propriedade de recuperação elástica do ligante asfáltico.

Uma vez que esta propriedade consiste em uma característica favorável à redução das trilhas de roda e ao aumento da resistência ao trincamento por fadiga do revestimento asfáltico, a incorporação de um polímero elastomérico no ligante modificado por nanoargila justifica-se em virtude de que o mesmo pode conferir ganhos na elasticidade do material. Consequentemente, pode-se dar origem a um ligante de desempenho superior àquele modificado exclusivamente por nanoargila.

Neste contexto, o desenvolvimento do presente trabalho justifica-se pelo fato de investigar uma mistura asfáltica ainda pouco estudada na atualidade, porém com grande potencial para atenuar o problema relacionado à formação de trilhas de roda e ao trincamento precoce do revestimento das rodovias submetidas a altos volumes de tráfego.

## 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

De modo a expor os resultados da pesquisa de maneira ordenada, o presente trabalho de Dissertação foi estruturado em 5 capítulos, conforme segue:

### **Capítulo 1 – Introdução**

O capítulo contextualiza o problema relacionado às condições atuais dos pavimentos asfálticos no Brasil, introduzindo a necessidade da busca por alternativas que visem melhorias nesta área. É apresentada a ciência de modificação de ligantes e misturas asfálticas, cujo tema é o foco principal da presente pesquisa. Também são apresentados os objetivos geral e específicos do trabalho, seguidos da justificativa para o desenvolvimento do mesmo e da estrutura adotada para a Dissertação.

### **Capítulo 2 – Revisão de literatura**

Este capítulo apresenta uma revisão de literatura a respeito dos ligantes asfálticos modificados. Para tanto, são expostos, inicialmente, conhecimentos gerais acerca dos mesmos. Na sequência, são abordados, separadamente, os ligantes modificados por polímeros, por nanomateriais e por ambos os modificadores anteriormente mencionados. De modo a elucidar o entendimento acerca do

comportamento destes modificadores, também são apresentadas breves descrições quanto às ciências de nanomateriais e de polímeros.

### **Capítulo 3 – Materiais e método**

O capítulo expõe e detalha os materiais empregados e o método de pesquisa adotado para que fossem atingidos os objetivos definidos para o trabalho. Nesta direção, é apresentado o programa experimental estabelecido de maneira a viabilizar o estudo aqui descrito.

### **Capítulo 4 – Apresentação e discussão dos resultados**

Neste capítulo, são apresentados e analisados os resultados obtidos por meio do método de pesquisa previamente definido.

### **Capítulo 5 – Conclusões e recomendações para trabalhos futuros**

O capítulo apresenta as conclusões e considerações finais inerentes aos resultados alcançados ao longo da pesquisa. Além disso, também são apresentadas recomendações para trabalhos futuros, em conformidade com os resultados obtidos e as perspectivas vislumbradas a partir dos mesmos.

Por fim, ao término da Dissertação, encontram-se relacionadas as referências de literatura consultadas para o desenvolvimento desta pesquisa.



## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 LIGANTES ASFÁLTICOS**

#### **2.1.1 Considerações iniciais**

De acordo com o *Asphalt Institute* (2016), o asfalto é um material cimentício, de coloração escura, cujo constituinte predominante é o betume, podendo ocorrer diretamente na natureza ou ser obtido através do processo de destilação do petróleo. Em relação aos betumes, estes são definidos como uma classe de substâncias com propriedades cimentícias, compostas principalmente por hidrocarbonetos de alto peso molecular.

No Brasil, os asfaltos que apresentam qualidade e consistência para aplicação direta nas obras de pavimentação recebem a denominação de Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAPs), os quais também são conhecidos como ligantes asfálticos (BRASIL, 2006a).

Conforme o Relatório NCHRP 673 (AAT, 2011), os ligantes correspondem, em massa, a cerca de 5% das misturas asfálticas, sendo os 95% restantes constituídos por agregados minerais. Em termos volumétricos, estas proporções correspondem a aproximadamente 10% de ligantes, 85% de agregados e 5% de vazios.

Quanto ao comportamento, são materiais termossensíveis, além de serem sensíveis às variações de velocidade, tempo e intensidade de carregamento (BERNUCCI et al., 2008). Apesar da pequena proporção nas misturas asfálticas, este comportamento dos ligantes é transferido a elas, que também são sensíveis às mudanças nestas variáveis.

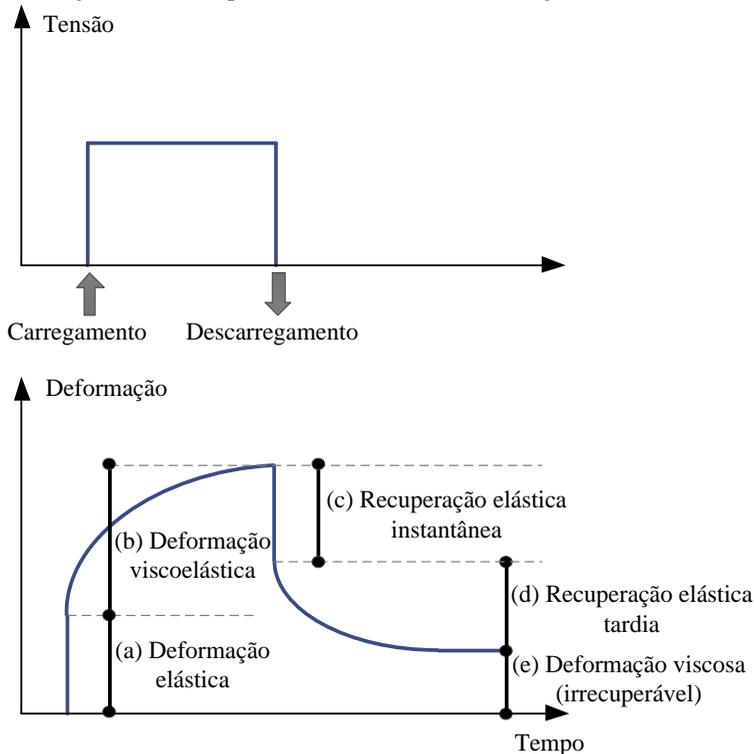
#### **2.1.2 Comportamento viscoelástico dos ligantes asfálticos**

Quando solicitado, um material pode apresentar comportamento elástico, viscoso ou viscoelástico. Os materiais elásticos são aqueles que retornam à sua conformação inicial depois de cessado o carregamento, ao contrário dos materiais viscosos, os quais mantêm a conformação gerada pela carga mesmo após a sua retirada. Entre estes extremos, encontra-se a resposta dos materiais viscoelásticos, cujo comportamento é caracterizado pelo retorno parcial das deformações quando o carregamento é cessado (ASKELAND; FULAY; WRIGHT, 2011).

Quando submetidos a baixas temperaturas ou carregamentos de curta duração, os ligantes asfálticos comportam-se predominantemente

como sólidos elásticos. Por outro lado, a altas temperaturas ou carregamentos lentos, apresentam comportamento de líquido viscoso. Em temperaturas de serviço nas rodovias, estes materiais apresentam resposta intermediária, ou seja, viscoelástica (MORGAN; MULDER, 1995). Este comportamento dos CAPs é ilustrado na Figura 2.1.

Figura 2.1 - Comportamento viscoelástico dos ligantes asfálticos.



Fonte: Adaptado de Morgan e Mulder (1995).

Conforme se pode observar na Figura 2.1, ao sofrer um carregamento, o material viscoelástico apresenta uma deformação elástica imediata (a). Mantendo-se este carregamento, o ligante continua a deformar-se, por ora, gradualmente (deformação viscoelástica (b)). Quando o carregamento é cessado, ocorre uma recuperação elástica instantânea (c), seguida pelo fenômeno de recuperação elástica tardia (d), sendo este último desenvolvido ao longo do tempo. Finalizada a

recuperação elástica tardia, mantém-se no material a deformação viscosa (irrecuperável (e)).

A incorporação de um polímero elastomérico em um ligante asfáltico faz com que haja um aumento na componente de deformação elástica quando o material é submetido a um carregamento, reduzindo-se a sua deformação viscosa. Como consequência, cessado o carregamento, tem-se uma maior componente relacionada à recuperação elástica do material, resultando na redução da deformação irrecuperável. Esta característica é altamente desejável, por exemplo, para a redução de trilhas de roda em revestimentos asfálticos.

## 2.2 LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS POR NANOMATERIAIS

### 2.2.1 Ciência dos nanomateriais

O termo “nano” tem origem grega, cujo significado literal está relacionado à palavra “anão”. Na prática, é geralmente utilizado como prefixo de unidades de medida como metros e segundos, expressando uma bilionésima parte da referida unidade. Assim, um nanômetro (nm) corresponde a  $10^{-9}$  metros (ASHBY; FERREIRA; SCHODEK, 2009). Isto equivale, fisicamente, ao alinhamento de 10 átomos de hidrogênio ou 5 átomos de silício (CAO, 2004).

Smith e Hashemi (2012) definem os nanomateriais como materiais que possuem escalas de dimensões menores do que 100 nm. Nestas dimensões são considerados, por exemplo, diâmetro de partículas ou espessura de camadas.

Os nanomateriais podem ter origem a partir de fenômenos naturais ou processos desenvolvidos pelo homem. Na natureza, são resultados, por exemplo, de erupções vulcânicas e tempestades de poeira. Além disso, dimensões nanométricas também podem ser encontradas em seres vivos, como é o caso de algumas bactérias. No que diz respeito aos nanomateriais sintetizados pelo homem, podem ser mencionados, por exemplo, os nanotubos de carbono e o negro de fumo (BUZEA; BLANDINO; ROBBIE, 2007).

Os primeiros estudos desenvolvidos no âmbito dos nanomateriais datam da década de 1960, quando partículas de tamanho menor do que 1 micrão ( $10^3$  nm) foram produzidas a partir de fornalhas de chama química. No início, estes materiais eram aplicados principalmente como catalisadores químicos e pigmentos (SMITH; HASHEMI, 2012).

No entanto, foi recentemente que os nanomateriais passaram a receber destaque especial no contexto da ciência dos materiais. Isto ocorreu devido ao desenvolvimento de ferramentas que permitem sua observação e caracterização, bem como de métodos de processamento e síntese dos mesmos (SMITH; HASHEMI, 2012).

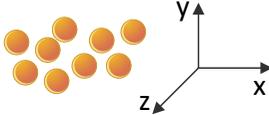
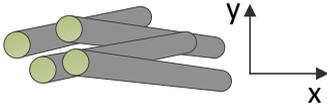
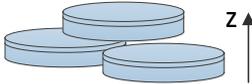
Nesta direção, pode-se dizer que se desenvolveu a nanotecnologia, a qual, segundo Cao (2004), corresponde à tecnologia de projeto, fabricação e aplicações de nanoestruturas e nanomateriais, incluindo o entendimento de suas propriedades físicas e fenômenos relacionados à escala nanométrica.

Tratando-se dos processos de síntese de nanomateriais, estes podem ser agrupados, de modo geral, em dois grandes grupos: procedimentos do tipo *bottom-up* e do tipo *top-down*. Quando sintetizado por um procedimento do tipo *bottom-up*, o nanomaterial é formado a partir da união de átomos ou moléculas, os quais reagem e se unem para formar um material de escala reduzida. No caso dos procedimentos do tipo *top-down*, ocorre o contrário, isto é, materiais de escalas maiores são moídos para dar origem aos nanomateriais (TANTRA et al., 2016).

Apesar de apresentarem composições e estruturas análogas àquelas dos materiais de dimensões correntes, os nanomateriais apresentam volume bastante reduzido e área de superfície muito maior, o que propicia a estes materiais um comportamento diferenciado quando comparados aos demais (OZIN; ARSENAULT; CADEMARTIRI, 2009).

Quanto ao número de dimensões em escala nanométrica, um nanomaterial pode ser classificado em tridimensional, bidimensional e unidimensional (RUIZ-HITZKY; VAN MEERBEEK, 2006). Representações esquemáticas destes materiais com seus respectivos exemplos são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Classificação dos nanomateriais de acordo com o número de dimensões nanométricas.

Classificação e dimensões	Representação esquemática	Exemplos
<i>Tridimensional</i> $1 \leq x, y, z \leq 100 \text{ nm}$		Negro de fumo, nanopartículas de sílica
<i>Bidimensional</i> $1 \leq x, y \leq 100 \text{ nm}$ $z > 100 \text{ nm}$		Nanotubos de carbono, nanofios metálicos, nanofibras minerais
<i>Unidimensional</i> $1 \leq z \leq 100 \text{ nm}$ $x, y > 100 \text{ nm}$		Esmectitas e caulinitas

Fonte: Adaptado de Ruiz-Hitzky e Van Meerbeek (2006).

## 2.2.2 Argilas, argilominerais e nanoargilas

De modo geral, uma argila pode ser definida como um material de origem natural, aspecto terroso e granulação fina, que desenvolve propriedade de plasticidade ao ser misturado com água (GRIM, 1953; REEVES; SIMS; CRIPPS, 2006). Normalmente, a plasticidade é entendida como a capacidade de moldagem de um solo, na presença de determinadas condições de umidade, sem que o mesmo apresente variações de volume (CAPUTO, 1988).

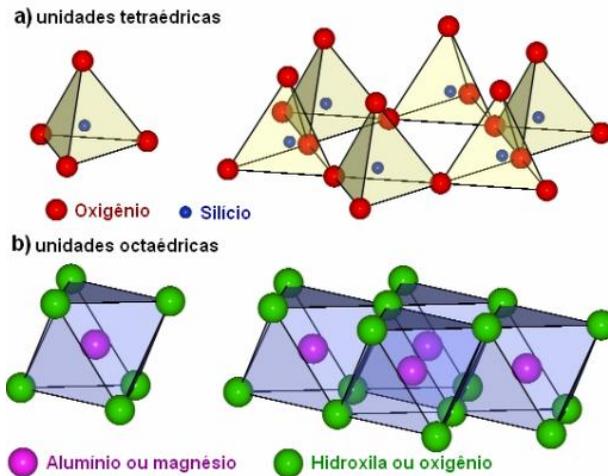
Em termos de frações granulométricas, a ABNT NBR 6502 classifica as argilas como solos constituídos por partículas de dimensões menores do que 0,002 mm.

Do ponto de vista químico, são constituídas basicamente a partir de um ou mais argilominerais. Segundo Grim (1953), este grupo de minerais consiste, essencialmente, em estruturas formadas por silicatos de alumínio hidratados, nos quais o alumínio pode ser substituído por magnésio ou ferro. Além dos argilominerais, que dão origem a partículas cristalinas extremamente pequenas, as argilas podem apresentar em sua composição outros minerais, matéria orgânica e sais solúveis em água (GRIM, 1953).

Na prática, o termo nanoargila é utilizado para designar argilominerais do grupo dos filossilicatos (silicatos em folhas), possuindo espessuras de camadas de aproximadamente 1 nm e demais dimensões da ordem de 50-150 nm. Apresentam área superficial específica próxima a 750 m<sup>2</sup>/g (KAMENA, 2010). A título comparativo, a área superficial específica da areia limpa é de aproximadamente 0,0002 m<sup>2</sup>/g (ATKINSON, 2007), ao passo que o cimento Portland apresenta superfície específica entre 0,30-0,35 m<sup>2</sup>/g (TAYLOR, 1997).

Para a obtenção de nanocompósitos, Carastan (2007) destaca a utilização de argilominerais do grupo dos filossilicatos, mais especificamente do tipo 2:1. Isto significa dizer que a estrutura destes materiais é composta a partir de camadas formadas por duas folhas de tetraedros de sílica que se posicionam sob e sobre uma folha central de octaedros de hidróxido de alumínio. As unidades estruturais dos tetraedros e octaedros são apresentadas na Figura 2.2 e a estrutura em camadas formada a partir das mesmas encontra-se ilustrada na Figura 2.3.

Figura 2.2 - Unidades estruturais dos filossilicatos.

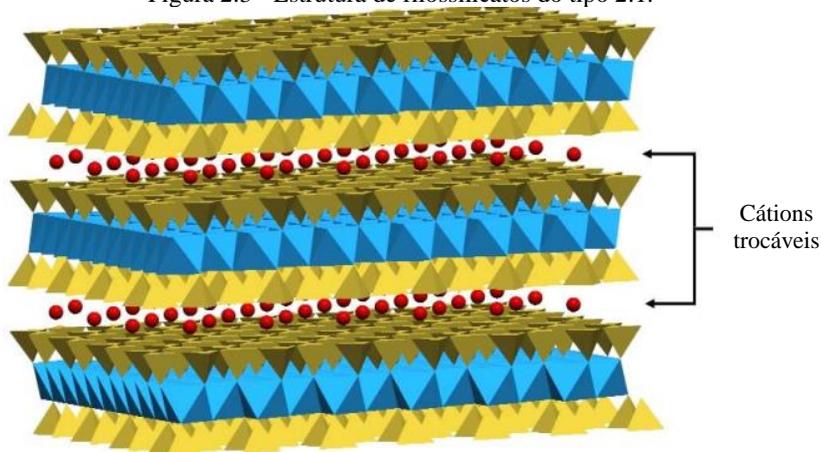


Fonte: Carastan (2007).

Na Figura 2.3, destaca-se a presença de cátions trocáveis nas superfícies das camadas. Isto ocorre quando alguns dos átomos de alumínio ou de silício são substituídos, na estrutura, por átomos de impurezas, cuja carga elétrica apresenta-se como negativa. Como

resultado, há um desbalanceamento elétrico na superfície, o qual é contrabalanceado pela presença de cátions inorgânicos. Se hidratados, tais cátions podem ser trocados por sais orgânicos, o que torna o material organofílico, isto é, compatível com substâncias orgânicas (CARASTAN, 2007).

Figura 2.3 - Estrutura de filossilicatos do tipo 2:1.



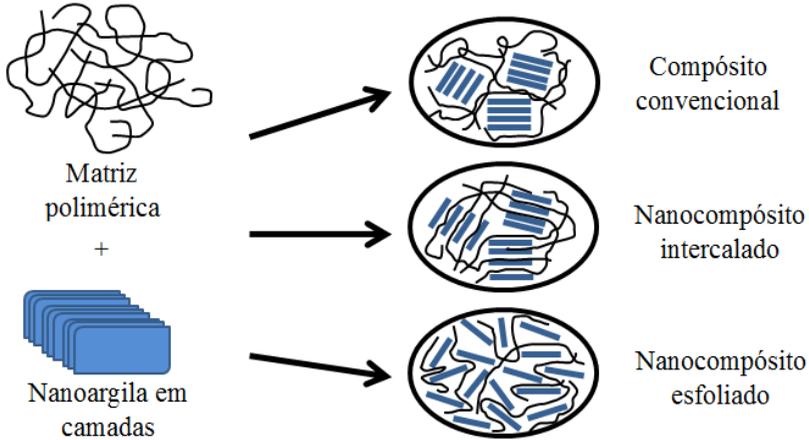
Fonte: Carastan (2007).

Quando associadas a matrizes poliméricas, as argilas organofílicas podem dar origem a três estruturas distintas, que diferem entre si em função do grau de dispersão atingido pelas camadas do nanomaterial. Estas estruturas são descritas na sequência e ilustradas na Figura 2.4 (ALEXANDRE; DUBOIS, 2000):

- Convencionais: também são conhecidas como imiscíveis. Neste caso, as camadas formadas a partir das folhas de tetraedros e octaedros mantêm-se aglomeradas, não havendo penetração da matriz polimérica no espaço entre camadas;
- Intercaladas: ocorrem quando uma ou algumas cadeias poliméricas posicionam-se entre as camadas da argila, resultando em uma morfologia bem ordenada a partir de camadas consecutivas de nanoargila e de material polimérico. Pode-se afirmar que, nestas estruturas, o espaço entre as camadas é relativamente aumentado, mas não ocorre a completa dispersão das mesmas;

- Esfoliadas: caracterizam-se pela dispersão completa e uniforme das camadas de argila na matriz polimérica.

Figura 2.4 - Ilustração das diferentes estruturas formadas a partir da dispersão de argilas organofílicas em matrizes poliméricas.



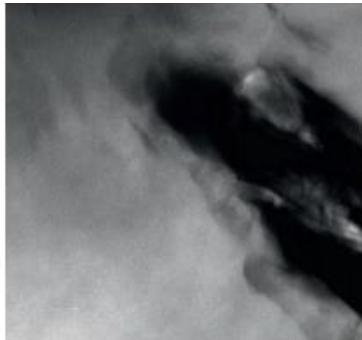
Fonte: Adaptado de Golestani, Nejad e Galooyak (2012).

Conforme Paul e Robeson (2008), para a produção da maioria dos nanocompósitos, o ideal é que sejam obtidas estruturas do tipo esfoliadas. Quando este objetivo é atingido, entende-se que o nanomaterial é completamente compatibilizado com a matriz polimérica.

Na Figura 2.5 são apresentados resultados de microscopia eletrônica de transmissão e de difratometria de raios X (DRX) para as três estruturas apresentadas. Em relação aos resultados de DRX, se comparados àqueles obtidos para a nanoargila pura, observa-se que a produção de estruturas intercaladas proporciona um deslocamento do pico de difração para menores valores de ângulos, enquanto a produção de estruturas esfoliadas faz com que o pico de difração desapareça do gráfico.

Figura 2.5 - Exemplo das diferentes estruturas formadas a partir da dispersão de argilas organofílicas em matrizes poliméricas: (a) resultados de microscopia eletrônica de transmissão e (b) resultados de difratometria de raios X.

(a) Estrutura convencional ou imiscível



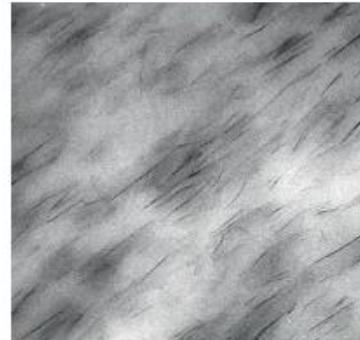
200 nm

Estrutura intercalada



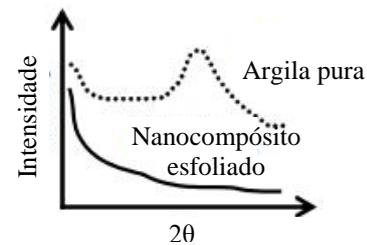
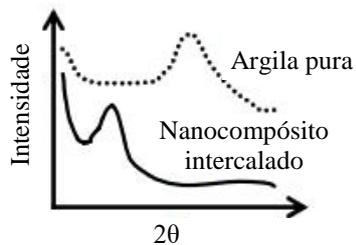
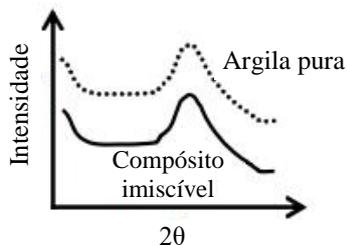
200 nm

Estrutura esfoliada



100 nm

(b)



Fonte: Adaptado de Paul e Robeson (2008).

### 2.2.3 Modificação de ligantes por nanomateriais

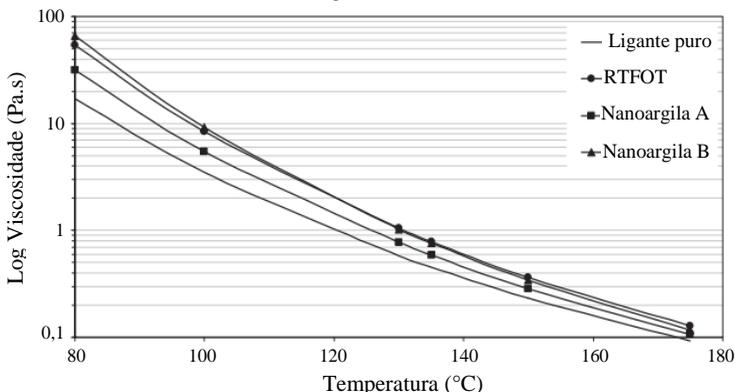
Apesar da nanotecnologia consistir em uma ciência recente, estudos desenvolvidos com os mais diversos materiais têm demonstrado o grande potencial da aplicação desta ciência nas diferentes áreas do conhecimento humano e campos das formações. No âmbito da engenharia rodoviária, pesquisas desenvolvidas recentemente também demonstraram os efeitos benéficos oriundos da utilização de nanomateriais como agentes modificadores de ligantes asfálticos.

Considerando-se este contexto, são relatados, na sequência, estudos recentemente desenvolvidos na área da modificação de materiais asfálticos com nanomateriais, evidenciando-se o estado da arte sobre o tema.

You et al. (2011) estudaram a influência da modificação de um ligante PG 64-28 com dois tipos diferentes de nanoargila, variando-se o teor de incorporação em 2% e 4%. No estudo, os ligantes foram modificados em um misturador de alto cisalhamento, atingindo-se a esfoliação das nanoargilas na matriz asfáltica.

Para avaliar a viscosidade dos ligantes asfálticos puro e modificados por 2% de nanoargila, You et al. (2011) conduziram ensaios no viscosímetro rotacional Brookfield, em temperaturas de 80 °C, 100 °C, 130 °C, 135 °C, 150 °C e 175 °C. Os resultados destes ensaios são apresentados na Figura 2.6.

Figura 2.6 - Influência da incorporação de nanoargilas na viscosidade dos ligantes asfálticos.

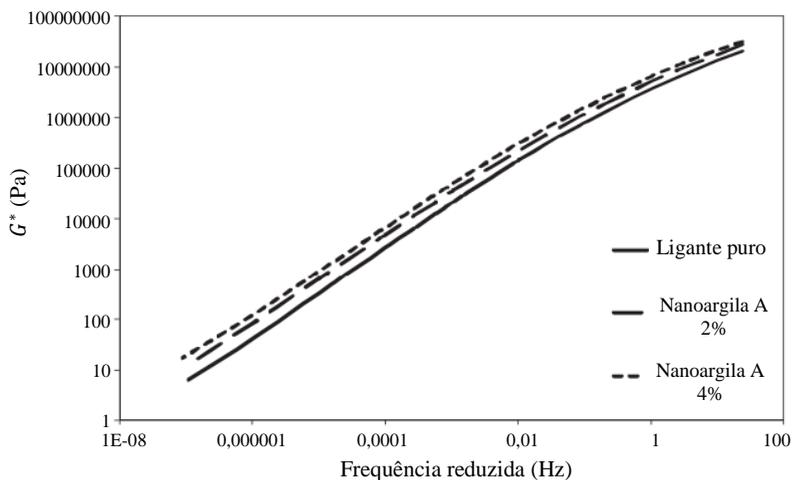


Fonte: Adaptado de You et al. (2011).

Conforme se pode observar, a incorporação das nanoargilas no ligante asfáltico puro resultou em acréscimos na viscosidade do material. De modo geral, os resultados de viscosidade obtidos para a Nanoargila B aproximam-se dos resultados verificados para o ligante asfáltico puro após o envelhecimento em curto prazo no RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*).

Ainda em relação às propriedades reológicas, os autores realizaram ensaios no reômetro de cisalhamento dinâmico, com frequências de carregamento entre 0,01 Hz e 25 Hz, e temperaturas variando entre 13 °C e 70 °C. Os resultados obtidos para o parâmetro  $G^*$  (módulo de cisalhamento dinâmico) são apresentados na Figura 2.7.

Figura 2.7 - Influência da incorporação de nanoargilas na rigidez ( $G^*$ ) dos ligantes asfálticos.



Fonte: Adaptado de You et al. (2011).

Observaram, deste modo, que a adição de nanoargila aos ligantes puros também proporciona um aumento no módulo de cisalhamento dinâmico dos materiais, o que indica uma maior rigidez dos ligantes modificados. Estes resultados, no entanto, são menos expressivos quando consideradas altas frequências de carregamento.

Melo (2014) estudou ligantes e misturas asfálticas modificados por nanoargila e por nanotubo de carbono. Em seu estudo, foi utilizado um ligante de referência (CAP 50-70, PG 58-22), que foi modificado pelos nanomateriais com teores de 1%, 2% e 3% (em peso).

O procedimento de modificação foi realizado em um misturador de alto cisalhamento, com velocidade de 5.000 rpm e temperatura de 150 °C, durante um período de compatibilização de 100 minutos. No caso da nanoargila, estas condições permitiram a obtenção de nanocompósitos esfoliados.

De acordo com os resultados obtidos por Melo (2014), a incorporação de nanomateriais à matriz asfáltica ocasionou a diminuição da penetração e o aumento do ponto de amolecimento dos ligantes, dando origem a materiais menos suscetíveis às variações de temperatura. Além disso, conforme ensaios realizados com o viscosímetro rotacional Brookfield (em temperaturas de 135 °C, 150 °C e 175 °C), todos os ligantes modificados apresentaram maior viscosidade se comparados ao ligante de referência.

Em ensaios de reometria, Melo (2014) avaliou o módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ) do ligante de referência e dos ligantes nanomodificados. De posse destes resultados, foram avaliados os parâmetros de desempenho  $G^*/sen\delta$  e  $G^*sen\delta$ , de acordo com a metodologia Superpave. Cabe destacar, no entanto, que estudos posteriores a esta especificação, inclusive o estudo realizado pelo próprio autor, demonstraram limitações destes parâmetros para ligantes modificados.

Independentemente, conforme os resultados verificados por Melo (2014), todos os ligantes asfálticos estudados apresentaram aumento no parâmetro  $G^*/sen\delta$  quando comparados ao ligante convencional, o que corresponde, segundo a metodologia Superpave, a um indicativo de redução da deformação permanente das misturas asfálticas produzidas a partir destes nanocompósitos. Quanto ao parâmetro  $G^*sen\delta$ , o autor verificou que os ligantes modificados por nanoargila apresentaram comportamento semelhante ao do ligante convencional. Em contrapartida, a incorporação de nanotubo de carbono à matriz asfáltica também proporcionou aumentos no parâmetro  $G^*sen\delta$ , o que é considerado pela metodologia Superpave como um indicativo de pior desempenho à fadiga das respectivas misturas asfálticas.

Além dos estudos desenvolvidos no âmbito dos ligantes modificados pelos nanomateriais, Melo (2014) também avaliou o comportamento mecânico e reológico das misturas asfálticas produzidas com os nanocompósitos. Foram realizados ensaios de deformação permanente, no simulador de tráfego *Orniéreur*, e ensaios de fadiga e de módulo complexo no aparato de flexão alternada a quatro pontos.

Como resultados, foi demonstrado pelo autor o melhor desempenho das misturas asfálticas modificadas pelos nanomateriais, tanto em termos de deformação permanente quanto em termos de resistência à fadiga, se comparadas à mistura de referência. Os resultados de deformação permanente e as curvas de fadiga relativos à mistura convencional e às misturas modificadas nanoargila são apresentados, respectivamente, nas Figuras 2.8 e 2.9.

Figura 2.8 - Desempenho à deformação permanente das misturas asfálticas modificadas com nanoargila e de referência.

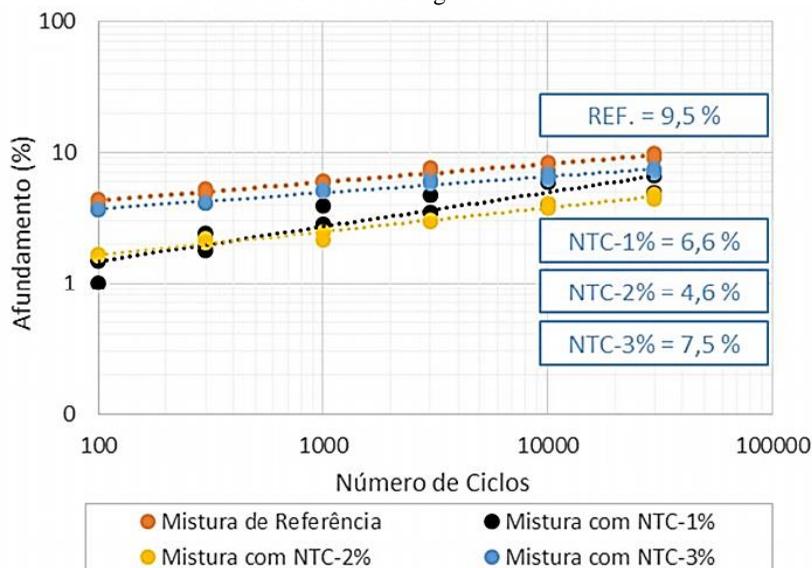
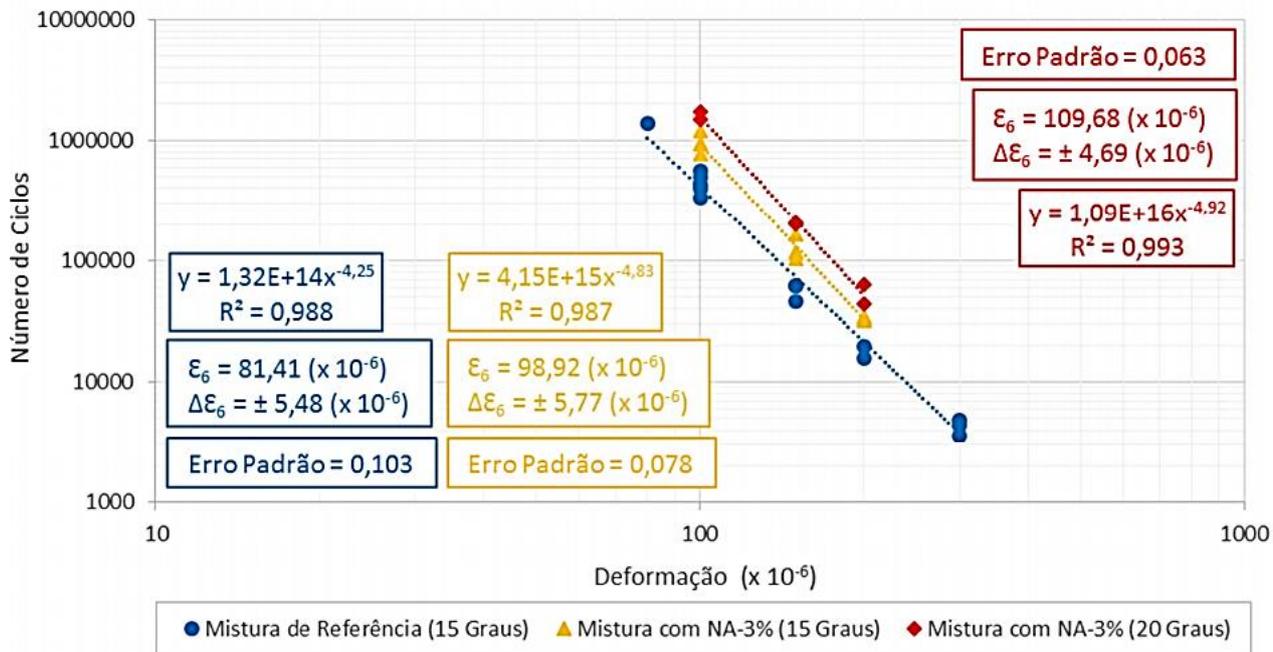


Figura 2.9 - Curvas de fadiga das misturas asfálticas modificada (com 3% de nanoargila) e de referência.



Fonte: Melo (2014).

No que diz respeito à deformação permanente, Melo (2014) verificou que os teores ideais de modificadores correspondem a 3% de nanoargila e 2% de nanotubo de carbono, que proporcionam, respectivamente, reduções de 29,5% e 51,6% nos resultados de deformação permanente em relação à mistura de referência.

Por fim, a partir dos resultados de módulo complexo, o autor conduziu simulações numéricas com o *software* ViscoRoute 2.0. Os resultados destas simulações, aplicados às curvas de fadiga, indicaram ganhos de desempenho, em relação ao revestimento convencional, de 4,6 vezes para o revestimento modificado com 3% de nanoargila e de 6,0 vezes para o revestimento modificado com 2% de nanotubo de carbono.

Jahromi, Andalibizade e Vossough (2010) também avaliaram a modificação de ligantes asfálticos com nanoargila. No trabalho, foram utilizadas as nanoargilas comerciais Nanofil-15 e Cloisite-15A, as quais foram incorporadas nas matrizes asfálticas em teores de 2%, 4% e 7%, em peso de ligante. O ligante escolhido para modificação na referida pesquisa caracteriza-se por apresentar grau de penetração 60-70.

De modo geral, Jahromi, Andalibizade e Vossough (2010) verificaram uma maior influência da incorporação da nanoargila do tipo Cloisite-15A nas propriedades empíricas do ligante modificado. Neste sentido, o ligante modificado pela nanoargila apresentou redução considerável da penetração e acréscimo do ponto de amolecimento.

Além de avaliar as propriedades dos ligantes modificados, os autores também realizaram, entre outros, ensaios de resistência à fadiga por compressão diametral das misturas modificadas com 7% das nanoargilas. Estes ensaios foram conduzidos em temperaturas de 5 °C e de 25 °C.

Como resultado, foi verificado que, na temperatura de 5 °C, as misturas asfálticas modificadas apresentaram desempenho reduzido quando comparadas à mistura convencional. No entanto, na temperatura de 25 °C, observou-se um melhor desempenho das misturas modificadas com nanoargila.

## 2.3 LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS POR POLÍMEROS

### 2.3.1 Ciência dos polímeros

A palavra polímero origina-se da combinação dos termos gregos “poli”, que significa “muitos”, e “mero”, cujo significado é de “unidade de repetição”. Assim, a molécula de um polímero pode ser definida como uma macromolécula composta por muitas unidades de repetição (os meros), as quais se encontram unidas entre si por meio de ligações covalentes (CANEVAROLO JUNIOR, 2006).

Estes materiais são encontrados de forma natural ou obtidos a partir de processos industriais (MISRA, 1993). Polímeros naturais (como o DNA, o RNA, proteínas e polissacarídeos) existem desde o início da existência dos seres vivos, enquanto a indústria de polimerização, que produz polímeros sintéticos (como o polietileno e o polipropileno), passou a ser desenvolvida somente a partir do século XIX (YOUNG; LOVELL, 2011).

A matéria prima dos processos de polimerização são os monômeros. As principais fontes para obtenção destas entidades químicas são produtos como a celulose, a borracha natural, a hulha ou carvão mineral e o petróleo. Os monômeros consistem em pequenas moléculas que, devido às reações químicas de polimerização, unem-se por meio de ligações covalentes, dando origem às macromoléculas poliméricas (CANEVAROLO JUNIOR, 2006).

As macromoléculas formadas pelos meros podem apresentar estrutura linear, ramificada, com ligações cruzadas ou em rede. Nas estruturas lineares, os meros unem-se entre si por duas extremidades e dão origem a longas cadeias principais isoladas. No caso das estruturas ramificadas, são observados prolongamentos laterais partindo destas cadeias, enquanto que, nas estruturas com ligações cruzadas, observam-se ligações em várias posições entre cadeias adjacentes e cadeias principais, unindo-as por meio de forças covalentes. Por fim, as estruturas em rede são aquelas caracterizadas por formar redes tridimensionais (CALLISTER JUNIOR, 2008).

Quanto à diversidade das unidades de repetição presentes nas cadeias poliméricas, um polímero pode ser classificado como homopolímero ou como copolímero. Os homopolímeros são aqueles formados pela repetição de apenas um mero enquanto os copolímeros

possuem cadeias constituídas a partir de duas ou mais unidades de repetição diferentes (SMITH; HASHEMI, 2012).

De acordo com o arranjo molecular ao longo das cadeias poliméricas, os copolímeros ainda podem ser classificados como aleatórios, alternados, em blocos ou enxertados. Conforme a própria nomenclatura sugere, os copolímeros aleatórios são polímeros nos quais os diferentes meros apresentam-se ordenados aleatoriamente na cadeia polimérica. De modo análogo, nos copolímeros alternados, as diferentes unidades de repetição se posicionam alternadamente na estrutura. Os copolímeros em bloco, por sua vez, caracterizam-se por apresentar aglomerados de meros idênticos ao longo da cadeia polimérica. Por fim, os enxertados são os polímeros formados a partir do enxerto de ramificações de um homopolímero em outro (CALLISTER JUNIOR, 2008).

Em relação ao seu comportamento térmico e mecânico, os materiais poliméricos ainda podem ser classificados em três grandes grupos principais: termoplásticos, termorrígidos e elastômeros (ASKELAND; FULAY; WRIGHT, 2011).

Os termoplásticos são polímeros compostos a partir de longas cadeias de estruturas lineares flexíveis, podendo apresentar também ramificações. Geralmente se comportam como plásticos dúcteis e, quando aquecidos, amolecem e fluem. Deste modo, podem ser moldados e são facilmente reciclados (ASKELAND; FULAY; WRIGHT, 2011).

Os termorrígidos, por outro lado, constituem-se de estruturas rígidas formadas a partir de redes tridimensionais fortemente unidas. São mais quebradiços do que os termoplásticos e, ao serem aquecidos, não amolecem, mas iniciam seu processo de decomposição, o que dificulta a condução de processos de reciclagem com estes materiais (ASKELAND; FULAY; WRIGHT, 2011).

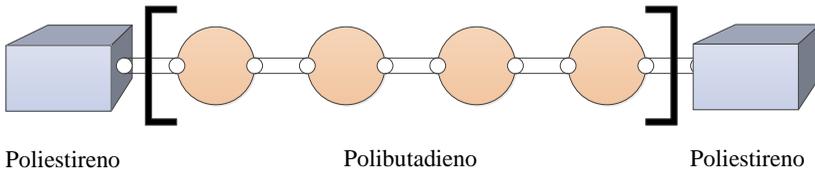
Por sua vez, os elastômeros caracterizam-se por apresentarem comportamento elástico, suportando deformações maiores que 200%. Podem ser termoplásticos ou termorrígidos com cadeias cruzadas (ASKELAND; FULAY; WRIGHT, 2011).

Askeland, Fulay e Wright (2011) ainda mencionam a existência de um quarto grupo importante e com características intermediárias, o grupo dos elastômeros termoplásticos. Estes materiais têm facilidade de transformação dos termoplásticos e o comportamento elástico dos elastômeros.

### 2.3.2 O polímero SBS

O polímero SBS (estireno-butadieno-estireno, do inglês *styrene-butadiene-styrene*) é um copolímero de arranjo molecular do tipo bloco, com estrutura linear, formado a partir de uma longa cadeia central de polibutadieno, que é ligada nas duas extremidades a cadeias curtas de poliestireno (GOOCH, 2007). A Figura 2.10 ilustra a estrutura deste polímero.

Figura 2.10 - Representação esquemática do polímero SBS.



Fonte: Adaptado de Robinson (2004).

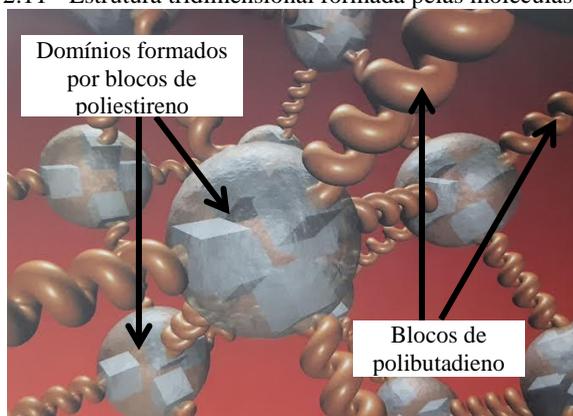
Além da estrutura linear com arranjo tribloco, as combinações entre poliestireno e polibutadieno também podem originar polímeros lineares diblocos (SB, do inglês *styrene-butadiene*) e, alternativamente, polímeros com arranjo radial  $(SB)_n$  (ALGER, 1990).

Nestas estruturas moleculares, os blocos de poliestireno constituem uma fase rígida, enquanto que os blocos de polibutadieno possuem propriedades elásticas (DEMARQUETTE; CARASTAN; VALERA, 2008).

Em termos de comportamento térmico e mecânico, o SBS classifica-se como um elastômero termoplástico (CHANDA; ROY, 2008). Tal comportamento se deve, de modo específico, à teoria dos domínios (WHELAN, 1994).

Neste sentido, apesar de estarem quimicamente ligados, os blocos de poliestireno e de polibutadieno são incompatíveis. Por este motivo, abaixo da temperatura de transição vítrea do poliestireno, os blocos formados por esta parte do polímero se aglomeram, constituindo domínios de poliestireno concentrados entre os blocos de polibutadieno. Isto dá origem a redes poliméricas tridimensionais à temperatura ambiente, nas quais os domínios de poliestireno atuam como pontos de reforço da fase elástica (polibutadieno) (WHELAN, 1994). Esta estrutura pode ser observada na Figura 2.11.

Figura 2.11 - Estrutura tridimensional formada pelas moléculas de SBS.



Fonte: Adaptado de Read e Whiteoak (2003).

Quando o material é aquecido acima da temperatura de transição vítrea do poliestireno, os domínios formados por estes blocos desaparecem e o SBS comporta-se, então, como um copolímero termoplástico, permitindo sua conformação (WHELAN, 1994).

### 2.3.3 Modificação de ligantes por polímeros

Conforme Bernucci et al. (2008), na Europa, as primeiras misturas asfálticas modificadas com polímeros foram empregadas na década de 1970. Zhu, Birgisson e Kringos (2014) destacam que, desde aquela época, estudos na área de ligantes modificados por polímeros têm sido intensamente desenvolvidos.

Na atualidade, este tema ainda constitui-se como um assunto de elevado interesse no âmbito das pesquisas acadêmicas envolvendo materiais para a pavimentação rodoviária, em virtude das melhorias conferidas pelos polímeros aos materiais asfálticos.

A aplicação de ligantes modificados com polímeros propicia melhor desempenho das misturas asfálticas em relação à deformação permanente, ao trincamento por fadiga, ao trincamento térmico e ao envelhecimento (BROWN; ROWLETT; BOUCHER, 1990 apud READ; WHITEOAK, 2003). Outra propriedade melhorada com a modificação por polímeros é a adesividade entre ligante e agregados (ROBINSON, 2004).

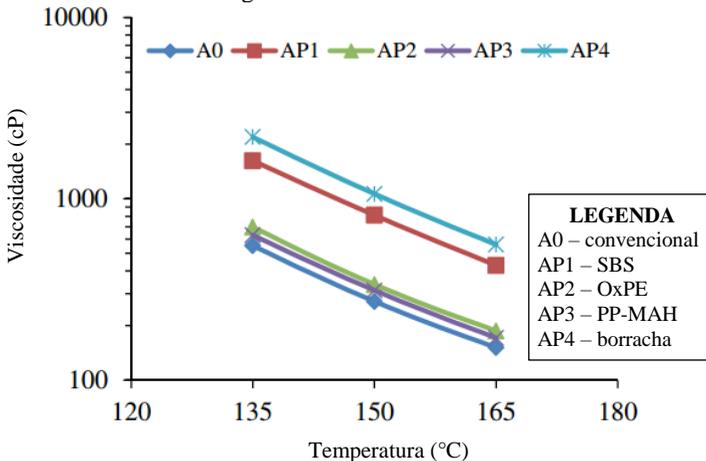
Em termos de propriedades reológicas, Xiao et al. (2014) estudaram ligantes asfálticos convencionais (PG 64-22) e modificados

por diferentes tipos de polímeros, além de borracha moída, os quais foram aplicados como modificadores de maneira isolada e também combinados com ácido polifosfórico (PPA, do inglês *PolyPhosphoric Acid*).

Na pesquisa, os ligantes convencionais foram modificados com polímeros do tipo SBS, OxPE (*Oxidized Polyethylene*) e PP-MAH (*Polypropylene-maleic anhydride*), ambos com um teor de modificação de 3% em peso quando aplicados de maneira isolada. A modificação por borracha foi realizada no teor de 10%. Quando utilizados em conjunto com o ácido polifosfórico, os polímeros foram aplicados no teor de 2% em peso, sendo o PPA utilizado no teor de 0,5% em peso.

A partir de ensaios de viscosidade aparente, realizados no viscosímetro rotacional Brookfield (em temperaturas de 135 °C, 150 °C e 165 °C), os autores demonstraram um aumento na viscosidade dos ligantes modificados com polímeros quando comparados aos convencionais, sendo este aumento mais expressivo para ligantes com polímero do tipo SBS. Estes últimos, por outro lado, apresentam viscosidades menores apenas se comparados com aqueles modificados por borracha moída. A Figura 2.12 ilustra estes resultados.

Figura 2.12 - Influência da incorporação de polímeros na viscosidade dos ligantes asfálticos.



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

Além de ensaios de viscosidade, também foram realizados ensaios com o reômetro de cisalhamento dinâmico (temperaturas de 64

°C, 70 °C, 76 °C e 82 °C, e frequência de 10 rad/s ou 1,59 Hz). Nesta direção, Xiao et al. (2014) avaliaram, entre outros, o ângulo de fase ( $\delta$ ) e o parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$  dos ligantes, que foram utilizados na previsão do comportamento das misturas asfálticas quanto à deformação permanente (apesar de outros trabalhos já terem demonstrado as limitações deste parâmetro na previsão, conforme mencionado anteriormente).

Os resultados obtidos pelos autores demonstraram menores ângulos de fase para os ligantes modificados (e correspondente aumento na resposta elástica destes materiais), bem como aumentos consideráveis em seu parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$ , o que indicaria, de acordo com as especificações da metodologia Superpave, redução no fenômeno de deformação permanente. Estes resultados são ilustrados na Figura 2.13a e 2.13b.

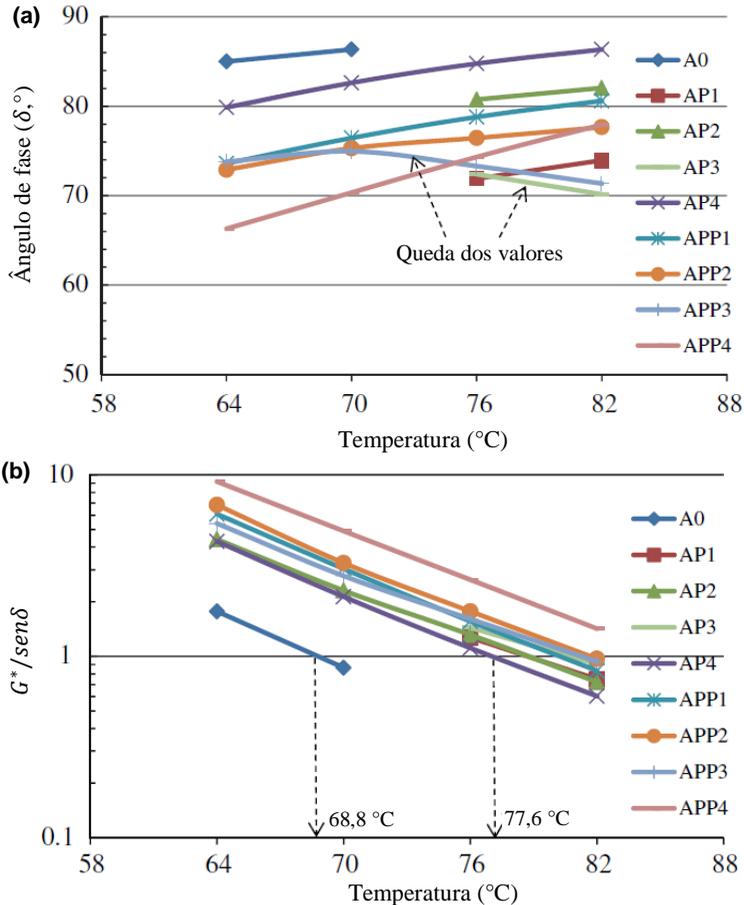
Segundo Read e Whiteoak (2003), a redução da deformação permanente das misturas asfálticas a partir da modificação de ligantes pode ocorrer com base em dois mecanismos distintos:

- (1) Aumento da rigidez do ligante, o que implica na redução da resposta viscoelástica total da mistura asfáltica ao sofrer carregamentos e, conseqüentemente, na redução da componente de deformação viscosa; e/ou
- (2) Aumento da componente elástica da deformação sofrida pelo material, o que também implica na redução da componente de deformação viscosa.

Robinson (2004) destaca que a redução da deformação permanente por meio do aumento da rigidez do ligante é proporcionada quando são utilizados polímeros modificadores de comportamento plastomérico (por exemplo, o polímero EVA, do inglês *Ethylene-Vinil Acetate*). Por outro lado, polímeros de comportamento elastomérico (como o SBS) trabalham a partir do princípio de aumento da resposta elástica dos materiais e conseqüente redução da resposta viscosa.

Marcon (2016) desenvolveu um estudo no qual foram avaliadas misturas asfálticas modificadas por polímero SBS e por borracha moída de pneu, ambas produzidas a partir de ligantes comerciais (respectivamente, Flexpave 60/85 e Ecoflex B, fornecidos pela Greca Asfaltos S. A.).

Figura 2.13 - Influência da incorporação de polímeros: (a) no ângulo de fase ( $\delta$ ) e (b) no parâmetro  $G^*/sen\delta$  dos ligantes asfálticos.



**LEGENDA**

A0 – convencional	APP1 – SBS + PPA
AP1 – SBS	APP2 – OxPE + PPA
AP2 – OxPE	APP3 – PP-MAH + PPA
AP3 – PP-MAH	APP4 – borracha + PPA
AP4 – borracha	

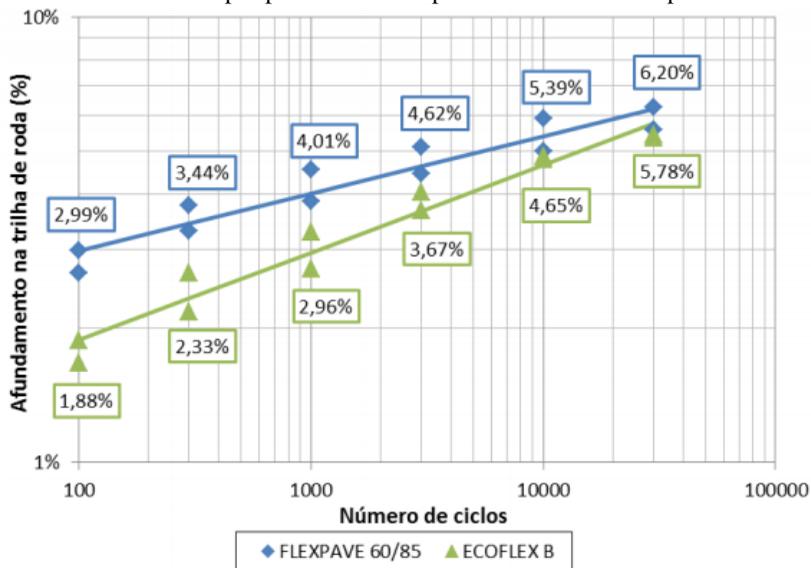
Fonte: Adaptado de Xiao et al. (2014).

Na referida pesquisa, foram avaliadas as propriedades mecânicas e reológicas das misturas asfálticas por meio de ensaios de deformação permanente, de fadiga e de módulo complexo. O autor realizou os

ensaios de deformação permanente no simulador de tráfego *Orniéreur*, sendo os ensaios de fadiga e de módulo complexo conduzidos no aparato de flexão alternada a quatro pontos.

A partir dos resultados obtidos, Marcon (2016) verificou um melhor desempenho à deformação permanente das misturas asfálticas modificadas com polímero SBS e com borracha moída de pneu se comparadas à mistura convencional (estudada por Melo (2014)), sendo este resultado mais expressivo para as misturas modificadas com borracha. Os resultados verificados pelo autor para as misturas modificadas são apresentados na Figura 2.14. A mistura convencional estudada por Melo (2014) apresentou afundamento na trilha de roda igual a 9,5% após 30.000 ciclos de carregamento.

Figura 2.14 - Desempenho à deformação permanente das misturas asfálticas modificadas por polímero SBS e por borracha moída de pneu.



Fonte: Marcon (2016).

Além de apresentarem melhor desempenho à deformação permanente, Marcon (2016) também verificou a maior resistência à fadiga das misturas modificadas. Por meio das simulações numéricas realizadas com o *software* ViscoRoute 2.0, estimou que a utilização de misturas modificadas por SBS no lugar de misturas convencionais proporcionaria um aumento de cerca de 50 vezes na vida útil à fadiga do

revestimento. As curvas de fadiga obtidas por Marcon (2016) são mostradas na Figura 2.15, em comparação com a curva de fadiga da mistura convencional obtida por Melo (2014).

Ainda em relação ao desempenho à fadiga das misturas modificadas por polímeros, Modarres (2013) realizou um estudo no qual foram avaliadas misturas asfálticas convencionais e modificadas por SBS. Para tanto, o autor conduziu ensaios de tração indireta a temperaturas de -10 °C, 20 °C e 50 °C e sob 6 níveis de tensão distintos.

Os ligantes convencionais (60/70 e 85/100, com respectivos PG 64-28 e PG 58-28) foram modificados com um teor de 5% de SBS em peso, utilizando-se um misturador de alto cisalhamento. As misturas asfálticas foram dosadas em conformidade com a metodologia Marshall.

Como resultado, o autor verificou que, para todas as temperaturas ensaiadas, as misturas modificadas com polímero SBS mostraram melhor comportamento à fadiga, especialmente a médios e altos níveis de deformação inicial.

O melhor desempenho das misturas modificadas por polímeros pode ser justificado devido ao fenômeno de inchamento do polímero em parte dos maltenos do ligante, o que aumenta a elasticidade e a resistência ao estiramento do CAP, exercendo influência também em outras características deste material. Devido ao inchamento, o ligante modificado passa a ser composto por duas fases, em escala micro: uma fase rica em polímero (composta pelo polímero e pela parte dos maltenos por ele adsorvida) e uma fase rica em asfaltenos (constituída pelos componentes do ligante que não são adsorvidos pelo polímero) (LEITE, 1999).

Sengoz e Isikyakar (2007) estudaram a dispersão destas fases em uma matriz asfáltica modificada por SBS, a partir de análises de microscopia de fluorescência. Este tipo de microscopia é indicado para avaliar o aspecto morfológico dos ligantes modificados por polímeros e baseia-se no princípio de que o polímero inchado fluoresce quando exposto à luz ultravioleta. Por este motivo, nas imagens obtidas, a fase rica em polímero apresenta coloração clara ou amarelada/esverdeada, ao passo que a fase rica em asfaltenos apresenta coloração escura ou negra (AIREY, 2002).

No estudo de Sengoz e Isikyakar (2007), foi avaliado um ligante de penetração 50/70, modificado em um misturador de alto cisalhamento, com teores de SBS (Kraton D1101) entre 2% e 6%. Os resultados de microscopia de fluorescência obtidos pelos autores encontram-se ilustrados na Figura 2.16.

Figura 2.15 - Curvas de fadiga das misturas asfálticas modificadas (com polímero SBS e com borracha moída de pneu) (MARCON, 2016) e de referência (MELO, 2014).

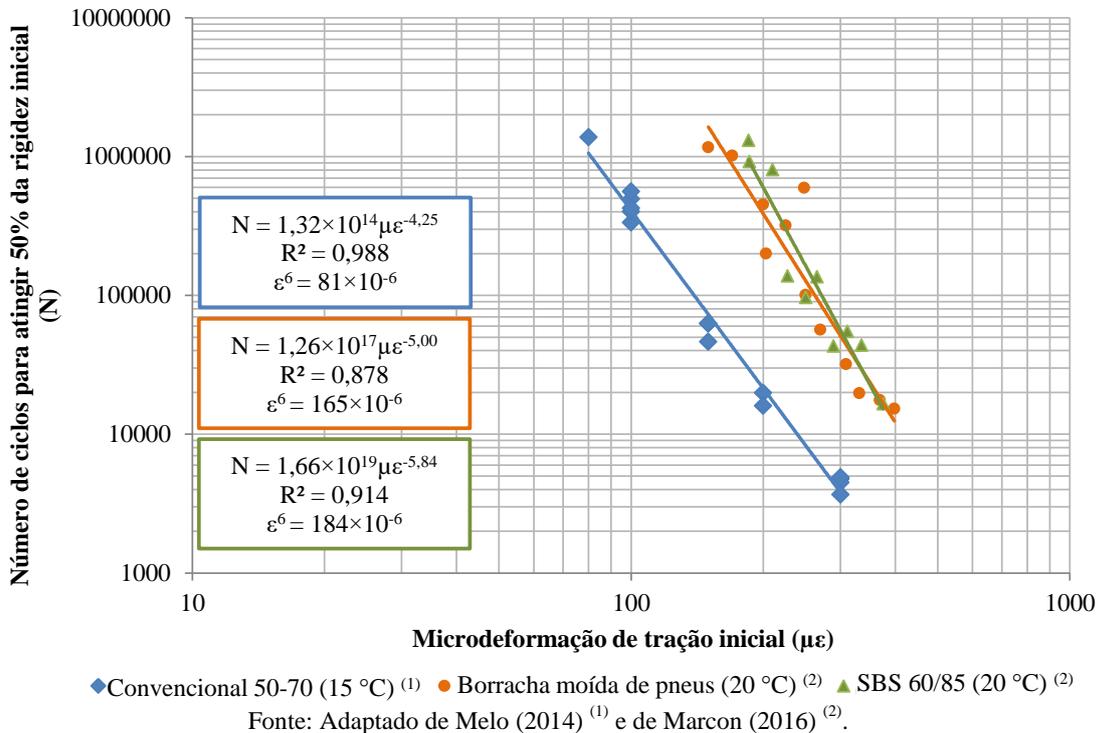
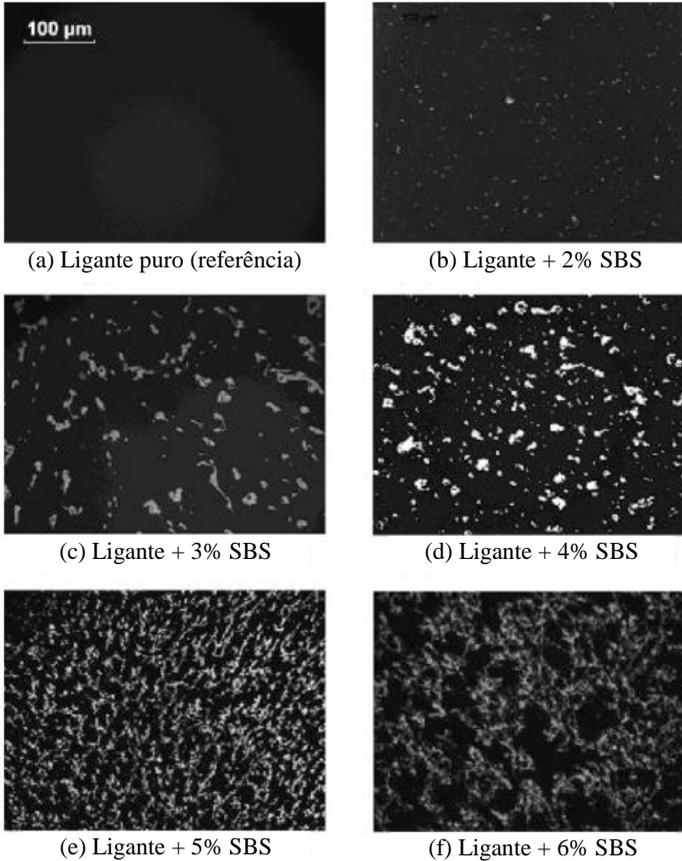


Figura 2.16 - Imagens de microscopia de fluorescência de ligantes modificados por polímero SBS (aumento de 100×).



Fonte: Adaptado de Sengoz e Isikyakar (2008).

Como se observa na Figura 2.16, o aspecto morfológico dos ligantes varia em função do aumento do teor de polímero adotado na modificação. Para porcentagens de SBS inferiores a 5%, os pequenos glóbulos constituídos por polímero inchado apresentaram-se dispersos de maneira homogênea em uma fase asfáltica contínua. Para o teor de SBS de 6%, de modo contrário, observa-se a existência de uma fase polimérica contínua, na qual a fase asfáltica encontra-se dispersa. Por outro lado, o ligante modificado com 5% de SBS apresentou duas fases contínuas entrelaçadas, formando uma estrutura em rede (SENGOZ;

ISIKYAKAR, 2007). Esta microestrutura corresponde à morfologia considerada ideal para os ligantes modificados por polímeros e acredita-se que esteja relacionada ao melhor aproveitamento dos modificadores em termos de desempenho das respectivas misturas asfálticas (BRULE; BRION; TANGUY, 1998 apud SENGOZ; ISIKYAKAR, 2007).

Apesar das grandes vantagens obtidas a partir da modificação de ligantes com polímeros, Zhu, Birgisson e Kringos (2014) relatam também os problemas envolvendo a aplicação destes materiais na pavimentação rodoviária. Entre eles, mencionam o custo elevado, a alta sensibilidade às variações de temperatura de alguns ligantes modificados e a dificuldade em se alcançar a estabilidade à estocagem dos mesmos.

De acordo com Wang, Yi e Yuzhen (2010), a ausência da estabilidade à estocagem de alguns ligantes modificados por polímeros pode ser relacionada à fraca compatibilidade entre os ligantes puros e seus respectivos modificadores. Assim, diferenças nas propriedades destes materiais (como a densidade e o peso molecular) contribuem para a separação de fases dos ligantes modificados.

## 2.4 LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS POR POLÍMEROS E POR NANOMATERIAIS

Em virtude das melhorias observadas nas propriedades e no comportamento dos materiais asfálticos modificados isoladamente por nanomateriais e por polímeros, passaram a receber interesse, recentemente, estudos que tratam da modificação simultânea dos ligantes asfálticos por estes materiais.

Neste sentido, Pamplona et al. (2012) estudaram as propriedades de ligantes asfálticos modificados simultaneamente por polímero SBS e por nanoargilas organofílicas. No estudo dos autores, foi utilizado como ligante de referência um CAP 50-70 convencional.

O polímero SBS aplicado como modificador apresenta estrutura linear e foi fabricado pela Petroflex. Em relação às nanoargilas, foram utilizados três tipos variados: (1) vermiculita, fornecida pela União Brasileira de Mineração e organofilizada em procedimento executado pelos autores; (2) montmorilonita, fornecida pela Mineração Vale do Juquiá Ltda., também organofilizada durante a pesquisa; e (3) nanoargila comercial Cloisite 20A, produzida pela *Southern Clay Products Inc.*

No estudo, foram avaliados 5 tipos de ligantes: um ligante convencional, um ligante modificado por 4,0% de SBS, e os demais

ligantes modificados por 2,5% de SBS e 2,5% de cada uma das nanoargilas estudadas.

O procedimento de modificação do ligante convencional foi realizado em um misturador de alto cisalhamento (Silverson L4R), com velocidade de 2.000 rpm, em temperatura de 160 °C. Após a adição dos modificadores, a mistura física foi mantida no misturador por um período de 2 horas.

Depois da modificação, todos os ligantes (com exceção daquele modificado pela nanoargila Cloisite 20A) foram caracterizados em relação à penetração, ponto de amolecimento, índice de susceptibilidade térmica e viscosidade rotacional. Os autores observaram que os asfaltos modificados, em comparação com o ligante convencional, apresentam redução da penetração, aumento do ponto de amolecimento e aumento da viscosidade. Além disso, os resultados verificados para o índice de susceptibilidade térmica indicaram que os ligantes modificados são adequados para aplicação em campo.

Em ensaios para avaliar a estabilidade à estocagem, comparando-se o ligante modificado exclusivamente por SBS com o ligante modificado simultaneamente por SBS e pela vermiculita organofílica, Pamplona et al. (2012) observaram que a separação de fases é atenuada em função da presença da nanoargila.

Quanto à reometria, verificaram, para todos os ligantes modificados, maiores valores de  $G^*$  e menores valores de  $\delta$  quando comparados ao ligante convencional, o que indica uma maior resistência destes ligantes ao fenômeno de deformação permanente. As diferenças nos valores obtidos para o módulo de cisalhamento dos ligantes convencional e modificados mostraram-se mais expressivas a baixas frequências, o que corresponde a altas temperaturas. Conforme os autores, neste caso, o comportamento das redes poliméricas formadas pelo SBS é dominante. Em baixas temperaturas, no entanto, verificaram que os ligantes modificados comportam-se de modo similar ao ligante puro.

Ainda em relação ao módulo de cisalhamento dinâmico, os resultados obtidos no trabalho de Pamplona et al. (2012) demonstraram um comportamento similar entre o ligante modificado com 4,0% de SBS e o ligante modificado com 2,5% de SBS e 2,5% da nanoargila vermiculita organofílica. A partir dos resultados obtidos, os autores concluíram que é possível alcançar, em termos de rigidez, um comportamento semelhante entre um ligante modificado por SBS e um ligante modificado por SBS e nanoargila, porém com menores teores de

polímero. Esta tendência também foi observada para a componente viscosa ( $G''$ ) do módulo dinâmico. No entanto, em relação à componente elástica ( $G'$ ), a baixas frequências, o comportamento dos ligantes diferiu de maneira mais significativa, de modo que o ligante modificado somente por SBS apresentou maiores valores.

Resultados semelhantes foram obtidos por Farias et al. (2016), que estudaram a modificação de um CAP 50-70 convencional com o teor de 4% de cinco modificadores diferentes: (1) nanoargila montmorilonita organofilizada durante a pesquisa; (2) nanoargila organofílica comercial (Cloisite 20A); (3) polímero SBS (Kraton 1110); (4) nanocompósito previamente produzido na pesquisa a partir da mistura da montmorilonita organofílica e do polímero SBS (com 5% de nanoargila em relação ao peso de polímero); e (5) nanocompósito também produzido durante a pesquisa por meio da mistura prévia da Cloisite 20A e do SBS, nas mesmas proporções.

No estudo, a modificação do CAP 50-70 foi realizada em um misturador Silverson L4R, com velocidade de 2.000 rpm, temperatura de 160 °C e tempo de compatibilização de 2 horas após a mistura física dos materiais. Este procedimento corresponde ao mesmo adotado no trabalho de Pamplona et al. (2012).

Para todos os ligantes modificados, em comparação com o ligante de referência, os resultados obtidos pelos autores demonstraram aumentos na viscosidade e no ponto de amolecimento, bem como diminuição na penetração. Contudo, verificaram que a adição dos nanocompósitos previamente produzidos proporciona menores ganhos em termos de aumento do ponto de amolecimento se comparada à modificação isolada por SBS e por nanoargila.

Em termos reológicos, Farias et al. (2016) também observaram maiores valores de módulo dinâmico ( $G^*$ ) para os ligantes modificados. Comparando-se as componentes elásticas ( $G'$ ) e viscosas ( $G''$ ) do módulo, evidenciaram o comportamento reológico similar dos ligantes modificados somente por SBS e pelos nanocompósitos constituídos por SBS e nanoargila. Por outro lado, o comportamento dos ligantes modificados somente pelas nanoargilas mostrou-se mais próximo ao do CAP convencional.

Devido ao comportamento similar dos ligantes modificados somente por SBS e pelos nanocompósitos de SBS e nanoargila, Farias et al. (2016) destacaram a possibilidade de substituir parte do polímero pelo nanomaterial, sem alterar as propriedades reológicas do ligante. De

acordo com os autores, tal substituição pode representar uma redução de custos de aproximadamente 36%.

Para a previsão do comportamento à deformação permanente das misturas asfálticas modificadas, Farias et al. (2016) realizaram ensaios de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR, do inglês *Multiple Stress Creep and Recovery*) com os ligantes. A partir das classificações indicadas para o tráfego, no entanto, verificaram a melhor previsão de comportamento para o ligante modificado exclusivamente por SBS, cuja classificação indicou resistência para tráfego pesado, isto é, ESALs (*Equivalent Single Axle Loads of 8.2 tons*) > 10 milhões. Os demais ligantes avaliados foram classificados com indicação para tráfego padrão (ESALs < 10 milhões). Contudo, os autores destacaram que os ensaios dos ligantes modificados com os nanocompósitos foram realizados a temperaturas mais elevadas se comparados ao convencional (12 °C de diferença), as quais foram definidas em função do PG dos respectivos ligantes.

Da mesma maneira, Merusi et al. (2014) avaliaram a modificação de um ligante asfáltico venezuelano 160/220 com nanoargila e polímeros variados. A nanoargila comercial utilizada na pesquisa foi a Cloisite 15A, fornecida pela *Southern Clay Products Inc.* Os polímeros aplicados na modificação foram o SBS (de nome comercial D1102, produzido pela Kraton), o EVA (Greenflex HN70, produzido pela Polimeri Europa) e o Elvaloy (1125 AC, fornecido pela Dupont).

Na pesquisa, os autores estudaram as propriedades de 8 ligantes asfálticos modificados. Foram conduzidas modificações, de modo isolado, pela nanoargila e pelo polímero SBS, em teores de 4% e 6%, respectivamente. As modificações restantes foram realizadas de modo simultâneo, misturando-se a nanoargila com cada um dos polímeros mencionados anteriormente (SBS, EVA ou Elvaloy), mantendo-se os teores de modificação em 4% para a nanoargila e 6% para o polímero. Além da influência da mistura física entre a nanoargila e o polímero diretamente na matriz asfáltica, os autores também avaliaram a influência da inserção de um nanocompósito previamente produzido, constituído de nanoargila e de polímero, o qual foi posteriormente adicionado ao ligante como modificador.

O procedimento de modificação consistiu em aquecer o ligante convencional até a temperatura de 180 °C, adicionando-se os modificadores em uma velocidade de 5 g/min. A mistura física foi realizada em um misturador de alto cisalhamento, com velocidade de 4.000 rpm e tempo de compatibilização de 1 hora após a adição dos

modificadores. Depois da modificação, todos os ligantes foram estocados à temperatura de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  para posterior caracterização.

Quanto à caracterização, os autores verificaram, em relação ao ligante convencional, a diminuição na penetração e o aumento no ponto de amolecimento de todos os ligantes modificados.

Tratando-se da estabilidade à estocagem, observaram uma maior separação de fases do ligante modificado exclusivamente por 6% de polímero SBS, cuja variação no ponto de amolecimento entre as amostras do topo e do fundo de um tubo de teste depois da estocagem ( $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 72 horas  $\pm 1$  h) correspondeu a  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Este resultado foi seguido pelo resultado obtido para o ligante modificado fisicamente por 6% de SBS e 4% de nanoargila, que apresentou variação de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A mesma modificação, quando realizada a partir da incorporação do nanocompósito de polímero e de nanoargila, resultou numa variação de temperatura de apenas  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Os resultados foram justificados pelos autores por meio de ensaios de microscopia, que ilustraram o aspecto morfológico dos três ligantes modificados e ressaltaram as diferenças obtidas, em termos de compatibilidade, a partir da aplicação dos modificadores diretamente na matriz asfáltica e da aplicação do nanocompósito previamente produzido.

Além disso, a partir da apresentação de resultados de reologia em temperaturas de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  e frequência de 10 rad/s, os autores observaram que os ligantes modificados simultaneamente por SBS e por nanoargila apresentaram maiores valores de módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ) e menores valores para o ângulo de fase ( $\delta$ ) quando comparados aos ligantes modificados somente por SBS. Ainda de acordo com o estudo reológico, Merusi et al. (2014) verificaram ganhos dos ligantes em termos de PG (*Performance Grade*), notadamente a altas temperaturas.

Na mesma linha, Galooyak et al. (2010) também estudaram as propriedades físicas e reológicas de ligantes modificados por SBS e por nanoargila. Como matriz para a modificação, empregaram um ligante convencional de penetração 85/100, o qual foi modificado pela adição do polímero Kraton D1101 (fornecido pela *Shell Chemical Co.*) e da nanoargila comercial Nanofil 948 (fornecida pela *Süd Chemie AG.*). No trabalho, o SBS foi adicionado à matriz asfáltica no teor de 5% (em peso de ligante) e a nanoargila em proporções SBS/nanoargila de 100/35, 100/50 e 100/65.

No estudo, procedeu-se inicialmente a modificação dos ligantes por SBS, sendo este procedimento realizado em um misturador de alto

cisalhamento, em temperatura de 180 °C e velocidade de 4.000 rpm, durante um período de 2 horas. Após a modificação por SBS, a nanoargila foi adicionada ao ligante, mantendo-se as mesmas condições de velocidade de cisalhamento e de temperatura, durante um tempo de modificação de 30 minutos. De acordo com os resultados de DRX (difratometria de raios X), este procedimento possibilitou a formação de estruturas esfoliadas.

Em relação às propriedades físicas, comparando-se com o ligante de referência, Galooyak et al. (2010) observaram que os ligantes modificados apresentaram aumento nos valores de ponto de amolecimento e viscosidade e diminuição na penetração. Além disso, também foi observada a redução na ductilidade a 15 °C, porém pouco significativa. Estes aumentos/diminuições evoluíram conforme foi aumentada a proporção de nanoargila no ligante. Por outro lado, quanto à recuperação elástica e à ductilidade a 4 °C, os autores verificaram pequenos aumentos enquanto a proporção SBS/nanoargila foi mantida abaixo de 100/65. Nesta proporção, foram observadas reduções nas respectivas propriedades.

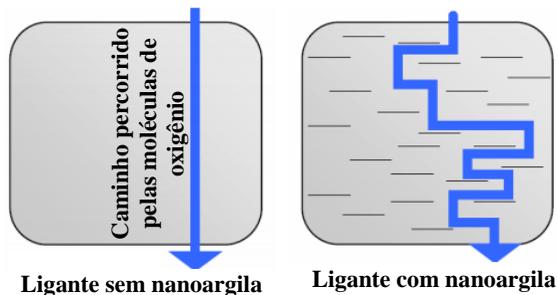
No estudo reológico, relataram a obtenção de maiores módulos dinâmicos e menores ângulos de fase para os ligantes simultaneamente modificados quando comparados aos ligantes convencional e modificado somente por SBS. Os aumentos no parâmetro  $G^*$  foram mais significativos a altas temperaturas e baixas frequências de carregamento, o que é altamente positivo em termos de resistência à deformação permanente.

Além disso, assim como observado por outros autores, Galooyak et al. (2010) também verificaram que a adição simultânea de SBS e nanoargila é capaz de eliminar o problema relacionado à separação de fases, o qual é identificado quando da modificação isolada dos ligantes por SBS.

Adicionalmente, os autores estudaram o envelhecimento em curto prazo dos ligantes modificados. Este envelhecimento foi simulado em RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*), sendo seus efeitos avaliados em termos de penetração retida e diferença de ponto de amolecimento. Os resultados obtidos demonstraram que a adição da nanoargila diminuiu a redução da penetração e a diferença de ponto de amolecimento entre antes e após o RTFOT, o que reflete o menor envelhecimento destes ligantes. Neste caso, conforme justificado pelos autores, com base no trabalho de Százdí (2006), as nanopartículas funcionam como barreiras para o oxigênio, fazendo com que suas moléculas percorram caminhos

mais difíceis. Este fenômeno retarda o envelhecimento oxidativo dos ligantes e seu princípio é ilustrado na Figura 2.17.

Figura 2.17 - Princípio de retardamento de envelhecimento dos ligantes asfálticos a partir da incorporação de nanoargila.



Fonte: Adaptado de Százdi (2006).

Posteriormente, a pesquisa de Galooyak (2010) foi continuada por Golestani, Nejad e Galooyak (2012). No estudo, os autores investigaram a influência da adição de dois polímeros distintos a um ligante convencional de penetração 85/100: (1) o Calprene 501, de estrutura linear; e (2) o Solprene 416, de estrutura radial. A nanoargila comercial utilizada na pesquisa foi a Cloisite 15A. Foram avaliados ligantes modificados com 6% de Calprene 501 e 5,5% de Solprene 416 (em peso), com respectiva adição de nanoargila nas proporções SBS/nanoargila de 100/12,5, 100/25 e 100/50.

Assim como no trabalho de Galooyak et al. (2010), o procedimento de modificação foi conduzido em um misturador de alto cisalhamento e teve início com a adição do polímero SBS. A modificação por SBS foi conduzida em temperatura de  $180 \pm 5$  °C e velocidade de 4.500 rpm, durante um período de 2 horas. Depois da modificação pelo polímero, os ligantes foram modificados pela nanoargila, também em um misturador de alto cisalhamento e a temperatura de  $180 \pm 5$  °C, porém a velocidade de 4.000 rpm e durante um tempo de compatibilização de 45 minutos.

Nestas condições, totalizando-se 2h45min de compatibilização dos materiais, Golestani, Nejad e Galooyak (2012) verificaram, por meio de resultados de difratometria de raios X, que os ligantes modificados por 6% de SBS de estrutura linear e relação SBS/nanoargila de 100/25 formaram uma estrutura completamente esfoliada. No entanto, considerando-se as mesmas condições, a

esfoliação não foi atingida para o ligante modificado por 5,5% de SBS de estrutura radial e proporção SBS/nanoargila de 100/25. Neste caso, os resultados de DRX indicaram a formação de uma estrutura intercalada.

Em relação às propriedades físicas dos materiais, em consonância com os demais estudos realizados na área, Golestani, Nejad e Galooyak (2012) observaram que a modificação faz com que haja uma redução da penetração e um aumento do ponto de amolecimento dos ligantes duplamente modificados em relação ao ligante convencional e ao modificado somente por SBS. De maneira geral, também foram observados aumentos na viscosidade com o aumento dos teores de nanoargila. Além disso, os autores observaram que baixas concentrações de nanoargila não exercem influências significativas na propriedade de recuperação elástica dos ligantes modificados. No entanto, destacam que concentrações elevadas destes modificadores podem resultar na redução da recuperação elástica conferida pelo SBS.

Como observado por outros autores, Golestani, Nejad e Galooyak (2012) também observaram melhorias, em termos de estabilidade à estocagem, dos ligantes duplamente modificados se comparados ao ligante modificado somente por SBS.

Tratando-se das propriedades reológicas, os autores apresentaram resultados de ensaios realizados no reômetro de cisalhamento dinâmico, na frequência de 10 rad/s e temperaturas variando entre 20 °C a 90 °C. De modo geral, assim como observado em outras pesquisas, os ligantes asfálticos modificados no trabalho de Golestani, Nejad e Galooyak (2012) apresentaram maiores valores de  $G^*$  e menores valores de  $\delta$ . Como consequência, foram observados maiores valores para o parâmetro  $G^*/\sin\delta$ .

Adicionalmente, conforme destacado pelos autores, foram observados maiores valores de  $G^*$  para os ligantes modificados por SBS de estrutura linear, quando comparados àqueles modificados por polímero de estrutura radial. Estes resultados apresentaram-se em conformidade com os resultados verificados nos ensaios de difratometria de raios X, no sentido de que a esfoliação da nanoargila na matriz asfáltica produz maiores efeitos no ligante asfáltico modificado do que a produção de estruturas intercaladas. Nesta direção, Golestani, Nejad e Galooyak (2012) evidenciaram o melhor comportamento do ligante quando da obtenção de uma estrutura esfoliada.

Mais recentemente, dando-se continuidade à pesquisa, Golestani et al. (2015) desenvolveram um estudo no qual avaliaram, além das

propriedades dos ligantes modificados por polímero SBS e por nanoargila, as propriedades mecânicas e reológicas dos concretos asfálticos produzidos com estes materiais. Para tanto, foram realizados ensaios de resistência à ação deletéria da água (Lottman), de módulo resiliente (tração indireta) e de deformação permanente (*wheel tracking test*).

No trabalho dos autores, foi utilizado como base um ligante convencional de PG 58-10, que foi modificado por 6% de polímero SBS de estrutura linear (Calprin 501) e 1,5% de nanoargila (Cloisite 15A). A partir das mesmas proporções, também foram estudados ligantes modificados, de maneira isolada, por cada um dos modificadores. O procedimento definido para a modificação correspondeu ao mesmo adotado no estudo de Golestani, Nejad e Galooyak (2012), conforme descrito anteriormente. Para a produção das misturas asfálticas, os autores utilizaram agregados de origem calcária, sendo a granulometria fechada.

No que diz respeito aos ensaios que avaliaram a ação deletéria da água, Golestani et al. (2015) observaram melhorias no desempenho das misturas asfálticas modificadas quando comparadas à convencional. Avaliando-se a razão entre a resistência à tração das misturas condicionadas e das misturas não condicionadas, foram verificados aumentos de 4,5%, 17,2% e 23,2%, respectivamente, para aquelas modificadas com nanoargila, com polímero SBS e com ambos os modificadores, em relação à mistura produzida com ligante convencional.

Em relação ao módulo resiliente, foram realizados ensaios em temperaturas de 5 °C, 25 °C e 40 °C, a uma frequência de 1 Hz, com duração de carregamento de 0,1 s (e correspondentes períodos de repouso de 0,9 s), sendo a carga aplicada de 1500 N. Como resultado, observaram que, de modo geral, o módulo resiliente das misturas modificadas é maior do que da mistura convencional, sendo obtidos os maiores valores para a mistura duplamente modificada. Quanto à influência da temperatura, Golestani et al. (2015) constataram maiores variações de módulo em temperaturas mais elevadas, o que indica um maior impacto das modificações nestas condições.

Por fim, tratando-se dos resultados obtidos a partir dos ensaios de deformação permanente, Golestani et al. (2015) observaram reduções neste fenômeno da ordem de 26%, 50% e 64%, respectivamente, para as misturas modificadas por nanoargila, por polímero SBS e por ambos.

## 2.5 RESUMO DA REVISÃO DE LITERATURA

A partir da revisão de literatura realizada acerca da modificação de ligantes asfálticos por nanoargilas e polímeros SBS, destacam-se as principais orientações para o desenvolvimento do presente estudo:

- As pesquisas desenvolvidas têm avaliado a incorporação do nanomaterial entre teores de 0,7% e 4,0% e do polímero entre teores de 2,5% e 6,0%, considerando-se períodos de compatibilização entre cerca de 1 hora e 3 horas;
- É possível alcançar a esfoliação da nanoargila nos ligantes duplamente modificados;
- O emprego dos ligantes modificados por nanoargila e SBS é capaz de proporcionar maior resistência às misturas asfálticas quanto ao fenômeno de deformação permanente e quanto ao efeito da ação deletéria da água se comparadas às misturas convencional, modificada exclusivamente por nanoargila e exclusivamente por SBS;
- A modificação por nanoargila e SBS resulta em aumentos nos valores de módulo de cisalhamento dinâmico ( $G^*$ ) e reduções nos valores de ângulo de fase ( $\delta$ ) em comparação aos ligantes convencionais e pode resultar também em respectivos aumentos/reduções em relação aos modificados por SBS;
- A adição de nanoargilas em ligantes modificados por SBS é capaz de proporcionar melhorias em termos de estabilidade à estocagem;
- A incorporação de nanoargilas nos ligantes modificados por polímeros elastoméricos, a partir de determinados teores, pode proporcionar redução na propriedade de recuperação elástica, o que poderia comprometer o desempenho à fadiga das respectivas misturas;
- Os ligantes modificados por nanoargilas e SBS apresentam menor penetração e maior ponto de amolecimento se comparados aos ligantes convencional, modificados somente por SBS e somente por nanoargila.

Conforme se pode observar, de acordo com os estudos realizados na área, verifica-se o potencial da modificação de ligantes asfálticos por polímeros e por nanomateriais. Neste sentido, as pesquisas relacionadas convergem para a ideia de que a modificação simultânea pode

proporcionar propriedades benéficas às misturas asfálticas com ligantes duplamente modificados.

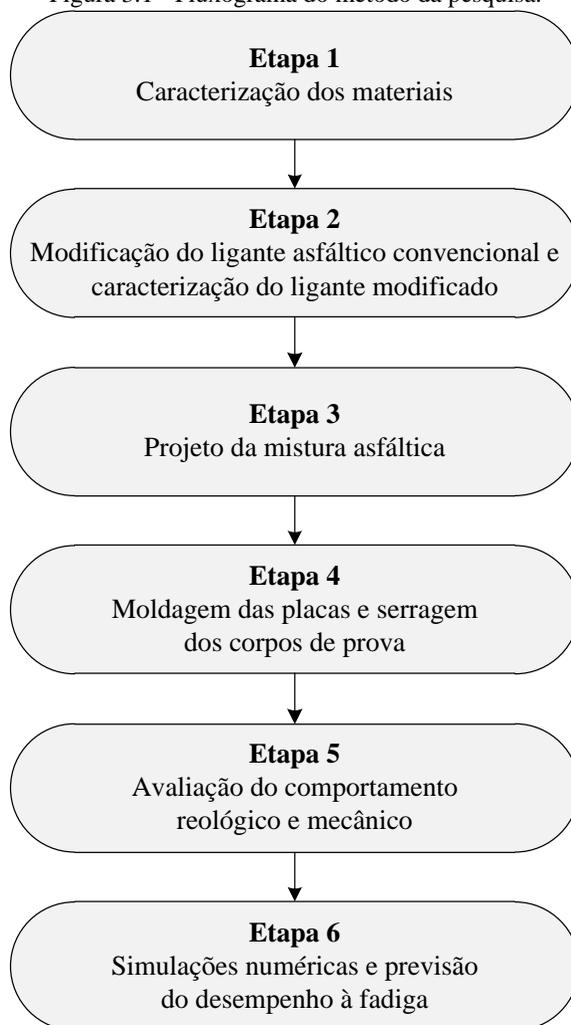
No entanto, observa-se que a grande maioria das pesquisas desenvolvidas acerca deste tema abrange somente o estudo dos ligantes, carecendo de maiores investigações no âmbito do desempenho das misturas asfálticas produzidas a partir destes materiais, o que é o objetivo central proposto no presente trabalho.



### 3 MATERIAIS E MÉTODO DA PESQUISA

Para que fossem atingidos os objetivos definidos para a pesquisa, o presente estudo foi desenvolvido em 6 etapas, conforme apresentado na Figura 3.1 e detalhado na sequência.

Figura 3.1 - Fluxograma do método da pesquisa.



Fonte: Autora (2017).

- **Etapa 1 – Caracterização dos materiais**

Esta etapa consistiu na caracterização dos materiais empregados na pesquisa (agregados, ligante asfáltico convencional e agentes modificadores do ligante). A caracterização dos agregados foi conduzida de acordo com a metodologia Superpave. O ligante asfáltico convencional (CAP 50-70), utilizado como matriz na modificação, foi caracterizado a partir de ensaios empíricos. Por fim, a caracterização da nanoargila e do polímero SBS, empregados como agentes modificadores, foi realizada com base em propriedades físicas e químicas destes materiais. Uma vez que esta etapa foi desenvolvida a partir de estudos conduzidos por outros autores, seus resultados são apresentados neste mesmo Capítulo 3, na seção 3.1.

- **Etapa 2 – Modificação do ligante asfáltico convencional e caracterização do ligante modificado**

Nesta etapa foram definidos o procedimento e os teores de nanoargila e de SBS adotados para a modificação do CAP 50-70. A influência da modificação nas propriedades do ligante foi avaliada por meio de ensaios de difratometria de raios X (DRX), microscopia de fluorescência, penetração, ponto de amolecimento, recuperação elástica, separação de fase e viscosidade aparente.

- **Etapa 3 – Projeto da mistura asfáltica**

Nesta etapa foi realizada a dosagem da mistura asfáltica modificada na pesquisa. Para isto, foi aplicada a metodologia de dosagem Superpave, por meio da qual foi definido o teor de ligante de projeto e avaliada a resistência da mistura asfáltica à ação deletéria da água.

- **Etapa 4 – Moldagem das placas e serragem dos corpos de prova**

Esta etapa correspondeu à moldagem de placas de concreto asfáltico para a realização de ensaios de deformação permanente, módulo complexo e fadiga. Posteriormente, as placas compactadas para os ensaios de módulo e de fadiga foram serradas, obtendo-se corpos de prova prismáticos para ensaios no aparato 4 pontos.

- **Etapa 5 – Avaliação do comportamento reológico e mecânico**

Esta etapa consistiu na avaliação do comportamento reológico e mecânico da mistura modificada simultaneamente por nanoargila e por

SBS. O comportamento reológico foi investigado a partir de ensaios de módulo complexo, com determinação do ângulo de fase. O comportamento mecânico foi avaliado por meio de ensaios de resistência à fadiga e deformação permanente.

- **Etapa 6 – Simulações numéricas e previsão do desempenho à fadiga**

O propósito desta etapa foi a estimativa da vida útil à fadiga de revestimentos asfálticos constituídos pela mistura desenvolvida na pesquisa, em termos de  $N_{8,2t}$ . Para tanto, foram realizadas simulações numéricas no *software* ViscoRoute 2.0, aplicando-se posteriormente o modelo de fadiga desenvolvido na etapa anterior.

Devido também ao caráter comparativo desta pesquisa, cabe salientar que o programa experimental da mesma foi estabelecido com base nos resultados obtidos nos trabalhos de Melo (2014) e de Marcon (2016). Deste modo, ao longo do trabalho, foi possível o desenvolvimento de uma análise comparativa entre os comportamentos de ligantes e misturas asfálticas modificadas por nanoargila, por polímero SBS e por ambos os modificadores.

As etapas da pesquisa são detalhadas na sequência.

### 3.1 ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 3.1.1 Agregados e composição granulométrica

De modo a viabilizar a comparação entre os resultados obtidos nesta pesquisa e nas pesquisas de Melo (2014) e de Marcon (2016), foram empregados, neste trabalho, os mesmos agregados e a mesma composição granulométrica utilizados pelos dois autores. Assim, procurou-se garantir que as diferenças verificadas entre o comportamento das misturas asfálticas distintas ocorreu exclusivamente devido à influência da modificação dos ligantes.

Os agregados e a curva granulométrica empregados correspondem aos mesmos aplicados nos Segmentos Monitorados do Contorno de Araranguá, que também foram empregados nos trabalhos de Ribas (2016) e de Santos (2016).

### 3.1.1.1 Agregados

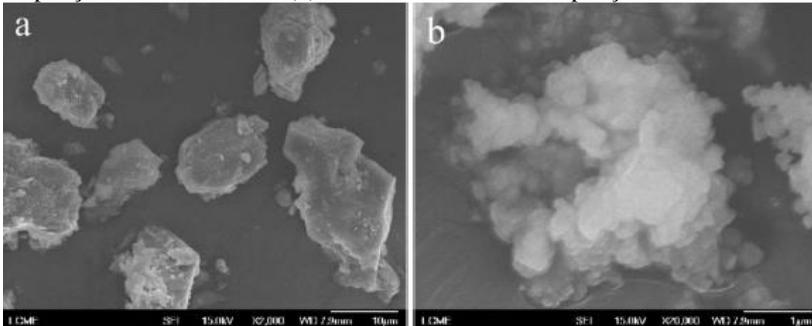
Visto que os agregados foram caracterizados por Melo (2014), a apresentação destas informações neste trabalho consistiu unicamente na consolidação dos resultados obtidos pelo autor e por isto são apresentados neste item.

No trabalho de Melo (2014) foram avaliadas as propriedades dos agregados apresentadas na Tabela 3.1. Como é possível observar, todas as propriedades avaliadas para os agregados, quando aplicáveis, encontram-se em conformidade com os critérios de aceitação da metodologia Superpave, demonstrando que os mesmos se apresentam adequados para a produção das misturas asfálticas.

Na produção do concreto asfáltico, foi utilizada como fíler uma cal hidratada do tipo CH-1 dolomítica, produzida pela Pinocal Indústria e Comércio de Cal Ltda. e suas propriedades são relacionadas na Tabela 3.2.

Além disso, a caracterização dos agregados realizada por Melo (2014) abordou resultados de ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para os grãos de pó de pedra e para a cal hidratada. Os resultados destes ensaios são apresentados na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Resultados da micrografia (a) dos grãos de pó de pedra com ampliação de 2.000 vezes e (b) da cal hidratada com ampliação de 20.000 vezes.



Fonte: Melo (2014).

Tabela 3.1 - Caracterização dos agregados.

<b>Propriedade</b>	<b>Norma</b>	<b>Resultado</b>	<b>Critério Superpave</b>
Massa específica real do agregado graúdo	ASTM C 127	2,953 g/cm <sup>3</sup>	n/a
Massa específica aparente do agregado graúdo	ASTM C 127	2,880 g/cm <sup>3</sup>	n/a
Absorção do agregado graúdo	ASTM C 127	0,8%	n/a
Massa específica real do agregado miúdo	DNER-ME 084	2,974 g/cm <sup>3</sup>	n/a
Massa específica real do material pulverulento	DNER-ME 085	2,804 g/cm <sup>3</sup>	n/a
Angularidade do agregado graúdo	ASTM D 5821	100%/100%	100%/100% mín. <sup>1</sup>
Angularidade do agregado miúdo	ASTM C 1252	49,2%	45% mín.
Partículas planas e alongadas	ABNT NBR 6954	9,6%	10% máx.
Teor de argila (Equivalente de areia)	AASHTO T 176	61,2%	50% mín.
Dureza (Abrasão Los Angeles)	ASTM C 131	11,6%	35-45% máx.
Sanidade	ASTM C 88	2,14%	10-20% máx.
Materiais deletérios	AASHTO T 112	0%	0,2-10% máx.

Nota: <sup>1</sup> Ex.: 85%/80% significa que 85% dos agregados graúdos têm uma ou mais faces fraturadas e 80% têm duas ou mais faces fraturadas.

Fonte: Adaptado de Melo (2014).

Tabela 3.2 - Caracterização da cal hidratada.

<b>Propriedade</b>	<b>Resultado</b>
Perda ao fogo	18,6%
Resíduo insolúvel	1,9%
Anidrido carbônico (CO <sub>2</sub> )	2,5%
Óxido de cálcio (CaO)	45,1%
Óxido de magnésio (MgO)	33,5%
Óxidos totais não voláteis (CaO + MgO)	96,5%
Óxidos totais não hidratados	27,6%
Óxidos de CaO não hidratados	0,0%
Cálcio (Ca)	32,2%
Magnésio (Mg)	20,2%
Densidade	3,0

Fonte: Melo (2014).

Conforme ressaltado por Melo (2014), o aspecto apresentado pelos grãos de pó de pedra (forma cúbica, com arestas bem definidas e textura rugosa) em conjunto com o aspecto da cal hidratada (aglomerado de partículas de tamanho reduzido, forma não esférica e porosidade aparentemente alta) contribuem para que haja uma boa ancoragem do ligante asfáltico quando da produção das misturas.

### 3.1.1.2 Composição granulométrica

A composição granulométrica aplicada nesta pesquisa foi definida pelo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES / Petrobras), tendo como objetivo de apresentar elevada resistência à deformação permanente, por conta dos problemas observados na duplicação da BR-101 Sul, na região do Contorno de Araranguá.

Sua definição obedeceu aos critérios da metodologia Superpave para um tamanho nominal máximo de agregado de 19 mm. É composta por 43% de brita 3/4", 15,5% de pedrisco, 40% de pó de pedra e 1,5% de cal. Estas proporções ainda podem ser expressas como correspondentes a 56,7% de agregado graúdo (passante na # 3/4" e retido na # n° 4), 37,9% de agregado miúdo (passante na # n° 4 e retido na # n° 200) e 5,4% de material pulverulento (passante na # 200) (MELO, 2014).

Para o desenvolvimento do presente trabalho, assim como no trabalho de Melo (2014) e de Marcon (2016), as proporções recém-

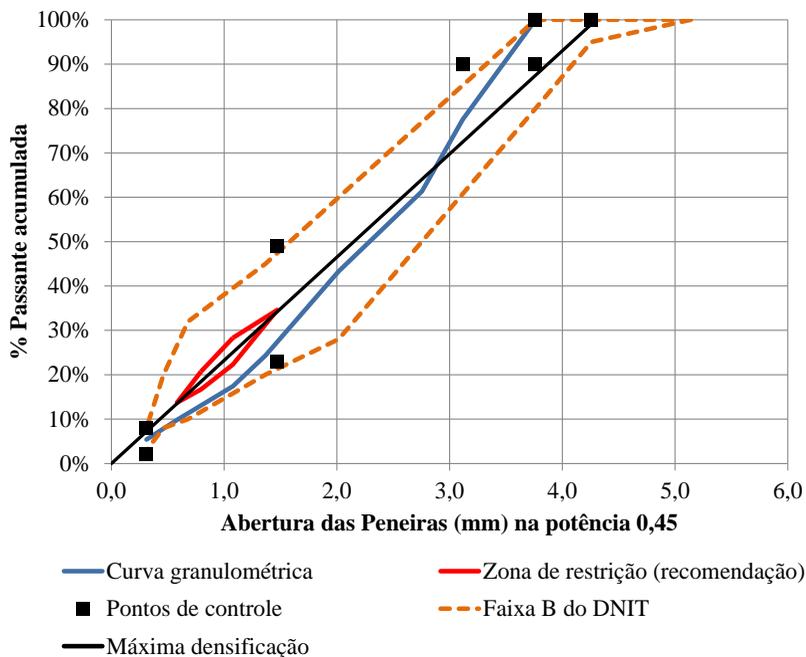
mencionadas foram fracionadas de acordo com as peneiras apresentadas na Tabela 3.3. Este fracionamento resultou na curva granulométrica ilustrada na Figura 3.3.

Tabela 3.3 - Composição granulométrica: porcentagem passante em cada peneira.

<b>Peneira (série ASTM)</b>	<b>% Passante</b>
3/4"	100,0
1/2"	77,5
3/8"	61,3
n° 4	43,3
n° 10	24,3
n° 16	17,4
n° 50	9,8
n° 200	5,4

Fonte: Adaptado de Melo (2014).

Figura 3.3 - Curva granulométrica da composição de agregados.



Fonte: Adaptado de Melo (2014).

Pode-se observar, a partir da Figura 3.3, que a curva granulométrica adotada posiciona-se abaixo da zona de densificação máxima na fração miúda e acima da referida zona na fração miúda. Além disso, a mesma respeita a recomendação da zona de restrição Superpave, posicionando-se entre os pontos de controle e correspondendo a uma curva da faixa B do DNIT. Ressalta-se que, na época do projeto da mistura (2011), a observação dos pontos de contorno na região da zona de restrição era mais relevante do que atualmente o é.

### 3.1.2 Ligante asfáltico convencional

O ligante asfáltico convencional empregado como matriz na produção do ligante modificado nesta pesquisa corresponde a um CAP 50-70, proveniente da refinaria REPAR (Refinaria do Paraná), localizada no município de Araucária.

Este ligante também foi empregado na produção das misturas convencionais dos Segmentos Monitorados do Contorno de Araranguá, além de ser utilizado nos trabalhos de Melo (2014), Ribas (2016) e Santos (2016). Os resultados da caracterização encontram-se na Tabela 3.4 e, conforme os estudos conduzidos por Melo (2014), apresenta PG 58-22.

Tabela 3.4 - Caracterização do ligante asfáltico convencional (CAP 50-70).

<b>Propriedade</b>	<b>Norma</b>	<b>Resultado</b>
Penetração	ASTM D 5	57 × 0,1 mm
Ponto de amolecimento	ASTM D 36	47,9 °C
Índice de Susceptibilidade Térmica	-	-1,44
Viscosidade Brookfield		
a 135 °C ( <i>spindle</i> 21, 20 rpm)	ASTM D 4402	290 cP
a 150 °C ( <i>spindle</i> 21, 50 rpm)		150 cP
a 175 °C ( <i>spindle</i> 21, 100 rpm)		60 cP

Fonte: Adaptado de Melo (2014).

### 3.1.3 Modificadores do ligante asfáltico

#### 3.1.3.1 Nanoargila organofílica

A nanoargila organofílica utilizada nesta pesquisa foi produzida pela *Laviosa Chimica Mineraria S.p.A.* e é comercialmente conhecida como Dellite 67G. Corresponde à mesma nanoargila empregada no trabalho de Melo (2014). Seu aspecto visual é ilustrado na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Aspecto visual da nanoargila organofílica Dellite 67G.



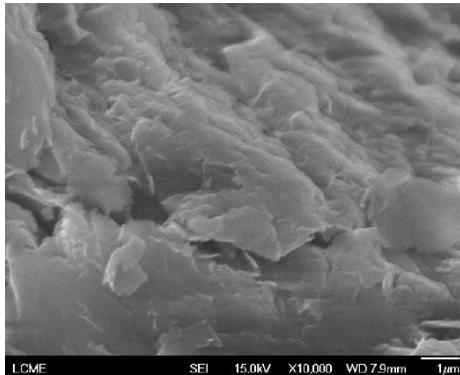
Nota: escala de referência em centímetros.

Fonte: Autora (2017).

Possui tamanho de partícula (seco) de 7-9  $\mu\text{m}$ , tamanho de partícula após a dispersão de  $1 \times 500 \text{ nm}$  e massa específica de  $1,7 \text{ g/cm}^3$  (MELO, 2014). O aspecto morfológico deste nanomaterial pode ser observado na Figura 3.5.

Conforme Melo (2014), a Dellite 67G apresenta a seguinte composição química: 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%). Esta composição foi determinada pelo autor a partir de ensaio de fluorescência de raios X, utilizando-se um espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva e o método da pastilha prensada.

Figura 3.5 - Resultado da micrografia da nanoargila com ampliação de 10.000 vezes.



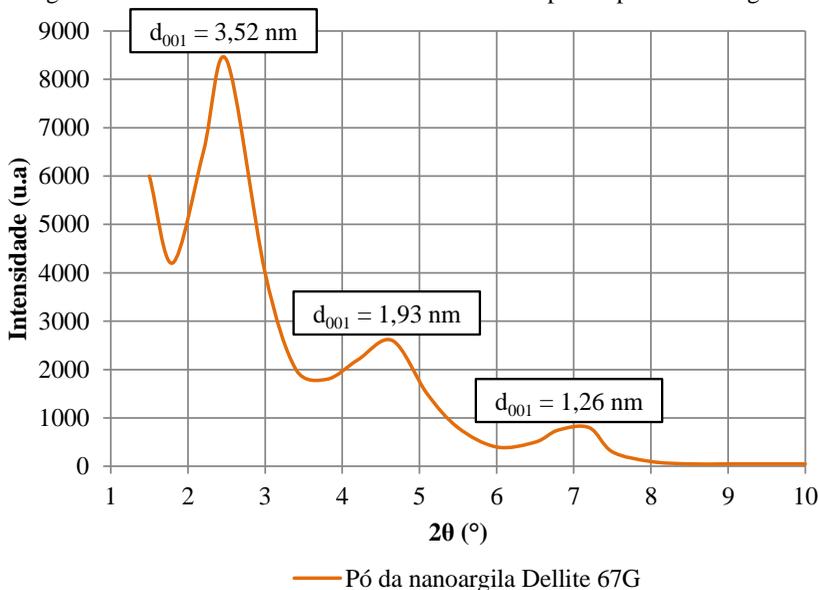
Fonte: Melo (2014).

Segundo o ensaio de termogravimetria conduzido pelo mesmo autor, entre temperaturas de 25 °C e 500 °C, este nanomaterial apresenta a primeira perda de massa na temperatura de 262,4 °C, mantendo-se termicamente estável em temperaturas abaixo desta.

É importante destacar que as temperaturas adotadas neste trabalho para a modificação do ligante asfáltico, bem como para a usinagem e para a compactação das misturas (posteriormente detalhadas), encontram-se abaixo do patamar de estabilidade térmica identificado por Melo (2014) para a nanoargila utilizada. Esta constatação indica a adequação térmica do material para a finalidade proposta na pesquisa.

Na pesquisa de Melo (2014), a nanoargila Dellite 67G também foi caracterizada a partir de ensaio de difratometria de raios X e da aplicação da Lei de Bragg, identificando-se espaçamentos interfoliares de 3,52 nm, 1,93 nm e 1,26 nm (Figura 3.6). Conforme destacado pelo autor, estes valores são maiores do que aqueles observados para a montmorilonita (correspondente argila de ocorrência natural), indicando maiores espaçamentos basais para a Dellite 67G, o que é resultado do processo de organofilização da nanoargila.

Figura 3.6 - Resultados da difratometria de raios X para o pó de nanoargila.



Fonte: Adaptado de Melo (2014).

### 3.1.3.2 Polímero SBS

O polímero SBS utilizado na pesquisa foi fornecido pela *Kraton Performance Polymers Inc.*, em grânulos. É identificado comercialmente como Kraton D1101 B e, de acordo com o fabricante, corresponde a um polímero de estrutura linear, com porcentagem de poliestireno entre 30% e 32%. Seu aspecto visual pode ser observado na Figura 3.7. Suas propriedades físicas e de resistência encontram-se relacionadas na Tabela 3.5.

Conforme recomendações do fabricante, a título de se evitar o risco de incêndio e de degradação do polímero, sugere-se que a temperatura de processamento do mesmo seja mantida abaixo de 225 °C. Deste modo, uma vez que as temperaturas de aplicação adotadas neste trabalho são inferiores ao patamar recomendado pelo fabricante, destaca-se a adequação do polímero para a finalidade desejada, assim como anteriormente constatado para a nanoargila.

Figura 3.7 - Aspecto visual do polímero SBS Kraton D1101 B em grânulos.



Nota: escala de referência em centímetros.

Fonte: Autora (2017).

Tabela 3.5 - Caracterização do polímero SBS Kraton D1101 B.

<b>Propriedade</b>	<b>Norma</b>	<b>Resultado</b>
Densidade relativa	ISO 2781	0,94
Resistência à tração	ISO 37	33 MPa
Módulo a 300% <sup>1</sup>	ISO 37	2,9 MPa
Massa específica aparente	ASTM D 1895 – método B	0,4 kg/dm <sup>3</sup>
Índice de fluidez (200 °C / 5 kg)	ISO 1133	< 1 g/10 min
Alongamento na ruptura	ISO 37	880%
Dureza, <i>Shore A</i>	ISO 868	70 (10 s)

Nota: <sup>1</sup>Na indústria de materiais elastoméricos, o termo módulo a 300% corresponde à tensão de tração necessária para produzir um alongamento de 300% no material e não está relacionado à inclinação da curva tensão-deformação (ISO 37).

Fonte: Adaptado de *Kraton Performance Polymers Inc.* (2016).

### 3.2 ETAPA 2 – MODIFICAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO CONVENCIONAL E CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE MODIFICADO

Os teores de modificação do ligante asfáltico CAP 50-70 e o método para a realização deste procedimento foram definidos de acordo com a revisão de literatura, em conformidade com premissas pré-estabelecidas em virtude do caráter comparativo deste estudo (FARIAS

et al., 2016; GALOYAK et al., 2010; GOLESTANI; NEJAD; GALOYAK, 2012; GOLESTANI et al., 2015; MARCON, 2016; MELO, 2014; MERUSI et al., 2014; PAMPLONA et al., 2012).

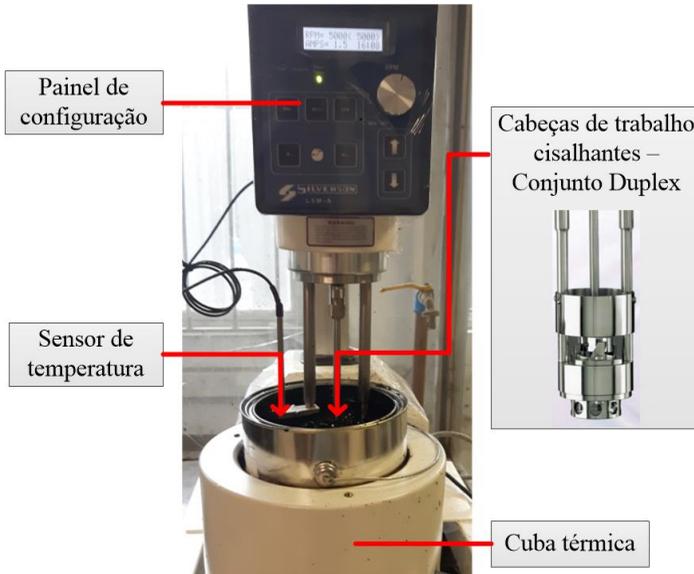
Deste modo, a modificação do ligante foi realizada com teores de 3% de nanoargila organofílica e 2% de polímero SBS (em relação ao peso de ligante). O teor de modificação de 3% de nanoargila foi fixado com o objetivo de comparar os resultados obtidos neste trabalho com os resultados verificados por Melo (2014) para um ligante modificado na mesma proporção, porém somente por nanoargila. Quanto ao teor de SBS fixado em 2%, este foi adotado com a finalidade de conferir propriedades de recuperação elástica ao material asfáltico, permitindo-se a comparação dos resultados obtidos nesta pesquisa com aqueles verificados por Marcon (2016) para o ligante Flexpave 60/85. Neste caso, nota-se que o teor estabelecido é inferior à proporção de polímero adicionada ao ligante comercial estudado pelo autor (cerca de 4%). No entanto, a adição de uma quantidade reduzida de SBS tem justificativas de ordem econômica e também se baseia nos resultados obtidos no trabalho de Pamplona et al. (2012), que estudaram a modificação com 2,5% de nanoargila e 2,5% de SBS.

O procedimento de modificação foi conduzido em um misturador de alto cisalhamento de laboratório, modelo Silverson L5M-A, equipado com conjunto de mistura Duplex (com duas cabeças de trabalho) e acompanhado de cuba térmica para controle de temperatura, ilustrado na Figura 3.8.

Conforme é possível observar na Figura 3.8, o ligante asfáltico foi modificado no interior de latas de 3,6 litros, sendo produzidos, em cada batelada, aproximadamente 2.800 gramas de ligante modificado.

Tendo-se como objetivo a esfoliação da nanoargila e o escoamento adequado do polímero na matriz asfáltica e, conseqüentemente, a completa dispersão dos modificadores, adotou-se a temperatura de modificação de 180 °C, velocidade de cisalhamento de 5.000 rpm e o período de compatibilização de 180 minutos após a mistura visual dos materiais.

Figura 3.8 - Misturador de alto cisalhamento Silverson L5M-A e cuba térmica.



Fonte: Autora (2017).

A modificação do ligante foi conduzida conforme procedimento descrito a seguir:

- 1) Pesagem do ligante asfáltico puro;
- 2) Pesagem dos modificadores de acordo com o peso de CAP 50-70 e com os teores definidos para a modificação;
- 3) Aquecimento, em estufa, do ligante asfáltico puro, até a temperatura de 170 °C;
- 4) Inserção da lata de CAP 50-70 na cuba térmica acoplada ao misturador de alto cisalhamento (previamente aquecida) e imersão das cabeças de trabalho cislhantes (conjunto Duplex) no material;
- 5) Aguardo da estabilização da temperatura do conjunto em 170 °C;
- 6) Aumento gradativo da velocidade do misturador até serem atingidas 5.000 rpm e temperatura de 180 °C;
- 7) Inserção do polímero SBS no CAP 50-70, a partir de uma taxa média de incorporação de 5 g/min;
- 8) Inserção da nanoargila organofílica no ligante, a partir de uma taxa média de incorporação de 5 g/min;

- 9) Aguardo de um período de compatibilização de 180 minutos, mantendo-se a velocidade do misturador em 5.000 rpm e a temperatura do ligante em  $180\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Este procedimento consiste em uma adaptação do procedimento adotado por Melo (2014) para modificar um ligante CAP 50-70 com um teor de 3% de nanoargila. A partir de um período de mistura de 100 minutos com temperatura de  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  e velocidade de 5.000 rpm, o autor verificou a completa esfoliação do nanomaterial. Neste trabalho, devido à adição simultânea do SBS, aumentou-se a temperatura de modificação para  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  (para garantir o livre escoamento do polímero) e o tempo de compatibilização para 180 minutos.

Posteriormente, para verificar o tipo de estrutura formado pela nanoargila (intercalada / esfoliada) na matriz asfáltica modificada com polímero SBS e com nanoargila, foram realizados ensaios de difratometria de raios X (DRX) com o ligante modificado. Nesta etapa, foram avaliados os tempos de compatibilização de 60, 100, 120 e 180 minutos e os resultados destes ensaios foram comparados àqueles realizados por Melo (2014) para o pó de nanoargila e para o ligante asfáltico contendo 3% deste modificador.

Os ensaios de DRX foram realizados no Laboratório de Caracterização Microestrutural (LCM) da UFSC, em um difratômetro do modelo X-Pert, com radiação  $k\alpha$  de Cu. Assim como no trabalho de Melo (2014), foram conduzidas varreduras entre  $1$  e  $90^{\circ}$ , com passo de  $0,02^{\circ}/\text{segundo}$ . Os resultados destes ensaios foram avaliados de acordo com a Lei de Bragg (Equação 3.1).

$$n\lambda = 2d \text{ sen}\theta \quad (3.1)$$

onde:

$n$  = ordem de difração (considerada igual a 1);

$\lambda$  = comprimento de onda da radiação de raios X (igual a  $1,5418\text{ \AA}$ );

$d$  = espaçamento basal, em  $\text{\AA}$ ;

$\theta$  = ângulo de difração, em  $^{\circ}$ .

Paralelamente, com o objetivo de avaliar a dispersão do polímero na matriz asfáltica, foram realizados ensaios de microscopia de fluorescência. Assim como nos ensaios de DRX, neste caso também foram avaliados os tempos de compatibilização de 60, 100, 120 e 180 minutos.

Estes ensaios foram realizados no Laboratório Multiusuário de Estudos em Biologia (LAMEB) da UFSC, com um microscópio Olympus modelo BX41 e aumento entre 100× e 400×. A magnificação de 100× foi adotada tomando-se como referência o trabalho de Sengoz e Isikyakar (2007), que também apresentaram resultados de microscopia de um CAP 50-70 modificado com 2% de SBS, entre outras porcentagens.

Apesar de serem analisados diferentes tempos de compatibilização nos ensaios de DRX e de microscopia, o tempo adotado para a compatibilização do ligante modificado foi de 180 minutos, uma vez que o cronograma para desenvolvimento do programa experimental deste trabalho não comportava a avaliação prévia dos resultados destes ensaios<sup>2</sup>.

Adicionalmente, também foi avaliado o efeito do envelhecimento do ligante asfáltico durante o período de modificação a 180 °C, a partir de ensaios de penetração (ABNT NBR 6576) e de ponto de amolecimento (ABNT NBR 6560). Foram comparados ensaios realizados com um CAP 50-70 virgem, sem modificação, e, paralelamente, com o mesmo ligante submetido ao procedimento definido para a modificação (temperatura de 180 °C e tempo de 180 minutos, no misturador de alto cisalhamento), porém sem a adição dos modificadores. Deste modo, foi possível mensurar a influência exclusiva da alta temperatura durante a modificação do ligante asfáltico.

Como referência comparativa, estes resultados foram confrontados com os limites estabelecidos pela Especificação Brasileira de Cimento Asfáltico de Petróleo (ANP, 2005) para um CAP 50-70 submetido ao envelhecimento em curto prazo (efeitos do calor e do ar a 163 °C por 85 minutos em estufa RTFOT).

A caracterização do ligante asfáltico modificado por SBS e por nanoargila foi realizada a partir de amostras do material virgem. Com este ligante, foram realizados os ensaios tradicionais de caracterização apresentados na Tabela 3.6, que também relaciona as respectivas normas adotadas.

---

<sup>2</sup> O equipamento de difratometria de raios X passava por manutenção preventiva na época da realização deste ensaio. Além disso, a primeira leva de ligantes preparados não apresentou coerência de resultados, sendo necessária a preparação de uma nova bateria de ligantes. Por este motivo, adotou-se previamente o tempo de compatibilização de 180 minutos.

Tabela 3.6 - Propriedades tradicionais avaliadas na caracterização do ligante modificado.

<b>Propriedade</b>	<b>Norma</b>
Penetração	ABNT NBR 6576
Ponto de amolecimento	ABNT NBR 6560
Recuperação elástica	ABNT NBR 15086
Separação de fase	ABNT NBR 15166
Viscosidade aparente	ABNT NBR 15184

Fonte: Autora (2017).

Os resultados dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento, recuperação elástica, separação de fase e viscosidade aparente obtidos neste trabalho foram comparados, posteriormente, aos resultados obtidos por Melo (2014) e por Marcon (2016).

No caso da recuperação elástica, uma vez que esta propriedade havia sido determinada anteriormente somente para o ligante Flexpave 60/85, por Marcon (2016), também foram realizados nesta pesquisa ensaios de recuperação elástica para um CAP 50-70 (de referência), um modificado com 3% de nanoargila, um modificado com 3% de nanoargila e 2% de SBS e um modificado apenas com 2% de SBS. Esta última determinação foi realizada com o objetivo de avaliar a influência da nanoargila na retenção da recuperação elástica do CAP 50-70 modificado simultaneamente por nanoargila e por SBS, quando comparado ao CAP modificado somente por SBS, fixando-se o mesmo teor de polímero.

Para o ensaio de separação de fase, foram avaliadas amostras com períodos de estocagem de 24 e 48 h, sendo este último intervalo de tempo recomendado pela ABNT NBR 15166. Estes ensaios indicam o nível de compatibilidade e a possibilidade de estocagem dos ligantes asfálticos e os resultados obtidos a partir dos mesmos foram posteriormente comparados ao limite estabelecido pela Especificação Brasileira de Asfalto-Polímero (ANP, 2010).

A viscosidade aparente do ligante asfáltico modificado foi determinada nas temperaturas de 135 °C (20 rpm), 150 °C (50 rpm) e 177 °C (100 rpm), com a utilização de um viscosímetro rotacional Brookfield, equipado com *spindle* 21. Os resultados destes ensaios também foram comparados aos limites de viscosidade estabelecidos pela ANP (2010), sendo posteriormente aplicados na determinação da curva viscosidade *versus* temperatura do ligante asfáltico modificado. A partir desta curva, foram obtidas as temperaturas de usinagem (correspondente

a viscosidade do ligante de 0,17 Pa.s) e de compactação (0,28 Pa.s) das misturas asfálticas. Para os agregados, na usinagem, adotou-se a temperatura do ligante acrescida de 10 °C.

### 3.3 ETAPA 3 – PROJETO DA MISTURA ASFÁLTICA

Para o desenvolvimento do estudo de dosagem da mistura asfáltica modificada com 3% de nanoargila organofílica e 2% de polímero SBS foram aplicados os princípios da metodologia de dosagem Superpave, realizando-se a moldagem de corpos de prova no Compactador Giratório (Prensa de Cisalhamento Giratório – PCG).

Deste modo, assim como estabelecido nos trabalhos de Melo (2014) e de Marcon (2016), a dosagem foi conduzida de acordo com as recomendações das normas AASHTO M 323 e AASHTO R 35.

No projeto da mistura, além de critérios volumétricos e de teor máximo de fíler, também foram obedecidos requisitos de resistência à ação deletéria da água (ensaio Lottman modificado), conforme detalhado na sequência.

#### 3.3.1 Determinação do teor de ligante de projeto

A dosagem da mistura asfáltica desenvolvida neste trabalho foi conduzida considerando-se um tamanho nominal máximo de agregado de 19 mm e um projeto de mistura para rodovia de alto volume de tráfego (que é o caso do Contorno de Araranguá).

Em função destas informações, segundo as recomendações da norma AASHTO M 323, o teor de ligante de projeto corresponde àquele em que são atendidos, simultaneamente, os seguintes critérios volumétricos:

- Volume de vazios no  $N_9$  giros ( $V_v@N_{inicial}$ ) > 11% (equivalente a  $\%G_{mm}@N_{inicial} < 89\%$ );
- Volume de vazios no  $N_{125}$  giros ( $V_v@N_{projeto}$ ) = 4%, (equivalente a  $\%G_{mm}@N_{projeto} = 96\%$ );
- Volume de vazios no  $N_{205}$  giros ( $V_v@N_{máximo}$ ) > 2% (equivalente a  $\%G_{mm}@N_{final} < 98\%$ );
- Volume de vazios do agregado mineral ( $VAM$ )  $\geq 13\%$ ;
- $65\% < \text{Relação betume / vazios (RBV)} < 75\%$ .

Além disso, também foram obedecidos os limites para a relação pó/betume efetivo (*RPB*), sendo recomendados, para este projeto, resultados entre 0,8 e 1,6.

Neste sentido, com o objetivo de determinar o teor de ligante de projeto da mistura asfáltica desenvolvida nesta pesquisa, a dosagem foi conduzida a partir da avaliação das propriedades volumétricas de misturas produzidas com teores de 4,0%, 4,5% e 5,0%.

As porcentagens mencionadas anteriormente foram adotadas como estimativas preliminares baseando-se nos resultados das pesquisas de Melo (2014) e de Marcon (2016), que determinaram, para misturas com a mesma granulometria, teores de ligante de projeto entre 4,10% e 4,50%.

De modo a proceder à verificação dos critérios de projeto a serem obedecidos pelas misturas, foram realizados ensaios de massa específica máxima medida ( $G_{mm}$ , procedimento Rice) e de massa específica aparente ( $G_{mb}$ ). As misturas produzidas com esta finalidade, assim como as demais misturas preparadas durante o desenvolvimento desta pesquisa, foram produzidas obedecendo-se às recomendações da norma AASHTO R 30.

Quanto à  $G_{mm}$ , esta foi determinada para o teor de ligante de 4,50% por meio de ensaios realizados conforme o procedimento Rice, preconizado pela norma ABNT NBR 15619. De posse da média do resultado de quatro ensaios consecutivos realizados para este teor, foram determinados os valores da  $G_{mm}$  para os demais teores (4,0% e 5,0%), procedimento este possibilitado por meio da aplicação dos cálculos apresentados nas Equações 3.2 e 3.3, que também foram adotados na pesquisa de Melo (2014).

$$G_{se} = \frac{100 - P_l}{\frac{100}{G_{mm}} - \frac{P_l}{G_l}} \quad (3.2)$$

$$G_{mm} = \frac{100}{\frac{P_{ag}}{G_{se}} + \frac{P_l}{G_l}} \quad (3.3)$$

onde:

$G_{se}$  = massa específica efetiva da composição de agregados, em g/cm<sup>3</sup>;

$G_{mm}$  = massa específica máxima medida da mistura asfáltica, em g/cm<sup>3</sup>;

$P_l$  = teor de ligante asfáltico, em %;

$P_{ag}$  = percentual de agregados da mistura, em %;  
 $G_l$  = massa específica do ligante, em g/cm<sup>3</sup>.

A determinação da massa específica aparente ( $G_{mb}$ ) das misturas de concreto asfáltico, por sua vez, foi realizada a partir da aplicação da norma ABNT NBR 15573. Para tanto, foram previamente moldados, no Compactador Giratório Superpave (PCG), um total de nove corpos de prova (três para cada teor de ligante em estudo), todos com diâmetro de 150 mm e altura de, aproximadamente, 100 mm. Na moldagem destes corpos de prova, foram fixados o ângulo de compactação (1,25°), a pressão de compactação (0,6 MPa) e a velocidade de giro (30 rpm).

Para a definição do teor de ligante de projeto, a moldagem dos nove corpos de prova foi prosseguida até ser atingido o  $N_{projeto}$ , correspondente, neste caso, ao  $N_{125\text{ giros}}$ .

A partir dos resultados obtidos para a  $G_{mm}$  e para a  $G_{mb}$  (com o  $N_{9\text{ giros}}$  e com o  $N_{125\text{ giros}}$ ), bem como de dados complementares do projeto, foram realizados os cálculos para a determinação dos requisitos estabelecidos pela metodologia de dosagem Superpave, conforme Equações 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7, adaptadas de Melo (2014).

$$V_v = 100 - \%G_{mm}@N_{projeto} \quad (3.4)$$

$$VAM = 100 - \left( \frac{\%G_{mm}@N_{projeto} \times G_{mm} \times P_{ag}}{G_{sb}} \right) \quad (3.5)$$

$$RBV = 100 \times \left( \frac{VAM - V_v@N_{projeto}}{VAM} \right) \quad (3.6)$$

$$RPB = \frac{\% \text{passante \#200}}{P_{le}} \quad (3.7)$$

onde:

$V_v$  = volume de vazios da mistura asfáltica, em %;

$\%G_{mm}@N_{projeto}$  = porcentagem da massa específica máxima medida atingida durante a moldagem realizada no compactador giratório, de acordo com o número de giros estabelecido, em %;

$VAM$  = vazios do agregado mineral, em %;

$G_{mm}$  = massa específica máxima medida para uma mistura asfáltica, de acordo com determinado teor de ligante, em g/cm<sup>3</sup>;

$P_{ag}$  = porcentagem de agregados na mistura asfáltica, em %;

$G_{sb}$  = massa específica aparente da composição de agregados, em g/cm<sup>3</sup>;

$RBV$  = relação betume/vazios, em %;

$RPB$  = relação pó/betume, em decimal;

$P_{le}$  = teor de ligante efetivo da mistura, em %.

### 3.3.2 Avaliação do dano por umidade induzida

De acordo com as recomendações da norma AASHTO R 35, após a definição do teor de ligante de projeto, foi realizada a avaliação da ação deletéria da água na mistura asfáltica estudada. Com esta finalidade, foi aplicado o ensaio de Lottman modificado (ABNT NBR 15617).

Para tanto, foram moldados seis corpos de prova com o soquete Marshall, todos com diâmetro próximo a 100 mm, volume de vazios entre 6,0% e 8,0% e teor de ligante igual àquele definido no estudo de dosagem.

Dos seis corpos de prova moldados, segundo recomendações da norma ABNT NBR 15617, três permaneceram em repouso enquanto os outros três foram submetidos a um condicionamento diferenciado, em três etapas: (1) saturação entre 55% e 80%; (2) congelamento durante 16 horas à temperatura de -18 °C; e (3) banho em água durante 24 horas + 1 hora à temperatura de 60 °C.

Posteriormente, todos os corpos de prova foram rompidos para a determinação da resistência à tração indireta, na temperatura de 25 °C, determinando-se a relação entre a resistência do grupo condicionado e do grupo não condicionado ( $RT_1/RT_2$ ). Para a aceitação da mistura de projeto, conforme recomendado por Bernucci et al. (2008) e por outros trabalhos da literatura, o resultado obtido deve ser maior do que 70%.

### 3.4 ETAPA 4 – MOLDAGEM DAS PLACAS E SERRAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Esta etapa da pesquisa compreendeu a moldagem de placas de concreto asfáltico para a realização dos ensaios de avaliação do comportamento reológico e do desempenho mecânico da mistura estudada.

Foram moldadas placas com dimensões de 50 × 18 × 5 cm para ensaios de deformação permanente e placas com dimensões de 60 × 40

× 9 cm para ensaios de módulo complexo e de fadiga, conforme detalhado na sequência.

### **3.4.1 Moldagem das placas de concreto asfáltico**

Neste trabalho, foram moldadas quatro placas para ensaios de deformação permanente e três para ensaios de módulo complexo e fadiga. Ambas as placas foram compactadas na mesa compactadora LCPC, desenvolvida pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*.

A compactação foi conduzida de acordo com as recomendações da norma francesa AFNOR NF P 98-250-2. Considerando-se que o projeto da mistura é para uma rodovia de tráfego pesado, adotou-se o procedimento de compactação forte “tipo 2 bis” para as placas maiores e o procedimento forte “tipo 2” para as menores.

Na moldagem, buscou-se a obtenção de uma porcentagem de vazios de 4%. Para isto, a massa asfáltica a ser compactada foi previamente determinada a partir da massa específica aparente ( $G_{mb}$ ) da mistura (obtida no procedimento de dosagem) e do volume de cada molde.

Após a moldagem, para as placas de deformação permanente, foram determinadas suas porcentagens de volume de vazios (%). Nesta etapa, assim como na etapa de dosagem, a massa específica aparente do concreto asfáltico ( $G_{mb}$ ) foi obtida segundo as recomendações da norma ABNT NBR 15573.

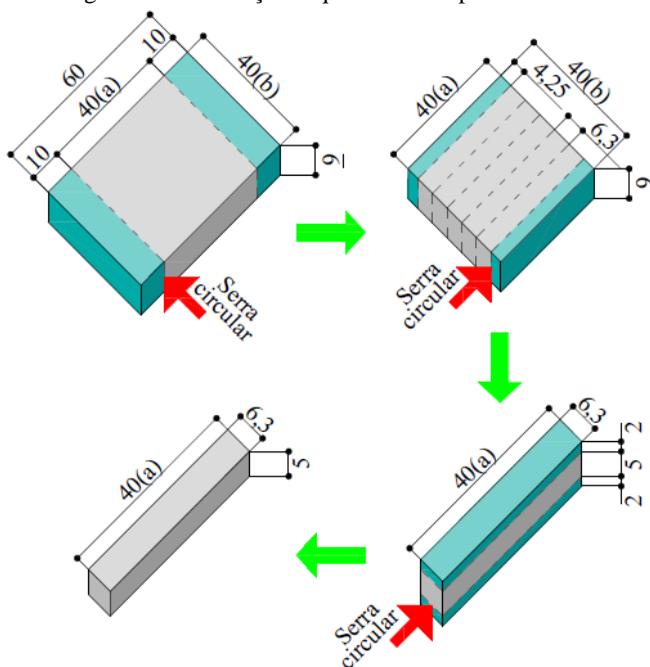
### **3.4.2 Serragem de corpos de prova prismáticos**

Depois da moldagem das placas com dimensões de  $60 \times 40 \times 9$  cm, as mesmas permaneceram em repouso por um período mínimo de 15 dias. Após este “período de cura”, foram serradas para a obtenção dos corpos de prova prismáticos para ensaios de módulo complexo e fadiga. O procedimento de serragem é ilustrado na Figura 3.9.

Assim, para cada placa serrada, foram obtidos cinco corpos de prova, cada qual com dimensões próximas a  $6,3 \times 5,0 \times 40,0$  cm, totalizando-se quinze corpos de prova para a posterior realização dos ensaios de módulo complexo e de fadiga.

Após a serragem, todos os corpos de prova foram caracterizados em função de propriedades geométricas (EN 12697-29) e volumétricas (ABNT NBR 15573).

Figura 3.9 - Ilustração esquemática do plano de corte.



Nota: dimensões em centímetros.

Fonte: Autora (2017).

### 3.5 ETAPA 5 – AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO E MECÂNICO

#### 3.5.1 Comportamento reológico

A caracterização reológica da mistura asfáltica modificada por nanoargila e por SBS foi realizada a partir de resultados de módulo complexo, obtidos por meio de ensaios de flexão alternada no aparato de teste quatro pontos. Para esta caracterização, foram ensaiados dois dos quinze corpos de prova prismáticos confeccionados na Etapa 4.

Estes ensaios foram realizados em conformidade com as recomendações da norma europeia EN 12697-26, sendo conduzidos sob aplicação de carregamento sinusoidal e amplitude de deformação de 50  $\mu\epsilon$ .

A partir da aplicação desta deformação específica, foi avaliado o comportamento reológico da mistura em frequências de 0,1 Hz, 0,2 Hz,

0,5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz, e temperaturas de 0 °C, 5 °C, 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C e 30 °C. Para cada combinação de frequência e temperatura de ensaio, foram aplicados 100 ciclos de carregamento, considerando-se como resultados os registros do centésimo ciclo.

Para a interpretação dos resultados, foram analisadas curvas isotérmicas, curvas mestras, curvas isócronas, espaços de Black e planos Cole-Cole. As curvas mestras foram obtidas a partir da translação das isotérmicas por meio da equação de Williams-Landel-Ferry (Equação 3.8), cujas constantes  $C_1$  e  $C_2$  foram calculadas com o auxílio do *software* Viscoanalyse, desenvolvido pelo LCPC.

$$\log \alpha_T = \frac{C_1(T - T_{ref})}{C_2 + T - T_{ref}} \quad (3.8)$$

onde:

$\alpha_T$  = fator de translação horizontal de uma determinada curva isotérmica;

$C_1$  e  $C_2$  = parâmetros do modelo, sendo  $C_1$  adimensional e  $C_2$  em K;

$T$  = temperatura de uma determinada curva isotérmica que se queira transladar, em K;

$T_{ref}$  = temperatura da curva isotérmica de referência, em K.

### 3.5.2 Comportamento mecânico

#### 3.5.2.1 Deformação permanente

Nesta pesquisa, a previsão do desempenho da mistura asfáltica à deformação permanente foi avaliada de acordo com ensaios realizados no equipamento francês *Orniéreur*, conforme a norma francesa AFNOR NF P 98-253-1. Estes ensaios foram realizados somente após um “período de cura” mínimo de 15 dias da moldagem das placas.

O equipamento *Orniéreur* permite o ensaio simultâneo de duas placas, que são submetidas ao carregamento de um eixo simples de roda simples, com intensidade de 5 kN, pressão de insuflagem dos pneus de 0,6 MPa e frequência de 1 Hz, na temperatura de 60 °C. Para este ensaio, entre as quatro placas moldadas com dimensões apropriadas, foram ensaiadas as duas que apresentaram volume de vazios mais próximo àquele definido no estudo de dosagem (4%).

Ao longo do ensaio, foi medida a evolução da trilha de roda formada pelo carregamento imposto. As medidas de deformação foram

registradas em 15 pontos distintos de cada placa, de acordo com as recomendações da norma AFNOR NF P 98-253-1, e repetiram-se nos ciclos 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000.

Ao término do ensaio, os resultados foram expressos em termos de curva de deformação permanente, que relaciona o número de ciclos aplicado à deformação média medida da trilha de roda (em termos de porcentagem em relação à altura inicial da placa).

Foi estabelecida, desta forma, uma hierarquia entre a resistência à deformação permanente da mistura asfáltica desenvolvida neste trabalho e das misturas estudadas por Melo (2014) e por Marcon (2016). Além disso, os resultados aos 30.000 ciclos foram comparados aos limites estabelecidos pelas diretrizes francesa (LCPC, 2007) e europeia (COST 333, 1999).

### 3.5.2.2 Fadiga

Os ensaios de resistência à fadiga também foram realizados no aparato de teste quatro pontos, sob flexão alternada e deformação controlada. Para a condução destes ensaios, foram obedecidas as recomendações da norma EN 12697-24.

Deste modo, foram realizados ensaios em diferentes níveis de deformação, entre 100 e 300  $\mu\epsilon$ , mantendo-se constantes a temperatura e a frequência de carregamento.

A temperatura para a realização destes ensaios foi definida a partir dos resultados obtidos na Etapa 5 (item 3.5.1, correspondente àquela de maior nível de dissipação de energia segundo o plano Cole-Cole) e com base na temperatura média da região onde se inserem os Segmentos Monitorados do Contorno de Araranguá.

Quanto à frequência de carregamento, esta foi adotada como sendo igual a 10 Hz, tendo-se como objetivo a simulação de um carregamento na velocidade de 72 km/h em campo.

Como critério de ruptura do concreto asfáltico, estabeleceu-se a redução de 50% do módulo complexo inicial do material, este último determinado no centésimo ciclo de carregamento para cada corpo de prova ensaiado.

Ao término dos ensaios, foi possível a obtenção do modelo fadiga da mistura asfáltica modificada, na forma da Equação 3.9:

$$N = k(\epsilon_t)^{-n} \quad (3.9)$$

onde:

$N$  = número de repetições do carregamento até se atingir 50% da rigidez inicial do concreto asfáltico;

$\varepsilon_t$  = deformação específica máxima de tração verificada no material;

$k, n$  = constantes dependentes sobretudo da rigidez e do teor de asfalto da mistura.

Assim como mencionado para os resultados de deformação permanente, também foi estabelecida uma hierarquia entre a curva de fadiga da mistura desenvolvida neste trabalho e as curvas das misturas estudadas por Melo (2014) e por Marcon (2016).

### 3.6 ETAPA 6 – SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E PREVISÃO DO DESEMPENHO À FADIGA

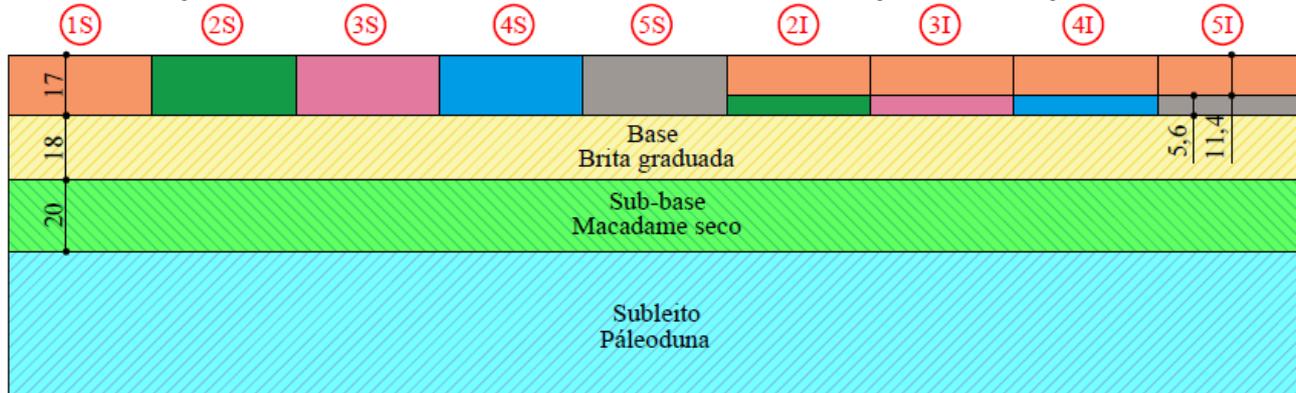
Esta etapa teve como finalidade a previsão do desempenho à fadiga de revestimentos asfálticos executados com a mistura 3% NA + 2% SBS e demais misturas mencionadas neste trabalho.

As simulações numéricas foram realizadas no *software* ViscoRoute 2.0, desenvolvido pelo LCPC, e tiveram como objetivo a estimativa das deformações de tração sofridas pelas fibras inferiores das camadas asfálticas durante a passagem dos veículos.

Estas deformações foram posteriormente aplicadas aos modelos de fadiga apresentados na Etapa 5 (item 3.5.2.2), admitindo-se, neste momento, a correspondência dos respectivos resultados ao  $N_{8,2t}$  (número de solicitações equivalentes ao eixo padrão de 8,2 tf) segundo a metodologia do USACE (*United States Army Corps of Engineers*) e um fator-campo laboratório igual a 1.

As estruturas consideradas nas simulações são apresentadas na Figura 3.10, com revestimentos em camadas singulares e integradas. Para efeitos deste trabalho, entende-se como revestimento em camada singular aquele que é executado com um mesmo tipo de mistura asfáltica, e como revestimento em camadas integradas o que é executado a partir da combinação de camadas de diferentes tipos de misturas. As estruturas 1S (camada singular de revestimento convencional) e 5I (camadas integradas de revestimento convencional e modificado com borracha moída de pneus) foram executadas nos Segmentos Monitorados do Contorno de Araranguá, sendo as demais análogas a elas.

Figura 3.10 - Estruturas simuladas com revestimentos em camadas singulares (S) e integradas (I).



- Revestimento asfáltico convencional - CAP 50-70
- Revestimento asfáltico modificado - 3% NA + 2% SBS
- Revestimento asfáltico modificado - 3% NA
- Revestimento asfáltico modificado - SBS 60/85
- Revestimento asfáltico modificado - BMP (borracha moída de pneus)

Nota: <sup>1</sup> Dimensões em centímetros. <sup>2</sup> No Contorno de Araranguá, foram executados os Segmentos de estruturas 1S e 5I, que estão sendo monitorados. As demais estruturas se prestaram para o desenvolvimento da análise mecanicista e da previsão de desempenho caso os Segmentos fossem executados da forma como ilustrado na figura.

Fonte: Autora (2017).

Para a realização das simulações, as camadas asfálticas foram caracterizadas em função dos parâmetros reológicos do modelo de Huet-Sayegh. No caso da mistura 3% NA + 2% SBS, estes parâmetros foram ajustados a partir dos ensaios de módulo complexo realizados na Etapa 5 (seção 3.5.1) deste trabalho, com o auxílio do *software* Viscoanalyse. Para as camadas de revestimento constituídas pelas misturas convencional, modificada com borracha moída de pneu (BMP), 3% NA e SBS 60/85, os parâmetros reológicos do modelo de Huet-Sayegh foram obtidos dos trabalhos de Melo (2014) e de Marcon (2016).

Os parâmetros elásticos das camadas de base, sub-base e subleito também foram considerados iguais àqueles obtidos por Melo (2014) e são apresentados na Tabela 3.7. Na determinação dos módulos elásticos das camadas, o autor realizou a retroanálise de bacias deflectométricas com o programa BAKFAA, da FAA (*Federal Aviation Administration*). As bacias foram obtidas com FWD (*Falling Weight Deflectometer*), no mês de abertura do Contorno de Araranguá ao tráfego (março de 2014).

Tabela 3.7 - Parâmetros elásticos das camadas de base, sub-base e subleito.

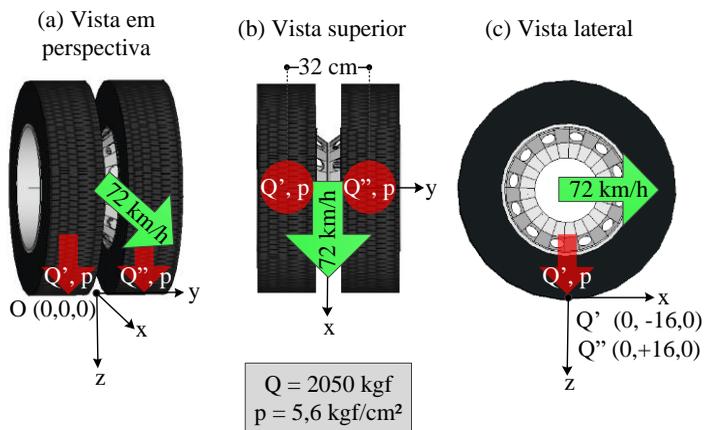
<b>Camada</b>	<b>Módulo (MPa)</b>	<b>Coefficiente de Poisson</b>
Base – Brita graduada	260	0,35
Sub-base – Macadame seco	210	0,35
Subleito – Páleoduna	180	0,35

Fonte: Adaptado de Melo (2014).

A temperatura considerada nas simulações correspondeu àquela em que foram realizados os ensaios de fadiga, conforme definido na Etapa 5 (seção 3.5.2.2).

O carregamento aplicado foi o do semieixo do eixo padrão de 8,2 tf, com aplicação de 2050 kgf por roda, pressão de enchimento dos pneus de 5,6 kgf/cm<sup>2</sup> e considerando-se uma velocidade do tráfego de 72 km/h. A configuração deste carregamento é ilustrada na Figura 3.11.

Figura 3.11 - Configuração do carregamento adotado nas simulações.



A partir das simulações realizadas e dos respectivos modelos de fadiga das misturas estudadas, foi possível comparar a previsão de desempenho dos revestimentos singulares e integrados, compostos por misturas convencional, modificada somente por nanoargila, somente por polímero SBS e, simultaneamente, por nanoargila e por SBS. Adicionalmente, estas estimativas também foram comparadas à previsão de vida útil do revestimento em camadas integradas de mistura convencional e modificada por borracha moída de pneus, que foi executado em um dos Segmentos Monitorados de Araranguá.



## 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste Capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Ao longo do texto, estes resultados são expostos de acordo com as 6 etapas definidas no método da pesquisa. Como informado, uma vez que os materiais foram caracterizados por outros autores, os resultados referentes à Etapa 1 foram apresentados no Capítulo 3.

### 4.1 ETAPA 2 – MODIFICAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO CONVENCIONAL E CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE MODIFICADO

Conforme mencionado no Capítulo 3, a modificação do ligante asfáltico CAP 50-70 foi realizada a partir da incorporação de 3% de nanoargila e 2% de polímero SBS na matriz asfáltica pura. Esta modificação foi conduzida de acordo com o procedimento exposto no item 3.2.

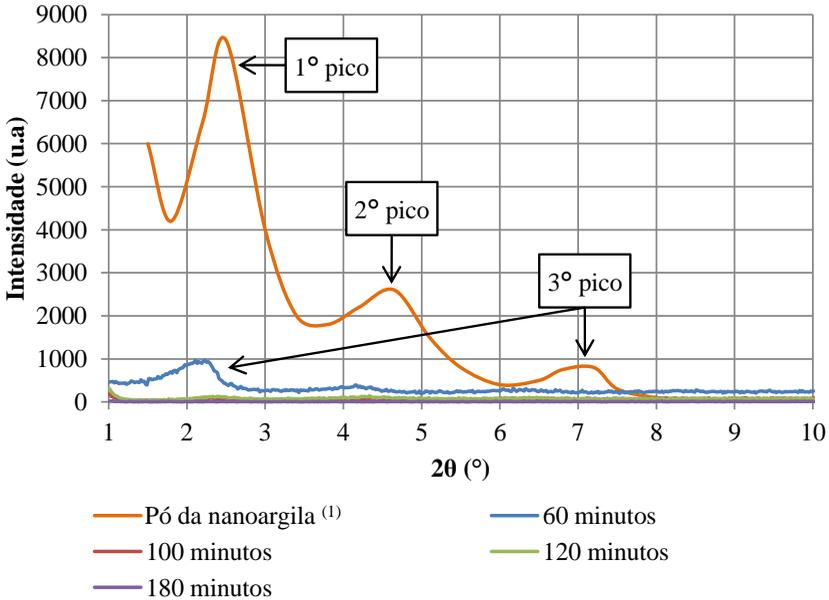
A Figura 4.1 apresenta os resultados dos ensaios de difratometria de raios X realizados para identificar o tipo de estrutura (intercalada/esfoliada) formada pela nanoargila no ligante asfáltico modificado a partir de diferentes tempos de compatibilização (60, 100, 120 e 180 minutos). Cabe lembrar que estes ensaios foram realizados após a adoção do tempo de compatibilização de 180 minutos<sup>3</sup>.

Como se pode observar na Figura 4.1, para o tempo de compatibilização de 60 minutos, ocorre a formação de uma estrutura mista (intercalada + esfoliada). Comparando-se o difratograma deste período de tempo com o difratograma do pó da nanoargila (referência), verifica-se a ausência do 1° e do 2° pico (2,51° e 4,57°), seguida por um deslocamento do 3° pico (7,01° para 2,23°). A ausência dos dois primeiros picos indica a esfoliação de parte da nanoargila, enquanto o deslocamento do 3° pico demonstra a formação de uma estrutura intercalada com a parcela restante do nanomaterial (aumento do espaçamento basal de 1,26 nm para 3,96 nm, de acordo com a Lei de Bragg).

---

<sup>3</sup> O equipamento de difratometria de raios X passava por manutenção preventiva na época da realização deste ensaio. Além disso, a primeira leva de ligantes preparados não apresentou coerência de resultados, sendo necessária a preparação de uma nova bateria de ligantes. Por este motivo, adotou-se previamente o tempo de compatibilização de 180 minutos.

Figura 4.1 - Resultados da difratometria de raios X para o pó da nanoargila (referência) e para o ligante modificado com diferentes períodos de compatibilização.



Fonte: Autora (2017), com dados de Melo (2014) <sup>(1)</sup> e de autoria própria.

Por outro lado, a análise dos difratogramas dos tempos de compatibilização de 100, 120 e 180 minutos permite observar a ausência de picos. Isto indica que, para períodos de mistura igual ou superiores a 100 minutos, há a formação de estruturas esfoliadas.

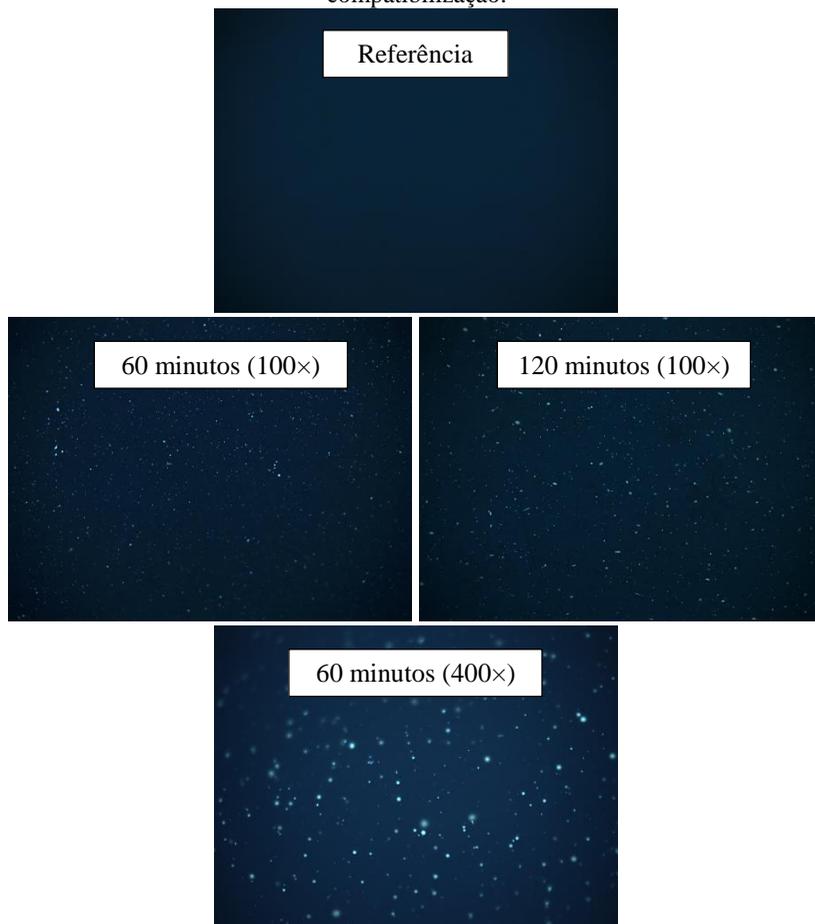
Este resultado encontra-se em concordância com aquele obtido no trabalho de Melo (2014), para a modificação de um CAP 50-70 somente com 3% de nanoargila, tempo de compatibilização de 100 minutos e temperatura de 150 °C. Nestas condições, o autor também demonstrou a completa esfoliação do nanomaterial.

Deste modo, em termos da esfoliação da nanoargila na matriz asfáltica, de acordo com os resultados de DRX, verifica-se que o período de compatibilização de 180 minutos (com temperatura de 180 °C e velocidade de 5.000 rpm) seria superior ao tempo mínimo requerido.

Na Figura 4.2 são ilustrados os resultados dos ensaios de microscopia de fluorescência, que foram realizados com o objetivo de

avaliar a dispersão do polímero SBS no ligante asfáltico. As imagens correspondem às microscopias conduzidas com o ligante de referência e com o ligante modificado, considerando-se tempos de compatibilização de 60 e 120 minutos, com aumento de 100×. Adicionalmente, também é apresentada, com aumento de 400×, a imagem de microscopia obtida para o período de compatibilização de 60 minutos.

Figura 4.2 - Resultados da microscopia de fluorescência para o ligante 50-70 (referência) e para os ligantes modificados com diferentes tempos de compatibilização.



Fonte: Autora (2017).

De maneira geral, o aspecto morfológico ilustrado na Figura 4.2 para o ligante modificado, considerando-se ambos os tempos de compatibilização, retrata a existência de uma fase asfáltica contínua, com pequenos glóbulos de polímero inchado dispersos de maneira homogênea. Este aspecto se deve ao baixo teor de SBS incorporado e apresenta-se em concordância com os resultados apresentados por Sengoz e Isikyakar (2007), que também conduziram ensaios de microscopia com um CAP 50-70 modificado por SBS, com teores entre 2% e 6%.

Nesta direção, nota-se que o período de compatibilização de 60 minutos seria suficiente para conferir homogeneidade à dispersão do polímero no ligante modificado, não havendo alterações no aspecto morfológico do material entre 60 e 120 minutos.

Por conseguinte, em relação à dispersão do polímero no ligante modificado, a partir dos resultados de microscopia de fluorescência, também se evidencia que o tempo de compatibilização de 180 minutos adotado nesta pesquisa seria superior ao tempo mínimo requerido, como observado anteriormente para a esfoliação da nanoargila.

Neste sentido, para atender, de maneira simultânea, ao requisito de esfoliação da nanoargila e à completa dispersão do polímero, o período de compatibilização de 100 minutos seria suficiente. É possível, então, que o maior tempo de compatibilização adotado possa ter levado a um maior envelhecimento em curto prazo do ligante e, desta forma, levar a alguma redução na resistência à fadiga da mistura.

Assim, para avaliar a influência do envelhecimento do ligante asfáltico durante o período de modificação de 180 minutos a 180 °C, foram realizados ensaios de penetração e de ponto de amolecimento. Estes ensaios foram realizados com amostras do CAP 50-70 virgem e também com amostras do mesmo ligante submetido ao procedimento adotado para a modificação, porém sem a adição dos modificadores. Os resultados são apresentados na Tabela 4.1.

De acordo com os resultados obtidos, observa-se que o efeito da temperatura durante o período de modificação no misturador de alto cisalhamento ocasiona uma redução de 24,6% na penetração (penetração retida de 75,4%) e um aumento de 7,7% no ponto de amolecimento (3,7 °C) do material asfáltico.

Segundo a Especificação Brasileira de Cimento Asfáltico de Petróleo (ANP, 2005), para um CAP 50-70 submetido ao envelhecimento em curto prazo no RTFOT, admite-se o mínimo de 55% de penetração retida e o aumento máximo no ponto de amolecimento de

8 °C. Desta maneira, a título de balizamento, verifica-se que os valores referentes às mudanças induzidas nas propriedades do ligante convencional durante o procedimento de modificação a alta temperatura encontram-se dentro dos limites estabelecidos pela ANP (2005) para o envelhecimento do CAP 50-70 em curto prazo e não representariam um envelhecimento inicial excessivo.

Tabela 4.1 - Influência do tempo (180 minutos) e da temperatura (180 °C) de modificação no envelhecimento do ligante asfáltico.

<b>Ligante</b>	<b>Penetração (0,1 mm)</b>	<b>Ponto de amolecimento (°C)</b>
CAP 50-70, virgem <sup>(1)</sup>	57	47,9
CAP 50-70, 180 minutos a 180 °C no misturador de alto cisalhamento, sem adição de modificadores	43	51,6

Fonte: Autora (2017), com dados de Melo (2014) <sup>(1)</sup> e de autoria própria.

Além disso, com base nos resultados apresentados por Galooyak et al. (2010), que simularam o envelhecimento de ligantes modificados no RTFOT, é esperado que os processos de usinagem, transporte e compactação das misturas asfálticas produzidas com este ligante, que serão realizados em temperaturas inferiores, não sejam responsáveis por exceder os limites especificados para o envelhecimento do ligante em curto prazo. Como referência, para um ligante de penetração 85/100 modificado com 2,5% de nanoargila e 5% de SBS, Galooyak et al. (2010) obtiveram a penetração retida de 72,2% e a variação no ponto de amolecimento de 0,4 °C. Para o ligante modificado somente com 5% de SBS, estes valores foram de 68,5% e 2,3 °C, respectivamente. Conforme os autores, estes ganhos estão relacionados ao efeito de barreira formado pelas nanopartículas, que retardam o envelhecimento oxidativo do ligante.

Por outro lado, considerando-se os resultados dos ensaios de DRX e de microscopia de fluorescência, que demonstraram a possibilidade da adoção de tempos de compatibilização menores, infere-se que o envelhecimento induzido ao ligante asfáltico poderia ser atenuado a partir da otimização prévia do tempo de modificação do material. Com isto, possivelmente se poderia alcançar um melhor desempenho da mistura quanto ao comportamento à fadiga, por exemplo, em relação aos obtidos nesta pesquisa.

A caracterização empírica do ligante asfáltico modificado neste trabalho, em termos de penetração e ponto de amolecimento, é apresentada na Tabela 4.2. Estes resultados são expostos em conjunto com os resultados obtidos por Melo (2014), para o ligante de referência (CAP 50-70) e para o ligante modificado somente por nanoargila, e por Marcon (2016), para o ligante modificado somente por SBS. Na tabela, com o intuito de balizar os resultados, também são apresentados os limites estabelecidos pela ANP (2010) para ligantes asfálticos modificados por polímeros elastoméricos de classificação 55/75 (esta classificação corresponde aos ligantes com menores teores de polímero dentre os especificados pela ANP (2010)).

Tabela 4.2 - Penetração e ponto de amolecimento dos ligantes asfálticos.

<b>Ligante</b>	<b>Penetração (0,1 mm)</b>	<b>Ponto de amolecimento (°C)</b>
CAP 50-70 <sup>(1)</sup>	57	47,9
3% NA + 2% SBS	36	56,9
3% NA <sup>(1)</sup>	55	50,2
SBS 60/85 <sup>(2)</sup>	50	73,0
SBS 55/75 <sup>(3)</sup>	45 - 70	Mín. 55,0

Fonte: Autora (2017), com dados de Melo (2014) <sup>(1)</sup>, de Marcon (2016) <sup>(2)</sup>, de autoria própria e limites especificados pela ANP (2010) <sup>(3)</sup>.

De acordo com a Tabela 4.2, em conformidade com os estudos abordados na revisão de literatura (FARIAS et al., 2016; GALOYAK et al., 2010; GOLESTANI; NEJAD; GALOYAK, 2012; GOLESTANI et al., 2015; MERUSI et al., 2014; PAMPLONA et al., 2012), a modificação dos ligantes ocasiona, de modo geral, a diminuição da penetração e o aumento do ponto de amolecimento dos mesmos.

Em termos de desempenho, sobretudo para altas temperaturas, ligantes com menores valores de penetração e maiores valores de ponto de amolecimento tendem a apresentar maior resistência à deformação permanente, visto que são mais rígidos e menos sensíveis à ação da temperatura. Contudo, quanto à fadiga, quando muito duros, podem formar misturas quebradiças.

Como é possível observar na Tabela 4.2, em relação ao CAP 50-70, a adição isolada de nanoargila proporciona um decréscimo relativamente baixo na penetração, apresentando também um aumento relativamente pequeno no ponto de amolecimento. Deste modo, de

acordo com a caracterização empírica, a modificação por nanoargila praticamente não altera a rigidez do ligante e proporciona um ganho suave em relação à sensibilidade à temperatura.

Quanto ao ligante SBS 60/85, também se observa um pequeno aumento na rigidez, porém mais significativo do que o aumento constatado para o ligante 3% NA. Por outro lado, nota-se que o ligante modificado exclusivamente por SBS apresenta grandes ganhos em termos de ponto de amolecimento, sendo, portanto, menos sensível a altas temperaturas. Esta característica, de modo geral, indica misturas asfálticas mais resistentes à deformação permanente.

Para o ligante 3% NA + 2% SBS, também se observa um aumento no ponto de amolecimento, mas não tão expressivo quanto aquele observado para o SBS 60/85. Em contrapartida, em relação à penetração, nota-se que o ligante duplamente modificado apresenta o menor valor entre os ligantes estudados. Este aumento na rigidez também pode indicar a produção de misturas asfálticas mais resistentes à deformação permanente, porém pode significar, paralelamente, perdas em termos de resistência à fadiga.

Comparando-se os resultados obtidos para os diferentes ligantes estudados, de maneira geral, a partir dos ensaios empíricos, espera-se o melhor comportamento à deformação permanente das misturas SBS 60/85 e 3% NA + 2% SBS. No entanto, cabe destacar que a predição do comportamento das misturas asfálticas por meio da caracterização empírica dos ligantes modificados apresenta limitações.

Em relação à especificação da ANP (2010) para o ligante SBS 55/75, nota-se que o 3% NA + 2% SBS atenderia ao limite mínimo estabelecido para o ponto de amolecimento, que não seria atendido pelo CAP modificado somente por nanoargila. Quanto à penetração, pode-se observar que ligante duplamente modificado apresentaria penetração inferior à especificada, sendo que, neste quesito, o 3% NA estaria dentro dos limites da especificação.

Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados dos ensaios de recuperação elástica realizados com os diferentes ligantes asfálticos estudados. A tabela também apresenta o limite mínimo estabelecido pela ANP (2010) para ligantes asfálticos modificados com polímeros elastoméricos.

Conforme se observa, a adição isolada de 3% de nanoargila não proporciona modificação na recuperação elástica do CAP 50-70, pois, como era esperado, este modificador não funciona como um produto elastomérico. Em contrapartida, de acordo com os valores obtidos, a

modificação com 2% de SBS aumenta em cerca de 11 vezes a recuperação do ligante convencional. Adicionando-se, simultaneamente, 3% de nanoargila e 2% de SBS, o aumento passa a ser de cerca de 9 vezes em relação ao CAP 50-70.

Tabela 4.3 - Recuperação elástica dos ligantes asfálticos.

<b>Ligante</b>	<b>Recuperação elástica (%)</b>
CAP 50-70	5
3% NA + 2% SBS	49
3% NA	6
SBS 60/85 <sup>(1)</sup>	90
2% SBS	58
SBS 55/75 <sup>(2)</sup>	Mín. 75

Fonte: Autora (2017), com dados de Marcon (2016) <sup>(1)</sup>, de autoria própria e limite especificado pela ANP (2010) <sup>(2)</sup>.

Comparando-se o valor obtido para o ligante 3% NA + 2% SBS com o resultado verificado para o ligante contendo somente 2% de SBS, observa-se que a presença da nanoargila contribui para a redução da recuperação elástica proporcionada pelo polímero elastomérico. Acredita-se que este fenômeno possa ser justificado em função do enrijecimento do ligante devido à presença do nanomaterial. Resultados semelhantes foram relatados nos trabalhos de Galooyak et al. (2010) e Golestani, Nejad e Galooyak (2012), os quais também observaram que altas proporções de nanoargila em relação aos teores de SBS são responsáveis por reduzir a recuperação elástica fornecida pelo polímero.

Apesar do aumento na recuperação elástica em relação ao CAP 50-70, ainda se observa que o valor obtido para o ligante 3% NA + 2% SBS encontra-se bastante abaixo daquele obtido por Marcon (2016) para o ligante comercial SBS 60/85. Além disso, encontra-se abaixo do valor mínimo (75%) especificado pela ANP (2010) para ligantes asfálticos modificados por polímeros elastoméricos (SBS 55/75). Este valor reduzido deve-se à baixa quantidade relativa de SBS adicionada à matriz asfáltica. Ressalta-se, no entanto, que objetivo da pesquisa não visa o atendimento das especificações, mas sim, o desenvolvimento de um ligante modificado por um nanomaterial e um elastômero que possa apresentar elevado desempenho em serviço.

Na Tabela 4.4 são apresentados os resultados obtidos a partir de ensaios de separação de fase.

Tabela 4.4 - Separação de fase (estabilidade à estocagem) dos ligantes asfálticos.

Ligante	Diferença de ponto de amolecimento (°C)	
	24 h	48 h
3% NA + 2% SBS	0,5	0,8
3% NA <sup>(1)</sup>	1,0	-

Fonte: Autora (2017), com dados de Melo (2014) <sup>(1)</sup> e de autoria própria.

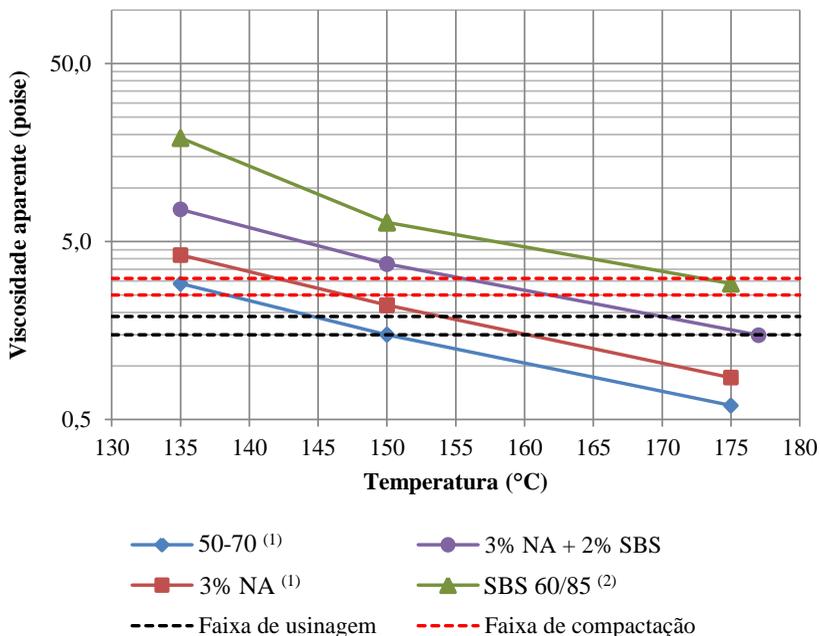
De acordo com a Especificação Brasileira de Asfalto-Polímero (ANP, 2010), o limite máximo aceitável para a diferença de ponto de amolecimento no ensaio de separação de fase é de 5 °C, considerando-se um período de 48 h de estocagem à temperatura de 163 °C. Conforme se observa na Tabela 4.4, o ligante 3% NA + 2% SBS atende ao limite definido pela ANP (2010), estando o resultado bastante abaixo do valor máximo especificado.

Confrontando-se os resultados obtidos com 24 h de estocagem para ambos os ligantes, pode-se admitir que a presença do polímero, nas quantidades adotadas, não exerce influência na estabilidade à estocagem. Por outro lado, Merusi et al. (2014), que adicionaram teores de 4% de nanoargila e 6% de SBS a um ligante 160/220, verificaram que a adição física simultânea dos modificadores aumenta consideravelmente a separação de fase, se comparada à adição isolada de nanoargila e diminui quando comparada à adição exclusiva de SBS.

Da análise destes resultados, pode-se concluir que a influência da adição simultânea dos dois modificadores na estabilidade à estocagem é mais expressiva quando adotados teores mais elevados na modificação e que a presença de SBS é mais influente na separação de fases do que a presença do nanomaterial.

A Figura 4.3 apresenta os resultados de viscosidade em função da temperatura para os diferentes ligantes em estudo. Também são apresentadas as faixas de usinagem (correspondente ao intervalo de viscosidade de  $0,17 \pm 0,02$  Pa.s) e de compactação ( $0,28 \pm 0,03$  Pa.s) das respectivas misturas asfálticas.

Conforme é possível observar, a modificação ocasiona um aumento na viscosidade dos ligantes. Este aumento também foi constatado nos trabalhos de Farias et al. (2016), Galooyak et al. (2010), Golestani, Nejad e Galooyak (2012) e Pamplona et al. (2012).

Figura 4.3 - Curvas viscosidade *versus* temperatura dos ligantes asfálticos.

Fonte: Autora (2017), com dados de Melo (2014)<sup>(1)</sup>, de Marcon (2014)<sup>(2)</sup> e de autoria própria.

Em virtude da viscosidade relativamente elevada, nota-se que os ligantes modificados requerem maiores temperaturas de usinagem e de compactação. No entanto, apesar de mais viscosos, cabe destacar que todos os ligantes modificados relacionados na Figura 4.3 se enquadram nos limites de viscosidade estabelecidos pela Especificação Brasileira de Asfalto-Polímero (ANP, 2010).

Neste trabalho, a partir dos resultados apresentados na Figura 4.3, de acordo com a curva viscosidade *versus* temperatura do ligante 3% NA + 2% SBS, foram adotadas as temperaturas de 173 °C para a usinagem das misturas asfálticas e de 159 °C para a moldagem dos corpos de prova e placas. Na usinagem, adotou-se a temperatura dos agregados igual a 183 °C.

## 4.2 ETAPA 3 – PROJETO DA MISTURA ASFÁLTICA

### 4.2.1 Determinação do teor de ligante de projeto

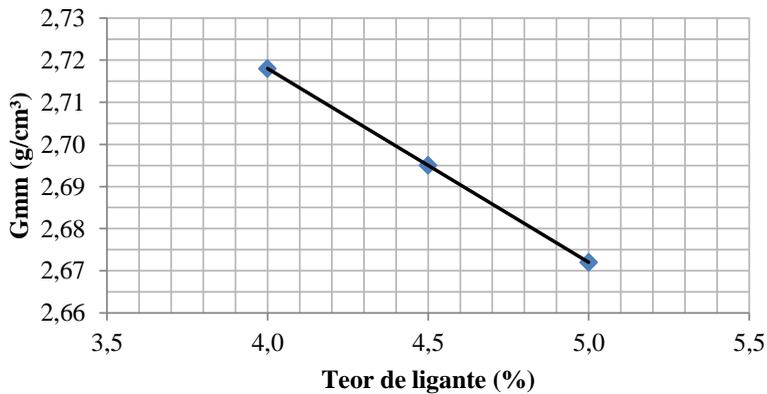
De acordo com o método estabelecido para esta pesquisa, a dosagem da mistura asfáltica modificada com o CAP 3% NA + 2% SBS foi conduzida a partir da avaliação dos critérios da metodologia Superpave para os teores de ligante de 4,0%, 4,5% e 5,0%. Lembra-se que estas porcentagens foram previamente definidas com base nos resultados obtidos por Melo (2014) e Marcon (2016), que empregaram os mesmos agregados e composição granulométrica e obtiveram teores de projeto entre 4,10% e 4,50%, respectivamente.

Na Figura 4.4 são apresentados os valores de massa específica máxima medida ( $G_{mm}$ ) da mistura asfáltica não compactada, em função dos diferentes teores de ligante. Conforme definido no método da pesquisa, a  $G_{mm}$  correspondente ao teor de 4,5% foi obtida a partir da média de 4 determinações sucessivas conduzidas por meio do método Rice, sendo as demais obtidas pela aplicação das Equações 3.2 e 3.3, relacionadas na seção 3.3.1.

Na sequência, nas Figuras 4.5 e 4.6, são apresentados, respectivamente, os dados referentes à massa específica aparente ( $G_{mb}$ ) e às curvas de compactação da mistura asfáltica de acordo com os teores de ligante avaliados. Estes dados foram obtidos a partir da moldagem de corpos de prova no Compactador Giratório Superpave (PCG), aplicando-se o número de giros igual ao  $N_{projeto}$  (125 giros).

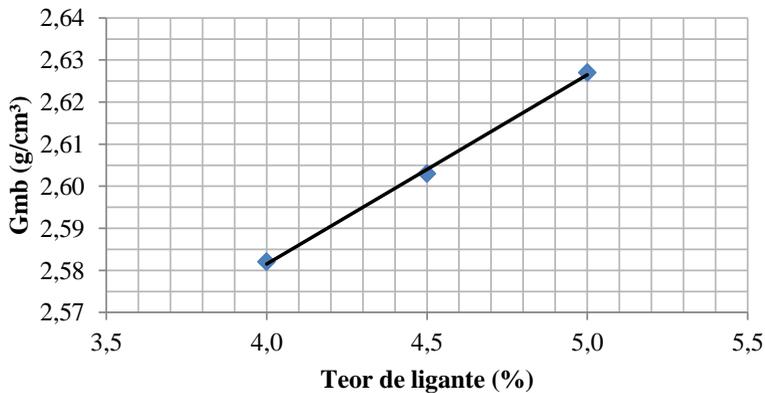
Com base nos resultados de massa específica máxima medida ( $G_{mm}$ ), massa específica aparente ( $G_{mb}$ ) e curvas de compactação, estabeleceu-se a relação entre a porcentagem do volume de vazios dos corpos de prova aos 125 giros e os teores de ligante avaliados neste estudo de dosagem. Esta relação é apresentada na Figura 4.7.

Figura 4.4 - Massa específica máxima medida ( $G_{mm}$ ) da mistura asfáltica em função do teor de ligante.



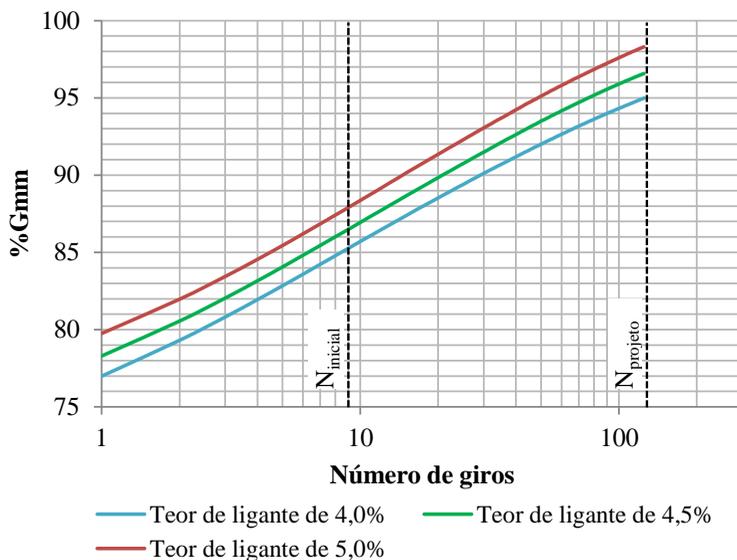
Fonte: Autora (2017).

Figura 4.5 - Massa específica aparente ( $G_{mb}$ ) da mistura asfáltica no  $N_{projeto}$  em função do teor de ligante.

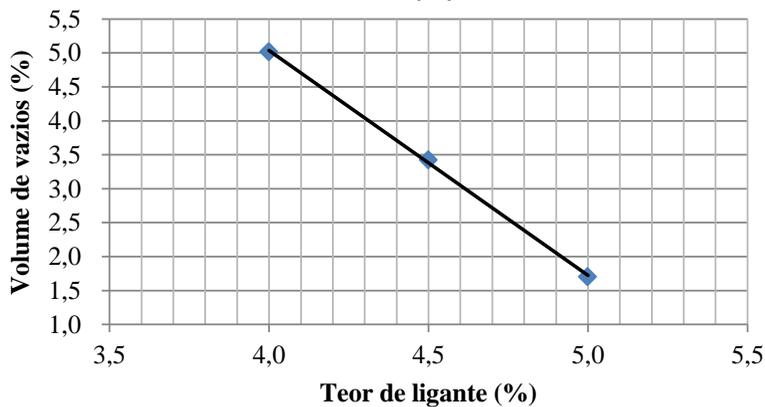


Fonte: Autora (2017).

Figura 4.6 - Curvas de compactação da mistura asfáltica.



Fonte: Autora (2017).

Figura 4.7 - Porcentagem do volume de vazios ( $V_v$ ) em função do teor de ligante, no  $N_{projeto}$ .

Fonte: Autora (2017).

De acordo com a Figura 4.7, atendendo-se ao requisito da metodologia Superpave, que estabelece  $V_v@N_{projeto} = 4\%$  (AASHTO M 323), definiu-se a porcentagem de 4,3% como o teor de ligante de projeto da mistura asfáltica projetada.

Para este teor, foi verificada a adequação dos demais parâmetros de projeto estabelecidos pela metodologia de dosagem, sendo os resultados apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Verificação dos parâmetros de dosagem para o teor de ligante de projeto de 4,3%.

<b>Parâmetro</b>	<b>Critério Superpave<sup>(1)</sup></b>	<b>Resultado</b>
$V_v@N_{projeto}$ (%)	= 4,0	4,0
VAM (%)	≥ 13,0	13,5
RBV (%)	65 - 75	70,3
RPB	0,8 - 1,6	1,5

Fonte: Autora (2017), com dados da AASHTO M 323<sup>(1)</sup> e de autoria própria.

Conforme se observa, todos os critérios requeridos foram simultaneamente atendidos, indicando a adequação do teor de 4,3% para a mistura projetada.

A título de comparação, são apresentados na Tabela 4.6 os resultados das misturas projetadas por Melo (2014) e por Marcon (2016), produzidas com a mesma granulometria e respectivos ligantes asfálticos.

Tabela 4.6 - Resultados das dosagens de misturas com o emprego da mesma granulometria e ligantes asfálticos distintos.

<b>Ligante</b>	<b>Teor de ligante de projeto (%)</b>
CAP 50-70 <sup>(1)</sup>	4,4
3% NA + 2% SBS	4,3
3% NA <sup>(1)</sup>	4,1
SBS 60/85 <sup>(2)</sup>	4,5

Fonte: Autora (2017), com dados de Melo (2014)<sup>(1)</sup>, de Marcon (2016)<sup>(2)</sup> e de autoria própria.

Observando-se os valores expostos na Tabela 4.6, verifica-se que a adição de nanoargila ao ligante convencional reduz o teor de projeto da mistura asfáltica. Por outro lado, para a mistura produzida com

ligante modificado por polímero, este teor sofre um acréscimo em relação à mistura de referência.

Nesta direção, o resultado obtido para a mistura produzida com o ligante 3% NA + 2% SBS apresenta-se coerente, de modo que um valor intermediário é explicado pela melhora na trabalhabilidade da mistura proporcionada pela nanoargila e pela redução de trabalhabilidade ocasionada pela presença do polímero.

No entanto, uma vez que as especificações construtivas vigentes permitem, em campo, variações no teor de ligante de  $\pm 0,3\%$ , pode-se admitir que as diferenças observadas para os diferentes teores de ligante estariam dentro desta tolerância.

#### **4.2.2 Avaliação do dano por umidade induzida**

Para avaliar o efeito da ação deletéria da água na mistura asfáltica, conforme estabelecido no método da pesquisa, foram compactados seis corpos de prova com o teor de ligante de projeto e porcentagem de volume de vazios entre 6,0% e 8,0%. A compactação foi conduzida com o soquete Marshall.

Na Tabela 4.7 são apresentados os resultados dos ensaios de tração indireta conduzidos com os corpos de prova condicionados e não condicionados, além das respectivas porcentagens de volume de vazios. Na Figura 4.8, estes resultados são apresentados em comparação com os resultados obtidos por Melo (2014) e por Marcon (2016).

Conforme se pode observar, para a mistura asfáltica projetada nesta pesquisa, verifica-se uma relação entre a resistência média dos grupos de corpos de prova condicionados e não condicionados ( $RRT = RT_1/RT_2$ ) igual a 1,16. Isto demonstra o comportamento satisfatório da mistura produzida com o ligante 3% NA + 2% SBS quanto ao efeito da ação deletéria da água, uma vez que sua aceitação estaria condicionada ao valor mínimo de 0,70.

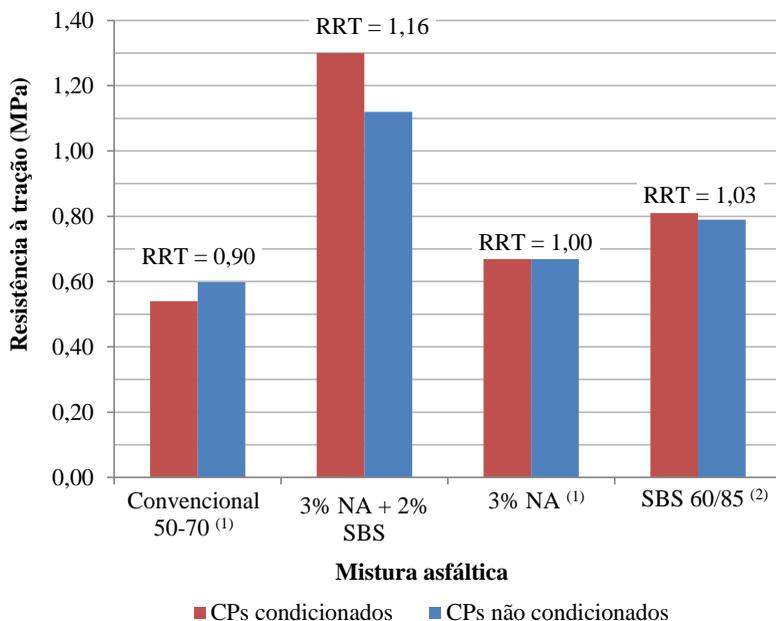
Do mesmo modo, de acordo com os resultados apresentados para as demais misturas asfálticas, desempenhos considerados satisfatórios também haviam sido anteriormente observados nos trabalhos de Melo (2014) e de Marcon (2016), inclusive para a mistura convencional (de referência).

Tabela 4.7 - Resultados de resistência à tração ( $RT$ ) e percentagem de volume de vazios ( $V_v$ ) dos corpos de prova avaliados no ensaio Lottman modificado.

Corpos de prova	$RT$ (MPa)		$V_v$ (%)	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Grupo 1 (condicionados)	1,30	0,10	7,35	0,23
Grupo 2 (não condicionados)	1,12	0,02	7,24	0,51

Fonte: Autora (2017).

Figura 4.8 - Resultados da avaliação em ensaios Lottman modificado para as diferentes misturas asfálticas.



Fonte: Autora (2017), com dados de Melo (2014)<sup>(1)</sup>, de Marcon (2016)<sup>(2)</sup> e de autoria própria.

Entretanto, comparando-se os resultados obtidos para as diferentes misturas, apesar de ambas terem apresentado comportamento satisfatório, é notável o desempenho superior da mistura com o ligante 3% NA + 2% SBS. Além disso, os valores mais elevados de resistência à tração obtidos para esta mistura também merecem destaque.

No que diz respeito ao elevado valor de *RRT*, pode-se afirmar que a ação benéfica isolada da nanoargila e do polímero nas misturas asfálticas é combinada quando da aplicação simultânea de ambos, o que poderia representar uma melhora no comportamento destas misturas em campo frente à alta pluviosidade de muitas regiões brasileiras. Assim, como resultado, tem-se o melhor comportamento da mistura 3% NA + 2% SBS se comparado aos demais apresentados, que é seguido pelo comportamento da mistura SBS 60/85, da mistura 3% NA e da mistura convencional. Na pesquisa de Golestani et al. (2015), a mesma hierarquia foi estabelecida para os valores de *RRT* de misturas análogas.

No caso dos elevados valores obtidos para a resistência à tração da mistura duplamente modificada por nanoargila e por SBS, estes podem ser atribuídos à forte ligação/adesividade estabelecida entre o ligante e os agregados. Adicionalmente, valores elevados de resistência à tração estão relacionados ao aumento da rigidez do ligante asfáltico, conforme observado na caracterização empírica dos ligantes modificados.

#### 4.3 ETAPA 4 – MOLDAGEM DAS PLACAS E SERRAGEM DOS CORPOS DE PROVA

##### 4.3.1 Moldagem das placas de concreto asfáltico

Nesta etapa da pesquisa, foram moldadas quatro placas com dimensões de  $50 \times 18 \times 5$  cm (para posteriores ensaios de deformação permanente) e três com dimensões de  $60 \times 40 \times 9$  cm (para posterior serragem dos corpos de prova para realização de ensaios de módulo complexo e fadiga).

Em ambos os casos, a compactação foi conduzida na mesa compactadora LCPC, tendo-se como objetivo a produção de corpos de prova com porcentagem de volume de vazios igual a 4%.

Na Tabela 4.8 é apresentada a caracterização das placas de concreto asfáltico moldadas para a realização dos ensaios de deformação permanente.

Tabela 4.8 - Caracterização das placas compactadas para ensaios de deformação permanente.

Placa	$V_v$ (%)	Espessura média (mm)	Grau de compactação (%)
1	5,37	52,86	98,6
2	6,03	-	97,9
3	6,10	-	97,8
4	5,69	51,80	98,3

Fonte: Autora (2017).

Conforme exposto, as placas apresentaram teores de vazios entre 5,37% e 6,10%. A obtenção de porcentagens de volume de vazios superiores àquela definida em projeto decorre da grande sensibilidade deste parâmetro diante de pequenas variações (da ordem de milímetro), na espessura final das placas. Constatou-se, durante a moldagem, que o controle desta dimensão é uma tarefa de difícil precisão, o que também foi relatado por Melo (2014) e por Marcon (2016). Relatos semelhantes também foram expostos por pesquisadores de outros laboratórios, o que leva a crer que esta dificuldade está atrelada ao próprio equipamento empregado na moldagem das placas (mesa compactadora LCPC).

No entanto, apesar de possuírem volumes de vazios superiores ao estabelecido em projeto, as placas foram consideradas adequadas para a realização dos ensaios de deformação permanente, visto que os graus de compactação encontram-se dentro do intervalo limite (de 97% a 101%) admitido em campo pela norma DNIT-ES 031/2006 (BRASIL, 2006b).

#### 4.3.2 Serragem de corpos de prova prismáticos

A partir da compactação das placas com dimensões de  $60 \times 40 \times 9$  cm e do procedimento de serragem descrito na seção 3.4.2 deste trabalho, foram obtidos quinze corpos de prova prismáticos com dimensões próximas a  $6,3 \times 5,0 \times 40,0$  cm. A caracterização volumétrica destes corpos de prova, bem como os ensaios para que foram destinados, é apresentada na Tabela 4.9.

Com base nos dados expostos, observa-se que os corpos de prova apresentaram porcentagens de volume de vazios entre 2,80% e 4,71%. Entre eles, foram selecionados os que apresentaram volume de vazios mais próximos ao teor definido em projeto e dimensões adequadas para a realização dos ensaios, sendo estas últimas definidas em conformidade com as normas EN 12697-26 e EN 12697-24.

Tabela 4.9 - Caracterização volumétrica dos corpos de prova para ensaios de módulo complexo e de fadiga.

<b>Corpo de prova</b>	<b><math>V_v</math> (%)</b>	<b>Ensaio</b>
1.1	4,71	-
1.2	4,66	-
1.3	4,51	Fadiga
1.4	4,04	Módulo complexo + Fadiga
1.5	3,61	Fadiga
2.1	4,24	Fadiga
2.2	4,08	Módulo complexo + Fadiga
2.3	3,25	Fadiga
2.4	3,60	-
2.5	3,55	Fadiga
3.1	3,82	Fadiga
3.2	3,68	-
3.3	2,80	-
3.4	3,37	Fadiga
3.5	3,47	Fadiga
Média	3,83	
Desvio padrão	0,54	

Fonte: Autora (2017).

#### 4.4 ETAPA 5 – AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO E MECÂNICO

##### 4.4.1 Comportamento reológico

Com a finalidade de avaliar o comportamento reológico da mistura asfáltica 3% NA + 2% SBS, foram realizados ensaios de módulo complexo no aparato de teste quatro pontos. Esta avaliação foi conduzida com os corpos de prova 1.4 e 2.2 (Tabela 4.9), que apresentaram porcentagens de volumes de vazios de 4,04% e 4,08%, respectivamente.

Na Tabela 4.10 encontram-se relacionados os resultados de módulo complexo e de ângulo de fase correspondentes às médias obtidas para os dois corpos de prova ensaiados. Os parâmetros são apresentados em função das temperaturas e frequências de carregamento definidas no método da pesquisa. Nas Tabelas 4.11, 4.12 e 4.13, a título de comparação, são apresentados os respectivos valores obtidos por

Melo (2014), para as misturas convencional e 3% NA, e por Marcon (2016), para a mistura SBS 60/85.

Para avaliar o comportamento reológico das misturas, foram plotadas as curvas isotérmicas, curvas mestras, curvas isócronas, espaços de Black e planos Cole-Cole.

As isotérmicas da mistura 3% NA + 2% SBS são ilustradas nas Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 em comparação às demais misturas. Estas curvas relacionam módulos e frequências de carregamento, a temperaturas variadas, e permitem avaliar a susceptibilidade cinética dos materiais.

Com base na observação do posicionamento das curvas isotérmicas, destaca-se a maior rigidez da mistura modificada simultaneamente por nanoargila e por SBS quando comparada às outras apresentadas. Este comportamento é considerado como um indicativo de melhor resistência à deformação permanente. No entanto, cabe destacar que misturas de elevada rigidez podem ter seu desempenho prejudicado no que se refere ao fenômeno de fadiga, uma vez que tendem a apresentar comportamento quebradiço.

A obtenção de valores elevados de módulo para a mistura 3% NA + 2% SBS encontra-se em conformidade com os resultados obtidos por Farias et al. (2016), Galooyak et al. (2010), Golestani, Nejad e Galooyak (2012), Golestani et al. (2015), Merusi et al. (2014) e Pamplona et al. (2012). Nestes trabalhos, com exceção da pesquisa de Golestani et al. (2015), os efeitos da modificação foram avaliados no âmbito dos ligantes asfálticos, a partir de ensaios no reômetro de cisalhamento dinâmico. Por outro lado, Golestani et al. (2015) avaliou a rigidez das misturas produzidas com os ligantes modificados por meio de ensaios de módulo resiliente.

Tabela 4.10 - Resultados de módulo complexo e ângulo de fase obtidos para a mistura 3% NA + 2% SBS.

<b>Módulo complexo <math> E^* </math> (MPa)</b>							
	<b>0 °C</b>	<b>5 °C</b>	<b>10 °C</b>	<b>15 °C</b>	<b>20 °C</b>	<b>25 °C</b>	<b>30 °C</b>
<b>0,1 Hz</b>	19022	13203	8687	4831	2501	1291	570
<b>0,2 Hz</b>	20639	15035	10305	6076	3338	1734	776
<b>0,5 Hz</b>	22750	17380	12676	7854	4604	2469	1205
<b>1 Hz</b>	24336	19118	14431	9503	5845	3268	1673
<b>2 Hz</b>	26012	20941	16362	11226	7174	4263	2340
<b>5 Hz</b>	28160	23492	19047	13750	9308	5828	3356
<b>10 Hz</b>	29671	25440	21272	15929	11175	7243	4472
<b>20 Hz</b>	31059	26653	22630	17515	12768	8699	5586
<b>Ângulo de fase (°)</b>							
	<b>0 °C</b>	<b>5 °C</b>	<b>10 °C</b>	<b>15 °C</b>	<b>20 °C</b>	<b>25 °C</b>	<b>30 °C</b>
<b>0,1 Hz</b>	9,9	15,5	22,2	30,1	36,8	40,0	40,5
<b>0,2 Hz</b>	8,5	13,5	19,8	27,6	35,1	39,6	42,2
<b>0,5 Hz</b>	6,9	11,2	16,9	24,3	31,7	37,9	42,8
<b>1 Hz</b>	6,1	9,8	14,7	21,4	29,0	35,9	42,2
<b>2 Hz</b>	5,5	8,7	12,9	19,0	26,1	33,2	40,2
<b>5 Hz</b>	4,4	7,2	10,8	16,0	22,4	29,3	37,0
<b>10 Hz</b>	3,3	5,9	9,2	13,8	19,8	26,5	34,3
<b>20 Hz</b>	1,8	4,5	7,1	11,2	16,3	23,7	32,0

Fonte: Autora (2017).

Tabela 4.11 - Módulo complexo e ângulo de fase da mistura Convencional.

<b>Módulo complexo <math> E^* </math> (MPa)</b>							
	<b>0 °C</b>	<b>5 °C</b>	<b>10 °C</b>	<b>15 °C</b>	<b>20 °C</b>	<b>25 °C</b>	<b>30 °C</b>
<b>0,1 Hz</b>	12772	7868	4525	1987	776	252	154
<b>0,2 Hz</b>	14190	9376	5603	2677	1136	417	201
<b>0,5 Hz</b>	15938	11281	7384	3936	1785	693	277
<b>1 Hz</b>	17268	12724	8823	5202	2576	1037	462
<b>2 Hz</b>	18577	14202	10285	6438	3549	1625	687
<b>5 Hz</b>	20224	16086	12238	8370	5131	2610	1145
<b>10 Hz</b>	21373	17531	13854	10035	6546	3578	1754
<b>20 Hz</b>	22274	18797	15239	11562	8065	4654	2457
<b>Ângulo de fase (°)</b>							
	<b>0 °C</b>	<b>5 °C</b>	<b>10 °C</b>	<b>15 °C</b>	<b>20 °C</b>	<b>25 °C</b>	<b>30 °C</b>
<b>0,1 Hz</b>	13,3	22,0	31,2	42,2	48,7	47,8	38,7
<b>0,2 Hz</b>	11,4	19,1	27,9	39,2	48,4	50,5	43,5
<b>0,5 Hz</b>	9,3	15,7	23,6	34,6	45,5	51,8	48,3
<b>1 Hz</b>	8,1	13,7	20,4	30,7	42,3	51,0	50,9
<b>2 Hz</b>	7,1	11,9	17,8	27,0	38,3	48,7	52,1
<b>5 Hz</b>	5,9	9,9	14,8	22,6	32,8	44,2	51,2
<b>10 Hz</b>	5,1	8,6	12,9	19,6	28,7	40,2	49,8
<b>20 Hz</b>	4,5	7,6	11,4	17,2	25,1	36,7	48,6

Fonte: Adaptado de Melo (2014).

Tabela 4.12 - Módulo complexo e ângulo de fase da mistura 3% NA.

<b>Módulo complexo <math> E^* </math> (MPa)</b>							
	<b>0 °C</b>	<b>5 °C</b>	<b>10 °C</b>	<b>15 °C</b>	<b>20 °C</b>	<b>25 °C</b>	<b>30 °C</b>
<b>0,1 Hz</b>	14796	10069	5688	2774	1276	556	265
<b>0,2 Hz</b>	16261	11490	7084	3616	1768	808	398
<b>0,5 Hz</b>	18308	13644	8927	5112	2679	1332	619
<b>1 Hz</b>	19768	15167	10457	6368	3582	1932	913
<b>2 Hz</b>	21220	16675	11970	7752	4683	2558	1257
<b>5 Hz</b>	23079	18810	14235	9831	6364	3806	2002
<b>10 Hz</b>	24464	20481	15932	11486	7895	4998	2723
<b>20 Hz</b>	25310	21642	17258	12929	9379	6200	3591
<b>Ângulo de fase (°)</b>							
	<b>0 °C</b>	<b>5 °C</b>	<b>10 °C</b>	<b>15 °C</b>	<b>20 °C</b>	<b>25 °C</b>	<b>30 °C</b>
<b>0,1 Hz</b>	11,4	18,4	26,9	37,2	43,6	44,5	43,2
<b>0,2 Hz</b>	9,7	16,2	24,2	34,2	42,3	45,5	46,2
<b>0,5 Hz</b>	7,8	13,5	20,6	29,5	39,0	44,9	48,5
<b>1 Hz</b>	7,0	11,6	17,8	26,5	35,8	42,9	48,8
<b>2 Hz</b>	6,2	10,1	15,5	23,3	32,2	40,1	47,5
<b>5 Hz</b>	5,0	8,4	12,9	19,5	27,6	35,5	44,2
<b>10 Hz</b>	4,2	7,3	11,2	16,9	24,4	32,1	41,3
<b>20 Hz</b>	3,3	6,1	9,6	14,9	21,7	29,2	38,9

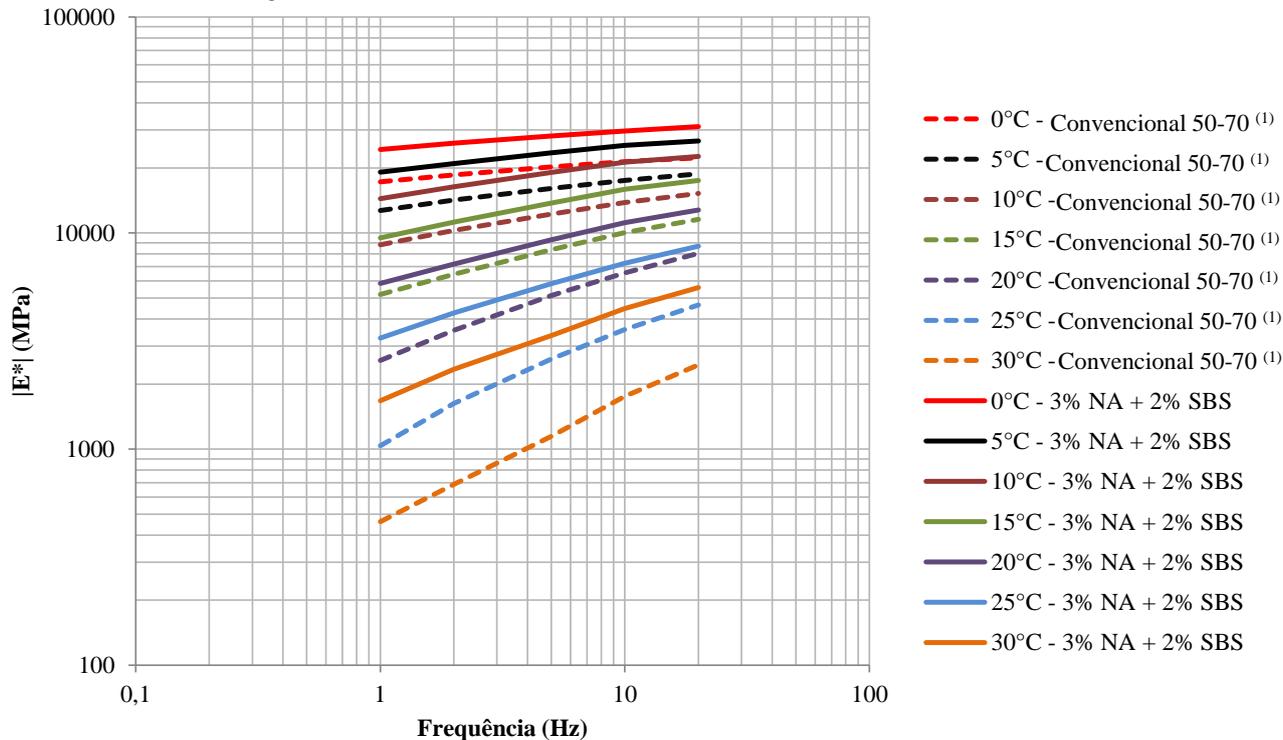
Fonte: Adaptado de Melo (2014).

Tabela 4.13 - Módulo complexo e ângulo de fase da mistura SBS 60/85.

<b>Módulo complexo <math> E^* </math> (MPa)</b>							
	<b>0 °C</b>	<b>5 °C</b>	<b>10 °C</b>	<b>15 °C</b>	<b>20 °C</b>	<b>25 °C</b>	<b>30 °C</b>
<b>0,1 Hz</b>	12153	8810	4982	3017	1312	621	301
<b>0,2 Hz</b>	13443	10033	6051	3730	1748	847	421
<b>0,5 Hz</b>	15113	11748	7534	4997	2560	1281	673
<b>1 Hz</b>	16385	13069	8850	6070	3335	1739	905
<b>2 Hz</b>	17681	14355	10086	7203	4198	2329	1217
<b>5 Hz</b>	19464	16203	11971	9064	5620	3309	1799
<b>10 Hz</b>	20742	17724	13484	10495	6881	4262	2383
<b>20 Hz</b>	22254	19350	14886	11980	8233	5251	3025
<b>Ângulo de fase (°)</b>							
	<b>0 °C</b>	<b>5 °C</b>	<b>10 °C</b>	<b>15 °C</b>	<b>20 °C</b>	<b>25 °C</b>	<b>30 °C</b>
<b>0,1 Hz</b>	12,6	17,5	25,4	31,3	39,2	40,7	36,7
<b>0,2 Hz</b>	11,2	15,5	23,0	29,4	38,1	41,6	39,0
<b>0,5 Hz</b>	9,5	13,5	20,1	26,4	35,3	41,0	41,6
<b>1 Hz</b>	8,5	12,0	17,9	23,7	32,9	39,7	42,5
<b>2 Hz</b>	7,8	10,8	16,1	21,5	30,2	37,5	42,0
<b>5 Hz</b>	6,6	9,3	13,9	18,6	26,7	34,0	40,0
<b>10 Hz</b>	5,8	8,3	12,5	16,7	24,1	31,5	38,4
<b>20 Hz</b>	5,5	7,9	11,5	15,4	22,1	29,3	37,7

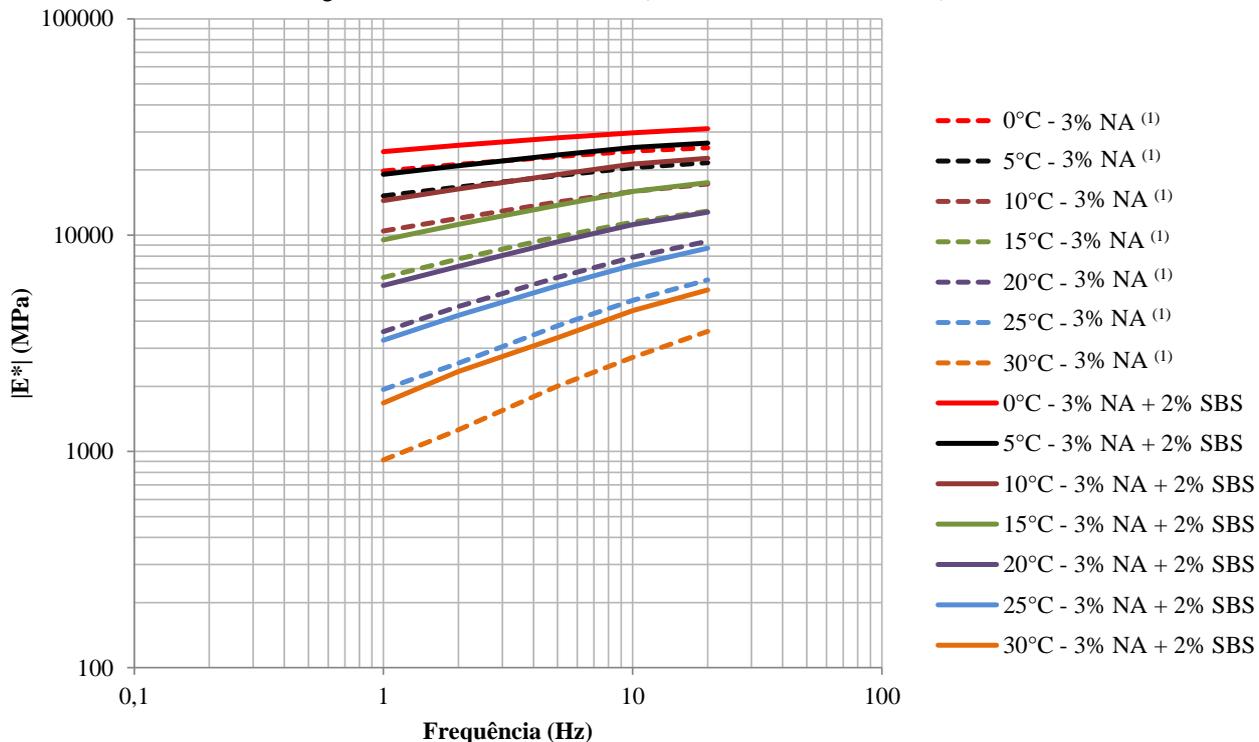
Fonte: Adaptado de Marcon (2016).

Figura 4.9 - Curvas isotérmicas (3% NA + 2% SBS e Convencional 50-70).



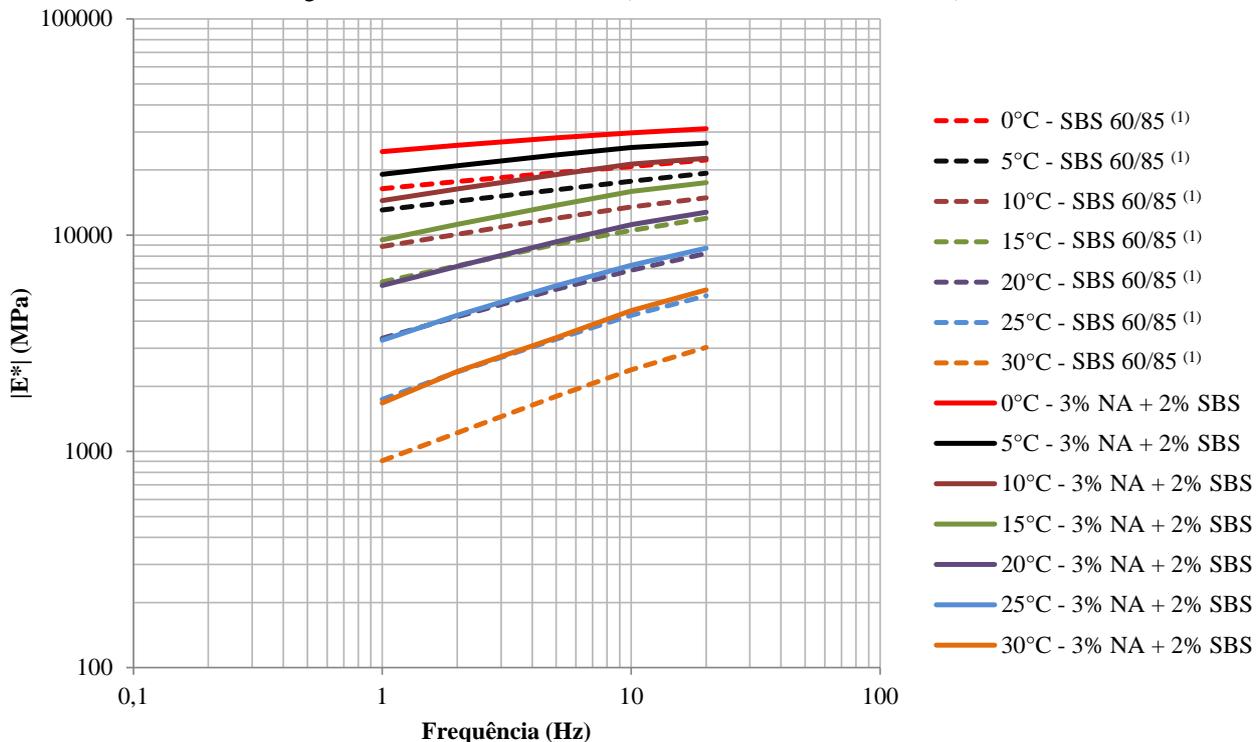
Fonte: Autora (2017), com dados de Melo (2014) <sup>(1)</sup> e de autoria própria.

Figura 4.10 - Curvas isotérmicas (3% NA + 2% SBS e 3% NA).



Fonte: Autora (2017), com dados de Melo (2014) <sup>(1)</sup> e de autoria própria.

Figura 4.11 - Curvas isotérmicas (3% NA + 2% SBS e SBS 60/85).



Fonte: Autora (2017), com dados de Marcon (2014)<sup>(1)</sup> e de autoria própria.

Em relação à susceptibilidade cinética, que é avaliada a partir da inclinação das curvas isotérmicas, são observados pequenos ganhos da mistura 3% NA + 2% SBS em relação à convencional. Isto indica que a rigidez desta mistura, em campo, seria menos sensível às variações de velocidade do tráfego. De maneira geral, estes ganhos também são observados quando a mistura 3% NA + 2% SBS é comparada às demais modificadas, porém em proporções ainda menores. Nota-se que estes ganhos são mais perceptíveis em temperaturas elevadas, o que se considera um aspecto positivo, sobretudo frente ao fenômeno de deformação permanente em regiões de clima tropical. Excepcionalmente, na Figura 4.11, para a temperatura de 30 °C, observa-se o melhor comportamento cinético da mistura modificada somente com SBS, porém também em pequena proporção.

Na Figura 4.12 são apresentadas as curvas mestras das diferentes misturas asfálticas, considerando-se a temperatura de referência de 20 °C. Para a obtenção destas curvas, foi aplicada a Equação 3.8. Os parâmetros  $C_1$  e  $C_2$  são apresentados na Tabela 4.14.

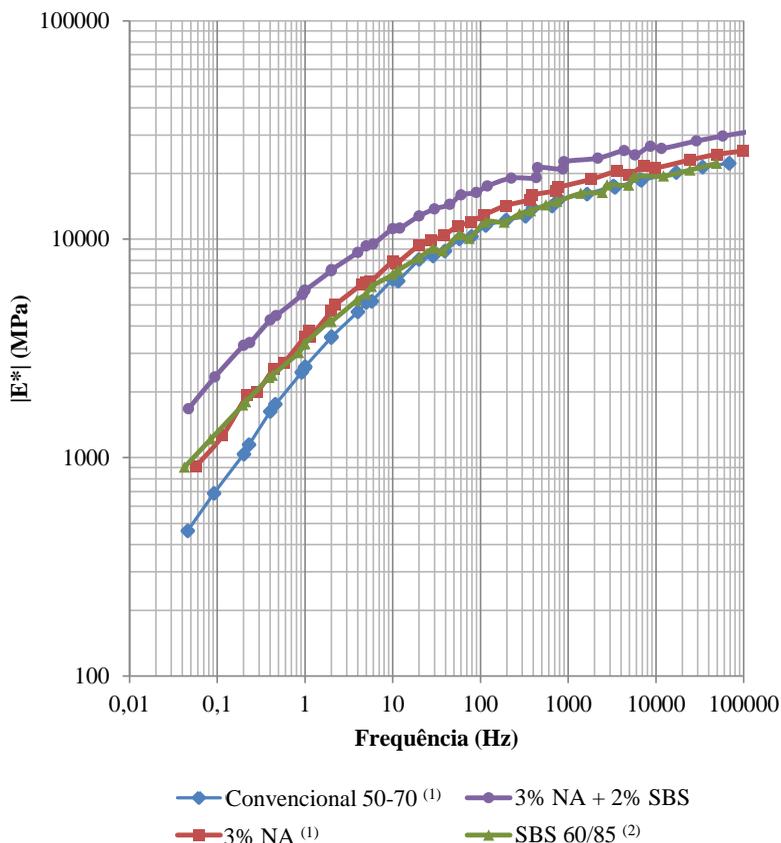
Tabela 4.14 - Parâmetros  $C_1$  e  $C_2$  da Equação de Williams-Landel-Ferry para as diferentes misturas (temperatura de referência = 20 °C).

<b>Mistura asfáltica</b>	<b><math>C_1</math></b>	<b><math>C_2</math> (K)</b>
CAP 50-70 <sup>(1)</sup>	-16,50	113,41
3% NA + 2% SBS	-13,54	91,98
3% NA <sup>(1)</sup>	-11,36	81,52
SBS 60/85 <sup>(2)</sup>	-21,63	147,61

Fonte: Autora (2017), com dados de Melo (2014) <sup>(1)</sup>, de Marcon (2016) <sup>(2)</sup> e de autoria própria.

A partir destas curvas, que permitem a análise da rigidez das misturas asfálticas em uma gama estendida de frequências, também ficam evidentes os valores elevados de módulo complexo da mistura 3% NA + 2% SBS em relação às demais. Na prática, considerando-se o mesmo estado de tensões no revestimento, a elevada rigidez reflete na menor deformabilidade da mistura (MELO, 2014). Conforme mencionado anteriormente, isto é um indicativo de maior resistência à deformação permanente e, até certo ponto, pode ser considerado como um aspecto positivo em termos de desempenho. Entretanto, a resistência à fadiga das misturas deve ser considerada paralelamente.

Figura 4.12 - Curvas mestras das diferentes misturas na temperatura de referência de 20 °C.



Fonte: Autora (2017), com dados de Melo (2014) <sup>(1)</sup>, de Marcon (2016) <sup>(2)</sup> e de autoria própria.

Em termos de susceptibilidade cinética, a observação das curvas mestras tornam os pequenos ganhos das misturas modificadas mais perceptíveis. Pode-se estabelecer uma hierarquia em função da sensibilidade das misturas às variações de velocidade de carregamento, segundo a qual a mistura modificada simultaneamente por nanoargila e por polímero é precedente, seguida pelas misturas SBS 60/85, 3% NA e convencional. A partir de resultados de módulo de cisalhamento dinâmico obtidos por Pamplona et al. (2012), também se observam pequenos ganhos em relação à susceptibilidade cinética dos ligantes

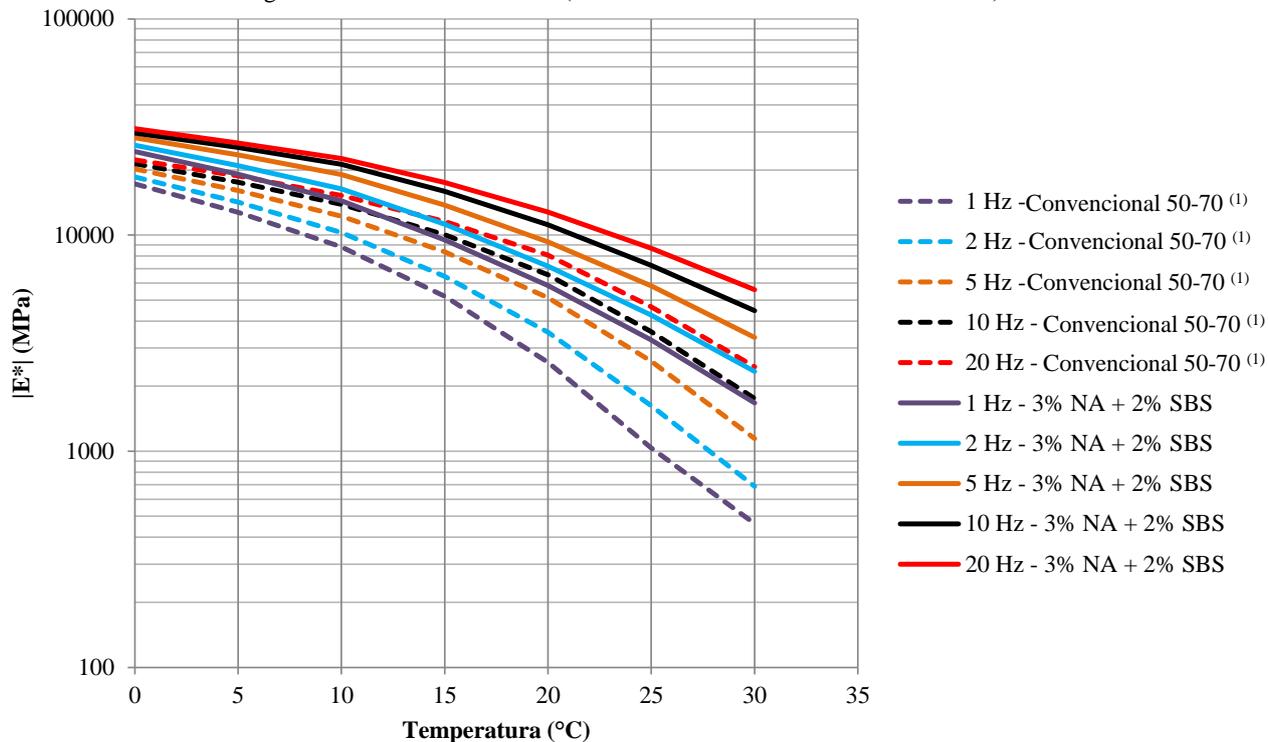
modificados por nanoargilas e por SBS quando comparados ao de referência. No entanto, de acordo com os resultados apresentados pelos autores, nota-se que o ligante modificado com 4% de SBS se apresenta menos sensível às variações de frequência do que os ligantes modificados com 2,5% de nanoargila e 2,5% do polímero.

Quanto à mistura SBS 60/85, percebe-se um comportamento semelhante ao da mistura convencional para altas frequências de carregamento, o qual mais se assemelha ao da mistura 3% NA em frequências reduzidas. Deste modo, em campo, para carregamentos lentos, os valores de módulo e a sensibilidade da mistura SBS 60/85 às variações de velocidade são próximos aos da mistura 3% NA, enquanto que, para carregamentos rápidos, são equivalentes aos da mistura convencional. Observa-se, assim, que os ganhos da mistura SBS 60/85 em termos de susceptibilidade cinética ocorrem no trecho da curva mestra referente aos carregamentos mais lentos. Ganhos neste trecho podem ser considerados mais significativos, visto que as baixas frequências de carregamento tem maior relação com o fenômeno de deformação permanente do que as altas.

Nas Figuras 4.13, 4.14 e 4.15 são apresentadas as curvas isócronas das diferentes misturas asfálticas. Estas curvas expressam a variação do módulo complexo em função da temperatura, sob diferentes frequências de carregamento, e suas inclinações permitem avaliar a susceptibilidade térmica dos materiais.

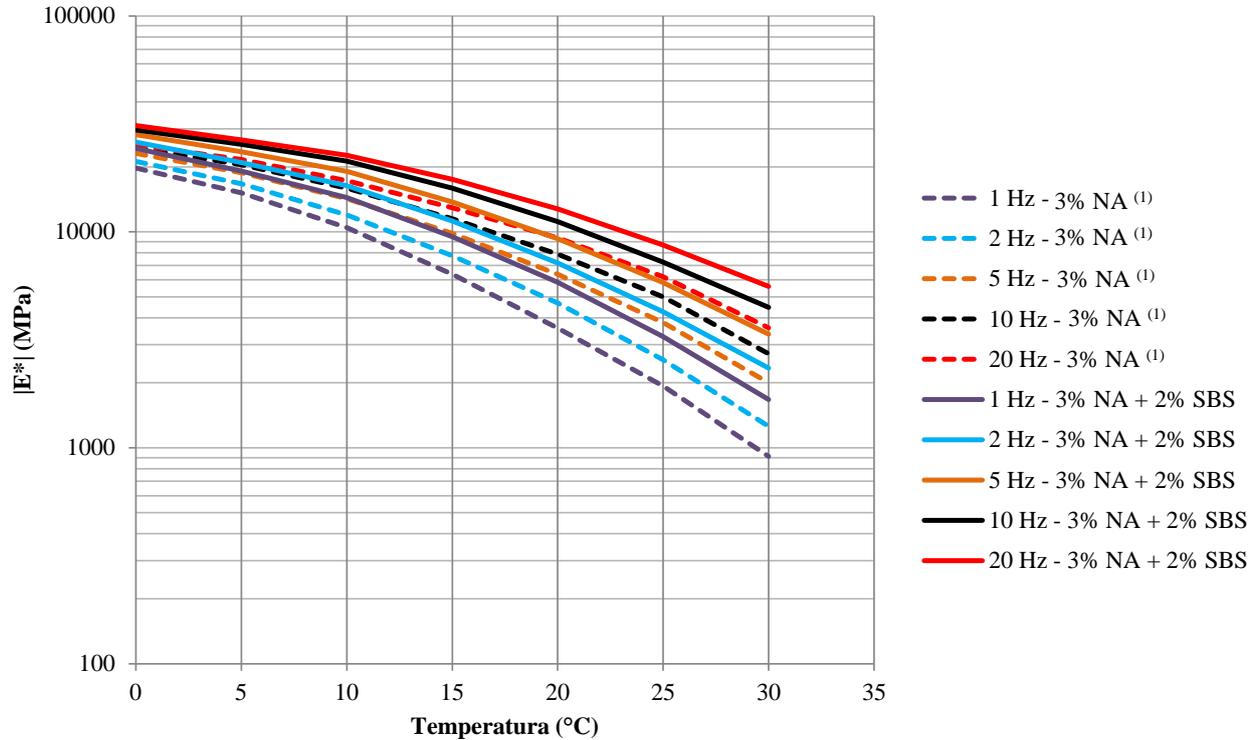
Conforme é possível observar, as isócronas demonstram o melhor comportamento térmico da mistura 3% NA + 2% SBS em relação às misturas convencional e 3% NA, sendo estas últimas mais sensíveis às variações de temperatura. Por outro lado, comparando-se a mistura 3% NA + 2% SBS com a mistura SBS 60/85, observa-se uma tendência de paralelismo entre as curvas, o que caracteriza o comportamento análogo das mesmas em termos de susceptibilidade térmica. Isto indicaria que, em campo, as mudanças de temperatura exerceriam menor influência na rigidez da mistura duplamente modificada e da mistura modificada somente por SBS. No trabalho de Golestani et al. (2015), os ligantes modificados com SBS e nanoargila (modificação simultânea) e somente com SBS também apresentaram melhor comportamento frente às variações térmicas. Contudo, conforme os resultados apresentados pelos autores, o ligante duplamente modificado se apresentaria menos susceptível.

Figura 4.13 - Curvas isócronas (3% NA + 2% SBS e Convencional 50-70).



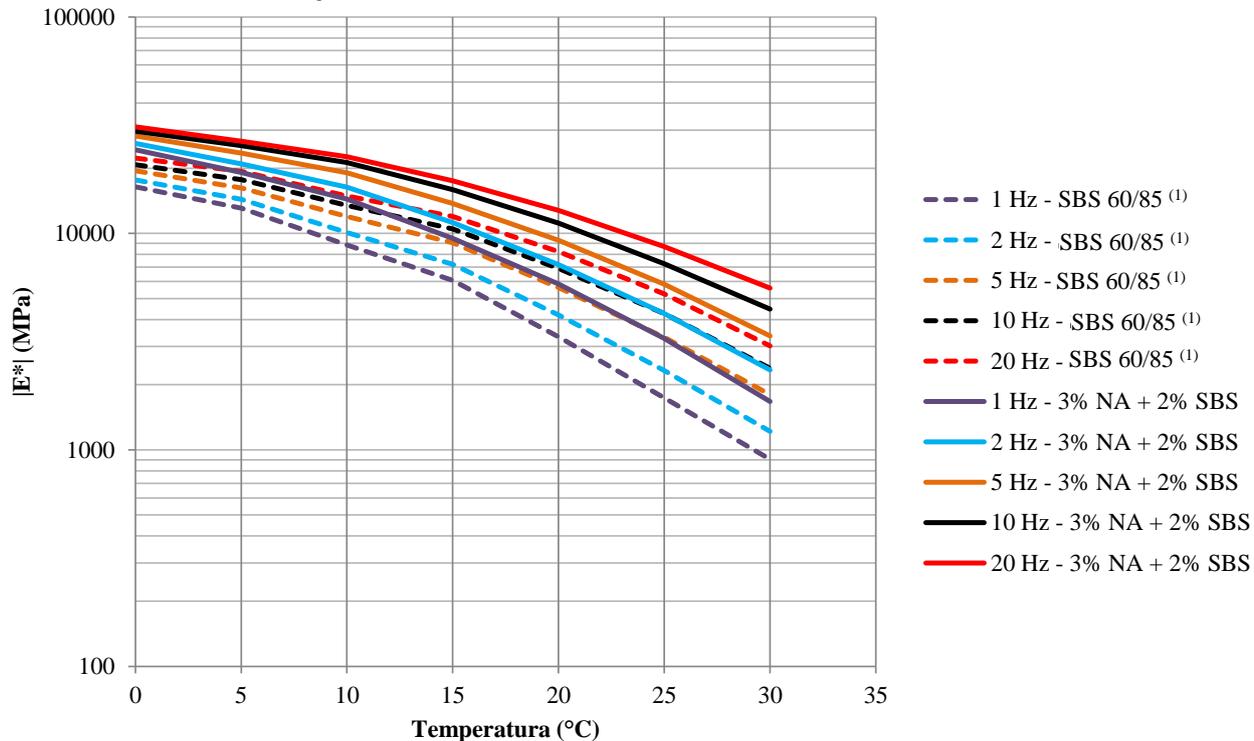
Fonte: Autora (2017), com dados de Melo (2014)<sup>(1)</sup> e de autoria própria.

Figura 4.14 - Curvas isócronas (3% NA + 2% SBS e 3% NA).



Fonte: Autora (2017), com dados de Melo (2014) <sup>(1)</sup> e de autoria própria.

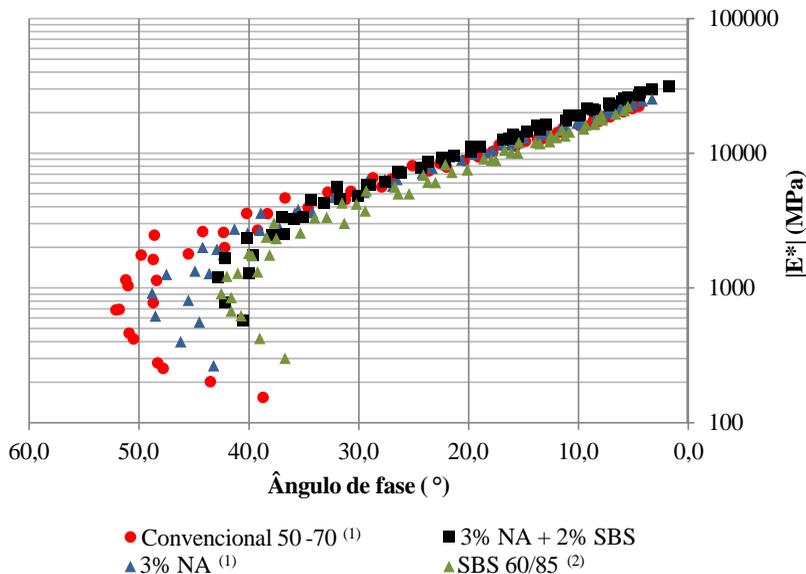
Figura 4.15 - Curvas isócronas (3% NA + 2% SBS e SBS 60/85).



Fonte: Autora (2017), com dados de Marcon (2016)<sup>(1)</sup> e de autoria própria.

Na Figura 4.16 são apresentados os espaços de Black das misturas convencional e modificadas. Nestas representações são relacionados os valores obtidos para o módulo complexo das misturas asfálticas e os respectivos ângulos de fase, para todas as temperaturas e frequências de carregamento consideradas.

Figura 4.16 - Espaços de Black das diferentes misturas asfálticas.



Fonte: Autora (2017), com dados de Melo (2014) <sup>(1)</sup>, de Marcon (2016) <sup>(2)</sup> e de autoria própria.

De acordo com os resultados apresentados, nota-se o aspecto de encurtamento gráfico (em relação ao ângulo de fase) das misturas modificadas se comparadas à convencional. Este aspecto retrata a obtenção de ângulos de fase menores e caracteriza a predominância do comportamento elástico das misturas. Resultados semelhantes foram obtidos por Farias et al. (2016), Galooyak et al. (2010), Golestani, Nejad e Galooyak (2012), Golestani et al. (2015), Merusi et al. (2014) e Pamplona et al. (2012), para ensaios realizados com os ligantes, e podem ser considerados como características positivas para as misturas asfálticas, tanto sob o ponto de vista de melhorar a resistência à fadiga quanto de melhorar a resistência à deformação permanente.

Entre as misturas modificadas, observa-se que a mistura 3% NA + 2% SBS apresenta maior concentração de baixos ângulos de fase,

seguida pela mistura SBS 60/85. A manifestação do comportamento com maior predominância elástica das misturas modificadas com SBS reflete a influência da modificação dos ligantes asfálticos com um polímero elastomérico e, analisada de maneira isolada, indicaria o melhor desempenho à fadiga e à deformação permanente destas misturas em campo. No contexto, destaca-se a redução dos ângulos de fase obtidos para a mistura 3% NA + 2% SBS em relação à mistura 3% NA, comportamento que era pretendido nesta pesquisa a partir da adição do polímero SBS.

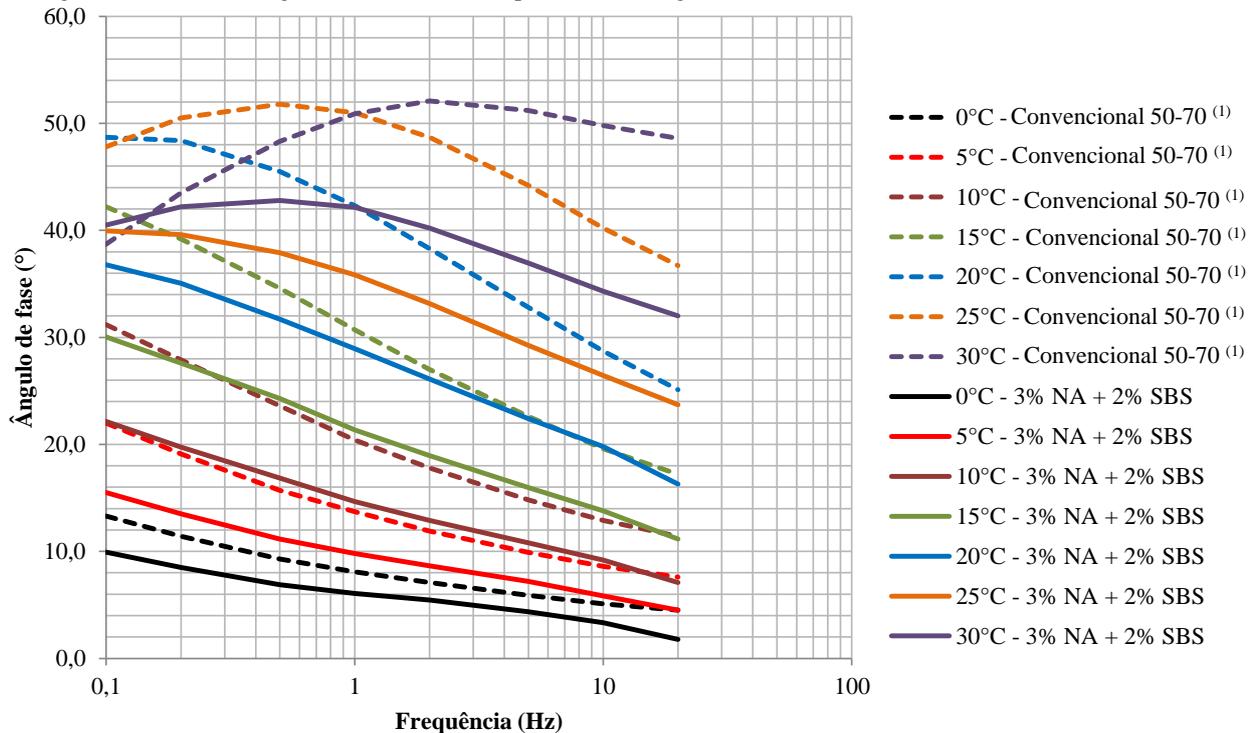
Nas Figuras 4.17, 4.18 e 4.19, são apresentadas as curvas que associam a frequência de carregamento com o ângulo de fase, para diferentes temperaturas de ensaio.

Para temperaturas entre 0 °C e 20 °C, verifica-se a diminuição do ângulo de fase com o aumento da frequência de carregamento, o que significa, na prática, que a manifestação do comportamento elástico das misturas é maior para altas velocidades de tráfego, como é o esperado.

Entretanto, nas temperaturas de 25° e 30 °C, podem ser observadas curvas com pontos de inflexão, que retratam o aumento do ângulo de fase em baixas frequências e a diminuição em frequências mais elevadas. Isto indicaria que, para estas temperaturas, até certo ponto, o aumento da velocidade de carregamento implicaria na diminuição da predominância da fase elástica na mistura. A partir deste ponto, as misturas seguem a mesma tendência das demais temperaturas, que corresponde ao aumento do ângulo de fase com a diminuição do tempo de carregamento. O comportamento diferenciado das misturas asfálticas, nestas temperaturas, pode estar atrelado à diminuição de viscosidade do ligante asfáltico, alterando sua tendência de resposta reológica. A mistura modificada simultaneamente por nanoargila e por polímero SBS apresenta curva com inflexão somente para a temperatura de 30 °C e, neste aspecto, demonstrou uma menor variabilidade de comportamento com o aumento de temperatura.

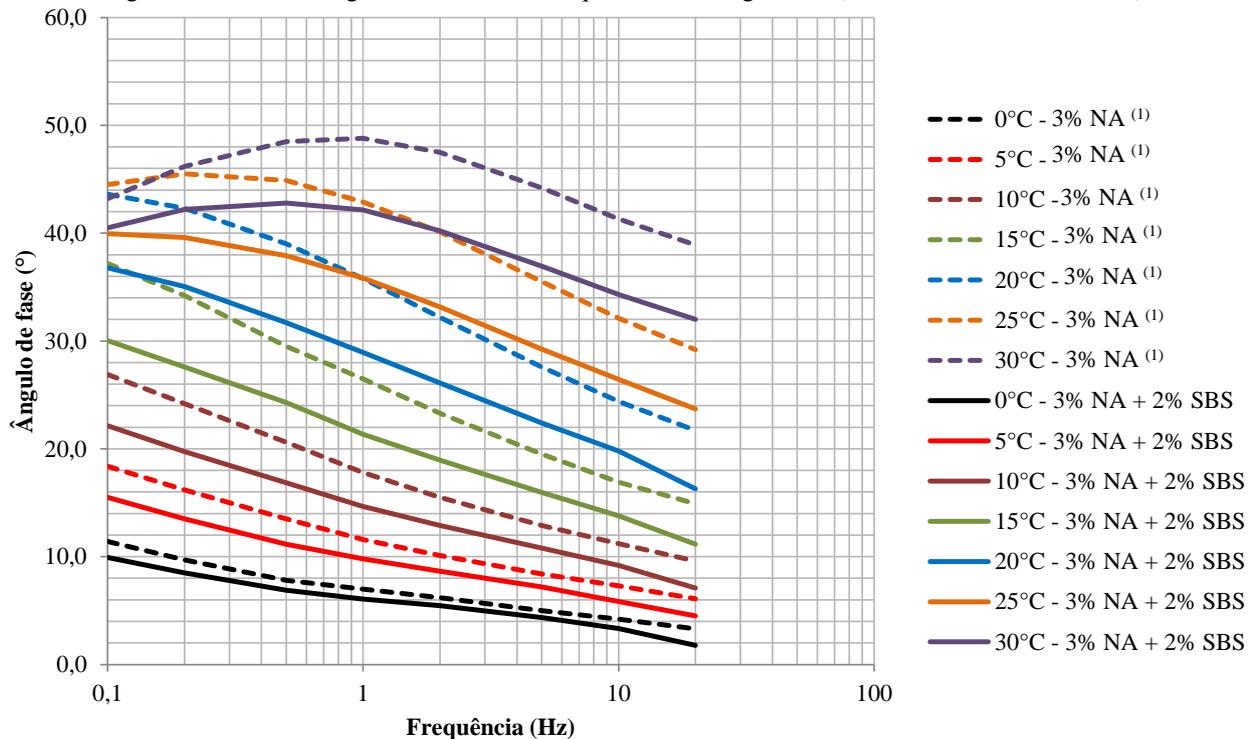
Além disso, a análise das curvas de ângulo de fase *versus* frequência também demonstra a obtenção de menores ângulos para a mistura 3% NA + 2% SBS, inclusive quando comparada à mistura modificada exclusivamente por SBS. Esta constatação foi feita anteriormente a partir da análise dos espaços de Black.

Figura 4.17 - Curvas ângulo de fase *versus* frequência de carregamento (3% NA + 2% SBS e Convencional 50-70).



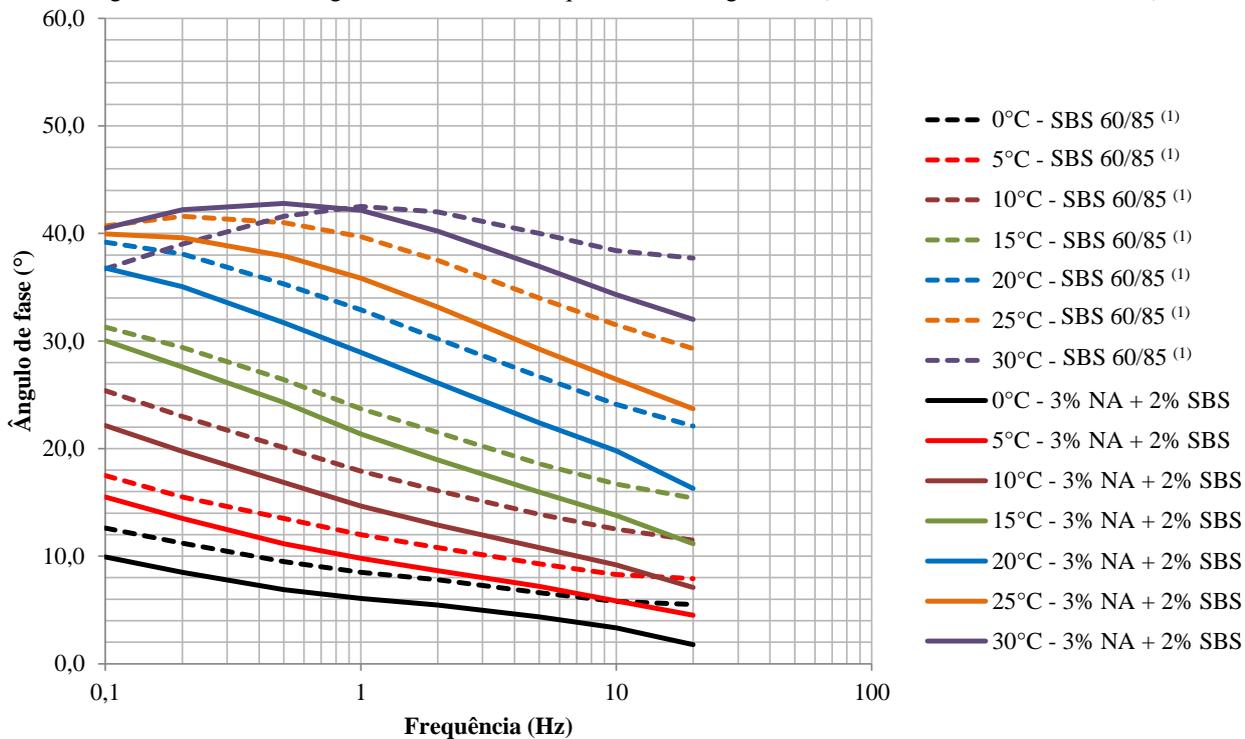
Fonte: Autora (2017), com dados de Melo (2014) <sup>(1)</sup> e de autoria própria.

Figura 4.18 - Curvas ângulo de fase *versus* frequência de carregamento (3% NA + 2% SBS e 3% NA).



Fonte: Autora (2017), com dados de Melo (2014) <sup>(1)</sup> e de autoria própria.

Figura 4.19 - Curvas ângulo de fase *versus* frequência de carregamento (3% NA + 2% SBS e SBS 60/85).

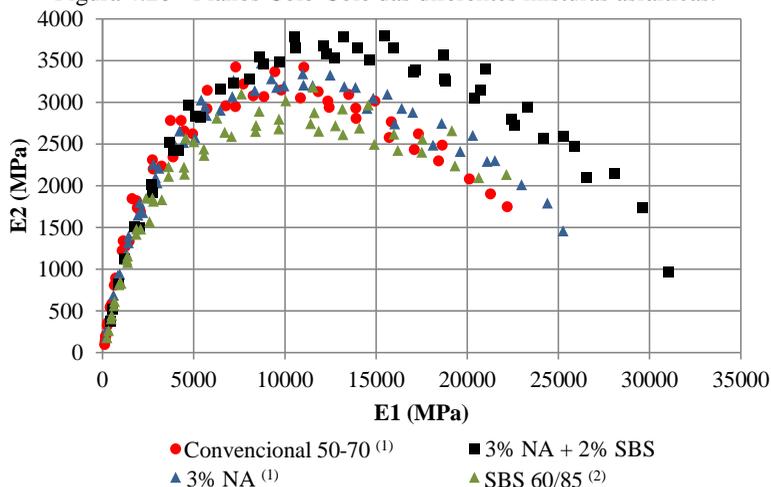


Fonte: Autora (2017), com dados de Marcon (2016) <sup>(1)</sup> e de autoria própria.

Na Figura 4.20 são ilustrados, em conjunto, os planos Cole-Cole das quatro misturas asfálticas. Estes gráficos relacionam as componentes elásticas ( $E1 = |E^*| \cos \delta$ ) e as componentes viscosas ( $E2 = |E^*| \sin \delta$ ) dos módulos complexos. Na Figura 4.21, estas componentes também foram ilustradas, considerando-se a temperatura de 20 °C e a frequência de 10 Hz, as quais foram adotadas na realização dos ensaios de fadiga.

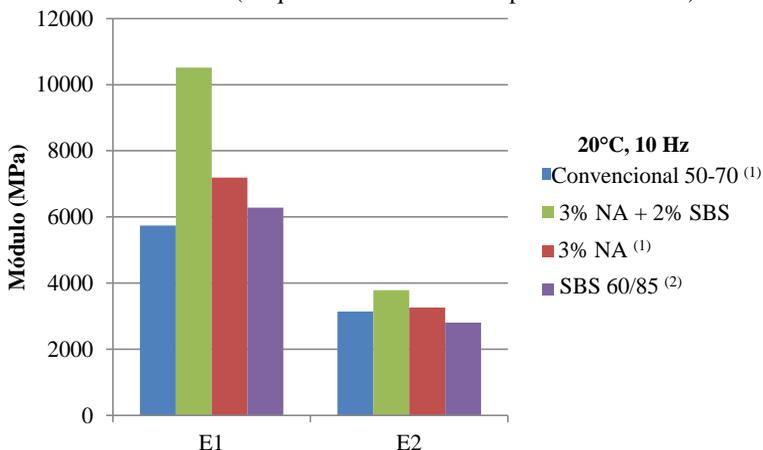
Como se observa na Figura 4.20, a mistura modificada simultaneamente por nanoargila e SBS apresenta valores mais expressivos, tanto das componentes elásticas, quanto das componentes viscosas. Contudo, observa-se uma maior manifestação de aumento da parcela elástica. Os valores relativamente elevados das componentes se devem aos altos módulos obtidos para esta mistura e, ao passo que o acréscimo na resposta elástica é considerado como um aspecto positivo em relação à deformação permanente e à fadiga, o aumento da parcela viscosa pode ser considerado como um indicativo negativo à fadiga. Isto porque, segundo os conceitos de energia dissipada, maiores componentes viscosas indicariam uma maior dissipação de energia por ciclo de carregamento, dando origem a misturas menos resistentes a este fenômeno.

Figura 4.20 - Planos Cole-Cole das diferentes misturas asfálticas.



Fonte: Autora (2017), com dados de Melo (2014) <sup>(1)</sup>, de Marcon (2016) <sup>(2)</sup> e de autoria própria.

Figura 4.21 - Componentes elásticas ( $E1$ ) e viscosas ( $E2$ ) das diferentes misturas asfálticas (frequência de 10 Hz e temperatura de 20 °C).



Fonte: Autora (2017), com dados de Melo (2014)<sup>(1)</sup>, de Marcon (2016)<sup>(2)</sup> e de autoria própria.

Na direção oposta, destaca-se a obtenção de componentes relativamente reduzidas para a mistura SBS 60/85. Esta diminuição ocorre devido aos baixos valores de módulo da mistura modificada somente com polímero, que refletiram na redução de ambas as componentes. Em conformidade com estes resultados, Zhang et al. (2016) demonstraram que misturas produzidas com ligantes de alta recuperação elástica, de maneira geral, apresentam menor rigidez, porém melhor desempenho à fadiga. Comparando-se com a mistura 3% NA + 2% SBS, no caso da mistura SBS 60/85, não se observam aumentos nas componentes elásticas, porém notam-se ganhos em termos de redução das componentes viscosas.

Na Figura 4.21, para a temperatura de 20 °C, na qual foram realizados os ensaios de fadiga, observa-se que a mistura SBS 60/85 foi a que apresentou menor parcela viscosa. Isto indicaria, segundo os conceitos de dissipação de energia, o melhor comportamento desta mistura em relação a este fenômeno. Ainda, de acordo com a abordagem de energia dissipada, de modo isolado, o comportamento da mistura 3% NA + 2% SBS seria prejudicado em relação às demais, uma vez que a mesma apresentou a maior componente viscosa. Contudo, em virtude de apresentar paralelamente a maior resposta elástica, não é esperado que esta mistura manifeste resistência à fadiga inferior às misturas convencional e 3% NA.

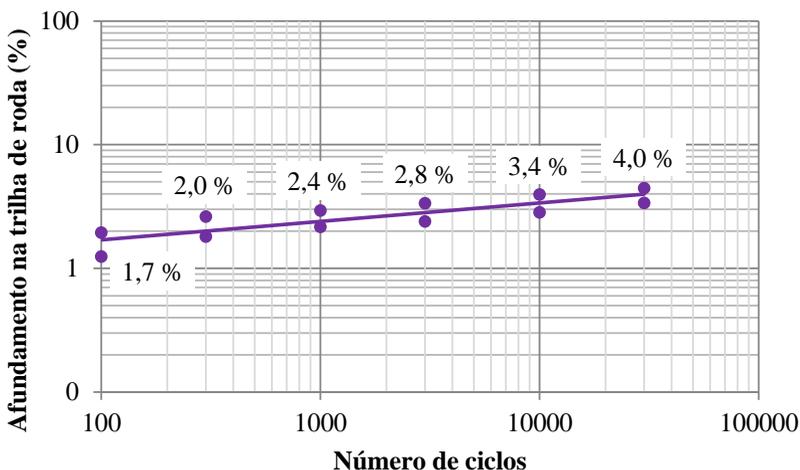
## 4.4.2 Comportamento mecânico

### 4.4.2.1 Deformação permanente

Para a avaliação da resistência à deformação permanente da mistura asfáltica 3% NA + 2% SBS, foi utilizado o simulador de tráfego francês *Orniéreur*. Foram ensaiadas, simultaneamente, as Placas 1 e 4, que apresentaram porcentagens de volume de vazios mais próximas a 4%, o qual seria o valor compatível com o teor de ligante de 4,3%.

A Figura 4.22 mostra a regressão linear obtida a partir dos resultados de afundamento de trilha de roda medidos ao longo do ensaio.

Figura 4.22 - Curva do ensaio de deformação permanente da mistura asfáltica 3% NA + 2% SBS.

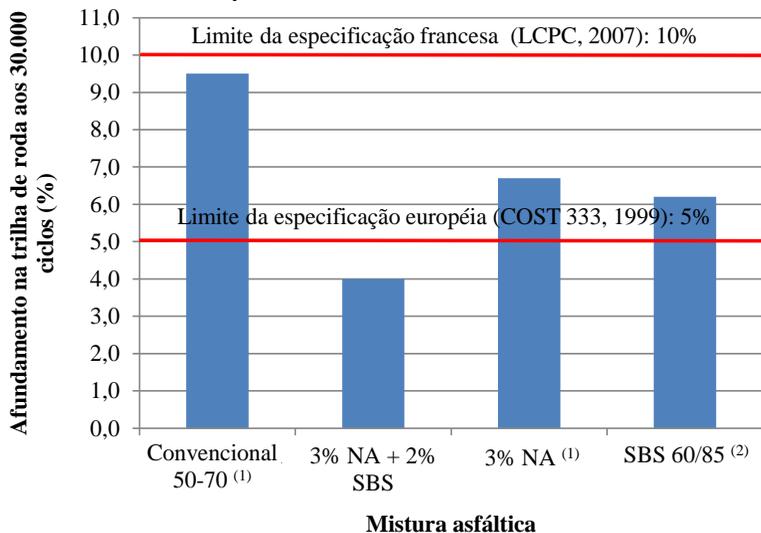


Fonte: Autora (2017).

Conforme se observa na Figura 4.22, ao término do ensaio, o afundamento na trilha de roda correspondeu ao total acumulado de 4,0% em relação à altura inicial das placas. Este resultado encontra-se abaixo dos limites de 10% estabelecidos pela especificação francesa (LCPC, 2007) e de 5% prescritos por diretrizes europeias (COST 333, 1999).

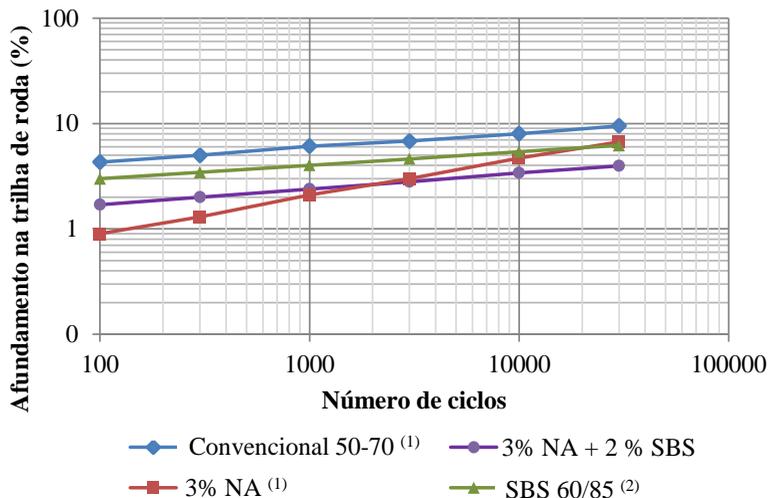
Nas Figuras 4.23 e 4.24 os resultados de deformação permanente obtidos para a mistura projetada nesta pesquisa são apresentados em conjunto com aqueles obtidos por Melo (2014) e por Marcon (2016).

Figura 4.23 - Resultados dos ensaios de deformação permanente aos 30.000 ciclos para as diferentes misturas asfálticas.



Fonte: Autora (2017), com dados de Melo (2014) <sup>(1)</sup>, de Marcon (2016) <sup>(2)</sup> e de autoria própria.

Figura 4.24 - Curvas dos ensaios de deformação permanente das diferentes misturas asfálticas.



Fonte: Autora (2017), com dados de Melo (2014) <sup>(1)</sup>, de Marcon (2016) <sup>(2)</sup> e de autoria própria.

Entre os resultados expostos, verifica-se o melhor comportamento da mistura asfáltica 3% NA + 2% SBS, seguido pelas misturas SBS 60/85, 3% NA e mistura convencional. Esta hierarquia também foi observada por Golestani et al. (2015), que estudaram a modificação simultânea de um CAP com 1,5% de nanoargila e 6% de polímero SBS.

Em proporções, estima-se que a utilização da mistura modificada por SBS e nanoargila possa alcançar a redução de até 58% do afundamento na trilha de roda em relação à mistura convencional. Quando o comportamento da mistura de referência é comparado ao da mistura modificada exclusivamente por SBS e exclusivamente por nanoargila, as porcentagens de redução podem chegar a até 35% e 29%, respectivamente.

A superioridade da mistura 3% NA + 2% SBS, em termos de resistência à deformação permanente, encontra-se em concordância com a previsão de desempenho realizada a partir dos resultados obtidos na caracterização empírica dos ligantes (menor penetração) e no estudo reológico das misturas (maior rigidez, que implica na menor deformabilidade, e menores ângulos de fase, que remetem ao aumento da resposta elástica do material).

O estudo reológico, a partir da análise dos resultados de ângulo de fase, também se mostrou efetivo na previsão de desempenho à deformação permanente das demais misturas. No caso da mistura SBS 60/85, além de baixos ângulos de fase, a caracterização empírica do ligante também havia demonstrado elevado ponto de amolecimento, aspecto favorável quanto à deformação permanente.

Observando-se as curvas da Figura 4.24, é possível verificar a semelhança entre a tendência de comportamento das misturas convencional, SBS 60/85 e 3% NA + 2% SBS. A mesma tendência não é seguida pela mistura modificada somente por nanoargila, que apresenta uma maior taxa de aumento na trilha de roda quando comparada às demais misturas. Todavia, ressalta-se que, neste ensaio, o que se busca é a porcentagem de deformação em relação à espessura inicial da placa para 30.000 ciclos de carregamento e, neste caso, somente a mistura 3% NA + 2% SBS atenderia ao critério europeu e todas as demais atenderiam ao critério da norma francesa.

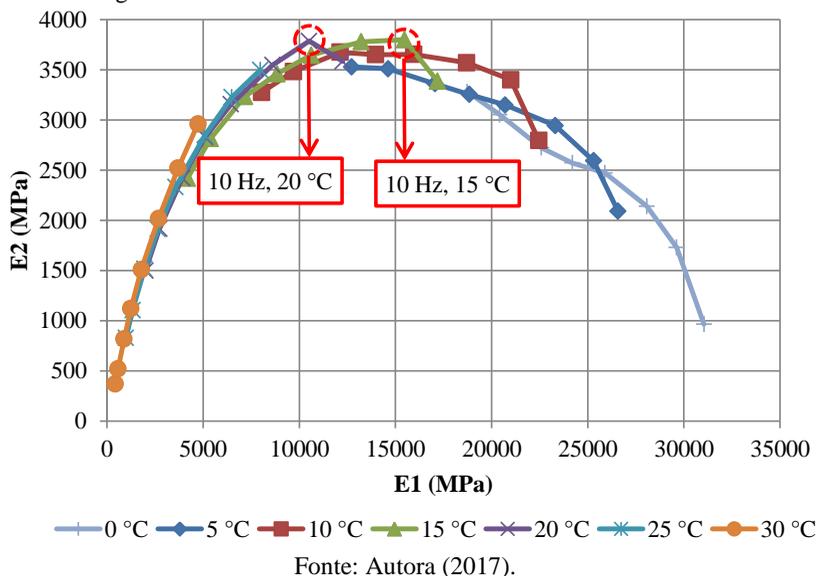
#### 4.4.2.2 Fadiga

Para a avaliação do comportamento à fadiga da mistura asfáltica 3% NA + 2% SBS, foram realizados ensaios de fadiga no aparato de

teste quatro pontos. Estes ensaios possibilitaram a obtenção do modelo de fadiga da mistura desenvolvida neste trabalho e a consequente comparação desta curva com aquelas obtidas por Melo (2014) e por Marcon (2016).

Os ensaios foram conduzidos à deformação controlada e frequência de carregamento igual a 10 Hz (equivalente à velocidade de 72 km/h). Para a definição da temperatura, foi inicialmente analisado o plano Cole-Cole, ilustrado na Figura 4.25.

Figura 4.25 - Plano Cole-Cole da mistura 3% NA + 2% SBS.



Conforme pode ser observado na Figura 4.25, para a frequência de 10 Hz, as temperaturas associadas aos maiores valores das componentes viscosas dos módulos complexos são de 15 °C e 20 °C. Estas temperaturas seriam consideradas críticas para a realização dos ensaios, uma vez que representam os maiores níveis de dissipação de energia por ciclo de carregamento.

No trabalho de Melo (2014), foram obtidas curvas de fadiga para a mistura convencional e modificada com 3% de nanoargila na temperatura de 15 °C. O autor também obteve um modelo para a mistura 3% NA considerando-se a temperatura de 20 °C. Para a mistura SBS 60/85, Marcon (2016) também obteve a curva aos 20 °C. Além disso, a

temperatura média anual da região onde se inserem os Segmentos Monitorados do Contorno de Araranguá é de 19,1 °C. Por estes motivos, optou-se por realizar os ensaios de fadiga da mistura 3% NA + 2% SBS na temperatura de 20 °C.

A Tabela 4.15 relaciona os dados dos ensaios de fadiga realizados nesta pesquisa e na Figura 4.26 é apresentada a curva de fadiga obtida a partir dos respectivos resultados. Para possibilitar uma análise comparativa entre as diferentes misturas asfálticas, esta curva é ilustrada em conjunto com as curvas obtidas por Melo (2014) e por Marcon (2016), para as misturas convencional, modificada somente por nanoargila e modificada somente por polímero. Na Figura 4.26, também são apresentados os modelos representativos de cada mistura, o coeficiente de correlação do ajuste dos pontos experimentais ( $R^2$ ) e a deformação de tração específica para um milhão de ciclos ( $\epsilon^6$ ). Estes dados também se encontram resumidos na Tabela 4.16.

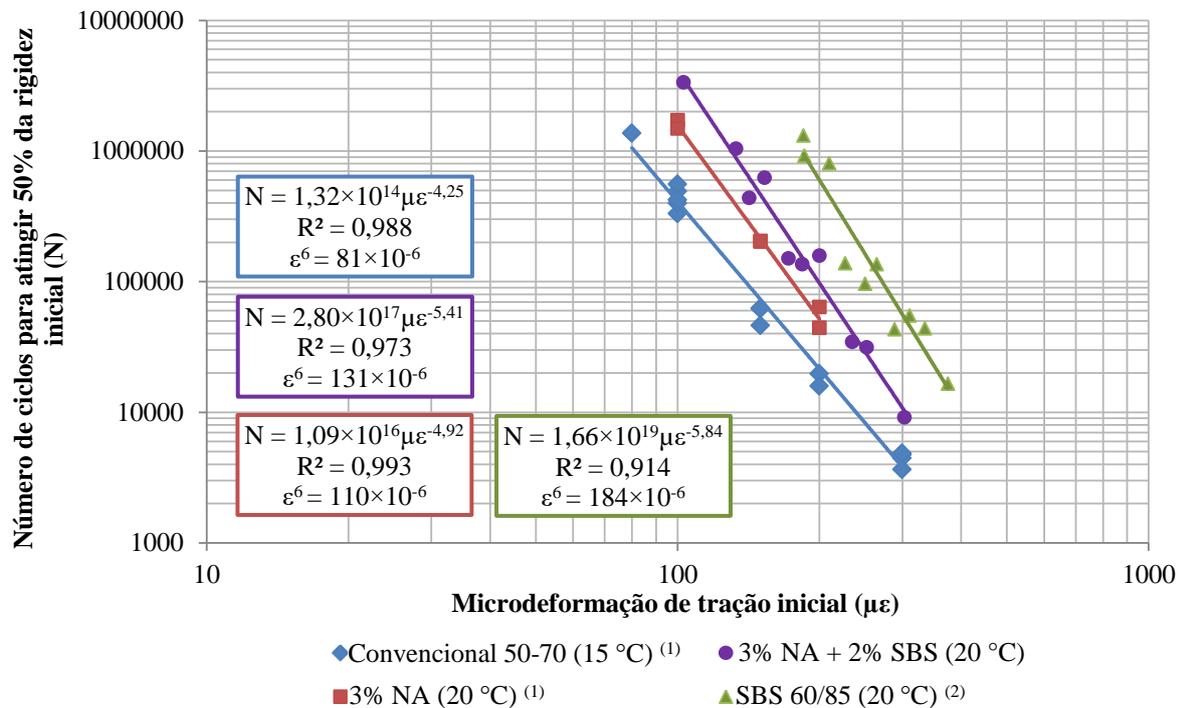
Tabela 4.15 - Resultados dos ensaios de fadiga da mistura asfáltica 3% NA + 2% SBS.

<b>Corpo de prova</b>	<b><math>V_v</math> (%)</b>	<b>Micro-deformação inicial (<math>\mu\epsilon</math>)</b>	<b>Módulo inicial (MPa)</b>	<b>Ângulo de fase inicial (°)</b>	<b>Número de ciclos</b>
2.2	4,08	103	9453	23,6	3355043
2.3	3,25	133	9982	23,1	1041115
3.4	3,37	142	10698	23,0	438493
1.4	4,04	153	10238	22,6	624385
3.1	3,82	172	10486	23,7	150295
2.5	3,55	184	9895	25,4	135705
1.5	3,61	200	10851	22,7	157818
3.5	3,47	235	9858	26,2	34656
1.3	4,51	252	9485	24,2	31362
2.1	4,24	303	8715	28,2	9136
Média	3,79	-	9966	-	-
Desvio padrão	0,41	-	645	-	-

Fonte: Autora (2017).

A partir das curvas apresentadas na Figura 4.26, para ensaios conduzidos com deformações de tração específicas entre 80 e 375  $\mu\epsilon$ , observa-se a maior resistência à fadiga da mistura SBS 60/85, seguida da mistura 3% NA + 2% SBS e das misturas 3% NA e convencional.

Figura 4.26 - Curvas de fadiga das diferentes misturas asfálticas.



Fonte: Autora (2017), com dados de Melo (2014) <sup>(1)</sup>, de Marcon (2016) <sup>(2)</sup> e de autoria própria.

Tabela 4.16 - Tabela resumo dos resultados dos ensaios de fadiga das diferentes misturas asfálticas.

Mistura asfáltica	Modelo de fadiga	$R^2$	$\epsilon^6$
Convencional <sup>(1)</sup>	$N = 1,32 \times 10^{14} \mu\epsilon^{-4,25}$	0,988	$81 \times 10^{-6}$
3% NA + 2% SBS	$N = 2,80 \times 10^{17} \mu\epsilon^{-5,41}$	0,973	$131 \times 10^{-6}$
3% NA <sup>(1)</sup>	$N = 1,09 \times 10^{16} \mu\epsilon^{-4,92}$	0,993	$110 \times 10^{-6}$
SBS 60/85 <sup>(2)</sup>	$N = 1,66 \times 10^{19} \mu\epsilon^{-5,84}$	0,914	$184 \times 10^{-6}$

Fonte: Autora (2017), com dados de Melo (2014) <sup>(1)</sup>, de Marcon (2016) <sup>(2)</sup> e de autoria própria.

Com base nas deformações estimadas para um milhão de ciclos ( $\epsilon^6$ ), estima-se que a mistura 3% NA + 2% SBS apresente um aumento de resistência de cerca de 19% em relação à mistura modificada somente por nanoargila. Quando esta última é comparada à mistura SBS 60/85, o acréscimo observado é de 67%. Deste modo, verifica-se que a adição simultânea do polímero à mistura modificada com nanoargila proporciona ganhos em termos de resistência à fadiga. No entanto, estes ganhos são relativamente pequenos em comparação à mistura modificada somente com polímero SBS. Há que se destacar, porém, que o ligante SBS 60/85 possui uma maior porcentagem de polímero.

Quanto à previsão de comportamento à fadiga realizada a partir do comportamento reológico das misturas asfálticas estudadas, pode-se dizer que a mesma foi parcialmente concretizada. Isto porque o comportamento superior das misturas SBS 60/85 e 3% NA + 2% SBS era esperado, em virtude de apresentarem maior predominância do comportamento elástico (menores ângulos de fase). Porém, de acordo com os respectivos resultados, de modo isolado, esperava-se o melhor comportamento da mistura 3% NA + 2% SBS. Provavelmente, em termos de fadiga, a mistura modificada por nanoargila e SBS tenha sido prejudicada devido ao considerável aumento na rigidez do material, o que foi verificado na caracterização empírica do ligante (baixa penetração) e também no estudo reológico das misturas. É possível, também, que o fato de se ter conduzido a modificação em uma temperatura ou tempo maior que o indicado tenha originado um maior envelhecimento final em curto prazo (após a moldagem das placas), comprometendo o melhor desempenho à fadiga desta mistura.

Além disso, retomando-se a Figura 4.21, que ilustra o contraste entre as componentes elásticas e viscosas dos módulos complexos das diferentes misturas a 20 °C e 10 Hz, pode-se observar o valor relativamente reduzido da parcela viscosa da mistura SBS 60/85. Neste

caso, os resultados dos ensaios de fadiga encontram-se em concordância com a teoria de energia dissipada. No entanto, segundo esta abordagem, o comportamento da mistura 3% NA + 2% SBS seria inferior também em relação às misturas 3% NA e convencional, o que não ocorreu na prática. Esta discordância provavelmente esteja atrelada à expressiva componente elástica da mistura 3% NA + 2% SBS, que supera todas as demais apresentadas. Assim, de acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa, nota-se que a componente viscosa não deveria ser analisada de forma isolada para prever o comportamento à fadiga de uma mistura asfáltica.

#### 4.5 ETAPA 6 – SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E PREVISÃO DO DESEMPENHO À FADIGA

As simulações numéricas conduzidas neste trabalho foram realizadas com o *software* ViscoRoute 2.0. As estruturas simuladas foram anteriormente apresentadas no método da pesquisa (Figura 3.10).

Para a caracterização reológica das misturas asfálticas, foram considerados os parâmetros de Huet-Sayegh apresentados na Tabela 4.17. Os parâmetros correspondentes à mistura 3% NA + 2% SBS foram obtidos com o auxílio do programa computacional Viscoanalyse, a partir do estudo do comportamento reológico da mistura. O ajuste dos respectivos dados experimentais é ilustrado na Figura 4.27.

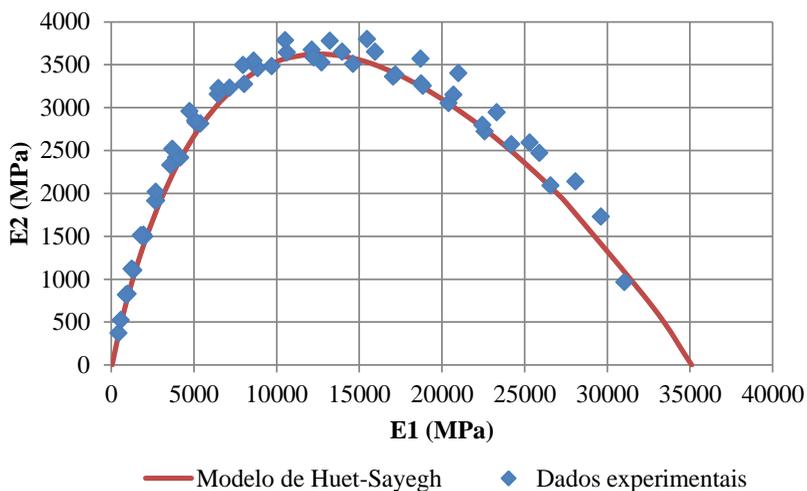
Tabela 4.17 - Parâmetros reológicos do modelo de Huet-Sayegh obtidos para as diferentes misturas asfálticas.

Parâmetro	Mistura asfáltica				
	Convencional (1)	3% NA + 2% SBS	3% NA (1)	SBS 60/85 (2)	BMP (2)
$E_{\infty}$ (MPa)	28499,2	35100,1	33864,1	52562,4	49323,0
$\nu$	0,30	0,30	0,30	0,27	0,27
$E_0$ (MPa)	56,253	50,11	1,23756	7,2476	7,70798
k	0,22896	0,19089	0,166642	0,10163	0,10543
h	0,68772	0,51946	0,56079	0,50227	0,47881
$\delta$	2,24483	1,67426	1,76482	2,68891	2,47254
A0	3,61263	4,60196	3,2907	1,14996	0,493797
A1	-0,474064	-0,490734	-0,487376	-0,441513	-0,416128
A2	0,0030196	0,0034947	0,0034478	0,002565	0,002202

Fonte: Autora (2017), com dados de Melo (2014)<sup>(1)</sup>, de Marcon (2016)<sup>(2)</sup> e de autoria própria.

Nas simulações, foi considerada a temperatura de 20 °C, que é aproximadamente a temperatura média anual da região onde se insere o Contorno de Araranguá. Excepcionalmente, para o revestimento em camada singular com mistura convencional (estrutura 1S), a simulação foi realizada aos 15 °C, dada a indisponibilidade da curva de fadiga aos 20 °C.

Figura 4.27 - Modelo de Huet-Sayegh ajustado para os dados experimentais da mistura asfáltica 3% SBS + 2% NA.



Fonte: Autora (2017).

Na Tabela 4.18 encontram-se relacionados os resultados das simulações, aplicados aos respectivos modelos de fadiga. Como se observa na Tabela, no caso das estruturas com revestimentos singulares (1S, 2S, 3S, 4S e 5S), as deformações de tração foram calculadas para as profundidades de 17,0 cm, que corresponde à espessura total do revestimento. Para as estruturas com camadas integradas (2I, 3I, 4I e 5I), estas determinações foram feitas nas profundidades de 11,4 cm e 17,0 cm, correspondentes às profundidades das faces inferiores de cada uma das camadas integradas.

Tabela 4.18 - Resultados das simulações numéricas e previsão da vida útil à fadiga dos revestimentos.

Estrutura	Revestimento	Profundidade (cm)	$\mu\epsilon$	Modelo de fadiga	Número de ciclos ( $N_{8,2t}$ )
1S	Convencional 50-70	17,0	65	$N = 1,32 \times 10^{14} \mu\epsilon^{-4,25} \text{ (1)}$	$2,60 \times 10^6$
2S	3% NA + 2% SBS	17,0	61	$N = 2,80 \times 10^{17} \mu\epsilon^{-5,41}$	$6,15 \times 10^7$
3S	3% NA	17,0	75	$N = 1,09 \times 10^{16} \mu\epsilon^{-4,92} \text{ (1)}$	$6,49 \times 10^6$
4S	SBS 60/85	17,0	80	$N = 1,66 \times 10^{19} \mu\epsilon^{-5,84} \text{ (2)}$	$1,28 \times 10^8$
5S	BMP	17,0	85	$N = 1,26 \times 10^{17} \mu\epsilon^{-5,00} \text{ (2)}$	$2,84 \times 10^7$
2I	Convencional 50-70	11,4	14	$N = 1,32 \times 10^{14} \mu\epsilon^{-4,25} \text{ (1)}$	$1,32 \times 10^9$
	3% NA + 2% SBS	17,0	66	$N = 2,80 \times 10^{17} \mu\epsilon^{-5,41}$	$4,01 \times 10^7$
3I	Convencional 50-70	11,4	23	$N = 1,32 \times 10^{14} \mu\epsilon^{-4,25} \text{ (1)}$	$2,15 \times 10^8$
	3% NA	17,0	78	$N = 1,09 \times 10^{16} \mu\epsilon^{-4,92} \text{ (1)}$	$5,35 \times 10^6$
4I	Convencional 50-70	11,4	25	$N = 1,32 \times 10^{14} \mu\epsilon^{-4,25} \text{ (1)}$	$1,51 \times 10^8$
	SBS 60/85	17,0	81	$N = 1,66 \times 10^{19} \mu\epsilon^{-5,84} \text{ (2)}$	$1,19 \times 10^8$
5I	Convencional 50-70	11,4	28	$N = 1,32 \times 10^{14} \mu\epsilon^{-4,25} \text{ (1)}$	$9,34 \times 10^7$
	BMP	17,0	85	$N = 1,26 \times 10^{17} \mu\epsilon^{-5,00} \text{ (2)}$	$2,84 \times 10^7$

Nota: No Contorno de Araranguá, foram executados os Segmentos de estruturas 1S e 5I, que estão sendo monitorados. As demais estruturas se prestaram para o desenvolvimento da análise mecanicista e da previsão de desempenho caso os Segmentos fossem executados da forma como ilustrado na Figura 3.10.

Fonte: Autora (2017), modelos de fadiga de Melo (2014) <sup>(1)</sup>, de Marcon (2016) <sup>(2)</sup> e de autoria própria.

Entre os resultados das simulações numéricas, podem ser destacadas as maiores deformações específicas calculadas para as camadas constituídas pela mistura asfáltica BMP (modificada por borracha moída de pneus, estruturas 5S e 5I), que são seguidas pelas deformações das camadas com SBS 60/85 (4S e 4I), com 3% NA (3S e 3I), com 3% NA + 2% SBS (2S e 2I) e convencional (1S). A maior deformabilidade da mistura BMP, por exemplo, deve-se à menor rigidez da mesma em relação às demais, verificada nos estudos reológicos de Marcon (2016). Entretanto, devido ao melhor comportamento à fadiga desta mistura observado nos ensaios de laboratório, nota-se que, mesmo sob a ação de maiores deformações, os revestimentos com BMP apresentariam maiores estimativas de vida útil se comparados aos revestimentos convencional e aos modificados com 3% de nanoargila (estruturas 1S, 3S e 3I).

Tratando-se das estimativas de desempenho das estruturas com revestimento singular, pode ser estabelecida a seguinte hierarquia, partindo-se da maior vida útil à fadiga: estrutura 4S (revestimento com mistura SBS 60/85), estrutura 2S (3% NA + 2% SBS), estrutura 5S (BMP), estrutura 3S (3% NA) e estrutura 1S (convencional).

Comparando-se, inicialmente, as estruturas 1S e 3S, observa-se que o emprego da mistura modificada com 3% de nanoargila, em substituição à mistura convencional, representaria o aumento de 1,5 vezes na vida útil do revestimento. Quando a mesma comparação é realizada entre as estruturas 1S e 2S, nota-se que a adição simultânea do polímero à mistura modificada por nanoargila intensificaria estes ganhos para cerca de 23 vezes, demonstrando-se o desempenho agregado ao revestimento em função do emprego da mistura projetada nesta pesquisa. Contudo, levando-se em conta as mesmas comparações e fixando-se as espessuras das camadas, nota-se que o emprego da mistura SBS 60/85 (4S) remeteria a um revestimento com desempenho à fadiga superior. No entanto, acredita-se que sua execução demandaria um maior custo.

Neste contexto, se comparados diretamente os desempenhos esperados para os revestimentos 4S (SBS 60/86) e 2S (3% NA + 2% SBS), estima-se que o primeiro apresente o dobro da vida útil em relação ao segundo. Para que apresentassem previsões de desempenho consideradas equivalentes, seria necessário o aumento de 2,2 cm (2,5 cm) na espessura do revestimento modificado por nanoargila e polímero (o que corresponderia a  $\mu\epsilon = 53$  e  $N_{8,2t} = 1,31 \times 10^8$ ). Ainda assim, considerando-se a possibilidade de redução de custos oriunda da

substituição da mistura SBS 60/85 pela mistura 3% NA + 2% SBS, evidencia-se que esta substituição, além de ser tecnicamente viável, poderia ser também viável economicamente. Esta constatação destaca o potencial de aplicação da mistura estudada neste trabalho, que pode se apresentar como uma alternativa competitiva frente às demais misturas estudadas.

Dando-se continuidade à análise, por ora em relação aos resultados obtidos para os revestimentos em camadas integradas, nota-se que, para todas as estruturas, a ruptura por fadiga ocorreria nas camadas modificadas. Este é o comportamento esperado para este tipo de revestimento, uma vez que o emprego de misturas com elevada resistência à fadiga nas camadas inferiores tem como objetivo o aproveitamento das propriedades destes materiais em regiões onde se iniciam os respectivos trincamentos.

Entre as estruturas com revestimentos integrados, pode-se estabelecer a seguinte hierarquia, da maior estimativa de desempenho para a menor: estrutura 4I (camada inferior modificada com SBS 60/85), estrutura 2I (3% NA + 2% SBS), estrutura 5I (BMP) e estrutura 3I (3% NA). Esta hierarquia corresponde à mesma estabelecida para os revestimentos singulares, porém com diferentes proporções de ganhos entre as misturas asfálticas distintas.

Demonstrando-se novamente as vantagens oriundas da adição simultânea de SBS à mistura 3% NA, neste caso, para revestimentos em camadas integradas, estima-se que a substituição da camada 3% NA (3I) pela camada 3% NA + 2% SBS (2I) implique em um aumento de aproximadamente 6 vezes na vida útil da estrutura. Além disso, a execução do revestimento 2I, em comparação ao revestimento 5I (executado em Araranguá), representaria um aumento na vida útil à fadiga do Segmento Monitorado de cerca de 41%.

Assim como constatado para os revestimentos em camadas integradas, nota-se que a execução da estrutura 4I (SBS 60/85) se apresentaria como sendo tecnicamente mais vantajosa em relação à estrutura 2I (3% NA + 2% SBS). Contudo, o desempenho equivalente destes revestimentos também poderia ser obtido por meio de um redimensionamento das estruturas, que poderia resultar em viabilidade técnica aliada à economia de custos. Como alternativa, a equivalência de desempenho, em termos de fadiga, poderia ser alcançada a partir do aumento de 2 cm na camada de mistura convencional da estrutura 2I (o que representaria, para a camada modificada por nanoargila e SBS,  $\mu\epsilon = 54$  e, conseqüentemente,  $N_{8,2t} = 1,19 \times 10^8$ ).

Analisando-se, paralelamente, os desempenhos esperados para os revestimentos singulares e integrados, sobretudo com base nos resultados obtidos para as estruturas 5S e 5I, nota-se que a execução de revestimentos em camadas integradas pode ser uma alternativa técnica e economicamente mais vantajosa. No caso das estruturas 2I, 3I e 4I, apesar de apresentarem estimativas de desempenho inferiores às singulares 2S, 3S e 4S, devido à proximidade entre os respectivos resultados, pode-se afirmar que o redimensionamento das espessuras poderia resultar também em melhores desempenhos aliados à economia de custos.

Tomando-se como referência o tráfego estimado para a BR-101 Sul, no Contorno de Araranguá ( $N_{8,2t} = 1,7 \times 10^8$ , USACE), observa-se que nenhuma das estruturas avaliadas atenderia, quanto à fadiga, às solicitações previstas para o período de projeto. Contudo, tendo em vista que a estrutura 1S representa o projeto contratado pelo DNIT e executado no Contorno, destaca-se que a execução dos revestimentos com camadas asfálticas modificadas representaria grandes ganhos para a vida útil do trecho e para a sociedade. Esta constatação encontra-se em concordância com os levantamentos realizados por Trichês (2016), que indicaram área trincada do revestimento 1S de cerca de 15% (Figura 4.28a) após 2 anos de abertura do Contorno ao tráfego, ao passo que a estrutura 5I, de outro Segmento Monitorado, apresentou área trincada de 0,09% (Figura 4.28b).

Figura 4.28 - Estado da superfície do revestimento dos Segmentos Monitorados de Araranguá com estrutura (a) 1S e (b) 5I.



Fonte: Trichês (2016).

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho possibilitou a investigação do comportamento reológico e a previsão do desempenho mecânico de uma mistura asfáltica modificada simultaneamente por nanoargila e por polímero SBS. A adição simultânea destes modificadores ao ligante asfáltico convencional visou à associação da influência benéfica do nanomaterial, em escala reduzida, ao efeito também positivo da recuperação elástica conferida pelo polímero.

Partindo-se deste princípio, foi adaptado um procedimento de laboratório para viabilizar a incorporação destes modificadores a um ligante convencional. Posteriormente, foram realizados estudos no âmbito do ligante modificado e da mistura asfáltica produzida com este ligante. Quanto à mistura, os efeitos da modificação foram avaliados em termos de dosagem, resistência à ação deletéria da água, comportamento reológico e previsão do desempenho mecânico (deformação permanente, fadiga e simulações numéricas).

A partir desta pesquisa, em conjunto com os resultados obtidos por Melo (2014) e por Marcon (2016), foi possível a realização de uma análise comparativa entre quatro misturas asfálticas distintas: convencional (CAP 50-70), modificada somente por nanoargila (3% NA), modificada somente por polímero SBS (SBS 60/85) e modificada simultaneamente por nanoargila e SBS (3% NA + 2% SBS).

No estudo de dosagem, observou-se que a mistura 3% NA + 2% SBS apresenta trabalhabilidade intermediária se comparada às misturas 3% NA e SBS 60/85, combinando as características de ambas as misturas.

Por meio do ensaio Lottman modificado, demonstrou-se a superioridade da mistura 3% NA + 2% SBS em termos de resistência à ação deletéria da água, o que poderia representar ganhos de desempenho em regiões de altos índices de pluviosidade. Além disso, também foram evidenciados os valores relativamente elevados obtidos para a resistência à tração indireta da mistura modificada nesta pesquisa, que resultam da forte ligação/adesividade formada entre o ligante e os agregados.

Com base na análise dos resultados de módulo complexo, observou-se a elevada rigidez e os valores reduzidos de ângulo de fase obtidos para a mistura duplamente modificada. Estes resultados foram considerados como bons indicativos do desempenho mecânico da

mistura. A partir do estudo reológico, também foram identificados ganhos em termos de susceptibilidade cinética em comparação às demais misturas estudadas. Em relação à susceptibilidade térmica, a mistura modificada simultaneamente por nanoargila e por SBS também se mostrou superior a convencional e a 3% NA e apresentando comportamento semelhante ao da mistura SBS 60/85.

Quanto ao fenômeno de deformação permanente, novamente merece destaque a superioridade da mistura estudada nesta pesquisa. Este comportamento concretizou as previsões realizadas por meio do estudo reológico e pode significar avanços no desempenho quanto às trilhas de roda para rodovias submetidas a altos volumes de tráfego.

Nos ensaios de fadiga, a mistura duplamente modificada apresentou resistência inferior à da mistura SBS 60/85. Neste aspecto, as previsões realizadas de acordo com o comportamento reológico das misturas foram parcialmente verificadas. No entanto, apesar da resistência à fadiga inferior da mistura 3% NA + 2% SBS em relação à mistura SBS 60/85, as simulações numéricas de estruturas de pavimento demonstraram que o emprego da primeira em substituição à segunda pode ser tecnicamente viável e, considerando-se a possibilidade de redução de custos a partir desta substituição, observa-se que a mesma também poderia ser viável sob o ponto de vista econômico.

Assim, de acordo com os resultados apresentados, a mistura 3% NA + 2% SBS seria altamente indicada para aplicação em rodovias submetidas a tráfego pesado e lento, localizadas em regiões de clima tropical e com elevado índice de pluviosidade, além de estruturas de pavimento com base cimentada, por exemplo. Deste modo, levando-se em conta os resultados extremamente positivos evidenciados para o comportamento e para a previsão de desempenho da mistura modificada simultaneamente por nanoargila e por polímero SBS, conclui-se que sua aplicação pode representar grandes contribuições para a área da engenharia rodoviária.

A partir dos resultados obtidos na pesquisa, recomenda-se para trabalhos futuros:

- Buscar a otimização dos teores de nanoargila e de polímero para a modificação dos ligantes asfálticos, de modo a se alcançar o melhor aproveitamento das propriedades de cada um destes reforços;
- Executar segmentos experimentais para a validação dos resultados obtidos em laboratório;

- Estudar a modificação simultânea de ligantes com outros nanomateriais e outros polímeros;
- Avaliar os efeitos da otimização do procedimento adotado para incorporar os modificadores à matriz asfáltica (tempo e temperatura);
- Estudar a modificação com nanomateriais e polímeros combinados em forma de nanocompósitos antes da dispersão no ligante;
- Avaliar a incorporação simultânea dos modificadores em ligantes de diferentes consistências.



## REFERÊNCIAS

AASHTO – 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, D. C., 2013.

\_\_\_\_. **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, D. C., 2010.

\_\_\_\_. **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, D. C., 2012.

\_\_\_\_. **AASHTO T 112: Standard method of test for clay lumps and friable particles in aggregate**. Test standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing. Washington, D. C., 2012.

\_\_\_\_. **AASHTO T 176: Standard method of test for plastic fines in graded aggregates and soil by use of the sand equivalent test**. Test standard specifications for transportation materials and methods of sampling and testing. Washington, D. C., 2008.

AAT - Advanced Asphalt Technologies, LLC. **A manual for design of hot mix asphalt with commentary**. NCHRP Report 673. Transportation Research Board, Washington D. C., 2011.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 6502: Rochas e solos: terminologia**. 1995.

\_\_\_\_. **ABNT NBR 6560: Ligantes asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do anel e bola**. 2016.

\_\_\_\_. **ABNT NBR 6576: Materiais asfálticos – Determinação da penetração**. 2007.

\_\_\_\_. **ABNT NBR 6954: Lastro-padrão – Determinação da forma do material.** 1989.

\_\_\_\_. **ABNT NBR 15086: Materiais betuminosos – Determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro.** 2006.

\_\_\_\_. **ABNT NBR 15166: Asfalto modificado – Ensaio de separação de fase.** 2004.

\_\_\_\_. **ABNT NBR 15184: Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional.** 2004.

\_\_\_\_. **ABNT NBR 15573 – Misturas asfálticas – Determinação da densidade aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados.** 2012.

\_\_\_\_. **ABNT NBR 15617 – Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida.** 2015.

\_\_\_\_. **ABNT NBR 15619: Misturas asfálticas – Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas.** 2016.

AFNOR – Association Française de Normalisation. **AFNOR NF P 98-250-2 – Essais Relatifs Aux Chaussées, Préparation des Mélanges Hydrocarbonés, Partie 2: Compactage des Plaques.** AFNOR, 1991.

\_\_\_\_. **NF P 98-253-1 – Essais Relatifs Aux Chaussées, Déformation Permanente des Mélanges Hydrocarbonés.** AFNOR, 1993.

AIREY, G. D. Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens. **Construction and building materials**, v. 16, p. 473-487, 2002.

ALEXANDRE, M.; DUBOIS, P. Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials. **Materials Science and engineering**, v. 28, p. 1-63, 2000.

ALGER, M. S. M. Thermoplastic elastomers. IN: DYSON, R. W. **Engineering polymers**. London: Blackie & Son Limited, 1990.

ANP - Agência Nacional De Petróleo, Gás e Biocombustível. **Resolução ANP Nº 19, DE 11.7.2005 DOU 12.7.2005 REPUBLICADA DOU 13.7.2005 – RETIFICADA DOU 25.7.2005 – RETIFICADA DOU 17.3.2006.**

\_\_\_\_. **Resolução ANP Nº 32, DE 21.9.2010 DOU 22.9.2010.**

ASHBY, M. F.; FERREIRA, P. J.; SCHODEK, D. L. **Nanomaterials, nanotechnologies and design: an introduction for engineers and architects**. Oxford: Elsevier Ltd., 2009.

ASKELAND, D. R.; FULAY, P. P.; WRIGHT, W. J. **The science and engineering of materials**. 6th ed. Stamford: Cengage Learning, 2011.

ASPHALT INSTITUTE. **Asphalt industry glossary of terms**. Disponível em: <<http://www.asphaltinstitute.org/engineering/>>. Acesso em: 31 jan 2016.

ASTM – American Society for Testing Materials. **ASTM C 88: Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate**. USA, 2013.

\_\_\_\_. **ASTM C 127: Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate**. USA, 2012.

\_\_\_\_. **ASTM C 131: Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine**. USA, 2014.

\_\_\_\_. **ASTM C 1252: Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading)**. USA, 2006.

\_\_\_\_. **ASTM D 5: Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials**. USA, 2013.

\_\_\_\_. **ASTM D 36 – Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)**. USA, 2014.

\_\_\_\_. **ASTM D 1895: Standard Test Methods for Apparent Density, Bulk Factor, and Pourability of Plastic Materials**. USA, 2010.

\_\_\_\_. **ASTM D 4402 – Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer**. USA, 2013.

\_\_\_\_. **ASTM D 5821: Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate**. USA, 2013.

ATKINSON, J. **The Mechanics of Soils and Foundations**. 2nd ed. New York: Taylor & Francis, 2007.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008.

BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 084: Agregado miúdo – determinação da densidade real**. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_. **DNER-ME 085: Material finamente pulverizado – determinação da massa específica real**. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **DNIT 095/2006 – EM: Cimentos asfálticos de petróleo – Especificação de material**. Rio de Janeiro, 2006a.

\_\_\_\_. **DNIT 031/2006 – ES: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2006b.

\_\_\_\_. **Rede do Sistema Nacional de Viação, 2015**. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/sistema-nacional-de-viacao/sistema-nacional-de-viacao>>. Acesso em: 31 out 2016.

BROWN, S. F.; ROWLETT, R. D.; BOUCHER, J. L. **Asphalt modification, Highway research: sharing the benefits**. Proceedings of the conference: The United States strategic highway research program. London: Thomas Telford, 1990.

BRULE, B.; BRION, Y.; TANGUY, A. Paving asphalt polymer blends, relationship between composition, structure and properties. **J. Assoc. Asphalt Paving Technol.**, v. 57, p. 41-64, 1988.

BUZEA, C.; BLANDINO, I. I. P.; ROBBIE, K. Nanomaterials and nanoparticles: sources and toxicity. **Biointerphases – a Journal of biomaterials and biological interfaces**, v. 2, n. 4, p. MR17-MR71, 2007.

CALLISTER JUNIOR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CANEVAROLO JUNIOR, S. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2 ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006.

CAO, G. **Nanostructures & nanomaterials: synthesis, properties & applications**. London: Imperial College Press, 2004.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988.

CARASTAN, D. J. **Obtenção e caracterização reológica de nanocompósitos de polímeros estirênicos**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

CHANDA, M.; ROY, S. K. **Industrial polymers, specialty polymers, and their applications**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC, 2008.

COST 333. **Development of New Bituminous Pavement Design Method: Final Report of the Action**. European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research. European Commission Directorate General Transport. Belgium, 1999.

CNT – Confederação Nacional de Transportes. **Pesquisa CNT de rodovias 2016**: relatório gerencial. Brasília, 2016.

DEMARQUETTE, N. R.; CARASTAN, D. J.; VALERA, T. S. Clay-containing styrenic compounds. IN: THOMAS, S.; ZAIKOV, G. E. **Polymer nanocomposites research advances**. New York: Nova Science Publishers, 2008. p. 327-378.

EN – 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.

\_\_\_\_\_. **EN 12697-29 – Bituminous Mixtures, Test Methods for Hot Mix Asphalt – Part 29: Determination of the Dimensions of a Bituminous Specimen**. CEN, Brussels, 2004.

FARIAS, L. G. A. T. et al. Effects of nanoclay and nanocomposites on bitumen rheological properties. **Construction and building materials**, v. 125, p. 873-883, 2016.

FONTES, L. P. T. L. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos**. Tese (Doutorado) – Universidade do Minho / Universidade Federal de Santa Catarina, Portugal, 2009.

GALOOYAK, S. S. et al. Rheological properties and storage stability of bitumen/SBS/montmorillonite composites. **Construction and building materials**, v. 24, n. 3, p. 300-307, 2010.

GOLESTANI, B.; NEJAD, F. M.; GALOOYAK, S. S. Performance evaluation of linear and nonlinear nanocomposite modified asphalts. **Construction and building materials**, v. 35, p. 197-203, 2012.

GOLESTANI, B. et al. Nanoclay application to asphalt concrete: characterization of polymer and linear nanocomposite-modified asphalt binder and mixture. **Construction and building materials**, v. 91, p. 32-38, 2015.

GOOCH, J. W. **Encyclopedic dictionary of polymers**. New York: Springer Science Business Media, LLC, 2007.

GRIM, R. E. **Clay mineralogy**. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1953.

ISO – International Organization for Standardization. **ISO 37: Rubber, vulcanized or thermoplastic -- Determination of tensile stress-strain properties**. 2005.

\_\_\_\_. **ISO 868: Plastics and ebonite -- Determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness)**. 2003.

\_\_\_\_. **ISO 1133: Plastics -- Determination of the melt mass-flow rate (MFR) and the melt volume-flow rate (MVR) of thermoplastics**. 2005.

\_\_\_\_. **ISO 2781: Rubber, vulcanized or thermoplastic -- Determination of density**. 2008.

JAHROMI, S. G.; ANDALIBIZADE, B.; VOSSOUGH, S. Engineering properties of nanoclay modified asphalt concrete mixtures. **The arabian journal for Science and engineering**, v. 35, n. 1B, 2010.

KAMENA, K. Nanoclays and their emerging markets. IN: XANTHOS, M. **Functional fillers for plastics**. 2nd ed. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010. p. 177-188.

KRATON PERFORMANCE POLYMERS Inc. **KRATON D 1101 B Polymer**. Disponível em: <[http://www.kraton.com/products/Kraton\\_D\\_SBS.php](http://www.kraton.com/products/Kraton_D_SBS.php)>. Acesso em: 18 abr 2016.

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

LEITE, L. F. M. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero**. Tese (Doutorado) – Instituto de

Macromoléculas Professora Eloisa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

MARCON, M. F. **Estudo e comparação do desempenho mecânico e reológico entre concretos asfálticos modificados por polímero SBS, borracha moída de pneu e nanomateriais.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

MELO, J. V. S. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos.** Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

MERUSI, F. et al. A model combining structure and properties of 160/220 bituminous binder modified with polymer/clay nanocomposites. A rheological and morphological study. **Materials and structures**, v. 47, n. 5, p. 819-838, 2014.

MISRA, G. S. **Introductory polymer chemistry.** New Delhi: New Age International (P) Limited, Publishers, 1993.

MODARRES, A. Investigating the toughness and fatigue behavior of conventional and SBS modified asphalt mixes. **Construction and building materials**, v. 47, p. 218-222, 2013.

MORGAN, P.; MULDER, A. **The Shell bitumen industrial handbook.** Surrey: Thomas Telford, 1995.

OZIN, G. A.; ARSENAULT, A. C.; CADEMARTIRI, L. **Nanochemistry: a chemical approach to nanomaterials.** 2nd ed. London: The Royal Society of Chemistry, 2009.

PAMPLONA, T. F. et al. Asphalt binders modified by SBS and SBS/nanoclays: effect on rheological properties. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 23, n. 4, p. 639-647, 2012.

PAUL, D. R.; ROBESON, L. M. Polymer nanotechnology: nanocomposites. **Polymers**, v. 49, p. 3187-3204, 2008.

READ, J.; WHITEOAK, D. **The Shell bitumen handbook**. 5th ed. London: Thomas Telford Publishing, 2003.

REEVES, G. M.; SIMS, I.; CRIPPS, J. C. **Clay materials used in construction**. London: The Geological Society, 2006.

RIBAS, C. Y. **Avaliação da influência do método de compactação na macroestrutura de misturas asfálticas densas utilizando o processamento digital de imagens**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

ROBINSON, H. L. **Polymers in asphalt**. Shrewsbury: Rapra Technology Limited, 2004.

RUIZ-HITZKY, E.; VAN MEERBEEK, A. Clay mineral – and organoclay-polymer nanocomposite. IN: BERGAYA, Faïza; THENG, Benny K. G.; LAGALY, Gerhard. **Handbook of clay Science**. Oxford: Elsevier Ltd., 2006. p. 583-621.

SANTOS, A. S. **Segmentos Monitorados de Araranguá: construção e previsão de desempenho do revestimento em camadas singulares e integradas**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SENGOZ, B.; ISIKYAKAR, G. Analysis of styrene-butadiene-styrene polymer modified bitumen using fluorescent microscopy and convencional test methods. **Journal of Hazardous Materials**, v. 150, p. 424-432, 2007.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2012.

SZÁZDI, L. T. **Structure - property relationship in polymer/layered silicate nanocomposites**. Ph.D. Thesis – Department of Plastics and Rubber Technology, Budapest University of Technology and Economics, Budapest, 2006.

TANTRA, R. et al. Nanomaterial syntheses. IN: TANTRA, R. **Nanomaterial characterization: an introduction**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2016.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2nd ed. London: Thomas Telford, 1997.

TRICHÊS, G. **Desenvolvimento de Método para Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos Fase II: Desempenho dos Segmentos Monitorados – UFSC**. Relatório Técnico Parcial de Acompanhamento 04, Dezembro de 2016. Circulação restrita.

XIAO, F. et al. Rheological property investigations for polymer and polyphosphoric acid modified asphalt binders at high temperatures. **Construction and building materials**, v. 64, p. 316-323, 2014.

YOU, Z. et al. Nanoclay-modified asphalt materials: preparation and characterization. **Construction and building materials**, v. 25, p. 1072-1078, 2011.

YOUNG, R. J.; LOVELL, P. A. **Introduction to polymers**. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2011.

WANG, T.; YI, T.; YUZHEN, Z. The compatibility of SBS-modified asphalt. **Petroleum science and technology**, v. 28, p.764-772, 2010.

WHELAN, T. **Polymer technology dictionary**. London: Springer Science Business Media, 1994.

ZHANG, J. et al. Relating asphalt binder elastic recovery properties to HMA crack modeling and fatigue life prediction. **Construction and building materials**, v. 111, p. 644-651, 2016.

ZHU, J.; BIRGISSON, B.; KRINGOS, N. Polymer modification of bitumen: advances and challenges. **European polymer journal**, v. 54, p. 18-38, 2014.