

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

TIAGO SCHEFFER DE MATOS



**INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES DINÂMICO-MECÂNICAS DE LIGANTES
ASFÁLTICOS BRASILEIROS COMO INDICADORES DE SEUS DESEMPENHOS
OPERACIONAIS EM CAMPO**

CURITIBA

2017

TIAGO SCHEFFER DE MATOS

**INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES DINÂMICO-MECÂNICAS DE LIGANTES
ASFÁLTICOS BRASILEIROS COMO INDICADORES DE SEUS DESEMPENHOS
OPERACIONAIS EM CAMPO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre. Área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais, Programa de Pós-Graduação de Engenharia e Ciência dos Materiais- PIPE. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Dr. Kleber Franke Portella
Coorientadora: Dr^a Leni Figueiredo Mathias Leite

CURITIBA

2017

M433

Matos, Tiago Scheffer de

Investigação das propriedades dinâmico-mecânicas de ligantes asfálticos brasileiros como indicadores de seus desempenhos operacionais em campo / Tiago Scheffer de Matos. – Curitiba, 2017.

99 f. : il. color. ; 30 cm.

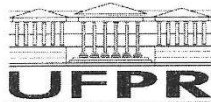
Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, 2017.

Orientador: Kleber Franke Portella – Co-orientador: Leni Figueiredo Mathias Leite.

Bibliografia: p. 92-99.

1. Engenharia de Materiais. 2. Pavimentação. 3. SUPERPAVE.
4. Reômetro de cisalhamento dinâmico. I. Universidade Federal do Paraná.
II. Portella, Kleber Franke. III. Leite, Leni Figueiredo Mathias . IV. Título.

CDD: 624.18



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
Setor TECNOLOGIA
Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS

ATA Nº323

**ATA DE SESSÃO PÚBLICA DE DEFESA DE MESTRADO PARA A OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS**

No dia vinte e tres de Fevereiro de dois mil e dezessete às 09:30 horas, na sala de reuniões do LAME, Institutos Lactec, foram instalados os trabalhos de arguição do mestrando **TIAGO SCHEFFER DE MATOS** para a Defesa Pública de sua Dissertação intitulada **INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES DINÂMICO-MECÂNICAS DE LIGANTES ASFÁLTICOS BRASILEIROS COMO INDICADORES DE SEUS DESEMPENHOS OPERACIONAIS EM CAMPO**. A Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS da Universidade Federal do Paraná, foi constituída pelos seguintes Membros: **KLEBER FRANKE PORTELLA (UFPR)**, **CARLOS ITSUO YAMAMOTO (UFPR)**, **EDUARDO PEREIRA (UEPG)**. Dando início à sessão, a presidência passou a palavra ao discente, para que o mesmo expusesse seu trabalho aos presentes. Em seguida, a presidência passou a palavra a cada um dos Examinadores, para suas respectivas arguições. O aluno respondeu a cada um dos arguidores. A presidência retomou a palavra para suas considerações finais e, depois, solicitou que os presentes e o mestrando deixassem a sala. A Banca Examinadora, então, reuniu-se sigilosamente e, após a discussão de suas avaliações, decidiu-se pela APROVAÇÃO do aluno. O mestrando foi convidado a ingressar novamente na sala, bem como os demais assistentes, após o que a presidência fez a leitura do Parecer da Banca Examinadora. Nada mais havendo a tratar a presidência deu por encerrada a sessão, da qual eu, **KLEBER FRANKE PORTELLA**, levrei a presente ata, que vai assinada por mim e pelos membros da Comissão Examinadora.

CURITIBA, 23 de Fevereiro de 2017.

KLEBER FRANKE PORTELLA

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

CARLOS ITSUO YAMAMOTO

Avaliador Interno (UFPR)

EDUARDO PEREIRA

Avaliador Externo (UEPG)

Dedico aos meus pais, Saul Ramos de Matos e Eli Scheffer de Matos e a minha irmã Cristina Scheffer de Matos pelo apoio durante a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador professor Dr. Kleber Franke Portella que me deu a oportunidade de realizar este trabalho e pelas contribuições durante esses dois anos de mestrado.

A Dr^a Leni Figueiredo Mathias Leite, pela confiança pelos ensinamentos que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho e também pela disponibilidade em me coorientar.

Aos meus professores Miguel Pinto Oliveira e Irene Terezinha Santos Garcia, pelo apoio e incentivo durante a minha graduação.

Aos colegas de trabalho do laboratório da REPAR que me incentivaram e contribuíram de alguma forma durante a realização deste trabalho, em especial a Aline Benato, Valdemir, Paulo Dazzan e André.

Ao Joel da Fábrica de Asfalto do Paraná -FASPAR pela visita técnica realizada onde tive uma dimensão maior da variedade de produtos asfálticos.

A Flavia Ártico e Cristiano Albanez da empresa QuantiQ e também Roberto Bernardique da Sasol Wax pela amostra do aditivo Sasobit®.

Ao Alexander Vivoni do laboratório central de Pavimentação da BR distribuidora pela ajuda durante a realização dos ensaios.

Aos colegas Emerson e Gerald Rodrigues que estiveram mais próximos durante esses dois anos de curso pela ajuda e momentos de descontração.

Aos professores do PIPE-UFPR pelos ensinamentos durante o curso mostrando de maneira ampla o processo de formação dos pesquisadores.

As pessoas que direta ou indiretamente contribuíram de alguma forma para que eu desse prosseguimento ao sonho de realizar o mestrado.

“ O que importa é saber o que importa”

(Mário Sérgio Cortella)

RESUMO

Os principais defeitos encontrados nos pavimentos brasileiros são a deformação permanente e o trincamento por fadiga. A atual especificação brasileira não prevê nenhum ensaio que contemple uma correlação com essas manifestações patológicas encontradas no pavimento e que permita classificar o material mais adequado para uma determinada aplicação. Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de classificar diferentes ligantes asfálticos por meio de ensaios dinâmico-mecânicos e sua influência na qualidade do pavimento. A evolução tecnológica trouxe diversos avanços na caracterização dos materiais nas últimas décadas o que foi fundamental para o desenvolvimento de materiais mais duráveis e sustentáveis. O reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) foi o equipamento chave para o desenvolvimento de novos ensaios que tenham a capacidade de mensurar o desempenho do material e não as propriedades empíricas com análises que foram desenvolvidas no início do século passado. Nesse estudo estão reunidas informações dos ligantes asfálticos, típicos, ligante modificado com cera de alto peso molecular e ligantes modificados por polímeros analisados por desempenho, baseados na metodologia SUPERPAVE, sendo confrontados os dados com aqueles obtidos da especificação brasileira atual fundamentada em propriedades empíricas, apontando as vantagens e as desvantagens na utilização desses novos ensaios desenvolvidos nos últimos anos para a realidade brasileira. Foi verificada a capacidade superior dos ensaios dinâmico-mecânicos para classificar os diferentes ligantes asfálticos trabalhados, predizendo se o material é suscetível à formação de defeitos prematuramente, classificando os ligantes asfálticos de acordo com o melhor desempenho e as características desejáveis ao pavimento.

Palavras Chave: Análises dinâmico-mecânicos; SUPERPAVE; Reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR); Indicadores de desempenho.

ABSTRACT

The main defects found in Brazilian pavements are permanent deformation and cracking due to fatigue. The current Brazilian specification does not provide for any test that contemplates a correlation with these pathologies found on the pavement and that allows to classify the most suitable material for a particular application. This work was developed with the objective of classifying different unmodified binders, modified binder with high molecular weight waxes and polymer modified binders, by means of dynamic mechanical analysis and their influence on pavement quality. Technological evolution has brought several advances in the characterization of materials in the last decades, which was fundamental for the development of more durable and sustainable materials. The dynamic shear rheometer (DSR) is the key equipment for the development of new tests that have the ability to measure the performance of the material and not the empirical properties with analyzes that were developed at the beginning of the last century. Based on the SUPERPAVE methodology, this study compares information from different asphalt binders based on the SUPERPAVE methodology and compares these data with those obtained from the current Brazilian specification based on empirical properties, pointing out advantages and disadvantages in the use of these new tests developed in recent years for the Brazilian reality. The superior ability of dynamic-mechanical analysis to classify different asphalt binders and to predict whether the material is prone to defect formation, classifying asphalt binders according to the best performance and desirable characteristics of the pavement was verified.

Keywords: dynamic-mechanical analysis; SUPERPAVE; Dynamic shear rheometer (DSR); Performance indicators.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - FOTO REFERENTE AO DEFEITO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM UM TRECHO URBANO DA BR-116 SENTIDO SUL NA CIDADE DE CURITIBA	22
FIGURA 2 - FOTO REFERENTE AO DEFEITO DE TRINCAMENTO POR FADIGA EM UMA RUA VICINAL NO BAIRRO XAXIM NA CIDADE DE CURITIBA	23
FIGURA 3 - FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DE PRODUÇÃO DO CAP, EM DOIS ESTÁGIOS.....	26
FIGURA 4 – ADITIVO SASOBIT® EM GRÂNULOS	31
FIGURA 5 - EFEITO DO ENVELHECIMENTO COM A IDADE DO ASFALTO.....	34
FIGURA 6 - GRÁFICO DA CARGA EM FUNÇÃO DO TEMPO, ONDE A CARGA É APLICADA EM UM TEMPO INICIAL (TA) E LIBERADA APÓS UM INTERVALO DE TEMPO, SENDO O TEMPO FINAL (TL). PARA O CICLO DE CARGA TEMPO EM (A), AS RESPOSTAS DA DEFORMAÇÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA COMPORTAMENTOS TOTALMENTE ELÁSTICO (B), VISCOELÁSTICO (C) E VISCOOSO (D)	36
FIGURA 7- TENDÊNCIA DA VARIAÇÃO DA VISCOSIDADE COM A TEMPERATURA E A MODIFICAÇÃO DO LIGANTE COM CERA DE FISCHER-TROPSCH E SBS.....	38
FIGURA 8 - ÂNGULO DE FASE DE DOIS MATERIAIS ASFÁLTICOS DIFERENTES OU DO MESMO MATERIAL EM DIFERENTES TEMPERATURAS	39
FIGURA 9 - RELAÇÃO ENTRE TENSÃO E RECUPERAÇÃO DURANTE O TESTE MSCR.....	43
FIGURA 10- GRÁFICO DA SUPERPOSIÇÃO DOS DADOS DE TEMPO TEMPERATURA NA CONSTRUÇÃO DE UMA CURVA MESTRA DO MÓDULO COMPLEXO VERSUS FREQUÊNCIA.....	45
FIGURA 11- PRINCIPAIS PARÂMETROS OBTIDOS EM UMA CURVA MESTRA DO MÓDULO COMPLEXO VERSUS FREQUÊNCIA.....	46

FIGURA 12- DIAGRAMA DAS ZONAS DE DANO E INÍCIO DA FORMAÇÃO DE TRINCAS COM O ENVELHECIMENTO PROPOSTO POR GLOVER-ROWE E ANDERSON ET AL. (2011).	47
FIGURA 13- AGITADOR ROTACIONAL UTILIZADO PARA HOMOGENEIZAR AS AMOSTRAS	55
FIGURA 14 -VISCOSÍMETRO ROTACIONAL DA MARCA BROOKFIELD UTILIZADO NA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS DE VISCOSIDADE	56
FIGURA 15- EQUIPAMENTO DE PONTO DE AMOLECIMENTO A ESQUERDA, FOTO DE UMA ANÁLISE EM ANDAMENTO, PROXIMO A TEMPERATURA DE PONTO DE AMOLECIMENTO DA AMOSTRA.....	58
FIGURA 16 - EQUIPAMENTO DE PONTO DE FULGOR CLEVELAND UTILIZADO NA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE INFLAMABILIDADE DAS AMOSTRAS	59
FIGURA 17 - MOLDE E EQUIPAMENTO UTILIZADOS PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE DUCTILIDADE.....	60
FIGURA 18 - EQUIPAMENTOS UTILIZADO PARA A ANALISE DE RTFOT: (A) O FRASCO UTILIZADO, (B) ESTUFA ABERTA (C) ESTUFA FECHADA	61
FIGURA 19 - APARATO UTILIZADO PARA ANÁLISE DE SOLUBILIDADE EM TRICLOETILENO.....	62
FIGURA 20 - REÔMETRO DE CISALHAMENTO DINÂMICO (DSR) UTILIZADO NOS ENSAIOS DINÂMICO-MECÂNICOS.....	63
FIGURA 21- VARIAÇÃO DA VISCOSIDADE DOS LIGANTES ASFÁLTICOS COM A TEMPERATURA E COM A ADIÇÃO DE 1,5%, 3,0% E 4,5%, EM MASSA, DA CERA DE FISCHER TROPSCH.....	68
FIGURA 22- VARIAÇÃO DA VISCOSIDADE COM A TEMPERATURA DAS AMOSTRAS DE LIGANTES ASFÁLTICOS PUROS E MODIFICADOS.....	69
FIGURA 23 VARIAÇÃO DA PENETRAÇÃO DAS AMOSTRAS DE LIGANTES ASFÁLTICOS PUROS E MODIFICADOS.....	71
FIGURA 24- RESULTADOS DO ENSAIO DE PONTO DE AMOLECIMENTO DOS LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS E NÃO MODIFICADOS	72
FIGURA 25- GRAU DE DESEMPENHO SUPERIOR DOS LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS E NÃO MODIFICADOS EM FUNÇÃO DO ENVELHECIMENTO EM CURTO PRAZO NO RTFOT	75

FIGURA 26- CURVA MESTRA DA VARIAÇÃO DO MÓDULO COMPLEXO COM A FREQUÊNCIA PARA O LIGANTE NÃO MODIFICADO CAP 001.....	80
FIGURA 27- CURVA MESTRA DA VARIAÇÃO DO MÓDULO COMPLEXO COM A FREQUÊNCIA PARA O LIGANTE NÃO MODIFICADO CAP 002.....	80
FIGURA 28- CURVA MESTRA DA VARIAÇÃO DO MÓDULO COMPLEXO COM A FREQUÊNCIA PARA O LIGANTE MODIFICADO CAP 003	81
FIGURA 29- CURVA MESTRA DA VARIAÇÃO DO MÓDULO COMPLEXO COM A FREQUÊNCIA PARA O CAP 004	81
FIGURA 30- CURVA MESTRA DA VARIAÇÃO DO MÓDULO COMPLEXO COM A FREQUÊNCIA.....	82
FIGURA 31- CURVAS MESTRAS DOS LIGANTES ASFÁLTICOS PUROS E MODIFICADOS SOBREPOSTAS	82
FIGURA 32- SOBREPOSIÇÃO DAS CURVAS “BLACK” DOS LIGANTES NÃO MODIFICADOS	84
FIGURA 33- SOBREPOSIÇÃO DAS CURVAS “BLACK” DOS LIGANTES MODIFICADOS	84
FIGURA 34- DIAGRAMA DE GLOVER-ROWE COM OS DADOS DE ENVELHECIMENTO PARA OS LIGANTES ASFÁLTICO MODIFICADOS E NÃO MODIFICADOS	86

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - QUALIDADE DO PAVIMENTO NAS RODOVIAS BRASILEIRAS NO ANO DE 2015.....	21
TABELA 2 - RELAÇÃO ENTRE VOLUME E VELOCIDADE DO TRÁFEGO COM O PARÂMETRO JNR.....	44
TABELA 3 - ESPECIFICAÇÃO DOS CIMENTOS ASFÁLTICOS DE PETRÓLEO (CAP).....	48
TABELA 4 - ESPECIFICAÇÃO DOS CIMENTOS ASFÁLTICOS DE PETRÓLEO MODIFICADOS POR POLÍMEROS ELASTOMÉRICOS	50
TABELA 5 - RESULTADOS DOS PARÂMETROS COMPLEMENTARES	73
TABELA 6 - RESULTADOS DETALHADOS DO PARÂMETRO JNR NAS AMOSTRAS DE LIGANTES ASFÁLTICOS PUROS E MODIFICADOS.....	77
TABELA 7 - COMPARATIVO ENTRE OS PARÂMETROS EMPÍRICOS E OS PARÂMETROS DINÂMICO-MECÂNICOS E SUA RELAÇÃO COM O DESEMPENHO DOS LIGANTES ASFÁLTICOS ANALISADOS	89

LISTA DE SIGLAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

AMP – Asfaltos Modificados por Polímeros

ASTM – American Society For Testing and Materials

CAP- Cimento Asfáltico de Petróleo

DSR – Dynamic Shear Rheometer

ESAL – Equivalent Single Axle Load

MSCR – Multiple Stress Creep and Recovery

PG – Performance Grade

RTFOT – Rolling Thin Film Oven Test

SBR – Styrene-Butadiene Rubber

SBS – Styrene-Butadiene-Styrene

SHRP – Strategic Highway Research Program

SUPERPAVE – Superior Performing Asphalt Pavements

LISTA DE SÍMBOLOS

δ – ângulo de fase

® – marca registrada

G^* – módulo complexo de cisalhamento

R – índice reológico

ω_c – frequência de crossover (cruzamento)

η_0 – viscosidade de estado estacionário

G^*_g – módulo vítreo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 Objetivo Geral	18
1.2.2 Objetivos Específicos	18
1.3 JUSTIFICATIVA	19
2 REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 PAVIMENTAÇÃO	20
2.1.1 Principais defeitos nos pavimentos brasileiros	21
2.2 LIGANTE ASFÁLTICO	24
2.2.1 Produção do ligante asfáltico	25
2.3 LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS	27
2.3.1 Ligante asfáltico modificado com cera de alto peso molecular	30
2.3.2 Ligante asfáltico modificado com SBS	32
2.3.3 Ligante asfáltico altamente modificado	33
2.4 ENVELHECIMENTO	33
2.5 COMPORTAMENTO REOLÓGICO	35
2.6 PROPRIEDADES DINÂMICO-MECÂNICAS DE LIGANTES ASFÁLTICOS	38
2.6.2 Princípios dos ensaios dinâmico-mecânicos	38
2.6.2 Grau de desempenho	41
2.6.3 Ensaio de fluência e relaxação sobre múltipla tensão	42
2.6.4 Superposição de dados de tempo e temperatura	44
2.7 PARÂMETROS DE QUALIDADE DE LIGANTES ASFÁLTICOS	48
2.7.1 Parâmetros predominantes na especificação brasileira	52
3 MATERIAIS E MÉTODOS	54
3.1 MATERIAIS	54
3.2 PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS	55
3.3 MÉTODOS DA ESPECIFICAÇÃO BRASILEIRA	55
3.3.1 Penetração	55
3.3.2 Viscosidade Rotacional	56
3.3.3 Ponto de Amolecimento (anel bola)	57
3.3.4 Ponto de fulgor em copo aberto	58
3.3.5 Ductilidade	59

3.3.6 Ensaio em estufa de filme fino rotativo (RTFOT)	60
3.3.7 Solubilidade em tricloroetileno	61
3.3.8 Índice de suscetibilidade térmica.....	62
3.4 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO MATERIAL.....	63
3.4.1 Grau de desempenho superior (PG).....	63
3.4.2 Compliância não recuperável (Jnr).....	64
3.4.3 Curvas mestras e “black”	65
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
4.1 ANÁLISES DA ESPECIFICAÇÃO ATUAL.....	67
4.1.1 Viscosidade Rotacional	67
4.1.2 Penetração.....	70
4.1.3 Ponto de amolecimento	71
4.1.4 Parâmetros complementares	72
4.2 ANÁLISES POR DESEMPENHO	74
4.2.1 Calculo da temperatura máxima e mínima do pavimento para a cidade de Curitiba	74
4.2.2 Grau de desempenho superior	75
4.2.2 Compliância não Recuperável.....	76
4.2.3 Curvas mestras.....	79
4.2.4 Curvas “black”.....	83
4.2.5 Diagrama de Glover-Rowe.....	85
4.3 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE AS METODOLOGIAS EMPREGADAS.....	87
5 CONCLUSÕES.....	90
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

1 INTRODUÇÃO

Os ligantes asfálticos vêm sendo utilizados na construção e na manutenção de estradas desde o final do século XIX, sendo aplicados na grande maioria das vias encontradas ao redor do mundo. A complexa composição química e seu comportamento termoviscoelástico ainda não são perfeitamente compreendidos, mesmo após décadas de pesquisa e aplicação.

As propriedades físicas e químicas do ligante asfáltico variam de acordo com a origem do petróleo processado nas refinarias, sendo que essas mudanças podem provocar significativas alterações nas suas características e na qualidade do produto (BERNUCCI et al., 2008).

O grande desafio dos pesquisadores tem sido desenvolver materiais com maior durabilidade sem aumentar os custos, aliando a sustentabilidade e o menor consumo de energia. Diversos aditivos surgiram com essa finalidade que, embora aumentem o custo inicial, reduzem os gastos com manutenção.

Novas tecnologias de caracterização têm contribuído para entender melhor o comportamento dos materiais, permitindo assim criar e projetar materiais mais duráveis e sustentáveis.

A preocupação com a redução de emissões e o esgotamento de recursos não renováveis, frente a uma demanda crescente por infraestrutura de qualidade, aumenta a necessidade por novos materiais de engenharia que atendam os requisitos de qualidade e de durabilidade necessários aos projetos. Nos países desenvolvidos, o uso intensivo da reciclagem e o emprego de misturas mornas (o termo mistura morna “warm mix” é adotado para descrever as misturas asfálticas que são produzidas e aplicadas em temperaturas que variam de 105 °C a 135 °C), tem por objetivo aumentar a sustentabilidade da pavimentação, reutilizando agregados e ligantes, reduzindo as emissões poluentes e o óleo combustível. Nos E.U.A. a reciclagem trouxe uma redução do consumo de ligante asfáltico de 3 milhões de toneladas por ano, e que foi equivalente à produção brasileira total de cimentos asfálticos em 2010 (HANSEN, 2011).

Atualmente, tem se verificado que os ensaios de caracterização tradicionais dos ligantes asfálticos baseados em métodos empíricos não têm sido suficientes para prever a capacidade desse material de resistir aos esforços ao qual está submetido e a sua durabilidade, ou seja, não conseguem correlacionar a qualidade desse material com as principais manifestações patológicas que se verificam no pavimento asfáltico.

Diversos países têm realizado esforços no sentido de desenvolver novos ensaios de caracterização dos ligantes asfálticos, com novos métodos de avaliação que possam prever o comportamento mecânico do material durante a sua utilização (AUSTROADS, 2016).

O ligante asfáltico possui um comportamento distinto quando submetido a diferentes temperaturas, uma vez que os principais defeitos ocasionados no revestimento asfáltico brasileiro são a deformação permanente, relacionadas às altas temperaturas de serviço e o trincamento por fadiga em temperaturas intermediárias do pavimento (NASCIMENTO, 2008; MARTINS, 2014).

Neste trabalho, estão mostradas as principais características dos ligantes asfálticos modificados e não modificados, levantando os aspectos de como os ensaios dinâmico-mecânicos podem influenciar na obtenção de um produto final com melhor desempenho e qualidade.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

- Avaliar o desempenho mecânico de diferentes ligantes asfálticos puros e modificados por meio de ensaios dinâmico-mecânicos e ensaios empíricos estabelecidos em normas brasileiras.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar ensaios de desempenho no ligante asfáltico brasileiro puro e modificado em diferentes temperaturas.
- Diferenciar as propriedades mecânicas dos asfaltos modificados e puros e sua resistência à deformação permanente e à formação de trincas por fadiga.
- Avaliar as propriedades mecânicas obtidas e a sua influência na qualidade do ligante asfáltico.
- Avaliar as vantagens e as desvantagens dos ensaios por desempenho em relação aos ensaios empíricos utilizados para a seleção do ligante ideal para determinada obra de pavimentação no Brasil.
- Auxiliar na seleção do melhor ligante para cada aplicação, levando em consideração aspectos como a localização e o volume e a velocidade do tráfego.

1.3 JUSTIFICATIVA

Novos ensaios para a seleção dos ligantes asfálticos contribuem de maneira significativa para a seleção do ligante ideal para cada tipo de obra de pavimentação, reduzindo assim os custos com as obras de manutenção, que muitas vezes são prematuras devido à baixa qualidade do ligante ou à incompatibilidade do material para aquela aplicação. Nos casos de alto volume de tráfego e regiões quentes, existe a necessidade de se empregar asfaltos mais consistentes e até mesmo modificados para garantir a qualidade em serviço.

Este estudo vem a contribuir para desenvolvimento e a implantação dos ensaios dinâmico-mecânicos na seleção de ligantes asfálticos, os quais se fazem necessários para selecionar o ligante adequado ao uso.

Os ensaios dinâmico-mecânicos podem ser utilizados como ferramenta para otimizar a quantidade exata de aditivo que deve ser adicionada ao ligante asfáltico para que este tenha o desempenho mecânico adequado a via ao qual será utilizado.

A correta seleção do ligante adequado para determinada obra de pavimentação pode trazer uma redução significativa nos gastos com manutenção de rodovias e conseqüentemente menores custos para o usuário, com menores tempos de viagem devido a qualidade da via e a ausência de bloqueios para manutenção. Por fim, a redução dos custos devido ao aumento da durabilidade do pavimento, pode incrementar a quantidade de vias pavimentadas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 PAVIMENTAÇÃO

As primeiras estradas ou vias surgiram da necessidade do homem de ter um acesso mais rápido às áreas de interesse, sejam cultiváveis, cidades, ou mesmo para conquistar novos territórios e expandir o comércio, ou seja, o crescimento e o aperfeiçoamento da pavimentação estão ligados diretamente à evolução da sociedade (BERNUCCI et al., 2008).

Os egípcios e romanos foram os primeiros povos a se preocupar com a construção de vias pavimentadas. Em 312 a.C. foi iniciada construção de uma das primeiras estradas romanas pavimentadas, a via Ápia, nome este que foi dado em homenagem ao seu construtor Appius Claudius (BERNUCCI et al., 2008).

No Brasil, um marco para a pavimentação foi a construção da calçada do Lorena, construída em 1792 entre os municípios de Riacho Grande e Cubatão, sendo considerada por muitos estudiosos uma das mais importantes obras de engenharia do período colonial brasileiro. A técnica de construção se baseava nos antigos pavimentos romanos, com pedras recortadas justapostas assentadas sobre uma base de pedregulho e saibro (BALBO, 2007).

Em 1922, um trecho da serra do mar, conhecido como caminho do mar, foi pavimentado com concreto de cimento Portland, sendo este o registro mais antigo de pavimentação no Brasil (BALBO, 2007).

Nas décadas seguintes diversas obras rodoviárias foram inauguradas no Brasil, sendo que no começo da década de 1950 teve início a grande expansão da pavimentação, com o surgimento de grandes empresas construtoras (PREGO, 2001).

Atualmente, os pavimentos podem ser classificados em dois tipos no que se refere ao material utilizado: i) o pavimento de concreto de cimento Portland; e ii) os pavimentos asfálticos, sendo os últimos os mais utilizados nas obras de pavimentação ao redor do mundo. (BALBO, 2007).

Os pavimentos asfálticos são aqueles em que o revestimento é constituído basicamente de agregados e de ligantes asfálticos, sendo a sua estrutura formada de quatro camadas principais: o revestimento asfáltico, a base, a sub-base e o reforço do subleito (DNIT, 2006).

Segundo o manual de pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre- DNIT (2006) a função do pavimento é resistir aos esforços das cargas geradas pelo tráfego e, também, suportar as ações climáticas que podem causar uma deterioração prematura.

O revestimento asfáltico é a camada superior, destinada a resistir às ações diretas das cargas e transmiti-las às camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento e gerar condições seguras de rodagem, garantindo assim conforto e segurança aos usuários (DNIT, 2006).

As camadas inferiores (base, sub-base e reforço do subleito) têm grande importância no que se refere à estrutura do pavimento, sendo primordial o seu correto dimensionamento pela combinação de espessuras e de materiais constituintes (MEDINA, 1997).

Diversos estudos da Confederação Nacional dos Transportes – CNT têm apontado dados preocupantes sobre a qualidade dos pavimentos e das rodovias no país. A pesquisa CNT de rodovias 2015 aponta que 57,3% apresentam problemas que podem reduzir a eficiência do transporte e comprometer a segurança dos usuários (CNT, 2015).

Com relação ao pavimento a mesma pesquisa mostrou que 48,6% do total da extensão pesquisada apresentou algum tipo de deficiência, sendo 10,1% considerados ruins e 3,1% péssimos (CNT, 2015). Os resultados estão detalhados na TABELA 1.

TABELA 1 - QUALIDADE DO PAVIMENTO NAS RODOVIAS BRASILEIRAS NO ANO DE 2015

Critérios de avaliação do pavimento brasileiro	Extensão total de rodovias analisadas e seus índices de classificação em percentagem	
	km	%
Ótimo	41.960	41,6
Bom	9.906	9,8
Regular	35.620	35,4
Ruim	10.203	10,1
Péssimo	3.074	3,1
Total	100.763	100,0

FONTE: tabela adaptada pelo autor, CNT (2015).

Pavimentos com baixa qualidade aumentam o custo do transporte e impactam no crescimento da economia, podendo gerar prejuízos, devido ao fato do modal rodoviário ser o principal meio de transporte de bens e serviços no país (CNT, 2015).

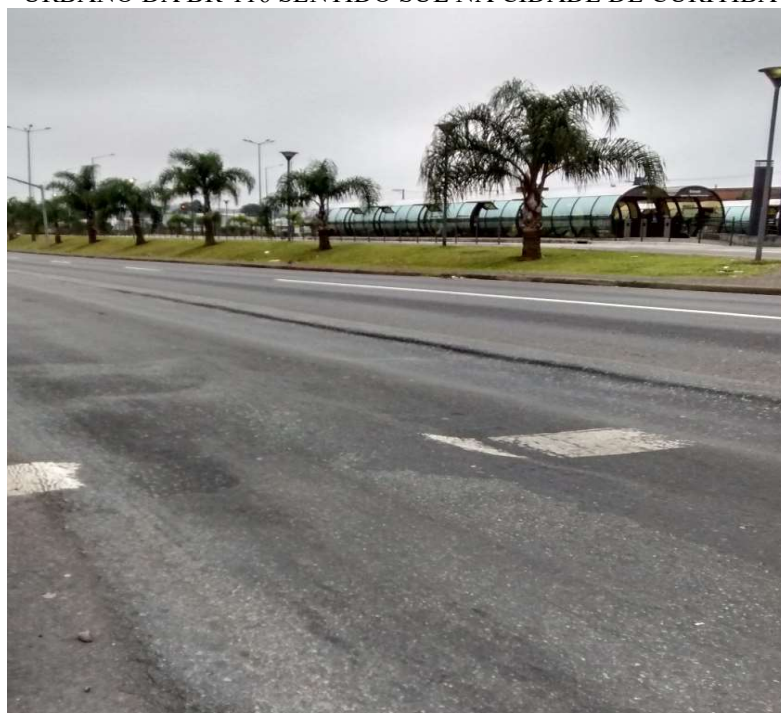
2.1.1 Principais defeitos nos pavimentos brasileiros

Diversos defeitos podem ser encontrados nos pavimentos asfálticos, sendo a deformação permanente e o trincamento por fadiga os mais comuns no Brasil (NASCIMENTO, 2008; MARTINS, 2014).

A deformação permanente também é conhecida por afundamento por trilha de rodas, sendo uma deformação plástica com depressões longitudinais no pavimento, ocasionada,

principalmente, por meio da ação de forças de cisalhamento impostas pelo tráfego de veículos (MAHMOUD e BAHIA, 2004). Esse defeito está relacionado às altas temperaturas de serviço do pavimento, excesso de carga e, também, ao dimensionamento ineficiente ou à falha no processo construtivo, sendo um dos fatores de maior impacto na serventia do pavimento, causando incômodos aos usuários da via. Na FIGURA 1, está ilustrado o defeito de deformação permanente em um trecho da linha verde BR-116 na região urbana de Curitiba.

FIGURA 1 - FOTO REFERENTE AO DEFEITO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM UM TRECHO URBANO DA BR-116 SENTIDO SUL NA CIDADE DE CURITIBA



FONTE: O autor (2016)

A deformação permanente está relacionada às altas temperaturas, principalmente, devido ao fato de que com o aumento da temperatura o ligante asfáltico tem sua viscosidade reduzida, sendo que as cargas aplicadas continuam as mesmas. Esse defeito também é frequente em regiões onde o tráfego é considerado lento, como próximo aos semáforos ou lombadas, pois as cargas aplicadas pelo tráfego têm uma duração maior e não ocorre a recuperação elástica do pavimento, ocasionando a deformação plástica (FONTES, 2009).

As trincas no revestimento asfáltico são comuns e podem ser térmicas ou por fadiga. As trincas térmicas são mais comuns em locais que têm temperaturas mínimas muito baixas e um gradiente térmico elevado, sendo esse defeito ocasionado devido o processo de retração do pavimento durante a diminuição da temperatura, sendo assim, esse defeito dificilmente ocorre no Brasil. O trincamento por fadiga é um defeito comum nos pavimentos brasileiros e a sua

causa principal é, basicamente, a aplicação de cargas repetidas, sendo que esse processo geralmente está associado ao envelhecimento do ligante asfáltico e, conseqüentemente, o aumento da sua viscosidade e a perda da sua elasticidade, gerando fragilidade e a formação de trincas (FONTES, 2009). Na FIGURA 2, é possível visualizar uma rua vicinal do bairro Xaxim em Curitiba com o defeito de trincamento por fadiga.

FIGURA 2 - FOTO REFERENTE AO DEFEITO DE TRINCAMENTO POR FADIGA EM UMA RUA VICINAL NO BAIRRO XAXIM NA CIDADE DE CURITIBA



FONTE: O autor (2016)

O trincamento por fadiga normalmente ocorre em pavimentos delgados, iniciando-se na parte inferior e se propagando para a superfície do pavimento onde é considerado um dos primeiros sinais da diminuição da qualidade do pavimento (FONTES, 2009).

Um estudo conduzido por Soenen et al. (2012) sobre o envelhecimento em escala real de ligantes asfálticos trouxe novas considerações sobre a formação de trincas por fadiga no pavimento. Neste estudo, chegou-se à conclusão que, na maioria das vezes, os resultados dos ensaios de envelhecimentos acelerados praticados sobre o material no laboratório não tinham correlação direta com o observado com o mesmo em campo, sob influência da radiação ultravioleta e outros fatores climáticos ou de multiestressamentos. As observações de campo têm indicado que este multiestressamento tem gerado uma camada superior fina e fortemente oxidada do ligante asfáltico, contribuindo para a formação de trincas por fadiga devido à ação

das cargas impostas pelo tráfego. Este envelhecimento acelerado na parte superior do pavimento causa a perda do seu módulo elástico, levando à formação de trincas que se iniciam de cima para baixo “top down cracking”.

2.2 LIGANTE ASFÁLTICO

O ligante asfáltico é um material amplamente utilizado em pavimentação, sendo obtido pela destilação do petróleo em sua maioria, ou a partir de lagos natural, geralmente encontrado em regiões onde o petróleo migrou para a superfície, e após a perda de frações leves, deu origem a um produto asfáltico natural como o asfalto de Trinidad, que foi amplamente utilizado nas primeiras obras de pavimentação no Brasil (PREGO, 2001).

Os termos betume e asfalto são facilmente confundidos devido à semelhança entre eles e, também, pela denominação do mesmo produto em diferentes países. Betume são todos os componentes que são solúveis em bissulfeto de carbono, já, o asfalto, é uma mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo cujo principal componente é o betume, podendo conter outros átomos como oxigênio, enxofre e nitrogênio.

A principal confusão está no fato dos europeus preferirem utilizar o termo betume para denominar o ligante obtido do petróleo, já, os americanos, utilizam a palavra asfalto. Quanto ao revestimento asfáltico os europeus utilizam o termo “asphalt” para denominar a mistura de agregados mais ligante (SHELL, 2003). Os americanos utilizam o termo “asphalt mixture”. No Brasil, o termo asfalto é considerado sinônimo, sendo utilizado para denominar o ligante produzido nas refinarias e, também, o pavimento asfáltico.

O ligante asfáltico produzido nas refinarias sob uma determinada especificação é denominado tecnicamente como Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), que é o ligante utilizado na mistura com os agregados para formar o pavimento. A sigla CAP, vem seguida de uma numeração que informa a faixa de penetração do ligante (BERNUCCI et al., 2008).

Os petróleos ou óleos crus diferem em suas propriedades físicas e químicas, sendo que existem perto de 1.500 tipos de petróleo explorados ao redor mundo, porém, somente uma pequena porção deles é considerada apropriada para produzir asfalto (SHELL, 2003). Os óleos crus têm composições diferentes dependendo de sua origem, portanto, os ligantes asfálticos resultantes também terão composições químicas e propriedades físicas distintas (YEN, 1991).

A composição química do CAP é muito complexa, sendo influenciada pelo processo de fracionamento e da origem do óleo cru. Essa composição influencia no desempenho físico e

mecânico não só do ligante asfáltico, mas também na mistura final que contém as propriedades do ligante.

O CAP tem uma massa molar entre 300 e 2.000 u, tendo em sua composição, aproximadamente 94% de hidrocarbonetos, 5% de enxofre, 1% de nitrogênio e oxigênio e 2.000 ppm de metais (V, Ni, Fe e outros). Seus componentes podem ser divididos em quatro grupos, de acordo com sua natureza química: hidrocarbonetos saturados, hidrocarbonetos aromáticos, resinas e asfaltenos. Os três primeiros grupos são designados sob o nome de maltenos (STASTNA et al., 2003). A proporção desses componentes pode variar de acordo com a origem do óleo e, também, com o processo de refino.

A variabilidade da composição química do CAP resulta em uma estrutura molecular complexa e de difícil definição. As moléculas do cimento asfáltico tendem a ser altamente polares. A polaridade significa que essas moléculas podem se unir umas às outras para formar grandes associações entre si. As forças que causam estas associações são relativamente fracas e altamente dependentes da temperatura (LEITE, 1999).

O programa estratégico de pesquisas rodoviárias (*Strategic Highway Research Program -SHRP*) não considera válido o conceito de asfaltenos e classifica os compostos do CAP em polares e não-polares. Segundo o SHRP o que governa as características do CAP são as forças intermoleculares como pontes de hidrogênio, forças de Vander Waals, ligações π - π e atrações polares. Algumas substâncias anfóteras também foram identificadas no ligante e segundo o programa são responsáveis pela sua viscosidade (BERNUCCI et al., 2008).

Com uma natureza tão complexa é quase impossível obter o mesmo produto em diferentes locais e até no mesmo local, em épocas diferentes. Devido a isso é de extrema importância ter requisitos mínimos na qualidade do ligante utilizado em pavimentação para garantir a sua qualidade e a sua durabilidade.

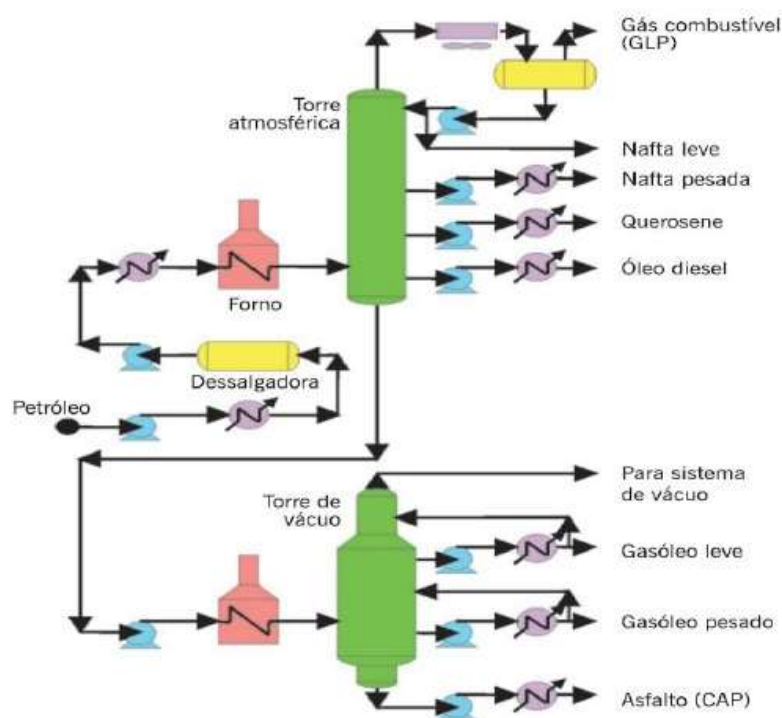
Diversas ferramentas vêm sendo utilizadas no decorrer dos anos com o objetivo de melhorar a qualidade dos materiais asfálticos, principalmente, no desenvolvimento de metodologias que classifiquem os ligantes baseados em seu desempenho, fazendo com que essas características façam parte da sua especificação.

2.2.1 Produção do ligante asfáltico

O ligante asfáltico é um derivado do petróleo, obtido por meio do processo de destilação fracionada, que simplificada consiste no aquecimento do petróleo e a separação dos componentes voláteis de acordo com as faixas de temperatura. O processo

geralmente ocorre em dois estágios, primeiramente sob pressão atmosférica, e logo após em um segundo estágio, sob pressão reduzida e altas temperaturas, chamado de destilação ao vácuo. Na FIGURA 3, pode ser visto um fluxograma simplificado do processo de produção do CAP.

FIGURA 3 - FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DE PRODUÇÃO DO CAP, EM DOIS ESTÁGIOS



FONTE: TONIAL E BASTOS (1995)

O ligante asfáltico é um produto de fundo do segundo estágio de destilação, sendo muitas vezes chamado de resíduo de vácuo (RV), que pode ser utilizado como matéria prima para a elaboração de produtos asfálticos, ou simplesmente ser caracterizado como CAP, dependendo das condições de processo (BERNUCCI et al., 2008).

O rendimento da produção de CAP depende do tipo de petróleo processado e, também, de questões logísticas e comerciais, que muitas vezes influenciam na operação de uma refinaria de modo a maximizar a produção de derivados que tenham uma maior demanda no mercado. Como o CAP é um produto de fundo da torre de vácuo acaba tendo uma grande variabilidade de processamento e conseqüentemente na sua composição química, o que deve ser levado em consideração na incorporação de aditivos e polímeros, de modo que estes tenham a suas propriedades maximizadas (MANOEL, 2015).

2.3 LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS

Com o intuito de melhorar a qualidade dos ligantes asfálticos para algumas aplicações especiais como em aeroportos e nas rodovias com alto volume de tráfego, diversos modificadores têm sido utilizados. Os modificadores podem ser naturais, como a gilsonita (EUA), a asfaltita (Argentina), o asfalto de Trinidad “Trinidad lake asphalt” (TLA), as fibras e os “fileres” que representam os materiais de enchimento como a cal, o cimento, etc., ou os sintéticos, como uma ampla variedade de polímeros e outros aditivos que têm por finalidade melhorar a qualidade do produto final. Os aditivos ou modificadores sintéticos são os mais utilizados na indústria da pavimentação (BERNUCCI et al., 2008).

Os asfaltos de Trinidad eram extensamente utilizados em obras de pavimentação devido à sua ocorrência natural e, também, ao fato do processo de refino de petróleo não ser muito desenvolvido. As propriedades do TLA quando combinadas com ligantes asfálticos convencionais melhoram a resistência ao envelhecimento, à deformação permanente e à formação de trincas por fadiga aumentando assim a vida útil do pavimento. O TLA pode ser adicionado ao ligante em uma proporção de 22 a 50%, em massa (CHARLES e GRIMALDI 1996).

A utilização de polímeros como modificadores aumenta a resistência do pavimento à ação do tráfego, melhorando sua suscetibilidade térmica na grande maioria das vezes, ou seja, diminui a variação de consistência com a temperatura. Além disso, os ligantes asfálticos modificados têm melhor adesão e coesão com os agregados do que asfaltos tradicionais. Outro aspecto relevante apontado por Balbo (2007) é a maior resistência ao envelhecimento do ligante asfáltico modificado por polímero. Porém, não é possível adicionar qualquer polímero ao CAP, pois este tem que ser compatível, de fácil dispersão e estável durante sua estocagem. A quantidade necessária depende do tipo de aplicação e, também, do polímero a ser adicionado.

Sendo o ligante asfáltico um material termoviscoelástico, suas características estão diretamente ligadas ao desempenho das misturas asfálticas, tanto de deformação permanente quanto de fadiga. As deformações resultantes das cargas aplicadas, ou seja, as respostas da mistura asfáltica aos pulsos de carga gerados pelo tráfego em movimento podem ser modificadas pela presença de polímeros no ligante, aumentando ou diminuindo as parcelas de viscosidade e de elasticidade do conjunto (BALBO, 2007).

As propriedades dos polímeros estão relacionadas de maneira complexa com os seus elementos estruturais e a forma como eles estão ligados, fazendo com que sejam classificados de diversas maneiras, dependendo da característica utilizada. Em geral, o que governa as

principais propriedades dos polímeros são o tipo de interação entre as moléculas, a massa molar e o grau de cristalização, sendo que estas propriedades variam com a temperatura (LEITE, 1999).

Os polímeros podem ser divididos em termoplásticos ou termofixos, conforme a resposta mecânica às temperaturas elevadas, o que está relacionado com a estrutura molecular. Os polímeros termoplásticos possuem ligações químicas fracas (secundárias, principalmente de van der Waals) que permitem uma movimentação maior das cadeias adjacentes quando uma tensão é aplicada. Esses polímeros são de fácil processamento devido ao fato de amolecem com o aumento da temperatura e se tornarem rígidos após o resfriamento e, geralmente, são fabricados com a aplicação de calor e pressão (MANOEL, 2015).

Os polímeros termofixos têm ligações primárias (covalentes) com as cadeias adjacentes o que faz que eles sejam permanentemente rígidos. A formação de ligações cruzadas covalentes durante o processamento do polímero faz com que as cadeias se prendam umas às outras, dificultando o movimento de rotação e de vibração da cadeia em temperaturas elevadas. O aumento das ligações cruzadas faz com a estrutura se torne mais rígida e, conseqüentemente, tenha uma resistência mecânica maior que os polímeros termoplásticos (MANOEL, 2015).

A natureza das cadeias poliméricas faz com que esses materiais geralmente não apresentem alto grau de cristalinidade, sendo em grande parte amorfos (ou vítreos) e semicristalinos. Quando ocorre uma redução na temperatura, os segmentos de cadeias moleculares têm seus movimentos rotacionais reduzidos, o que ocasiona mudanças nas propriedades físicas do polímero. Durante o resfriamento ocorre a passagem do estado líquido para um estado elastomérico e, logo após, para o estado rígido (vítreo), em outras palavras, ocorre a mudança de um estado desordenado para um estado ordenado. A temperatura de transição vítrea é aquela no qual o material passa de um estado elástomérico para o estado rígido (BURGER, 2001).

A fusão é um processo no qual o material passa do estado sólido, com uma estrutura ordenada e cadeias moleculares alinhadas, para o estado líquido, onde sua estrutura é aleatória. Acima da temperatura de fusão as ligações secundárias são rompidas permitindo um escoamento viscoso do polímero, se o aquecimento continuar pode ocorrer a degradação do polímero pelo rompimento de suas cadeias primárias (MANOEL, 2015).

Entre a temperatura de transição vítrea e a temperatura de fusão o polímero tem um comportamento viscoelástico, ou seja, as cadeias poliméricas apresentam certa mobilidade decorrente do aumento da energia térmica, mas não têm escoamento livre, pois estão entrelaçadas, devido às ligações secundárias ainda presentes. Essa característica é encontrada

em elastômeros, sendo que essa região é chamada de estado borrachoso devido ao fato da elasticidade ser a principal característica das borrachas, que são elastômeros naturais (MANOEL, 2015).

A adição de polímero ao ligante asfáltico foi introduzida na década de 1970 na Europa, com a adição de polietileno diretamente na usina misturadora. No Brasil, os ligantes asfálticos modificados por polímeros começaram a ser aplicados a partir da década de 1990, sendo que em 1998 a PETROBRAS começou a comercializar um asfalto modificado com polímeros Estireno-Butadieno-Borracha (*styrene-Butadiene-Rubber* - SBR) e Estireno-Butadieno-Estireno (*styrene-butadiene-styrene* - SBS) (LEITE, 1999).

Os principais polímeros utilizados na modificação de ligantes asfálticos no Brasil são os elastômeros que tem deformações recuperáveis sob baixos patamares de tensão.

O polímero SBR, é empregado principalmente na elaboração de emulsões asfálticas devido a sua difícil incorporação direta no CAP.

O elastômero termoplástico mais empregado para a modificação de ligantes asfálticos é o copolímero SBS, pois com ele se obtém as propriedades desejadas no CAP, além de ser de mais fácil incorporação do que o SBR. O SBS reduz a ruptura frágil do asfalto a baixas temperaturas, pois o torna menos rígido, já em temperaturas altas ele aumenta a rigidez quando comparado ao asfalto convencional, impedindo o fluxo viscoso do pavimento que causaria o defeito de afundamento por trilha de rodas (BALBO, 2007).

A utilização da borracha moída de pneu como modificador do ligante asfáltico tem aumentado nos últimos anos. A necessidade de descartar os pneus inservíveis fez com que essa incorporação fosse benéfica ao meio ambiente bem como na qualidade do pavimento.

O Brasil fechou o ano de 2014 com mais de 68,7 milhões de unidades produzidas pelas empresas que compõem a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP, 2015). De acordo com Luz e Durante (2013), no Brasil são descartados anualmente 40 milhões de pneus, que somados ao que já existe acumulado em todo o país, representam um passivo ambiental que necessita de solução.

O processo de incorporação da borracha de pneu moída diretamente ao CAP, é chamado de processo úmido (*wet process*), envolve altas temperaturas e a agitação mecânica. O produto final dessa incorporação é chamado de asfalto borracha e geralmente contém teores de 15 a 20%, em massa, de borracha de pneu triturada (BERNUCCI et al., 2008).

Os ligantes asfálticos podem ser modificados, não somente por polímeros, também por alguns aditivos os quais vêm ganhando destaque na indústria da pavimentação por promover uma sensível diferença nas características de interesse. A principal diferença entre um ligante

comum e um aditivo é a sua temperatura de aplicação, pois esses aditivos conseguem alterar algumas propriedades que podem levar a uma mudança significativa na temperatura de usinagem (mistura) e compactação da mistura (ROMIER et al., 2006).

A temperatura de usinagem (mistura) depende de vários fatores, mas, principalmente, da viscosidade do ligante que vai determinar a sua trabalhabilidade e, conseqüentemente, a sua aplicação. As misturas asfálticas são classificadas como quentes, mornas ou frias dependendo da sua temperatura de aplicação (HURLEY e PROWELL, 2005).

O termo mistura morna “warm mix” é adotado para descrever as misturas asfálticas que são produzidas e aplicadas em temperaturas que variam de 105 °C a 135 °C, a partir do uso de aditivos, parafinas, ceras, zeólitas, injeção de água e diferentes processos mecânicos (D’ANGELO et al., 2008).

A tecnologia de misturas asfálticas mornas tem se mostrado um processo construtivo alternativo, por ser ambientalmente menos agressiva quando comparado com outras tecnologias, principalmente as misturas a quente. Poucos processos e produtos tornaram-se disponíveis com a capacidade de reduzir a temperatura pela qual o ligante asfáltico quente é misturado, sem comprometer a qualidade estrutural dos pavimentos. Estes novos produtos podem reduzir as temperaturas de produção em 40%, sendo que, diminuir a temperatura de mistura na usina significa, entre outras coisas, economizar custos com os combustíveis (HURLEY e PROWELL, 2006).

As misturas mornas têm recebido atenção dos países da Europa e Austrália desde meados de 2000. A indústria de pavimentos na América do Norte começou a dar atenção alguns anos depois, após a publicação de dois relatórios sobre o uso de uma cera sintética e uma zeólita sintética, para a produção de misturas asfálticas mornas (HURLEY e PROWELL, 2005).

2.3.1 Ligante asfáltico modificado com cera de alto peso molecular

Em geral as ceras ou parafinas não são consideradas boas para a utilização como modificadores em ligantes asfálticos. Entretanto, a cera derivada do processo Fischer-Tropsch com alto peso molecular é considerada como um excelente modificador comercialmente conhecido como Sasobit®, sendo produzido pela Sasol Wax na África do Sul (ASPHALT ACADEMY, 2007).

As parafinas produzidas pela rota de Fischer-Tropsch são obtidas a partir da reação do carvão ou gás natural com vapor d’água (ou O₂ alternativamente) em temperaturas de 180 °C a 280 °C, na presença de um catalisador (D’ANGELO et al., 2008).

O produto da síntese de Fischer-Tropsch é uma parafina que tem um ponto de fusão variando de 85 °C a 115 °C. À temperatura ambiente, é extremamente dura. Entretanto, uma vez fundida, esta possui uma viscosidade de 12 mPa.s a 135 °C (D'ANGELO et al., 2008).

A cera está disponível comercialmente nas formas de flocos, pequenos grânulos ou “*pellets*”, como pode ser visualizado na FIGURA 4.

FIGURA 4 – ADITIVO SASOBIT® EM GRÂNULOS



FONTE: O autor (2016)

O aditivo pode ser pré-misturado em linha com o ligante no estado líquido, ou adicionado durante o processo de mistura na forma de “*pellets*”. Na Alemanha, o aditivo é tipicamente adicionado numa proporção de 2,5% em relação à massa total de ligante, sendo que o limite de 3 % não deve ser excedido por causa do efeito de enrijecimento a baixas temperaturas. Adições de 1% a 1,5% em massa são usadas tipicamente nos Estados Unidos (WONG, 2009).

A cera de Fischer-Tropsch tem basicamente duas funções, que estão relacionadas com as propriedades físicas do ligante asfáltico. A primeira é reduzir a viscosidade do ligante em temperaturas superiores a 100 °C, promovendo uma redução nas temperaturas de usinagem (mistura) e de compactação da mistura; a segunda é aumentar a viscosidade a baixas e médias temperaturas, quando o asfalto está na sua fase sólida ou coloidal. O efeito da cera depende da composição química e das características reológicas do ligante como também da quantidade de cera adicionada (EDWARDS e ISACSSON, 2005).

Diversos países têm utilizado aditivos nas obras de construção de rodovias, pistas de decolagens de aeroportos e estradas com alto volume de tráfego. Diferentes objetivos são apontados para utilizar o aditivo, seja o de aumentar a resistência do pavimento, utilizar menos combustível no processo de usinagem ou simplesmente conseguir liberar a pista para o tráfego

com um menor tempo (ROBINETTE et al., 2010). Melhorando a resistência à deformação permanente.

Na Europa o aditivo foi utilizado pela primeira vez em 1997, tendo grande aceitação devido às baixas deformações ocasionadas no pavimento e também pela possibilidade de poder incorporar asfalto reciclado à mistura sem aumentar consideravelmente a viscosidade. Diversos projetos foram realizados, entre eles a construção de um trecho da rodovia Veddeler Damm-Hanburg na Alemanha que não apresentou deformações no trecho construído com o aditivo, enquanto outros trechos construídos de maneira convencional apresentavam deformações de 4-8 mm (NOELTING et al., 2005).

Outra investigação agora no estado do Wisconsin mostrou que após 4 meses de tráfego as deformações estavam menores que 1 mm (PROWELL, 2007).

A utilização de Sasobit® tem crescido exponencialmente nos últimos anos em diversos projetos construtivos e aplicações especiais, como aeroportos e terminais de carga, além de rodovias com alto tráfego como autoestradas.

2.3.2 Ligante asfáltico modificado com SBS

O copolímero tribloco estireno-butadieno-estireno (SBS) é um elastômero termoplástico formado por segmentos em blocos de estireno e butadieno. Este polímero tem propriedades elastoméricas em temperatura ambiente, entretanto tem uma natureza termoplástica, o que faz com que seja mais facilmente processado do que os polímeros termofixos, sendo o polímero mais utilizado para a modificação de ligantes asfálticos (SENGOZ e ISIKYAKAR, 2008).

Diversos estudos mostraram que o uso de SBS na modificação do ligante asfáltico aumenta a resistência das misturas asfálticas à deformação permanente e à formação de trincas por fadiga (TAYFUR et al., 2007; AGLAN et al., 1993).

O teor de polímero adicionado na amostra e a sua interação foram objeto de diversos trabalhos científicos. Em um dos estudos, Cortizo et al. (2004) revelaram a existência de partículas de polímero dispersas numa fase contínua de ligante em baixos teores de SBS, enquanto que em altos teores de polímero foi observada uma fase polimérica contínua. A modificação do polímero melhorou as propriedades convencionais do ligante asfáltico de base tais como: penetração, ponto de amolecimento, susceptibilidade à temperatura.

Em um estudo de envelhecimento de ligantes asfálticos modificados com SBS, foi observada a formação de polímeros de baixa massa molar, devido ao processo de

envelhecimento, provenientes da cisão das cadeias poliméricas bem como de reações entre radicais poliméricos e o ligante asfáltico (CORTIZO et al., 2004).

2.3.3 Ligante asfáltico altamente modificado

O teor máximo de polímero adicionado ao ligante asfáltico deve ser levado em consideração, pois acima de um determinado limite podem ocorrer alguns problemas no manuseio e estocagem, por exemplo a separação de fases entre o polímero e o ligante e o aumento da viscosidade, o que demanda novas tecnologias para as plantas de mistura de asfalto e também problemas de compactação (TIMM et al., 2012; KLUTTZ et al., 2013).

O ligante asfáltico altamente modificado (Highly Modified Asphalt – HiMA), revolucionou o mercado de ligantes modificados, por meio da utilização do copolímero dibloco de estireno-butadieno (SB) que pode ser adicionado em maiores quantidades ao ligante asfáltico sem ocasionar problemas de compatibilidade e aumento da viscosidade em relação ao ligante modificado com SBS, incrementando significativamente a resistência à formação de trincas por fadiga e à deformação permanente (TIMM et al., 2012).

Quando o polímero SB é adicionado na proporção de 7,0-7,5 % em massa ao ligante, ocorre a inversão de fases, onde as propriedades do polímero se tornam dominantes, diminuindo assim a fragilidade à baixas temperaturas, típica do ligante puro, e aumentando a resistência à deformação permanente na temperatura máxima de utilização do pavimento, com isso é possível reduzir a espessura do pavimento sem comprometer a qualidade (TIMM et al., 2011).

O copolímero dibloco estireno-butadieno (SB) tem a capacidade de absorver na sua estrutura até 10 vezes a sua massa, isso faz com que a adição de 2,5 % em massa de SB ao ligante, o comportamento da mistura seja similar a 25 % do polímero e 75 % do ligante asfáltico, sendo que as propriedades da mistura serão governadas pelas características do ligante. Portanto uma adição de 7%, em massa de SB, equivale a uma relação 70% de polímero e 30% de ligante, ocorrendo assim a inversão de fases e as propriedades predominantes serão do polímero (WEST et al., 2012).

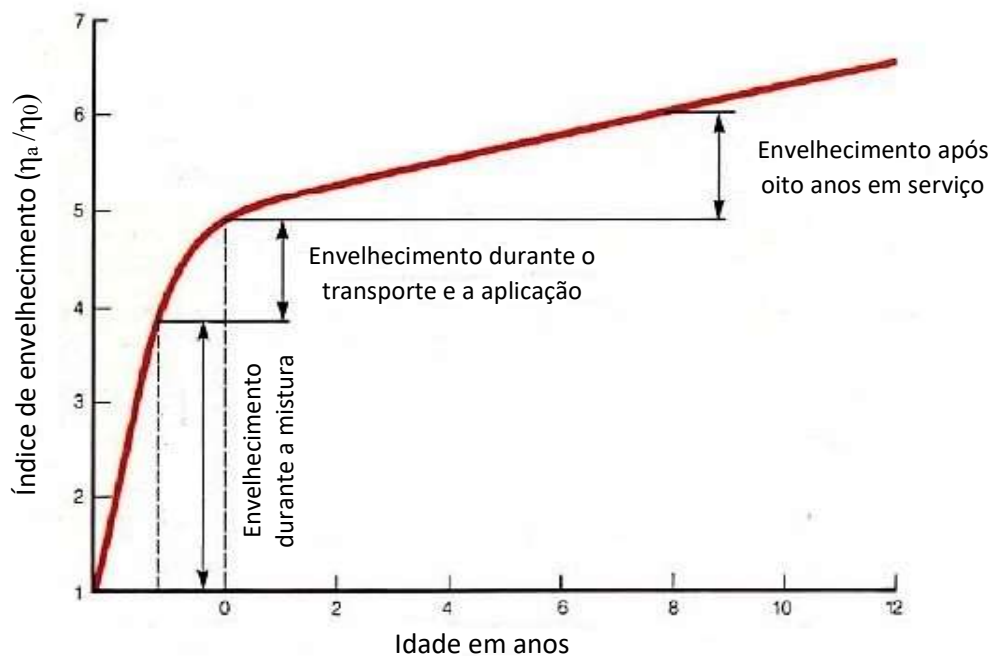
2.4 ENVELHECIMENTO

O processo de envelhecimento do asfalto envolve a perda das suas propriedades ao longo do tempo causando o seu endurecimento e o aparecimento de deformações ou trincas. Esse processo ocorre de forma acelerada no processo de usinagem (mistura) e de forma mais

lenta na sua vida útil em serviço como mostrado no gráfico da FIGURA 5, onde o índice que mede o envelhecimento é calculado em relação à idade do asfalto. O índice de envelhecimento é uma relação entre a viscosidade do asfalto em determinado período (η_a) com a viscosidade inicial (η_0) desse mesmo asfalto.

Segundo Edwards et al. (2005) as causas do envelhecimento do asfalto bem como outras substâncias orgânicas são a presença de oxigênio, a radiação ultravioleta e a temperatura. Apesar do ligante asfáltico ser estocado por longos períodos em altas temperaturas, o contato com o oxigênio é mínimo.

FIGURA 5 - EFEITO DO ENVELHECIMENTO COM A IDADE DO ASFALTO



FONTE: Adaptado de SHELL (2003)

O fato do envelhecimento ser acelerado durante o processo de usinagem (mistura) pode ser explicado pelas altas temperaturas no qual o ligante está exposto durante esse processo, principalmente na preparação de misturas quentes onde a temperatura pode chegar a 170 °C, e também a elevada área superficial do ligante em contato com os agregados e o oxigênio do ar (BERNUCCI et al., 2008).

Existem muitos mecanismos que causam o envelhecimento no ligante asfáltico, mas os que possuem uma relevância maior são dois: a perda de componentes voláteis e a oxidação pelo contato com o oxigênio do ar (TONIAL, 2001).

Devido à complexa composição química do ligante asfáltico é difícil avaliar o envelhecimento de forma completa, sendo que as características que são avaliadas durante o processo de endurecimento do ligante são o aumento da viscosidade e do ponto de amolecimento e a diminuição da penetração (MORILHA, 2004).

Tem influência também do teor de ligante, pois o maior teor significa maior recobrimento do agregado e menor tendência a oxidação, devido à menor superfície de contato com o ar. O teor e tipo de filer, como a cal hidratada, por exemplo, retarda o envelhecimento, enquanto outros podem enrijecer demais a mistura. Por fim o teor de vazios da mistura asfáltica que se mal compactada e alta pode permitir maior entrada de ar. (TONIAL, 2001).

O processo de envelhecimento está ligado à composição química do ligante asfáltico, do tipo de agregado, do tamanho e da distribuição das partículas e também das condições ambientais ao qual está exposto, podendo este ser acelerado ou retardado dependendo desse processo. Silva (2005) mostrou que a incidência da radiação ultravioleta em uma região de clima tropical tem uma severidade maior do que em uma região de clima temperado, portanto mais degradante para o pavimento.

Alguns defeitos são ocasionados pelo endurecimento do asfalto devido ao seu processo de envelhecimento, sendo a formação de trincas por fadiga um dos mais conhecidos e ocorre principalmente devido ao fato do pavimento estar muito rígido e não resistir aos esforços oriundos do tráfego (MEDINA, 1997).

2.5 COMPORTAMENTO REOLÓGICO

A palavra reologia, derivada do grego “rheo” que significa fluir, significa a capacidade de fluir do ligante asfáltico. É dependente do tempo e da temperatura; estes dois fatores devem ser considerados ao se realizar a caracterização reológica dos ligantes asfálticos, ou seja, as propriedades reológicas obtidas em determinado teste são específicas para um determinado tempo de carregamento em uma determinada temperatura (BURGER, 2001).

A reologia é a ciência da deformação e do escoamento dos materiais, e a viscosidade é uma propriedade relacionada com os materiais no estado líquido ou gasoso. Os equipamentos que medem apenas viscosidade, não são utilizados para a caracterização reológica completa, pois mensuram apenas uma propriedade do fluido. Já os reômetros fazem esta caracterização, além de medir a viscosidade. (BARNES et al., 1993).

O termo viscosidade descreve uma propriedade de um material do ponto de vista físico. É a medida da resistência física de um fluido ao fluxo ou à deformação. A viscosidade é

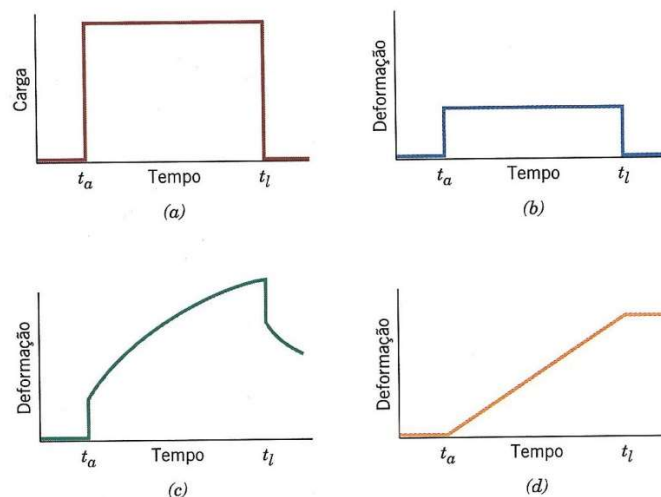
determinada pela viscosimetria que é uma parte da reologia que estuda o comportamento e o fluxo dos materiais (ANDERSON et al., 1994).

As propriedades mecânicas dos ligantes asfálticos dependem da taxa ou tempo de carregamento. Ligantes asfálticos se tornam mais rígidos à medida que a temperatura do ensaio decresce, a taxa de carregamento aumenta ou o seu tempo de carregamento decresce. Este intercâmbio de efeitos do tempo e da temperatura é a base da superposição tempo-temperatura com a qual a redução da temperatura do ensaio pode ser equivalente ao aumento de frequência de carregamento ou redução de tempo de carregamento (ANDERSON et al., 1994).

Os materiais podem ter um comportamento elástico como em sólidos ou puramente viscoso como em alguns líquidos, ou intermediário como alguns polímeros e outros materiais que exibem um comportamento viscoelástico, que na verdade é uma combinação dos dois comportamentos com uma componente dependente do tempo.

Na FIGURA 6, estão representados os diversos comportamentos quando é aplicada uma carga dependente do tempo.

FIGURA 6 - GRÁFICO DA CARGA EM FUNÇÃO DO TEMPO, ONDE A CARGA É APLICADA EM UM TEMPO INICIAL (t_a) E LIBERADA APÓS UM INTERVALO DE TEMPO, SENDO O TEMPO FINAL (t_l). PARA O CICLO DE CARGA TEMPO EM (a), AS RESPOSTAS DA DEFORMAÇÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA COMPORTAMENTOS TOTALMENTE ELÁSTICO (b), VISCOELÁSTICO (c) E VISCOSO (d)



FONTE: CALLISTER (2015)

O comportamento reológico dos polímeros é dependente do tempo e temperatura, sendo uma combinação do comportamento elástico e viscoso, chamado de comportamento viscoelástico. Em um material puramente elástico toda a energia aplicada é recuperada e sob pequenas deformações existe uma correlação entre a tensão aplicada e a deformação de acordo

com a lei de Hooke, $\sigma = G\gamma$, onde σ é a tensão, γ a deformação e G o módulo de cisalhamento. Toda a deformação é recuperada imediatamente após cessar a aplicação da tensão (BARNES, 1993).

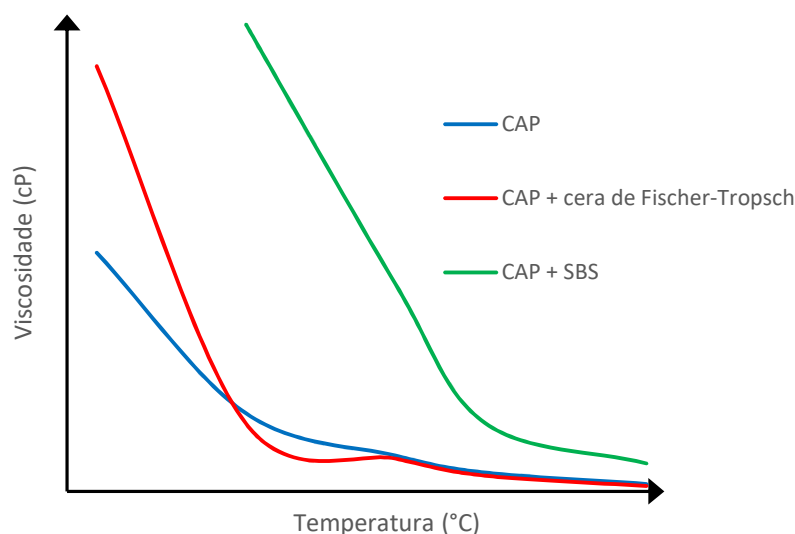
Para um material puramente viscoso toda a energia aplicada é dissipada na deformação do material, ou seja, não é recuperável. A deformação de um material viscoso obedece a lei de Newton, $\sigma = \eta\dot{\gamma}$, onde σ é a tensão, $\dot{\gamma}$ a deformação e η a viscosidade do material. Portanto este material pode ser chamado de fluido newtoniano, onde existe uma relação direta entre a tensão cisalhante e a deformação (MANOEL, 2015).

Diversos modelos combinando as deformações elásticas e plásticas tentam explicar o comportamento dos polímeros. Por meio de equações diferenciais ordinárias de segunda ordem com vários elementos é possível aproximar o comportamento experimental do real, porém isso se torna cada vez mais complexo, pois as deformações dos polímeros são uma combinação do comportamento viscoso e elástico dependente do tempo e temperatura (MANOEL, 2015).

A variação da viscosidade com a temperatura é influenciada pela natureza do modificador. A cera de Fischer-Tropsch utilizada para modificar o ligante típico tem uma temperatura de fusão na faixa de 85-115 °C e, em função disto, pode ocasionar a diminuição da viscosidade em temperaturas superiores a 100 °C, bem como causar acréscimos na propriedade medida mesmo em temperaturas inferiores. O polímero SBS e SB utilizados como modificadores podem ocasionar aumento da viscosidade do ponto de amolecimento no ligante.

O efeito de dois modificadores (SBS e cera de Fischer-Tropsch) nos ligantes asfálticos pode ser visualizado na FIGURA 7, como exemplo experimental da variação da viscosidade com a temperatura (O AUTOR, 2017). No CAP puro a viscosidade diminui com o aumento da temperatura. Quando um polímero é adicionado, como no exemplo onde o SBS é utilizado como modificador, ocorre um incremento dos valores de viscosidade. Entretanto ao se adicionar a cera de Fischer-Tropsch ao ligante asfáltico observa-se um decréscimo nos valores de viscosidade em temperaturas maiores e um incremento em temperaturas menores devido à cristalização das ceras, que em altos teores (superiores a 3,0%) podem levar à fragilização do pavimento em baixas temperaturas (WONG, 2009). Em relação ao polímero SBS, teores muito elevados (da ordem de 7,0%) podem ocasionar problemas de compatibilidade entre o polímero e o ligante, podendo levar à separação das fases relacionadas (CORTIZO et al., 2004).

FIGURA 7- TENDÊNCIA DA VARIAÇÃO DA VISCOSIDADE COM A TEMPERATURA E A MODIFICAÇÃO DO LIGANTE COM CERA DE FISCHER-TROPSCH E SBS



FONTE: O autor (2017)

2.6 PROPRIEDADES DINÂMICO-MECÂNICAS DE LIGANTES ASFÁLTICOS

2.6.2 Princípios dos ensaios dinâmico-mecânicos

Os ensaios dinâmico-mecânicos podem ser de deformação controlada ou tensão controlada. Quando uma deformação senoidal é aplicada na amostra e a resposta é medida em função da frequência, este ensaio é denominado de deformação controlada; quando uma tensão senoidal variável é aplicada por meio de um torque variável mede-se a deformação na amostra, sendo este ensaio denominado ensaio de tensão controlada (ANDERSON et al., 1994).

As propriedades dinâmico-mecânicas estão diretamente relacionadas às propriedades de fluência, mas de uma forma matematicamente complexa. Ambas as caracterizações dão uma indicação completa das propriedades viscoelásticas do material testado. Tanto o módulo complexo como o módulo de rigidez são simplesmente indicadores da resistência de um ligante asfáltico à deformação sob um dado conjunto de condições de carga (MANOEL, 2015).

A tensão (σ) e a deformação (γ) estão ligadas por meio de um número complexo, denominado de módulo complexo, G^* , conforme equação:

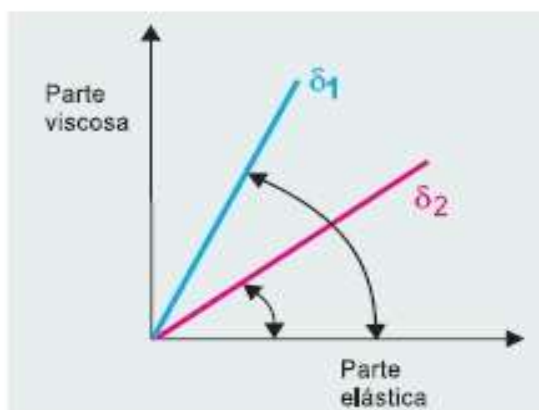
$$G^*(\omega) = \sigma(\omega) / \gamma(\omega) \quad (1)$$

Como pode ser observado a partir das variáveis utilizadas na Equação 1, o módulo complexo é normalmente medido e relatado em termos de resposta ao cisalhamento. O ângulo de fase, δ , indica o atraso na resposta de tensão em comparação com a deformação aplicada. A defasagem entre a tensão cisalhante e a deformação no material é expressa levando em consideração o atraso necessário para essa recuperação (Δt) multiplicado pela frequência angular (ω), sendo esse resultado o ângulo de fase (δ), que simplificadamente mostra se o material exibe um comportamento puramente elástico sem defasagem, ou seja, o ângulo de fase igual a zero, e com o retorno imediato após o término da aplicação da tensão cisalhante, ou puramente viscoso com uma defasagem total no ângulo de fase, ou seja 90° , não retornando a sua forma original após o término da aplicação de uma tensão cisalhante (BERNUCCI et al., 2008).

Como os materiais asfálticos exibem um comportamento viscoelástico, ou seja, nem puramente viscosos nem totalmente elásticos, estes exibem um ângulo de fase entre 0 e 90° , sendo possível medir esse parâmetro em diferentes temperaturas. A partir desse ensaio pode-se comparar a resposta de diferentes materiais quando submetidos a uma tensão cisalhante ou o comportamento do mesmo material em diferentes temperaturas.

Os materiais que tem um comportamento elástico, ou seja, apresentam um ângulo de fase igual ou próximo a zero, se aproximam do comportamento de materiais sólidos, e o contrário acontece com os materiais com o comportamento viscoso que tendem a um comportamento semelhante a líquidos. Na FIGURA 8 é possível visualizar esse comportamento, o gráfico pode representar dois ligantes asfálticos, ou o mesmo em diferentes temperaturas, onde o maior ângulo de fase representa o material com a temperatura mais elevada, com a maior tendência de se comportar como um líquido (BARNES, 1993).

FIGURA 8 - ÂNGULO DE FASE DE DOIS MATERIAIS ASFÁLTICOS DIFERENTES OU DO MESMO MATERIAL EM DIFIRENTES TEMPERATURAS



FONTE: BERNUCCI et al. (2008)

Ao relatar os resultados de testes dinâmico-mecânicos, outros três parâmetros são frequentemente usados. O módulo de armazenamento $G'(\omega)$; O módulo de perda $G''(\omega)$ e a tangente de perda, ou $\tan \delta$. Estes parâmetros estão diretamente relacionados ao módulo complexo e podem ser obtidos de maneira simples por meio de relações trigonométricas.

A separação de $G^*(\omega)$ em duas componentes leva a definição do módulo de armazenagem (parte real do módulo complexo $G^*(\omega)$) e do módulo de perda (parte imaginária do módulo complexo, $G''(\omega)$). O módulo de armazenagem, $G'(\omega)$, representa a contribuição elástica associada à habilidade do material em armazenar energia. Já o módulo de perda $G''(\omega)$ representa a contribuição viscosa associada à dissipação de energia (ANDERSON et al., 1994). Eles são representados pelas Equações 2 e 3.

$$G'(\omega) = G^*(\omega) \cos \delta \quad (2)$$

$$G''(\omega) = G^*(\omega) \sin \delta \quad (3)$$

O fator de perda ou “damping”, pode ser calculado simplesmente como a tangente do ângulo de fase, ou, alternativamente, como a razão do módulo de perda e o módulo de armazenagem conforme a Equação 4:

$$\tan \delta = G''(\omega) / G'(\omega) \quad (4)$$

O fator de perda indica a capacidade de um material em converter energia mecânica em outras formas. Os sólidos que possuem apenas a componente elástica possuem $\tan \delta$ igual a zero (MURAYAMA, 1988).

Esses termos são por vezes mal interpretados como os módulos elásticos e viscosos. Na realidade, a componente elástica da resposta apenas representa parte do módulo de armazenagem, e a resposta viscosa é apenas parte do módulo de perda. Além da resposta elástica e viscosa, a maioria dos materiais viscoelásticos reais exibem uma quantidade significativa de resposta elástica retardada que é dependente do tempo, mas completamente recuperável. Ao interpretar os módulos de armazenagem e de perda, deve-se ter em mente que ambos os parâmetros refletem uma porção da resposta elástica retardada. Portanto, não podem ser interpretados estritamente como elásticos e viscosos, mas sim como módulos de armazenagem e de perda (BURGER, 2001).

Os dados utilizados para classificar os ligantes asfálticos a temperaturas altas e intermediárias são obtidos no reômetro de cisalhamento dinâmico (*Dynamic Shear Rheometer-*

DSR), equipamento que mede o módulo complexo de cisalhamento (G^*) e também o ângulo de fase (δ) a partir da aplicação de tensões ou deformações cisalhantes entre duas placas paralelas. (BERNUCCI et al., 2008).

2.6.2 Grau de desempenho

Para altas temperaturas de serviço o parâmetro $G^*(\omega) \times \cos \delta$ dá informações sobre a qualidade do ligante antes e após o envelhecimento a curto prazo (*Rolling Thin Film Oven Test* - RTFOT) e pode prever a resistência desse material a deformação permanente segundo os dados do programa estratégico de pesquisas rodoviárias (SHRP), que estabeleceu novos testes e uma nova especificação chamada de SUPERPAVE (ASTM D6373), nome este derivado de *SUperior PERforming asphalt PAVEments* (ANDERSON et al., 1994).

A relação $G^* \times \cos \delta$ representa a parte do módulo de armazenamento do ligante asfáltico, no qual deve ter requisitos mínimos quando submetido a uma tensão cisalhante para que o pavimento não tenha um comportamento que se aproxime da parte viscosa, ou seja comece a fluir a altas temperaturas. Devido a isso esse parâmetro é relacionado com a deformação permanente a altas temperaturas (CHOI, 2011).

O ensaio realizado no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) tem uma velocidade de carregamento de 10 rad/s (aproximadamente 90 Km/h) sendo que em locais onde os veículos trafeguem em velocidades menores ou estacionárias, como no caso de semáforos, corredores de ônibus ou praças de pedágio, a velocidade de carregamento é muito mais lenta que a estabelecida nos critérios de especificação (BERNUCCI et al., 2008).

Outro importante aspecto no ensaio de grau de desempenho (*Performance Grade*- PG) é não diferenciar entre asfaltos modificados ou não modificados, levando em conta apenas desempenho do produto com testes que avaliem o ligante asfáltico em diferentes temperaturas de serviço (altas, intermediárias e baixas) propiciando assim um melhor controle de qualidade do material a ser utilizado e o tipo de manifestação patológica possível de ser evitada em cada caso (CHOI, 2013).

A taxa de carregamento cíclico ocasionado pelo tráfego de veículos gera um trabalho de deformação no pavimento, sendo que parte deste trabalho é recuperada pela componente elástica do ligante e o restante é dissipado na forma de deformação e calor. Portanto, deve-se minimizar essa dissipação na forma de deformação e calor maximizando a componente elástica do ligante que é representada pelo parâmetro $G^* \times \cos \delta$. Devido a isso parâmetros mínimos são exigidos para essa componente (BARCENA et al., 2002)

As temperaturas máximas e mínimas de utilização do pavimento foram coletadas em um sistema meteorológico e correlacionadas com a temperatura do pavimento por meio de um trabalho de monitoramento da temperatura do ar versus temperatura do pavimento por 2 anos, chegando a uma relação muito próxima da realidade que pode ser visualizada nas Equações 5 e 6 (ALANI et al., 2010).

$$T_{\text{máx}} = 54,32 + [0,77585 T_{\text{ar}}] - [0,002468 \text{ LAT}^2] - [15,137 \log (H+25)] \quad (5)$$

$$T_{\text{mín}} = -1,56 + [0,71819 T_{\text{ar}}] - [0,003966 \text{ LAT}^2] + [6,264 \log (H+25)] \quad (6)$$

Onde: T_{ar} = Temperatura do ar na região (°C)

LAT= latitude

H= profundidade do pavimento em cm (usualmente 2 cm)

A partir das Equações 5 e 6 foi possível calcular o grau de desempenho indicado para uma obra de pavimentação em determinada região.

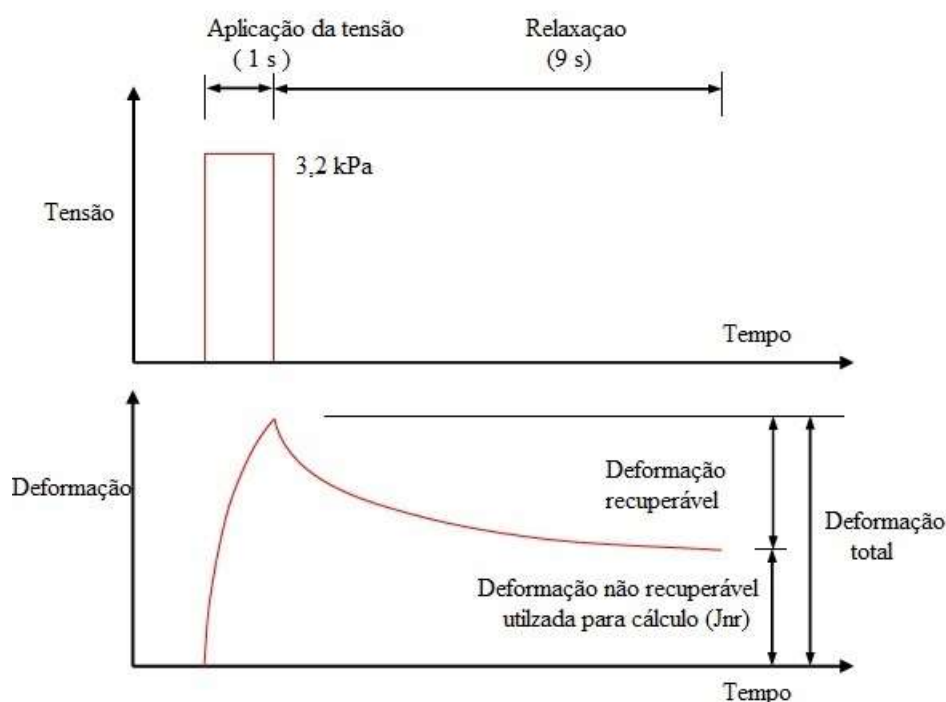
2.6.3 Ensaio de fluência e relaxação sobre múltipla tensão

O ensaio de fluência e relaxação sobre múltipla tensão (*Multiple stress creep and recovery- MSCR*) que utiliza o DSR, é realizado na mesma temperatura do grau de desempenho superior ou a 64 °C para comparar diferentes ligantes, foi desenvolvido e se mostrou eficaz para avaliar a elasticidade de ligantes convencionais e modificados em altas temperaturas de serviço, sendo considerado mais representativo do que apenas o PG superior por aplicar um ciclo de carga e descarga na amostra, ou seja, um processo muito semelhante ao que ocorre no pavimento na sua vida útil em serviço (HUANG et al., 2015).

O teste MSCR consiste na aplicação de uma tensão de 0,1 kPa durante 10 ciclos, sendo que cada ciclo tem 1 s de carregamento e 9 s de repouso, seguido da aplicação de mais 10 ciclos a uma tensão de 3,2 kPa. Na FIGURA 9 está ilustrado o comportamento do material durante o ensaio MSCR (AASHTO T350, 2014).

O parâmetro obtido nesse teste é a compliância de fluência não recuperável (Jnr). Durante o ciclo de carregamento e repouso, ocorre a aplicação de uma tensão e após a recuperação parcial ou total da deformação causada por essa tensão, a deformação não recuperável é utilizada para o cálculo do parâmetro Jnr (AASHTO T350, 2014; D'ANGELO et al. 2007; WU e HERRINGTON, 2016).

FIGURA 9 - RELAÇÃO ENTRE TENSÃO E RECUPERAÇÃO DURANTE O TESTE MSCR



FONTE: Adaptado de AUTROADS (2016)

As análises de MSCR devem ser realizadas após o RTFOT para serem mais representativas das condições de uso do pavimento, pois a partir deste se simula o envelhecimento a curto prazo durante o processo de usinagem (mistura).

D'Angelo (2009) investigou a correlação entre os valores obtidos em laboratório para o parâmetro J_{nr} e a deformação permanente em pistas experimentais. Esse estudo utilizou 7 ligantes asfálticos diferentes incluindo os modificados, e correlacionou também diferentes tensões aplicadas no teste de MSCR (3,2 kPa, 12,8 kPa e 25,6 kPa). Os resultados foram coletados durante 6 anos levando a conclusão que a tensão de 3,2 kPa tinha a melhor correlação entre os valores de J_{nr} e a formação de deformação permanente no pavimento.

Após chegar a essa correlação com valor de J_{nr} , onde quanto menor o valor desse parâmetro maior a resistência a deformação, D'Angelo (2009) propôs ainda uma classificação para diferentes níveis de tráfego e velocidades baseadas nesse parâmetro, sendo dividida em quatro classificações: padrão (S), pesado (H), muito pesado (V) e extrapesado (E), e ainda propôs uma relação onde estabelece uma diferença máxima de 75 % entre os valores obtidos no teste a 0,1 kPa e a 3,2 kPa, valores superiores indicariam uma alta suscetibilidade a variações de tensão no ligante (D'ANGELO, 2009). A relação entre o volume e velocidade do tráfego e os valores de J_{nr} pode ser visualizada na TABELA 2.

TABELA 2 - RELAÇÃO ENTRE VOLUME E VELOCIDADE DO TRÁFEGO COM O PARÂMETRO JNR

Nível de tráfego (ESAL*- milhões)	Velocidade (Km/h)	Tipo de tráfego	Jnr recomendado (KPa ⁻¹)
< 10	> 70	S- <i>Standard</i> (padrão)	< 4,5
10 a 30	ou 20 a 70	H- <i>High</i> (pesado)	< 2,0
> 30	ou < 20	V- <i>Very Heigh</i> (muito pesado)	< 1,0
> 30	e <20	E- <i>Extremely Very Heigh</i> (extrapesado)	< 0,5

FONTE: Adaptado AUSTROADS (2016)

* ESAL (*Equivalent Single Axle Load*) é um conceito criado pela AASTHO, correspondendo à carga equivalente de eixo simples, estabelecendo uma relação de dano por comparação dos efeitos de diferentes combinações de eixos carregando cargas variadas. O eixo de carga padrão é de eixo simples (8.2 t) com roda dupla. O cálculo do ESAL é um resumo estatístico de carga de tráfego acumulada, obtido a partir de fatores de equivalência de carga determinados nos EUA.

2.6.4 Superposição de dados de tempo e temperatura

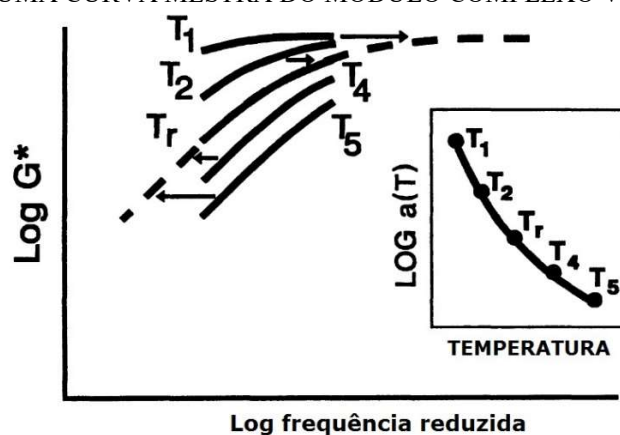
Uma das principais técnicas analíticas utilizadas na análise dos dados dinâmico-mecânicos para os ligantes asfálticos envolve a construção de curvas mestras de força para o módulo complexo dinâmico e o ângulo de fase. Na construção dessas curvas mestras, é utilizado o princípio da superposição tempo-temperatura, ou método de variáveis reduzidas. Na construção de uma curva mestre usando superposição tempo-temperatura, os dados dinâmicos são primeiro coletados a diferentes temperaturas variando-se a frequência obtendo se várias curvas denominadas T1, T2, T3, T4 e T5 que representam a variação de G^* versus uma determinada faixa de frequência. Com a superposição é possível obter uma curva a uma temperatura de referência (T_r) entre T1, T2 e T4, T5 com dados de G^* a uma faixa de frequência bem maior que as determinações acima (ver FIGURA 10). Os dados a todas as outras temperaturas são então deslocados em relação ao tempo até as curvas se fundirem numa única função suave. O deslocamento pode ser feito com base em qualquer das funções viscoelásticas (BARNES 1993).

Existem vários tipos de funções viscoelásticas que são usadas para ajustar a curva do fator de deslocamento. O modelo de Williams Landel e Ferry (WLF) proposto inicialmente para polímeros pode ser utilizado para chegar ao valor do fator de deslocamento para ligantes asfálticos (FERRY, 1980), entretanto a função de Arrhenius é uma das mais simples para se chegar ao fator de deslocamento. Utilizando o fator de deslocamento é possível construir uma

curva mestra para a rigidez do ligante a uma temperatura a partir de medições a diferentes temperaturas (GOODRICH, 1988).

O módulo de cisalhamento complexo, $G^*(\omega)$ e o ângulo de fase δ são plotados contra a frequência em uma escala log-log. Em altas frequências, o módulo de cisalhamento complexo se aproxima de um valor limitante, que é o módulo vítreo em cisalhamento. Em baixas frequências, a inclinação do gráfico log-log de módulo complexo versus frequência se aproxima de uma relação de 1: 1, o que significa que o fluxo viscoso foi atingido, e que o ligante asfáltico está se comportando como um fluido newtoniano. Em frequências intermediárias, o comportamento do asfalto muda gradualmente de um fluido simples para um sólido vítreo (BURGER, 2001). A superposição tempo temperatura pode ser visualizada na FIGURA 10, no gráfico do logaritmo do modulo complexo versus frequência reduzida.

FIGURA 10- GRÁFICO DA SUPERPOSIÇÃO DOS DADOS DE TEMPO TEMPERATURA NA CONSTRUÇÃO DE UMA CURVA MESTRA DO MÓDULO COMPLEXO VERSUS FREQUÊNCIA



FONTE: Adaptado ANDERSON et al. (1994)

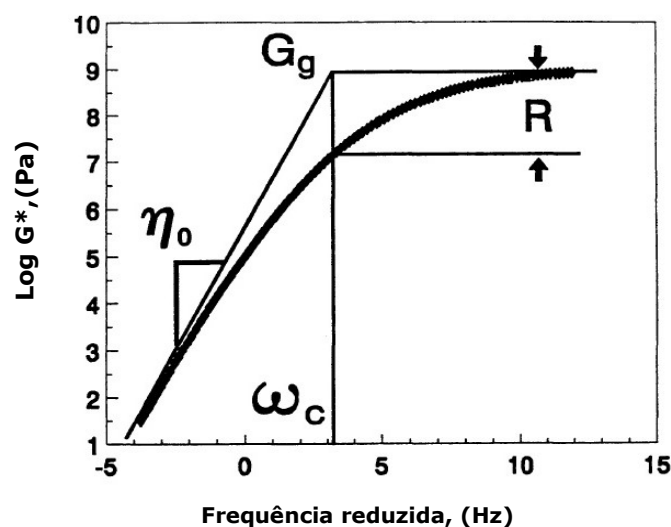
A dependência da temperatura, tal como refletida nos fatores de mudança, não deve ser confundida com a susceptibilidade à temperatura. Susceptibilidade à temperatura é um conceito empírico baseado na mudança de consistência ou dureza de um asfalto com temperatura. A dependência da temperatura é um conceito fundamental que indica como os processos de relaxamento dentro de um determinado ligante asfáltico mudam com a temperatura (ANDERSON et al., 1994).

Os parâmetros que podem ser obtidos por meio de uma curva mestra de força são:

- Módulo vítreo (G^*_g): A baixas temperaturas e altas frequências ou tempos de carregamento curtos, o módulo vítreo é normalmente muito próximo de 1 GPa em carga de cisalhamento para a maioria dos ligantes asfálticos, sendo que o valor único de 1 GPa pode ser assumido para a maioria das finalidades.

- viscosidade de estado estacionário (η_0) ou viscosidade newtoniana: Em um ensaio dinâmico ocorre a aproximação do limite da viscosidade dinâmica, η^* , quando o ângulo de fase se aproxima de 90° . Na linha de 45° da curva mestre, a baixas frequências, é conhecida como a assíntota viscosa. É um indicativo da viscosidade de estado estacionário;
- frequência de crossover (ω_c): É a frequência em uma dada temperatura onde a $\tan \delta$ é igual a 1. Nesse ponto, o módulo de armazenamento e perda são iguais. Para a maioria dos ligantes asfálticos a frequência de crossover é aproximadamente igual ao ponto em que a assíntota viscosa intersecta o módulo vítreo. Esse parâmetro pode ser considerado como um indicativo de dureza do ligante a uma determinada temperatura;
- índice reológico (R): É a diferença entre o módulo vítreo, G_g e o módulo complexo dinâmico na frequência de crossover, $G^*(\omega_c)$. O índice reológico é diretamente proporcional à largura do espectro de relaxamento. O índice reológico não é uma medida relacionada com a temperatura, mas reflete a mudança módulo com a frequência ou tempo de execução e, portanto, é uma medida da dependência da taxa de cisalhamento no ligante asfáltico (ANDERSON et al., 1994). Na FIGURA 11 é possível visualizar como são obtidos os parâmetros citados em uma curva mestra.

FIGURA 11- PRINCIPAIS PARÂMETROS OBTIDOS EM UMA CURVA MESTRA DO MÓDULO COMPLEXO VERSUS FREQUÊNCIA

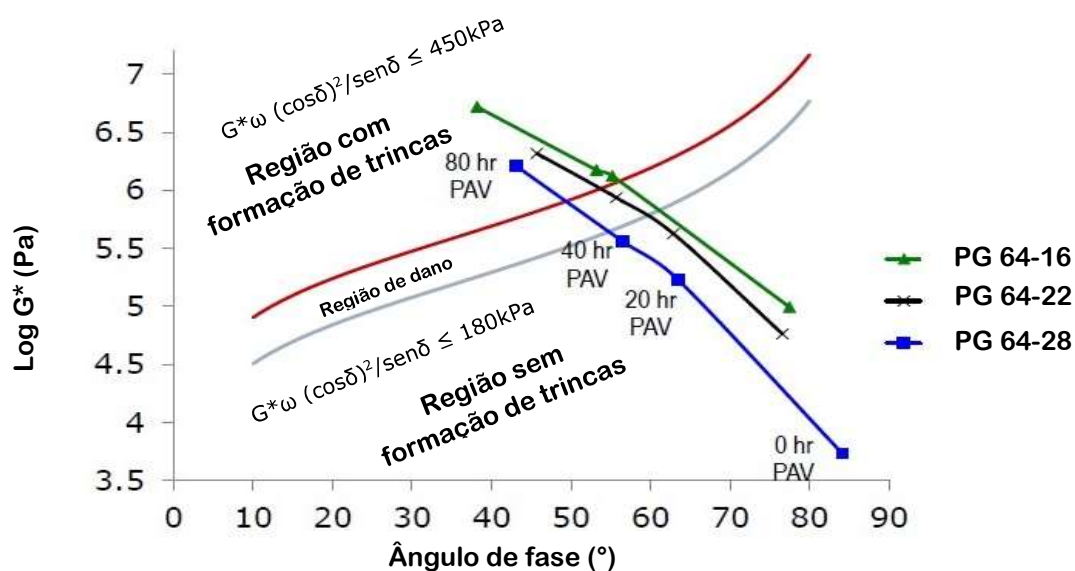


FONTE: Adaptado ANDERSON et al. (1994)

Este conjunto de parâmetros auxilia na descrição da dependência temporal da maioria dos ligantes de asfálticos sob uma ampla gama de condições de carga por meio das curvas mestres de força.

Outros parâmetros correlacionados com a performance do ligante podem ser extraídos a partir dos dados obtidos no DSR. O parâmetro de Glover-Rowe é um exemplo disso, são construídas curvas de módulo complexo e de ângulo de fase, conhecidas como curvas “black” para traçar as propriedades do ligante em um diagrama chamado de “black space”. O diagrama “black space” é uma curva “black” com os eixos invertidos e com limites estabelecidos para o início da formação de trincas, e pode ser melhor entendido por meio da FIGURA 12, onde pode ser visualizado diferentes níveis de envelhecimento em alguns ligantes asfálticos.

FIGURA 12- DIAGRAMA DAS ZONAS DE DANO E INÍCIO DA FORMAÇÃO DE TRINCAS COM O ENVELHECIMENTO PROPOSTO POR GLOVER-ROWE E ANDERSON ET AL. (2011).



FONTE: Adaptado de ANDERSON et al. (2011)

O parâmetro de Glover-Rowe é definido como: $G^*\omega ((\cos\delta)^2/\sin\delta)$, onde a relação entre o módulo complexo de cisalhamento e o ângulo da fase a 15 °C e 0,005 rad/s indicam a região de início do dano por fadiga entre 180 kPa e 450 kPa. Os valores para esse parâmetro devem ficar abaixo de 180 kPa para o ligante asfáltico considerado com baixa suscetibilidade ao envelhecimento, sendo que valores acima de 450 kPa indicam que o ligante pode ter um envelhecimento acelerado com a perda da ductilidade e a formação de trincas como resultado desse processo (ANDERSON et al., 2011).

Os resultados do parâmetro Glover-Rowe são especialmente úteis para avaliação do estado de envelhecimento de ligantes asfálticos, devido à relação que pode levar à formação de

trincas. Outra informação relevante que esse parâmetro traz é a possibilidade de avaliar quanto um determinado ligante asfáltico pode receber de material fresado (reciclado) sem comprometer o seu desempenho em relação ao envelhecimento, já que o ligante reciclado é um material envelhecido (GLOVER et al., 2005 e ROWE, 2014). Por intermédio destes resultados, têm-se, também, a capacidade de capturar informações como a previsão do início de fissuras no pavimento com o decorrer dos anos, ou seja, é possível prever a suscetibilidade desse ligante ao envelhecimento precoce e o aparecimento de fissuras e conseqüentemente a perda de serventia desse pavimento (MENSCHING et al., 2015).

2.7 PARÂMETROS DE QUALIDADE DE LIGANTES ASFÁLTICOS

Para os materiais asfálticos a especificação para a sua qualificação, deve mostrar as informações das propriedades que são relevantes para a sua escolha e local de uso, uma vez que uma especificação técnica pode ser considerada como um conjunto de informações dada a um determinado material, propiciando o seu comportamento e o seu desempenho (CLAXTON *et al.*, 1996).

No Brasil os ligantes asfálticos eram classificados inicialmente por meio do ensaio de penetração. No final dos anos 80, a classificação foi alterada, o ensaio de penetração foi substituído pela viscosidade a 60 °C, baseada nas especificações americanas (ASTM D 3381), permanecendo esta forma de diferenciar a consistência até 2005. A partir daí foram estabelecidas especificações baseadas nas especificações europeias (EN 12591), como no teste de penetração a 25 °C para diferenciar os ligantes asfálticos, não tendo mudanças ou atualizações significativas desde a sua criação (BERNUCCI et al., 2008).

A especificação brasileira inclui 4 classes de ligantes asfálticos classificados pela propriedade de penetração. Na TABELA 3, é possível visualizar a especificação brasileira do CAP. O índice de suscetibilidade térmica (IST) presente nessa especificação é calculado a partir de uma equação desenvolvida por Pfeiffer e Van Doormaal (1936).

TABELA 3 ESPECIFICAÇÃO DOS CIMENTOS ASFÁLTICOS DE PETRÓLEO (CAP)

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES				MÉTODOS	
		CAP 30 45	CAP 50 70	CAP 85 100	CAP 150 200	ABNT	ASTM
Penetração (100 g, 5s, 25 °C)	dmm	30 45	50 70	85 100	150 200	NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36

continua

TABELA 3 - ESPECIFICAÇÃO DOS CIMENTOS ASFÁLTICOS DE PETRÓLEO (CAP)

		continuação e conclusão					
CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES				MÉTODOS	
		CAP 30 45	CAP 50 70	CAP 85 100	CAP 150 200	ABNT	ASTM
Viscosidade SayboltFurol	s					NBR 14950	E 102
a 135 °C, mín		192	141	110	80		
a 150 °C, mín		90	50	43	36		
a 177 °C		40 150	30 150	15 60	15 60		
OU							
Viscosidade Brookfield	cP					NBR 15184	D 4402
a 135 °C, SP 21, 20 rpm, mín		374	274	214	155		
a 150 °C, SP 21, mín.		203	112	97	81		
a 177 °C, SP 21		76 285	57 285	28 114	28 114		
Índice de susceptibilidade térmica (1)		(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)		
Ponto de fulgor mín	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92
Solubilidade em tricloroetileno, mín	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
Ductilidade a 25 °C, mín	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 min							D 2872
Varição em massa, máx (2)	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5		
Ductilidade a 25 °C, mín	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36
Penetração retida, mín (3)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5

FONTE: BRASIL-ANP (2005)

(1) O Índice de susceptibilidade térmica é obtido a partir da seguinte equação

$$\text{Índice de susceptibilidade térmica} = \frac{(500) (\log \text{PEN}) + (20) (T^{\circ} \text{C}) - 1951}{120 - (50) (\log \text{PEN}) + (T^{\circ} \text{C})}$$

Onde: (T °C) = Ponto de amolecimento, (PEN) = penetração a 25 °C, 100 g, 5 s.

(2) A Variação em massa, em porcentagem, é definida como: $M = (\text{Minicial} - \text{Mfinal}) / \text{Minicial} \times 100$

Onde: (Minicial) = massa antes do ensaio RTFOT, (Mfinal) = massa após o ensaio RTFOT

(3) A Penetração retida é definida como: $\text{PEN retida} = (\text{PENfinal} / \text{PENinicial}) \times 100$

Onde: (PENinicial) = penetração antes do ensaio RTFOT, (PENfinal) = penetração após o ensaio RTFOT

O cálculo complexo define o índice de Penetração (IP) que é uma propriedade derivada e não propriamente o IST, como descrito na especificação brasileira, pois esta relaciona as propriedades como o ponto de amolecimento e a penetração do ligante e não a sua suscetibilidade com a variação da temperatura.

O índice de suscetibilidade térmica (IST) pode ter como resultante um valor negativo e, este, pode ser devido ao fato de haver uma confusão entre o IST e o índice de penetração (IP).

O IST é definido como a variação da consistência do CAP com a temperatura e pode ser calculado realizando o ensaio de penetração em diferentes temperaturas, e colocando-se na forma gráfica do logaritmo da penetração pela temperatura do ensaio e o resultado da inclinação desse gráfico é o IST. Quanto maior for a inclinação dessa curva maior é a suscetibilidade térmica do material, sendo que os valores variam de 0,02 a 0,06, onde um ligante com 0,04 apresenta uma suscetibilidade térmica ideal para a pavimentação (BERNUCCI et al., 2008).

Os asfaltos modificados por polímeros (AMP) são classificados pelo ponto de amolecimento, segundo a resolução nº 32 da ANP de setembro de 2010, como podem ser visualizados na TABELA 4.

TABELA 4 ESPECIFICAÇÃO DOS CIMENTOS ASFÁLTICOS DE PETRÓLEO MODIFICADOS POR POLÍMEROS ELASTOMÉRICOS

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE			MÉTODO	
		Tipo			ABNT NBR	ASTM
		55/75-E	60/85-E	65/90-E		
Penetração (100 g, 5 s, 25 °C)	dmm	45 - 70	40 - 70		6576	D5
Ponto de amolecimento, mín	°C	55	60	65	6560	D36
Viscosidade Brookfield						
a 135 °C, spindle 21, 20 rpm, máx.		3000				
a 150 °C, spindle 21, 50 rpm, máx.	cP	2000			15184	D4402
a 177 °C, spindle 21, 100 rpm, máx.		1000				
Ponto de fulgor, mín	°C		235		11341	D92
Ensaio de separação de fase, máx.	°C		5		15166	D7173
Recuperação elástica a 25 °C, 20 cm, mín	%	75	85	90	15086	D6084

continua

TABELA 4- ESPECIFICAÇÃO DOS CIMENTOS ASFÁLTICOS DE PETRÓLEO MODIFICADOS POR POLÍMEROS ELASTOMÉRICOS

		continuação e conclusão				
CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE			MÉTODO	
		Tipo			ABNT NBR	ASTM
		55/75-E	60/85-E	65/90-E		
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C, 85 minutos						
Varição em massa, máx (1)	% massa	1,0			15235	D2872
Varição do ponto de amolecimento, máx	°C	-5 a +7			6560	D36
Percentagem de penetração original, mín	%	60			6576	D5
Percentagem de recuperação elástica original a 25 °C, mín.	%	80			15086	D6084

FONTE: BRASIL-ANP (2010)

(1) A variação em massa é definida como:

$$\Delta M = \frac{M_f - M_i}{M_i} \times 100$$

M_f: massa após o ensaio RTFOT

M_i: massa antes do ensaio RTFOT

Essa especificação surgiu da demanda crescente pela utilização de ligantes asfálticos modificados especialmente para aplicações especiais em rodovias que não suportavam a ação do tráfego com um pavimento produzido com um ligante convencional.

As distribuidoras de ligantes asfálticos começaram a oferecer diferentes ligantes asfálticos modificados por polímero a partir de então, colaborando para o crescimento do mercado de polímeros e aditivos para aplicações na pavimentação. Surgiram novos produtos disponíveis no mercado nacional, até então utilizados apenas em outros países.

A comercialização de ligantes asfálticos modificados foi importante principalmente para garantir maior vida útil ao pavimento asfáltico, que resiste melhor aos esforços do tráfego e também as intempéries do clima que afetam a sua durabilidade (BALBO, 2007).

O ligante asfáltico modificado com borracha moída de pneus surgiu a partir de um passivo ambiental, entretanto tornou-se atrativo devido ao aumento das propriedades elásticas do ligante e são classificados, segundo a viscosidade nos tipos AB8 e AB22 como definido na resolução nº 39 da ANP de dezembro de 2008.

A comercialização de ligantes asfálticos modificados foi importante principalmente para garantir maior vida útil ao pavimento asfáltico, que resiste melhor aos esforços do tráfego e também as intempéries do clima que afetam a sua durabilidade (BALBO, 2007).

2.7.1 Parâmetros predominantes na especificação brasileira

A especificação brasileira adota diferentes critérios para classificação dos ligantes asfálticos, sendo que estas são propriedades empíricas, ou seja, não estão relacionadas com o desempenho do material na sua vida útil em serviço e sim com propriedades físicas como consistência no caso do ensaio de penetração ou resistência ao fluxo na medida da viscosidade a altas temperaturas.

A penetração a 25 °C é a propriedade predominante na classificação do CAP não modificado no Brasil, sendo que esse ensaio foi utilizado para classificar os primeiros ligantes asfálticos produzidos no EUA em 1918. O ensaio de ponto de amolecimento é utilizado como propriedade principal para a classificação do ligante asfáltico modificado por polímero (ANP, 2010).

Na década de 1980 após algumas discussões de especialistas em pavimentação chegou-se às seguintes conclusões:

- a penetração é uma propriedade empírica e fornece informações apenas sobre a consistência do produto a temperaturas intermediárias de 25 °C e não necessariamente as condições de utilização em serviço;
- a viscosidade é um parâmetro importante que pode relacionar as condições do ligante a elevadas temperaturas, pois considera o seu comportamento viscoso nessa faixa, mas que não pode ser utilizada para asfaltos modificados que exibem comportamento elástico muitas vezes nessa mesma faixa de temperatura. Portanto é um ensaio que não pode caracterizar o comportamento de ambos os materiais (CHOI, 2013).

O ponto de amolecimento de um material é considerado como o valor de temperatura na qual a consistência de um ligante asfáltico passa do estado plástico ou semissólido para o estado líquido, sendo um indicador de uma mudança de estado físico do ligante (ASTM D36/D36M, 2014).

Ligantes asfálticos modificados por polímeros têm um aumento no ponto de amolecimento, ou seja, tem a sua a sua rigidez aumentada a temperaturas intermediárias (BERNUCCI et al., 2008).

Outros parâmetros presentes na especificação brasileira indicam a pureza do material e também aspectos de segurança como a solubilidade em tricloroetileno e o ponto de fulgor respectivamente.

A importância de parâmetros que correlacionem propriedades as medidas com desempenho do produto refletem na qualidade e durabilidade do produto final, ou seja o pavimento asfáltico. Fatores como o volume e velocidade de tráfego em uma via devem ser levados em consideração na escolha do melhor ligante para determinada obra viária.

Novos parâmetros que consigam prever a suscetibilidade de um material ao envelhecimento precoce e o aparecimento de fissuras no pavimento são determinantes para a seleção do ligante com maior durabilidade e resistência as condições de tráfego e as intempéries climáticas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Os materiais listados na sequência foram utilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

- cera de Fischer-Tropsch em forma de grânulos;
- CAP 001 (ligante da classe 50/70 de ligantes asfálticos não modificados da proveniente da refinaria A);
- CAP 002 (ligante da classe 50/70 de ligantes asfálticos não modificados proveniente da refinaria B);
- CAP 003 (ligante 001 modificado com cera de Fischer- Tropsch)
- CAP 004 (ligante modificado com copolímero tribloco SBS da classe 60/85 de ligantes asfálticos modificados por polímeros);
- CAP 005 (ligante altamente modificado (HiMA) com copolímero SB).

Os ligantes utilizados no trabalho foram identificados com a numeração de 001 a 005. Os ligantes puros foram cedidos por duas refinarias da PETROBRAS, e são da classe 50/70 (classificados pelo ensaio de penetração com limites entre 50-70 dmm) que é uma das mais utilizadas nas obras de pavimentação no Brasil.

O CAP 003 foi preparado pela adição da cera Fischer-Tropsch com alto peso molecular na proporção de 1,5%, em massa, do ligante asfáltico proveniente da refinaria A, sendo que este aditivo foi utilizado por ser considerado como um excelente modificador do ligante asfáltico, sendo produzido pela Sasol Wax na África do Sul (ASPHALT ACADEMY, 2007).

O CAP 004 é um ligante asfáltico modificado com o copolímero tribloco de SBS, esse polímero é um elastômero termoplástico com uma concentração aproximada de 30% de poliestireno e é adicionado ao ligante na proporção de 3,0 %, em massa do ligante asfáltico. Esse produto é comercializado por diversos distribuidores de ligante asfáltico. A amostra utilizada foi cedida pela COPPE-UFRJ.

O CAP 005 é um ligante altamente modificado (HiMA), por um copolímero dibloco de estireno butadieno (SB), O copolímero SB tem uma concentração de poliestireno de 33% e esse polímero é adicionado na proporção de 7,5%, em massa, do ligante asfáltico. A amostra de ligante asfáltico utilizada foi cedida pela COPPE-UFRJ.

3.2 PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS

A preparação do asfalto modificado com a cera de Fischer-Tropsch foi realizada a partir da sua adição ao CAP na temperatura de 135 °C, mantendo-se a agitação em agitador rotacional na velocidade de 300 rpm por, aproximadamente, 15 minutos. Para não ocorrer o resfriamento do CAP foi utilizada uma manta aquecedora onde a lata com o produto foi colocada.

Na FIGURA 13 pode-se observar o agitador utilizado para a completa homogeneização do aditivo no CAP.

FIGURA 13 - AGITADOR ROTACIONAL UTILIZADO PARA HOMOGENEIZAR AS AMOSTRAS



FONTE: O autor (2016)

3.3 MÉTODOS DA ESPECIFICAÇÃO BRASILEIRA.

3.3.1 Penetração

A determinação da penetração dos ligantes asfálticos foi realizada de acordo com a norma ASTM D5/D5M – 13. Esse ensaio pode ser definido como a distância em décimos de milímetro que uma agulha padrão penetra verticalmente na amostra do material sob condições prefixadas de carga (100 g), tempo (5 s) e de temperatura (25 °C).

Primeiramente verte-se a amostra previamente aquecida em um recipiente de ensaio de 35 mm de altura e 55 mm de diâmetro, logo após deixou-se resfriar por um período de 60 a 90 minutos à temperatura ambiente.

A partir de então a amostra foi imersa em banho especificado para o ensaio ($25,0 \pm 0,1$) °C, pelo mesmo período de tempo. Após esse período colocou-se a amostra sob a agulha, no penetrômetro, e ajustou-se a mesma fazendo com que se coincidissem exatamente a imagem da agulha refletida pela amostra com a ponta da própria agulha

A escala do penetrômetro foi ajustada para a leitura zero e liberou-se a agulha durante o tempo de 5 s, anotando-se a penetração imposta na amostra. Foram realizadas pelo menos três leituras, sendo que o resultado final da penetração foi a média dos três valores.

3.3.2 Viscosidade Rotacional

O viscosímetro rotacional pode ser utilizado para se determinar a viscosidade aparente de asfaltos a elevadas temperaturas. O torque em um medidor geométrico em rotação inserido em uma amostra com temperatura controlada pode ser utilizado para o cálculo da resistência a rotação. O torque e a velocidade foram utilizados para a determinação da viscosidade de asfaltos em mPa.s ou cP. Na FIGURA 14 é possível visualizar o equipamento utilizado na realização dos ensaios.

FIGURA 14 - VISCOSÍMETRO ROTACIONAL DA MARCA BROOKFIELD UTILIZADO NA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS DE VISCOSIDADE



FONTE: O autor (2016)

A viscosidade rotacional foi determinada utilizando um viscosímetro rotacional (marca Brookfield) e um medidor geométrico de tamanho 21 conforme determina a norma de referência ASTM D-4402/4402M – 15. Esse medidor geométrico é chamado de “spindle” tendo diferentes dimensões que podem ser utilizados em diferentes faixas de viscosidade e temperaturas.

Este teste é muito utilizado para o cálculo da temperatura de manipulação, transporte, mistura e aplicação de asfaltos.

As análises foram realizadas conforme ASTM D-4402/4402M – 15, onde a amostra foi pesada em um recipiente próprio do equipamento conforme recomendação do fabricante, logo após colocar o frasco no thermosel e ajustar a temperatura aguardou-se 30 minutos para iniciar a rotação. Após ligar a rotação e ajustar o torque entre 10 e 98%, aguardou-se a estabilização da leitura por 10 minutos. Foram realizadas 3 leituras com intervalos de 1 minutos. Foi realizada a média das leituras e realizado o mesmo procedimento para leituras em diferentes temperaturas.

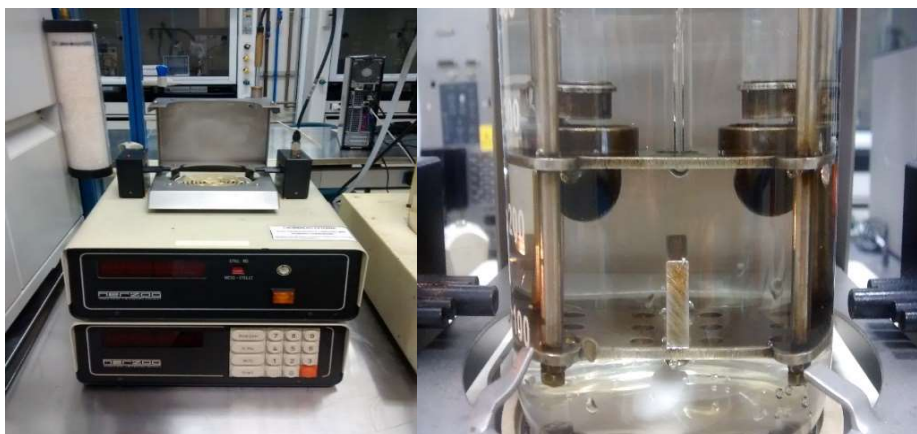
3.3.3 Ponto de Amolecimento (anel bola)

Este ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM-D36/36M – 14. Nesta norma está descrito o procedimento para a determinação do ponto de amolecimento de piches, alcatrões e cimentos asfálticos na faixa de 30 a 175 °C. O ponto de amolecimento de um material é considerado como o valor de temperatura na qual a consistência de um ligante asfáltico passa do estado plástico ou semissólido para o estado líquido. O ponto de amolecimento, é a temperatura lida no momento em que a esfera metálica padronizada atravessa o anel (também padronizado) cheio com o material asfáltico, tocando uma placa de referência após ter percorrido uma distância de 25,4 mm sob condições especificadas.

Resumidamente, o ensaio pode ser descrito da seguinte maneira. A amostra fundida é colocada em um molde que consiste de um anel de latão. Após o seu resfriamento à temperatura ambiente por 30 minutos o anel foi mantido suspenso em um banho à temperatura controlada (5 ± 1) °C durante 15 minutos e, sobre ele, foi colocada uma esfera de aço de 3,5 g com 9,53 mm de diâmetro. O conjunto foi aquecido a uma velocidade de aquecimento constante (5 °C/minuto) fazendo com que a amostra amolecesse dentro do anel e cedesse ao peso da bola que se deslocou a uma determinada distância. Quando a amostra tocou a placa do fundo, anotou-se a temperatura como sendo o ponto de amolecimento.

A análise foi realizada em duplicada, sendo a diferença entre os resultados não pode ultrapassar 1 °C, caso contrário o teste teria que ser refeito. Na FIGURA 15 é possível visualizar o equipamento utilizado para a realização do ensaio (esquerda), assim como a foto de uma análise em andamento (direita) em uma temperatura próxima ao ponto de amolecimento.

FIGURA 15 - EQUIPAMENTO DE PONTO DE AMOLECIMENTO A ESQUERDA, FOTO DE UMA ANÁLISE EM ANDAMENTO, PROXIMO A TEMPERATURA DE PONTO DE AMOLECIMENTO DA AMOSTRA



FONTE: O autor (2016)

3.3.4 Ponto de fulgor em copo aberto

Esse teste foi realizado conforme a norma ASTM D92 – 16. Esta norma descreve o procedimento para determinação do ponto de fulgor. O ponto de fulgor é uma medida da inflamabilidade do produto, ou seja, a menor temperatura que o produto libera vapores de modo a formar uma mistura inflamável em contato com o ar e que possa entrar em ignição quando em contato com uma fonte externa de calor. Na FIGURA 16 pode-se visualizar o equipamento utilizado na realização dos ensaios de ponto de fulgor.

O teste consiste no aquecimento controlado de 70 ml de amostra em uma cuba específica do equipamento de ponto de fulgor Cleveland em copo aberto (marca: ISL). Deve-se colocar a amostra em uma temperatura inferior de no mínimo 56 °C abaixo do ponto de fulgor esperado.

A amostra foi aquecida e uma chama de teste foi passada acima da amostra a cada 2 °C, até que o ponto de fulgor fosse detectado por um sensor. Este sensor é sensível a pequenas variações de calor, sendo que quando ocorre a ignição da mistura inflamável essa alteração é detectada.

FIGURA 16 - EQUIPAMENTO DE PONTO DE FULGOR CLEVELAND UTILIZADO NA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE INFLAMABILIDADE DAS AMOSTRAS



FONTE: o autor (2016)

3.3.5 Ductilidade

A ductilidade de um material betuminoso é definida como sendo a distância, medida em centímetros, com que se rompe um corpo de prova padronizado desse material submetido a uma tração em condições específicas.

Os asfaltos dúcteis têm propriedades aglutinantes melhores do que os asfaltos não dúcteis, pois garantem a flexibilidade das misturas asfálticas utilizadas nos pavimentos. No entanto ductilidades altas indicam asfaltos mais suscetíveis às mudanças de temperatura, e ductilidades baixas indicam pequena suscetibilidade às variações de temperatura. A determinação da ductilidade foi realizada conforme a norma ASTM D113 – 07.

Nesse ensaio o material asfáltico foi aquecido até a fluidez completa, que deve ser conseguida por volta de 140 °C então o material foi colocado no molde, deixou-se resfriar por (35 ± 5) minutos à temperatura ambiente e em seguida, mergulhou-se o conjunto banho de água de mesma temperatura do teste e após (35 ± 5) minutos, removeu-se a amostra do banho e logo em seguida cortou-se o excesso com uma espátula um pouco aquecida, para que suas faces ficassem planas.

As amostras foram mergulhadas no banho de água, mantendo-se a temperatura de $(25,0 \pm 0,5)$ °C por (90 ± 5) minutos, em seguida, retiraram-se o molde da placa e as duas partes laterais, sendo imediatamente colocados nos orifícios existentes em cada extremidade das garras, no gancho do ductilímetro.

Iniciou-se a tração da amostra com uma velocidade uniforme de 5 cm/min $\pm 5,0\%$ até o rompimento do corpo de prova, que correspondeu ao rompimento de um fio de asfalto que vai se alongando e reduzindo o diâmetro do cilindro na sua parte central. A ductilidade do

material asfáltico foi medida em uma escala impressa na parede do próprio equipamento e foi dada em centímetros. O molde e o equipamento utilizados nos ensaios de ductilidade estão mostrados na FIGURA 17.

FIGURA 17 - MOLDE E EQUIPAMENTO UTILIZADOS PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE DUCTILIDADE



FONTE: O autor (2016)

3.3.6 Ensaio em estufa de filme fino rotativo (RTFOT)

O ensaio em estufa de filme fino rotativo “Rolling Thin Film Oven Test” (RTFOT), foi realizado de acordo com o método ASTM D 2872 – 12, que simula o envelhecimento que ocorre no ligante asfáltico durante a sua usinagem (mistura). Neste ensaio é possível avaliar o processo de oxidação e envelhecimento da amostra pela variação de massa e pelos resultados dos testes após o envelhecimento a curto prazo. A determinação a quantidade de voláteis perdida durante o ensaio é um indicador do envelhecimento que pode ocorrer no ligante durante a mistura em usina e a construção do pavimento.

O ensaio pode ser resumidamente descrito da seguinte maneira. A amostra deve ser aquecida até que fique fluida, não excedendo 150 °C. Em seguida os frascos do RTFOT são preenchidos com $(35,0 \pm 0,5)$ g da amostra. Duas amostras são usadas para determinar a perda de massa, sendo que estes dois frascos devem ser resfriados por um período mínimo de 60 min e máximo de 180 min e devem ser pesados com uma precisão de 0,0001 g ou melhor, os outros seis frascos são usados para produzir materiais para ensaios adicionais. Os frascos com as amostras são colocados no suporte e submetidos a uma rotação de (15 ± 2) rpm. O fluxo de ar é introduzido a uma taxa de (4000 ± 200) ml/min e as amostras são expostas a essas condições

durante 85 minutos. Após o envelhecimento, dois frascos são pesados para se verificar a variação de massa e o conteúdo dos outros seis frascos é utilizado para a realização dos testes após o ensaio para verificar o grau e taxa de envelhecimento do ligante pela variação do ponto de amolecimento, penetração e ductilidade. Os equipamentos utilizados para a análise de RTFOT podem ser visualizados na FIGURA 18, sendo da esquerda para a direita: (a) o frasco utilizado, (b) estufa aberta (c) estufa fechada.

FIGURA 18 - EQUIPAMENTOS UTILIZADO PARA A ANALISE DE RTFOT: (A) O FRASCO UTILIZADO, (B) ESTUFA ABERTA (C) ESTUFA FECHADA



FONTE: O autor (2016)

3.3.7 Solubilidade em tricloroetileno

Este ensaio foi realizado conforme ASTM D2042 – 15, e determina a quantidade de material asfáltico solúvel em tricloroetileno e a presença ou não de materiais minerais insolúveis. A amostra é dissolvida em tricloroetileno e filtrada em um aparato com uma membrana de fibra de vidro. O material retido é lavado, após sua secagem o mesmo é pesado para se determinar a massa de material insolúvel.

Primeiramente, deve-se preparar a membrana secando-a em uma estufa a $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ por 30 minutos e logo após aguarda-se mais 30 minutos em um dessecador para realizar a pesagem. Deve-se colocar aproximadamente 2 g de amostra em um erlemeyer previamente tarado. Aguarda-se 15 minutos para realizar a pesagem da massa exata após o seu resfriamento e logo após adiciona-se 100 ml de tricloroetileno. Aguarda-se 15 minutos com agitações ocasionais para dissolver toda a amostra.

A amostra após ter sido dissolvida deve ser filtrada sob vácuo em um cadinho de gooch onde deve estar a membrana previamente pesada, após a filtração deve-se lavar as paredes do cadinho com pequenas porções de tricloroetileno. A membrana deve ser colocada em uma cápsula de vidro e seca a $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ por no mínimo 20 minutos e logo após é deixada em dessecador

e pesada com aproximação de 0,1 mg. O procedimento anterior foi repetido até que não ocasionasse diferença entre duas pesagens consecutivas maior que 0,3 mg. Na FIGURA 19 está ilustrado o aparato utilizado para filtração nesse ensaio.

FIGURA 19 - APARATO UTILIZADO PARA ANÁLISE DE SOLUBILIDADE EM TRICLOETILENO



FONTE: O autor (2016)

O cálculo do material insolúvel foi realizado pela diferença na massa da membrana antes e após a filtração, subtraída da massa de amostra, dividida pela massa de amostra e multiplicado por 100 para expressar em percentagem em massa conforme é dado por:

$$\text{Solubilidade} = (M - (B - A) / M) \times 100 \quad (7)$$

Onde : M = massa amostra

A = massa inicial membrana

B = massa final da membrana após secagem

3.3.8 Índice de suscetibilidade térmica

O índice de suscetibilidade térmica é calculado conforme a Equação 10 segundo a especificação brasileira de julho de 2005 (ANP, 2005).

$$\text{Índice de susceptibilidade térmica} = \frac{(500) (\log \text{PEN}) + (20) (T^\circ \text{C}) - 1951}{120 - (50) (\log \text{PEN}) + (T^\circ \text{C})} \quad (8)$$

Onde: (T °C) = Ponto de amolecimento, (PEN) = penetração a 25 °C, 100 g, 5 s.

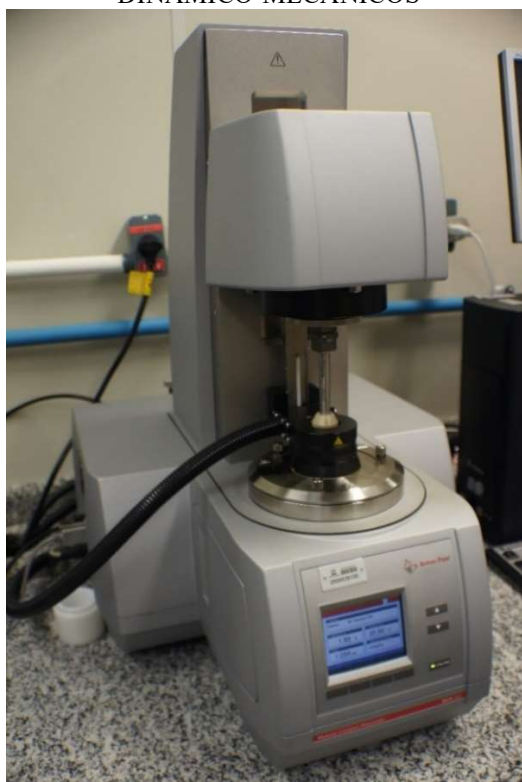
A suscetibilidade térmica de um material é um parâmetro que indica a variação de uma propriedade com a temperatura, no caso do CAP a variação da consistência com a variação da temperatura, a partir do valor de penetração e do ponto de amolecimento considerando que a penetração do material no ponto de amolecimento é 800 dmm.

3.4 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO MATERIAL

3.4.1 Grau de desempenho superior (PG)

Este ensaio foi realizado conforme a norma AASHTO T315 – 12, que indica os parâmetros para a determinação do grau de desempenho superior entre as temperaturas de 6 a 88 °C com uma frequência angular de 10 rad/s utilizando o reômetro de cisalhamento dinâmico com placas paralelas de geometria de $(25,00 \pm 0,05)$ mm. O objetivo foi calcular o módulo complexo de cisalhamento (G^*) e o ângulo de fase (δ) na amostra de ligante asfáltico em determinada temperatura. Na FIGURA 20 é possível visualizar o equipamento da marca Anton Paar utilizado para realizar os ensaios.

FIGURA 20 - REÔMETRO DE CISALHAMENTO DINÂMICO (DSR) UTILIZADO NOS ENSAIOS DINÂMICO-MECÂNICOS



FONTE: O autor (2016)

A amostra aquecida é colocada no suporte do equipamento, que após um breve período de resfriamento é acoplado à placa paralela superior para que a amostra fique aderida a esta parte. Um comando no equipamento faz com que a placa superior desça até formar uma película de 1 mm de ligante asfáltico, o excesso de ligante deve ser removido antes do início do teste.

Logo após coloca-se o controlador de temperatura e o equipamento inicia o teste na menor temperatura indicada para teste. Se o ligante supera o grau mínimo de resistência ao cisalhamento especificado no método, ele faz o teste na próxima temperatura múltipla de 6 °C, até que a amostra não atinja o limite especificado para o módulo complexo de cisalhamento. O valor da última temperatura atingida é o grau de desempenho superior da amostra. O resultado do módulo de cisalhamento dinâmico é expresso em kPa.

O equipamento calcula automaticamente pelo software o valor do módulo complexo de cisalhamento e o ângulo de fase.

3.4.2 Compliância não recuperável (Jnr)

O valor do parâmetro da compliância não recuperável (Jnr) é obtido pelo ensaio de MSCR utilizando reômetro de cisalhamento dinâmico com placas de $(25,00 \pm 0,05)$ mm segundo a norma ASTM D7405 – 15. Esta norma especifica os parâmetros utilizados no ensaio, para obter a compliância não recuperável utilizando as tensões de 0,1 kPa e 3,2 kPa.

A amostra deve ser preparada para o ensaio da mesma maneira que para a determinação do PG superior, e o ensaio consiste na aplicação de 10 ciclos com uma tensão de 0,1 kPa, sendo que cada ciclo é composto pela aplicação da tensão de cisalhamento por 1 segundo seguido de 9 segundos de relaxamento para recuperação da deformação. Logo após o término dos 10 primeiros ciclos são aplicados mais 10 ciclos com uma tensão de 3,2 kPa, seguindo os mesmos tempos de aplicação da tensão e de relaxamento.

O Jnr é calculado pela média das deformações não recuperáveis durante os 10 ciclos dividida pela tensão, portanto obtém-se dois resultados, um para a tensão de 0,1 kPa e outro para a tensão de 3,2 kPa.

Os ensaios para obtenção do parâmetro Jnr foram realizados em amostras após o envelhecimento no RTFOT.

A temperatura utilizada para a realização do ensaio foi de 64 °C, e os ensaios foram realizados no mesmo DSR utilizado para obter o PG superior.

3.4.3 Curvas mestras e “black”

Na construção de uma curva mestra usando superposição de dados de tempo e temperatura, os dados dinâmicos foram primeiro coletados em uma faixa de temperaturas e frequências por meio de uma tensão oscilatória predeterminada é aplicada à amostra a uma temperatura controlada. A velocidade de deslocamento de uma placa em relação à outra foi medida. Mediu-se o estresse de cisalhamento resultante. A medição é feita com a ajuda de um computador dedicado que manipula os dados resultantes. Os dados obtidos foram usados para traçar uma curva mestra ou curva “black” que ajuda a entender o comportamento reológico do ligante asfáltico.

Uma temperatura de referência padrão foi selecionada. Neste estudo, 25 ° C foi utilizado como temperatura de referência para a construção de curvas mestre. Os dados de todas as outras temperaturas são então deslocados em relação ao tempo até as curvas se fundirem numa única função suave.

Este teste é adequado para uso na faixa de temperatura de 5,0 a 65,0 °C e varredura de frequência na faixa de 0,01 a 25 Hz. As amostras de ensaio, nominalmente de 8 mm ou 25 mm de diâmetro, são utilizadas na geometria da placa-placa, dependendo da temperatura de ensaio.

Durante o ensaio, uma das placas paralelas é rodada em relação à outra em tensão de cisalhamento pré-selecionada ou taxas de tensão de cisalhamento. Os valores da tensão de cisalhamento utilizados dependem da viscosidade do material a ser testado e das limitações da região viscoelástica linear (LVE) do material.

A amostra aquecida foi colocada no suporte do equipamento e logo após acoplada a placa superior do reômetro onde ficou aderida e o suporte para amostra foi retirado. Um comando no equipamento faz com que a placa superior desça até formar um filme de 1 mm de amostra de ligante entre a placa superior e a inferior, e logo após foi raspado o excesso de ligante das placas para que a geometria da amostra não influencie nos resultados. A temperatura de teste do equipamento foi ajustada e aguardou-se a estabilização da temperatura com uma variação de $\pm 0,1$ ° C da temperatura de teste.

O teste foi realizado no modo de tensão controlada onde foi selecionado a faixa de frequências que foi utilizada para cada temperatura de acordo com a norma ASTM D 7175-15, começando das menores frequências para as maiores. Após cada teste em determinada temperatura foi resfriada a amostra por no mínimo 6 minutos para se iniciar os testes na próxima temperatura.

Os dados para a construção da curva mestra foram coletados utilizando-se a placa de 25 mm e 8 mm conforme a temperatura de teste, então os dados da variação do módulo complexo de cisalhamento foram colocados na forma gráfica versus a variação de frequência, obtendo-se a curva mestra de força. Os dados da variação do ângulo de fase e do módulo complexo de cisalhamento com a variação da temperatura de 10 °C a 65 °C foram utilizados para a construção das curvas “black”.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As amostras foram analisadas por meio dos resultados de ensaios empíricos relacionados na especificação brasileira atual como: Penetração (ASTM D5/D5M - 13), viscosidade rotacional (ASTM D4402/4402M - 15), ponto de amolecimento (ASTM D36/D36M - 14), que são os parâmetros predominantes para classificar os ligantes asfálticos puros e modificados. Foram realizados os ensaios de pureza e segurança como a solubilidade em tricloroetileno (ASTM D2042 - 15) e ponto de fulgor (ASTM D92 - 16) respectivamente, além do ensaio de envelhecimento em curto prazo (ASTM D 2872 - 12) e ductilidade (ASTM D113 - 07).

Foi realizado o cálculo das temperaturas máximas e mínimas do pavimento para a cidade de Curitiba, como exemplo, e foram realizados ensaios para calcular o grau de desempenho superior (AASHTO T315 - 12), o parâmetro Jnr (ASTM D7405 - 15) e a construção de curvas mestras e “black” por meio da superposição de dados de tempo e temperatura, e com esses dados foi possível calcular o parâmetro de Glover-Rowe e inserir os dados no digrama com o mesmo nome.

4.1 ANÁLISES DA ESPECIFICAÇÃO ATUAL

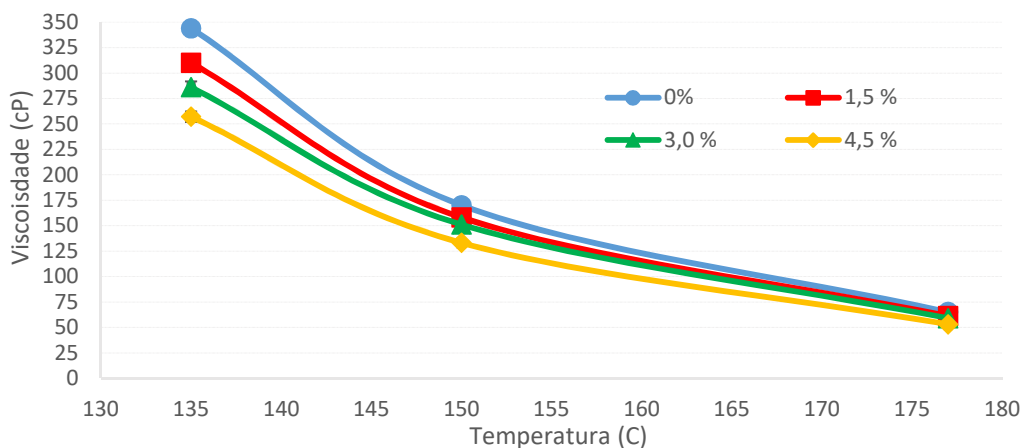
4.1.1 Viscosidade Rotacional

Na FIGURA 21, estão apresentados os valores da variação da viscosidade com a temperatura e com a adição de 1,5%, 3,0% e de 4,5%, em massa, de aditivo, em relação a amostra de referência, com 0%. Observou-se uma redução da viscosidade com o aumento no teor de aditivo, sendo que na temperatura de 135 °C a variação na amostra de CAP de referência para a amostra com 4,5% de aditivo foi de 87 cP. Já, na amostra com 1,5%, em massa, de aditivo a redução da viscosidade foi de 34 cP, valor este que não altera significativamente as características do produto no que tange à viscosidade rotacional Brookfield. A manutenção desses valores fez com que o CAP 003 tivesse características semelhantes ao CAP 001, podendo ser utilizado da mesma maneira no que se refere ao processo de armazenamento, transferência e estocagem e mistura aos agregados.

Outro fator que levou a escolha do valor adicionado da cera ao ligante, foi a tentativa de manter a viscosidade do ligante às temperaturas próximas dos valores do CAP 001, da ordem de 330 cPs a 135 °C e de se ter como premissa a manutenção dos parâmetros empíricos do CAP

001, para que fosse possível diferenciá-lo do CAP 003 por meio de ensaios dinâmico-mecânicos, mesmo tendo parâmetros empíricos muito semelhantes.

FIGURA 21- VARIAÇÃO DA VISCOSIDADE DOS LIGANTES ASFÁLTICOS COM A TEMPERATURA E COM A ADIÇÃO DE 1,5%, 3,0% E 4,5%, EM MASSA, DA CERA DE FISCHER TROPSCH

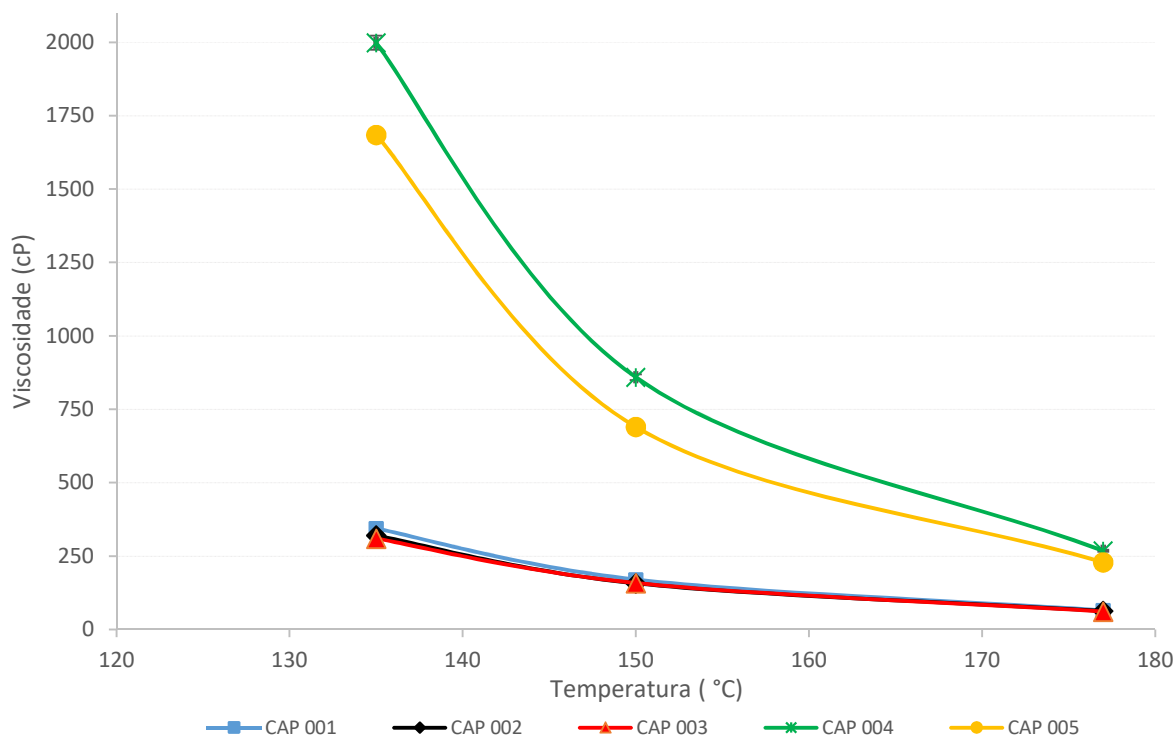


Fonte: O autor (2017)

Altos teores de cera (acima de 3-4%) podem ocasionar problemas como o aumento da viscosidade em baixas temperaturas (inferiores a 100 °C) devido à cristalização da cera na estrutura do ligante, sendo que isso pode provocar uma maior suscetibilidade à formação de trincas (EDWARDS e ISACSSON, 2005). Com base nos resultados de viscosidade, onde o teor de 1,5 % de cera de Fischer-Tropsch não alterou significativamente os resultados em relação ao CAP puro, e indicações da literatura (WONG, 2009), optou-se por trabalhar na proporção de 1,5% em massa do aditivo em relação à massa do ligante para o prosseguimento dos demais ensaios empíricos e por desempenho.

A influência da interação dos aditivos com o ligante asfáltico na resposta da viscosidade do fluido em altas temperaturas pode ser visualizada na FIGURA 22. Por meio dos resultados das amostras é possível inferir que o copolímero tribloco SBS aumentou significativamente a viscosidade do CAP 004, de cerca de 250 cP para cerca de 2000 cP, a 135 °C. Segundo a literatura (SILVA et al., 2002) tal fato pode ser consequência das fortes interações e cruzamentos moleculares desse polímero com o ligante asfáltico, tendo como resultante uma maior resistência ao fluxo. Esse efeito também pode ser visualizado em temperaturas mais baixas, conforme curva esquemática apresentada na FIGURA 7.

FIGURA 22- VARIAÇÃO DA VISCOSIDADE COM A TEMPERATURA DAS AMOSTRAS DE LIGANTES ASFÁLTICOS PUROS E MODIFICADOS



Fonte: O autor (2017)

O CAP 004 teve os maiores valores de viscosidade entre as amostras testadas. Isso se deve à natureza do polímero utilizado para a modificação. O copolímero tribloco de estireno-butadieno-estireno (SBS) que foi utilizado tem um teor aproximado de 29% de poliestireno (PS). Os blocos de poliestireno têm uma temperatura de transição vítrea (T_g) de 100 °C e os blocos de polibutadieno (PB) de -90 °C, o que faz com que o copolímero SBS tenha características intermediárias entre os blocos duros de poliestireno e dos blocos macios de polibutadieno, sendo este o comportamento dos elastômeros termoplásticos (SILVA, 2007).

O CAP 005, modificado com um copolímero dibloco de estireno-butadieno com no mínimo 33% de PS, fez com que o seu comportamento como modificador fosse diferente em relação ao ligante asfáltico, podendo ser incorporado em teores maiores como no caso de HiMA (7,5%) sem problemas de compatibilidade (TIMM et al., 2011). De forma geral, o aumento da viscosidade do CAP 004 e do CAP 005 pode ser atribuída a adição dos polímeros que têm elevado peso molecular (SILVA et al., 2002).

O CAP 001 e o CAP 002, não tiveram estatisticamente alguma variabilidade no comportamento quanto à viscosidade, sendo este fato consequente da composição similar dos petróleos, mesmo sendo obtidos em diferentes refinarias e condições de processo.

A amostra de CAP 003 teve os valores de viscosidade reduzidos devido à fusão da cera em temperaturas superiores a 100 °C, portanto esses valores ficaram muito próximos aos valores encontrados na amostra de CAP 002. Com o aumento da temperatura os valores de viscosidade tiveram uma tendência de se aproximarem, tanto na amostra sem modificador como na modificada com a cera de Fischer-Tropsch, porém esse efeito é menos acentuado nas amostras modificadas com polímero como o caso da CAP 004 e do CAP 005 (SENGOZ e ISIKYAKAR, 2008).

4.1.2 Penetração

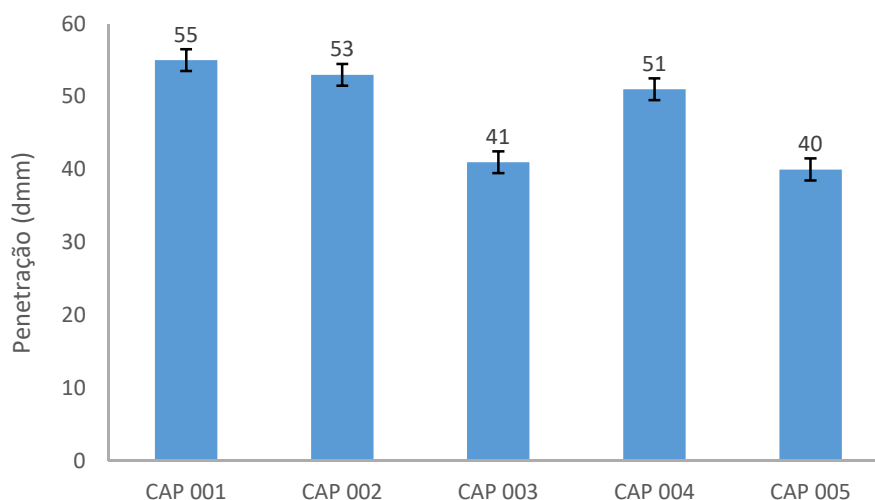
As amostras de CAP não modificados, CAP 001 e CAP 002 tiveram valores de 55 e 53 dmm, respectivamente, sendo enquadradas como um ligante asfáltico típico (CAP 50/70). De um modo geral a adição de modificadores como cera de Fischer-Tropsch e SBS reduzem a penetração, mas no caso de SBS sempre se adiciona um extrato aromático (viscosidade baixa) para aumentar a aromaticidade e melhorar a estabilidade a estocagem e, com isso, a penetração aumenta. O CAP 005 não necessita de extrato pois o copolímero utilizado para realizar a modificação foi desenvolvido para garantir a estabilidade à estocagem e ser usado em ligantes asfálticos (KLUTTZ et al., 2013).

O CAP 003 teve uma redução no valor de penetração, em virtude de o ensaio ser realizado a 25 °C, temperatura inferior a 100 °C, onde ocorre a cristalização da cera e, conseqüentemente, o aumento da consistência e a redução no valor de penetração de 55 dmm no CAP 001 para 41 dmm com o aditivo. Na FIGURA 23 é possível visualizar os resultados dos ensaios de penetração realizados nas amostras.

O CAP 004 teve um resultado de penetração de 51 dmm, indicando uma consistência intermediária, muito próxima à do CAP sem aditivo. Neste caso, inferiu-se que não existiu uma relação direta entre os valores de viscosidade com os valores de penetração e que por meio desse ensaio não é possível diferenciar ligantes modificados e não modificados, pois o CAP 004 tem valores de penetração muito próximo do CAP 001 e CAP 002.

A amostra do CAP 005 teve valores de penetração menores do que o CAP 004, ou seja, foi mais consistente, entretanto, os valores de viscosidade na temperatura de 135 °C mostraram um comportamento antagônico, o CAP 005 foi menos viscoso (1685 cP) do que o CAP 004 (1998 cP). Isso foi possivelmente resultado da maior interação entre o polímero e o ligante e, também, às diferenças entre os CAPs que foram utilizados para realizar a preparação do ligantes modificados (TIMM et al., 2012).

FIGURA 23 VARIAÇÃO DA PENETRAÇÃO DAS AMOSTRAS DE LIGANTES ASFÁLTICOS PUROS E MODIFICADOS



Fonte: O autor (2017)

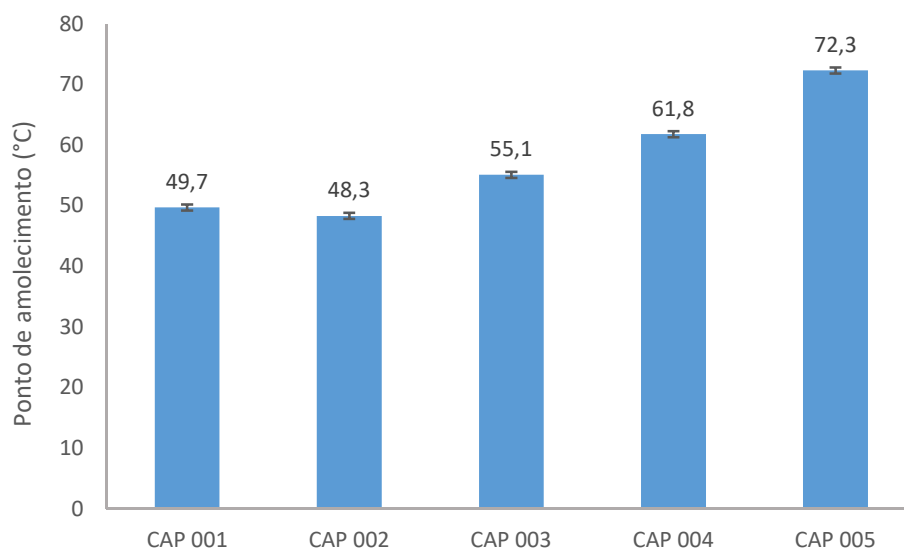
O ensaio de penetração foi realizado em triplicata e o desvio padrão dos resultados foi entre 0,9 -1,5 dmm nas amostras testadas, sendo que o recomendado para um mesmo operador é de no máximo 2 dmm para resultados < 60 dmm com 95 % de confiança.

4.1.3 Ponto de amolecimento.

O ponto de amolecimento das amostras do CAP 001 e do CAP 002, ficaram bem próximos com valores de 49,7 °C e 48,3 °C, respectivamente. O CAP 003, teve um aumento no valor do ponto de amolecimento em relação ao CAP 001 devido à presença da cera de Fischer-Tropsch, de alto peso molecular, pois o aumento da massa molar tende a aumentar a temperatura de transição vítrea (SILVA et al., 2002). Na FIGURA 24 é possível visualizar os resultados do ponto de amolecimento das amostras analisadas.

A amostra de CAP 004 teve um aumento de, aproximadamente, 12 °C no ponto de amolecimento em relação a um CAP 001, devido principalmente ao fato de uma maior interação e um possível intercruzamento do copolímero SBS na estrutura do ligante asfáltico. Adicionalmente, infere-se que a estrutura do copolímero tribloco SBS, com um segmento central da cadeia com blocos de polibutadieno, com propriedades elásticas, o que confere a característica elastomérica à mistura. Os blocos de poliestireno que são rígidos e ficam na extremidade da cadeia tem a capacidade de se agregar às cadeias adjacentes formando regiões rígidas, necessitando assim de mais energia para a mudança de estado físico (SILVA, 2007).

FIGURA 24- RESULTADOS DO ENSAIO DE PONTO DE AMOLECIMENTO DOS LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS E NÃO MODIFICADOS



FONTE: O autor (2017)

A amostra de CAP 005 teve um valor de 72,3 °C de ponto de amolecimento, resultado aproximadamente 22 °C superior a um CAP típico. Isso se deve, principalmente, à inversão de fase que ocorre entre o polímero e o ligante asfáltico (WEST et al., 2012). As propriedades dominantes estão correlacionadas com as propriedades do copolímero dibloco de estireno-butadieno que foi utilizado como modificador (KLUTTZ et al., 2013, TIMM et al., 2011).

Os ensaios foram realizados em duplicata e a variação máxima entre os resultados foi de 0,50 °C, variação que foi considerada aceitável. O limite de repetibilidade para o equipamento automático utilizado é de 0,80 °C.

4.1.4 Parâmetros complementares

Na TABELA 5 é possível visualizar os resultados dos parâmetros complementares analisados nas amostras.

O cálculo do índice de suscetibilidade térmica (IST) foi realizado utilizando a Equação 8 conforme a especificação brasileira atual (BRASIL-ANP, 2005) na amostra de CAP 001 e de CAP 003. Nas demais amostras o teste não foi realizado devido ao fato dos ligantes modificados com os polímeros terem um comportamento diferente com relação à variação da penetração com a temperatura pela Equação 8 que é utilizada na especificação brasileira atual (BRASIL-ANP, 2005). A cera melhorou o IST no CAP 003.

TABELA 5 - RESULTADOS DOS PARÂMETROS COMPLEMENTARES

Característica	Método	CAP 001	CAP 002	CAP 003	CAP 004	CAP 005	Unidade
Índice de suscetibilidade térmica	(Equação 8)	-1,1	NR	-0.4	NR	NR	N/A
Ductilidade a 25 °C	ASTM D113	>100	>100	>100	>100	>100	cm
RTFOT variação em massa	ASTM D2872	0,057	0,062	0,059	0,065	0,070	% massa
Ponto de fulgor	ASTM D92	332	282	318	286	276	°C
Solubilidade em tricloetileno	ASTM D2042	99,9	99,8	NR	NR	NR	% massa

NR: Não Realizado

FONTE: O autor (2016)

O CAP 001 teve um ponto de fulgor de 332 °C, valor este superior ao mínimo exigido, segundo os critérios de especificação para a manipulação do produto, que é de 235 °C. Isso, pode ser explicado pelo processo de produção em um estágio, por destilação à vácuo, ao invés do processo de desasfaltação à propano onde geralmente o produto tem um resultado de ponto de fulgor menor. A amostra de CAP 003 contendo a cera de Fischer-Tropsch teve um resultado de ponto de fulgor de 318 °C. Essa redução se deveu ao fato do aditivo puro ter um ponto de fulgor próximo a 290 °C. As amostras de CAP 002, CAP 004 e CAP 005 tiveram valores de 282 °C, 286 °C e 276 °C, respectivamente, essa variação possivelmente se deve ao processo de produção do ligante.

A perda de massa no ensaio de RTFOT foi considerada baixa, sendo que os resultados foram muito próximos, o que indica um baixo teor de material volátil nas amostras, o que é confirmado pelo alto ponto de fulgor.

Não ocorreram processos de oxidação acelerada nas amostras durante o ensaio, o que poderia levar ao aumento de massa, ou seja, uma variação positiva. Nos processos de oxidação ocorre a quebra de algumas moléculas com a formação de compostos com oxigênio de maior peso molecular. O limite estabelecido para esse ensaio permite uma variação máxima de 0,5% para ligantes asfálticos não modificados e de 1,0% para os ligantes modificados.

A presença de quantidades significativas de material mineral não foi detectada nas amostras de CAP 001 e CAP 002, por meio do ensaio de solubilidade em tricloroetileno onde

os resultados foram de 99,9% e de 99,8%, respectivamente. Nas amostras modificadas este ensaio não foi realizado.

4.2 ANÁLISES POR DESEMPENHO

4.2.1 Cálculo da temperatura máxima e mínima do pavimento para a cidade de Curitiba

Foram utilizadas as Equações 5 e 6 para calcular a temperatura máxima e mínima do pavimento, respectivamente, para a cidade de Curitiba. Foram utilizados os dados da temperatura do ar do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) onde foram obtidas as temperaturas máximas e mínimas absolutas para a cidade na série histórica de 1961-1990.

A temperatura máxima do ar em Curitiba foi de 35,2 °C, e a mínima foi de -5,4 °C, sendo que a latitude da cidade é de 25° 25' 40" S. Para fins de simplificação foi utilizado o valor de 25° para a latitude, e as temperaturas máximas e mínimas absolutas. Na metodologia SUPERPAVE são utilizados os dados da média dos sete dias consecutivos mais quentes do ano para o cálculo da temperatura máxima do pavimento, entretanto nesse trabalho foi utilizado somente a temperatura do dia mais quente do ano para mostrar que mesmo com o valor superestimado, a temperatura máxima do pavimento no Brasil raramente ultrapassa a fronteira de 64 °C.

A temperatura máxima para o pavimento na cidade de Curitiba foi de 58,4 °C e a mínima de 1,1 °C, valores estes encontrados por meio das Equações 5 e 6.

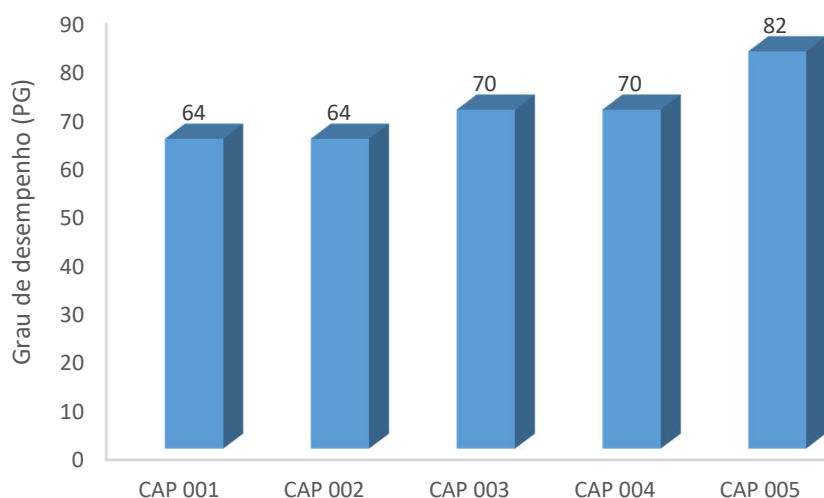
Por meio desses resultados foi possível prever que a temperatura máxima no qual o pavimento pode chegar foi de, aproximadamente, 58 °C e a temperatura mínima de aproximadamente 1 °C. Não foram realizados testes de desempenho para baixas temperaturas devido ao fato da temperatura mínima no pavimento dificilmente ser negativa na grande maioria das cidades brasileiras e, também, pelo fato de muitos ligantes suportarem temperaturas de utilização de -16 °C ou menores. Nos EUA, assim como em outros países, é necessário especificar essa temperatura de utilização pois o pavimento pode chegar a temperaturas inferiores a -20 °C, portanto um ligante que não suporte essa temperatura pode vir a ter problemas de fragilidade e trincar prematuramente.

Os valores de temperatura máxima e mínima do pavimento podem ser calculados para qualquer localidade utilizando os valores de temperatura do ar e a latitude.

4.2.2 Grau de desempenho superior

Os resultados das análises do grau de desempenho superior nos ligantes asfálticos típicos e modificados, em função do envelhecimento em curto prazo no RTFOT podem ser visualizados na FIGURA 25.

FIGURA 25- GRAU DE DESEMPENHO SUPERIOR DOS LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS E NÃO MODIFICADOS EM FUNÇÃO DO ENVELHECIMENTO EM CURTO PRAZO NO RTFOT



Fonte: O autor (2017)

As amostras sem modificação tiveram um grau de desempenho na temperatura de 64 °C, ou seja, tiveram valores do parâmetro $G^*(\omega) \times \cos \delta$ superiores a $(1,00 \pm 0,02)$ kPa para o ligante não envelhecido e valores superiores a $(2,20 \pm 0,07)$ kPa para o ligante envelhecido após o teste de RTFOT na temperatura testada, portanto devem ser utilizados somente em locais onde a temperatura do pavimento não ultrapasse 64 °C, pois acima dessa temperatura o pavimento pode ter deformações permanentes.

A amostra de CAP 003 teve um grau de desempenho maior do que o ligante convencional, podendo ser utilizado em regiões com temperaturas do pavimento de até 70 °C. Isso se deve a maior resistência do ligante às forças de cisalhamento que impedem o seu fluxo viscoso em temperaturas menores. A cristalização da cera de Fischer-Tropsch na estrutura fez com que o ligante tivesse uma resistência maior mesmo com o efeito do acréscimo da temperatura em relação ao CAP 001. O CAP 004 teve o mesmo resultado de grau de desempenho que o da amostra modificada com a cera de Fischer-Tropsch, entretanto, o

aumento do grau de desempenho em relação as amostras sem modificador, foi devido à interação do polímero SBS com o ligante asfáltico que aumentou a sua resistência.

A amostra de ligante altamente modificado (CAP 005) teve os melhores resultados de grau de desempenho. Nesta, foram alcançados os maiores valores de resistência à deformação pela aplicação da tensão de cisalhamento. A melhor resposta do CAP 005 foi, principalmente, devida ao fato das respostas mecânicas serem governadas pelas características do copolímero dibloco SB, pois nesse ligante asfáltico ocorre a inversão entre as fases do ligante e do polímero, sendo que uma das características do elastômero termoplástico SB é ter propriedades elásticas dentro de uma faixa de, aproximadamente, -90 °C a 100 °C, essa faixa de temperatura pode ser alterada de acordo com o aumento ou a diminuição do número de blocos do componente macio, no caso o polibutadieno (SILVA et al., 2002).

O valor de 82 para o grau de desempenho do CAP 005 não significa que este ligante deve ser utilizado somente em locais onde a temperatura fique próxima desse valor, mas indica que o ligante tem uma capacidade de resistência superior aos outros ligantes testados em relação as ações do tráfego.

As principais fontes de desvios e erros no ensaio para a determinação do grau de desempenho são os erros de medição na temperatura e do diâmetro da amostra. Cada amostra no ciclo de análise foi testada 10 vezes, em uma determinada temperatura e o desvio padrão dos resultados ficaram entre 0,00218 kPa e 0,00707 kPa, o maior desvio foi observado na amostra de CAP 003 contendo 1,5% da cera de Fischer-Tropsch, quando testado a 64 °C. Entretanto, os valores de desvios podem ser considerados pequenos e os resultados foram tipicamente reportados com duas casas decimais pelo software do equipamento. A amostra com o maior desvio padrão teve um resultado de 1,06 kPa a 64 °C e o resultado com 95% de confiança foi de no mínimo 1,06 kPa e no máximo de 1,07 kPa.

4.2.2 Compliância não Recuperável

A análise de MSCR para obter o parâmetro da compliância não recuperável foi realizada após o envelhecimento em curto prazo na estufa de RTFOT, para simular melhor as condições do pavimento, pois o envelhecimento em curto prazo simula o envelhecimento durante o processo de usinagem (mistura).

Na TABELA 6, podem ser visualizados os resultados detalhados do ensaio de MSCR, com a diferença entre os resultados nos dois patamares de tensão e o parâmetro de tráfego indicado para cada ligante.

TABELA 6- RESULTADOS DETALHADOS DO PARÂMETRO JNR NAS AMOSTRAS DE LIGANTES ASFÁLTICOS PUROS E MODIFICADOS

Parâmetros	Jnr CAP 001	Jnr CAP 002	Jnr CAP 003	Jnr CAP 004	Jnr CAP 005
Tensão 0,1 kPa	3,13 kPa ⁻¹	3,45 kPa ⁻¹	1,48 kPa ⁻¹	0,80 kPa ⁻¹	0,062 kPa ⁻¹
Tensão 3,2 kPa	3,40 kPa ⁻¹	3,49 kPa ⁻¹	2,07 kPa ⁻¹	1,03 kPa ⁻¹	0,070 kPa ⁻¹
Diferença Jnr % (ASTM D7405)	7,88	1,26	28,49	22,33	11,42
Tipo de tráfego recomendado (Jnr 3,2KPa)	S	S	S (H- marginal)	H (V –marginal)	E

FONTE: O autor (2016)

As amostras não modificadas tiveram valores de Jnr maiores, o que representa uma menor resistência dos ligantes à deformação permanente para a temperatura indicada no teste, do que nas amostras modificadas.

As amostras de CAP não modificadas foram classificadas como 64S, ou seja, são ligantes asfálticos destinados para serem utilizados em rodovias com um tráfego padrão, com um volume máximo de 10 milhões de ESALs e com uma velocidade superior a 70 km/h. Quanto à temperatura máxima dos pavimentos, estas raramente ultrapassam a fronteira dos 64 °C no território brasileiro, um exemplo é a temperatura máxima registrada no Brasil, na série histórica 1961-1990 do INMET, foi de 44,6 °C na cidade de Orleans em Santa Catarina, sendo que esta cidade tem uma latitude aproximada de 28° e a temperatura máxima no pavimento calculada pela Equação 5 foi de 65,3 °C. Esses valores são aproximados somente para a comparação com as temperaturas máximas do pavimento, sendo que deve ser levado em conta a média dos 7 dias consecutivos mais quentes em uma determinada localidade para o cálculo exato da temperatura do pavimento (BERNUCCI et al., 2008), portanto, o cálculo utilizando a temperatura máxima absoluta registrada trouxe um indicativo superestimado da temperatura máxima do pavimento, porém válida para mostrar que mesmo com esse valor superestimado as temperaturas máximas do pavimento ultrapassam muito pouco o valor de 64 °C.

A amostra de CAP 003 teve um desempenho melhor em relação as amostras não modificadas, e foi classificada como 64H marginal, pois o valor encontrado de 2,06 kPa⁻¹ foi muito próximo ao limite superior para a classe de tráfego pesado que é 2,0 kPa⁻¹, indicado para tráfego entre 10 e 30 milhões de ESAL, ou com velocidade entre 20 e 70 km/h. O aumento da elasticidade do ligante modificado deve-se à formação da estrutura cristalina formada pela cera

de Fischer-Tropsch com o ligante asfáltico, que aumentou a sua viscosidade às temperaturas inferiores ao ponto de fusão do aditivo e, também, a sua resistência e sua capacidade de resistir às tensões de cisalhamento impostas durante o teste.

A diferença entre os valores obtidos para as duas tensões foi superior para o ligante modificado com a cera de Fischer-Tropsch em relação aos ligantes puros, o que indica uma menor suscetibilidade para resistir a tensões maiores ocasionadas pelo tráfego de veículos, porém ambos os resultados são aceitáveis pois estão abaixo do limite recomendado de variação de 75%.

A amostra de CAP 004 teve um desempenho superior ao das amostras sem modificação e a modificada com a cera de Fischer-Tropsch. Pelo valor encontrado para o parâmetro Jnr esse ligante asfáltico foi classificado como 64V marginal, ou seja, um ligante indicado para vias que tenham um tráfego muito pesado. O valor encontrado ficou muito próximo à categoria de tráfego muito pesado por isso o ligante pode ser indicado para este tipo de via com um volume de tráfego maior que 30 milhões de ESALs ou velocidade menor do que 20 km/h.

A amostra modificada com a cera de Fischer-Tropsch, teve o mesmo grau de desempenho que a amostra de CAP 004, entretanto os valores encontrados no ensaio de Jnr foram diferentes, o que indica que o CAP 004 tem uma maior capacidade de recuperação da deformação aplicada e isso se deve principalmente a interação do polímero SBS na estrutura do ligante e sua capacidade de resistir as deformações impostas no nível de tensão aplicado e ainda recuperar boa parte da deformação.

A amostra de CAP 005 teve os melhores resultados para o ensaio de Jnr, sendo o ligante classificado com 64E, indicado para um tráfego extrapesado, com volume acima de 30 milhões de ESALs a uma velocidade menor que 20 km/h. A inversão de fases do ligante com o polímero fez com que as propriedades predominantes no ligante modificado fossem derivadas do copolímero dibloco SB, ou seja, o CAP 005 tem as suas propriedades semelhantes a um elastômero termoplástico, no caso o SB.

A capacidade de recuperação elástica e a resistência ao escoamento às temperaturas ambientes e intermediárias, se deve às propriedades do copolímero dibloco de estireno butadieno, o que fica evidenciado pelo alto valor do grau de desempenho CAP 005 e, também, pelo comportamento semelhante a uma borracha, que tem a capacidade de ser deformada e de retornar elasticamente a sua forma original. Nas borrachas, esse comportamento é devido às ligações cruzadas que muitas vezes é feito por meio do processo de vulcanização. Já, no polímero SB, isso se deve à combinação de blocos macios de polibutadieno e dos blocos rígidos

de poliestireno, os quais ficam nas extremidades e restringem os movimentos dos blocos macios que ficam na região central e são responsáveis pela elasticidade resultante. Essa combinação faz com que esse polímero tenha propriedades elásticas até a temperatura de fusão do componente duro e rígido que é de aproximadamente 100 °C (SILVA et al., 2002).

4.2.3 Curvas mestras

Os resultados das varreduras de frequência em diferentes temperaturas foram utilizados para a construção de curvas mestras. Por meio destas curvas mestras foi possível prever o comportamento de cada amostra com relação à variação de frequência de carregamento e a variação de temperatura. O efeito de baixas frequências de carregamento é similar ao efeito de altas temperaturas, e o contrário também é válido, ou seja, são grandezas inversamente proporcionais e devido a isso é possível avaliar o comportamento mecânico por meio da superposição de dados de tempo e temperatura, e avaliar a influência da adição de modificadores no comportamento mecânico dos ligantes asfálticos.

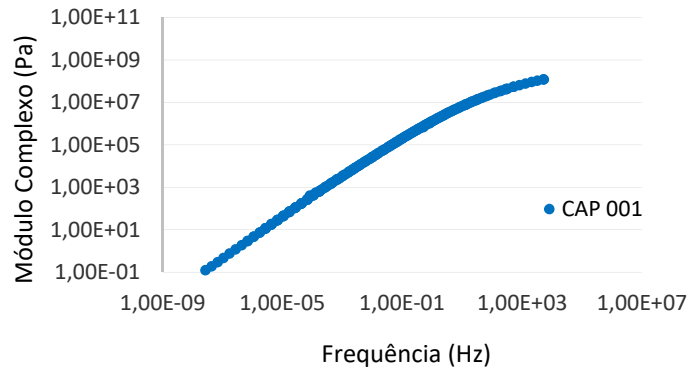
Nas FIGURAS 26 e 27, é possível visualizar o comportamento da variação do módulo complexo com a frequência para os ligantes não modificados.

A variação observada da curva mestra do CAP 001 indica que o material tem uma grande suscetibilidade às mudanças de frequências, pois em baixas frequências o módulo complexo é muito baixo, ou seja, a relação entre a tensão aplicada e a deformação teve um valor pequeno o que indica que esse material pode ter grandes deformações em baixas frequências e altas temperaturas. Em altas frequências o material não teve uma mudança em tão alto grau como em baixas frequências. Pode ser observado um leve platô na parte superior da curva, o que indica uma variação pequena do módulo complexo com a variação da frequência, isso se deve ao fato do material resistir a altas frequências e baixas temperaturas, sendo esse ligante asfáltico indicado para vias com tráfego padrão, com altas velocidades, o que ratifica o resultado do ensaio de MSCR onde o parâmetro Jnr de tráfego indicado para este ligante é o de tráfego padrão.

A amostra de CAP 002 teve um resultado semelhante ao CAP 001, tendo um comportamento típico de ligantes não modificados, com grandes variações do módulo complexo em baixas frequências, e pequenas variações em altas frequências, o que indica uma suscetibilidade elevada em relação às mudanças de temperatura. Os baixos valores de módulo complexo em baixas frequências respaldam os menores valores de grau de desempenho encontrados para esses ligantes não modificados em relação aos ligantes modificados, isto é,

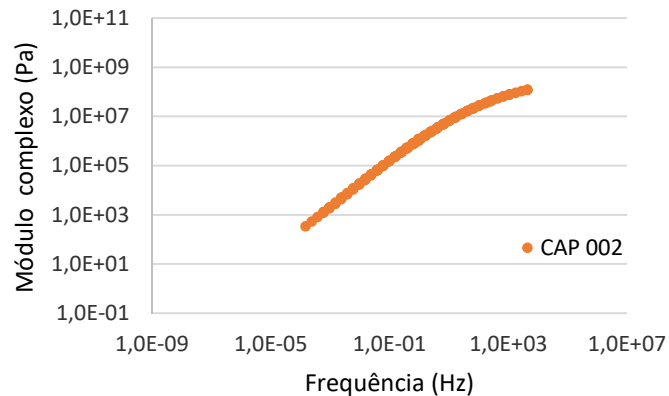
em baixas frequências os ligantes têm um desempenho menor, o que indica que podem ter grandes deformações, assim como em altas temperaturas.

FIGURA 26- CURVA MESTRA DA VARIAÇÃO DO MÓDULO COMPLEXO COM A FREQUÊNCIA PARA O LIGANTE NÃO MODIFICADO CAP 001



FONTE: O autor (2017)

FIGURA 27- CURVA MESTRA DA VARIAÇÃO DO MÓDULO COMPLEXO COM A FREQUÊNCIA PARA O LIGANTE NÃO MODIFICADO CAP 002



FONTE: O autor (2017)

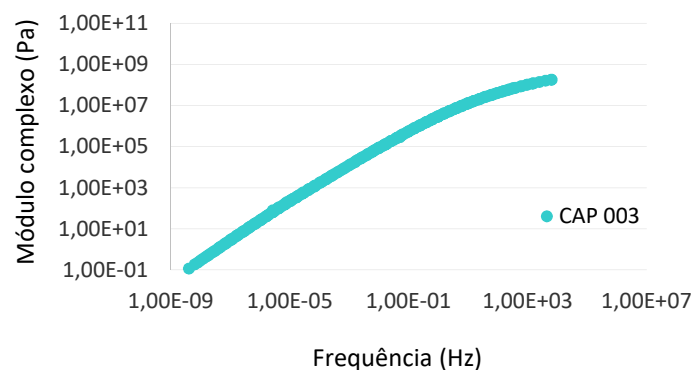
Nas FIGURAS 28, 29 e 30 é possível visualizar o comportamento das amostras modificadas com relação à variação da frequência utilizada. Já, na FIGURA 31 é possível visualizar as curvas mestras sobrepostas.

A amostra CAP 005 teve o melhor desempenho entre os ligantes modificados ao se analisar a curva mestra de força. Esse ligante teve valores de módulo complexo relativamente altos, mesmo em baixas frequências, ou seja, a relação entre a tensão e a deformação que define o módulo complexo de cisalhamento teve um valor alto quando comparado às outras amostras modificadas e, também, aos ligantes não modificados. Em frequências baixas a deformação foi pequena quando comparada com o tempo de aplicação da tensão ou mesmo o valor de tensão aplicado. Isso pode ser correlacionado com o tráfego de veículos onde a velocidade do tráfego

indica a frequência de aplicação da tensão no pavimento, onde, quanto maior for a velocidade de um veículo menor resultará a tensão aplicada pelas rodas no pavimento, ou seja, menor a duração da carga aplicada pelo veículo no pavimento. Para um tráfego lento, com velocidade baixa, o tempo de contato dos pneus com o pavimento é maior, conseqüentemente maior é a duração da carga aplicada pelo veículo sobre o pavimento, isto quer dizer que se tem uma frequência menor na aplicação da carga.

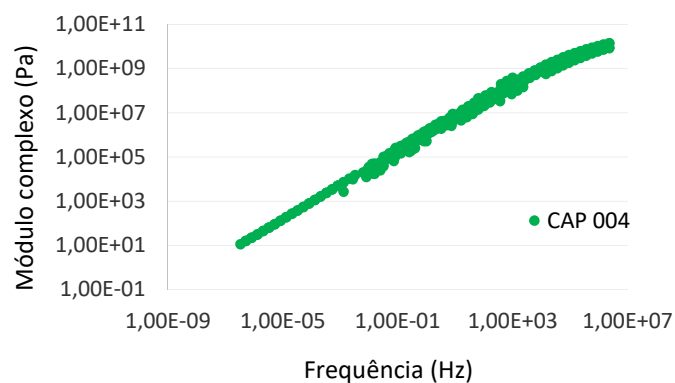
A temperatura pode ser correlacionada com os valores de módulo complexo já que a curva mestra é a superposição de dados de tempo e temperatura. Em baixas frequências o valor do módulo complexo diminui e conseqüentemente o valor do ângulo de fase aumenta, o que indica uma tendência ao comportamento viscoso da amostra, ou seja, uma menor resistência a aplicação de uma tensão cisalhante. Já, em altas frequências foi observado o comportamento contrário, com altos valores de módulo complexo e baixos valores de ângulo de fase, valores estes que tendem ao comportamento elástico do material de resistir às tensões impostas

FIGURA 28- CURVA MESTRA DA VARIAÇÃO DO MÓDULO COMPLEXO COM A FREQUÊNCIA PARA O LIGANTE MODIFICADO CAP 003



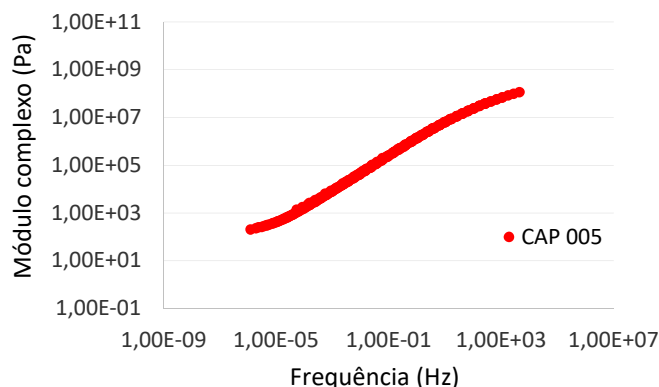
FONTE: O autor (2017)

FIGURA 29- CURVA MESTRA DA VARIAÇÃO DO MÓDULO COMPLEXO COM A FREQUÊNCIA PARA O CAP 004



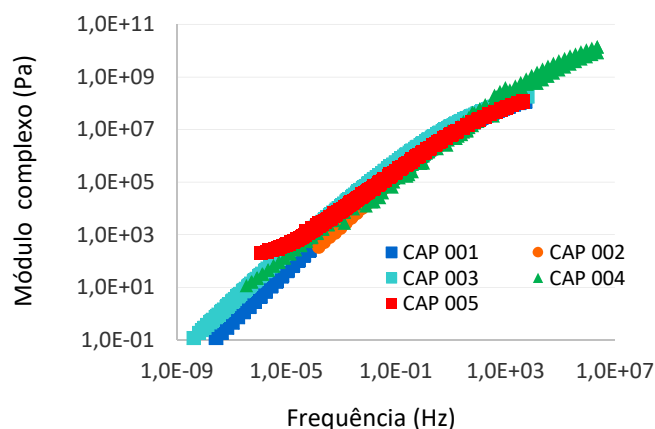
FONTE: O autor (2017)

FIGURA 30- CURVA MESTRA DA VARIAÇÃO DO MÓDULO COMPLEXO COM A FREQUÊNCIA PARA O CAP 005



FONTE: O autor (2017)

FIGURA 31- CURVAS MESTRAS DOS LIGANTES ASFÁLTICOS PUROS E MODIFICADOS SOBREPOSTAS



FONTE: O autor (2017)

Os valores superiores de módulo complexo encontrados para o CAP 005 em baixas frequências confirmam o alto valor de grau de desempenho para essa amostra e a relação entre os dados da curva mestra e os demais parâmetros analisados.

Os valores encontrados para o módulo complexo da amostra de CAP 005 confirmam os resultados do parâmetro J_{nr} no qual essa amostra foi indicada para utilização em vias com tráfego extrapesado.

A amostra de CAP 003 teve um comportamento semelhante ao CAP 004 por meio da curva mestra, entretanto o CAP 004 teve um melhor desempenho com relação à faixa de frequência de trabalho, isso pode ser explicado pelo comportamento do polímero SBS disperso na fase do ligante asfáltico que absorve melhor as tensões impostas, porém ambos tiveram resultados superiores aos ligantes asfálticos não modificados. Em relação a amostra de CAP 005 a amostra de CAP 003 teve uma resposta semelhante em altas frequências de carregamento

com um aumento do módulo complexo tendo um comportamento semelhante às amostras em temperaturas baixas.

Em altas frequências foi observada uma pequena variação nos valores de módulo complexo entre as amostras modificadas, isso se deveu ao tempo de relaxação das moléculas das amostras, que está relacionado com a frequência e a temperatura. Em altas frequências as amostras tiveram um comportamento semelhante ao das baixas temperaturas, com isso não foi possível visualizar o comportamento de relaxação em alguns grupos moleculares que tem a capacidade de absorver energia e dissipa-las de outra forma, o que é comum em grande parte dos polímeros. Em altas frequências muitas vezes a relaxação não é observada devido ao fato do tempo de cada oscilação ser inferior ao tempo de relaxação de um determinado grupo molecular em uma determinada temperatura. Como a redução da frequência é similar ao aumento da temperatura, com isto existe uma mobilidade maior das cadeias poliméricas que absorvem determinada quantidade de energia e a transformam em outra forma (SILVA, 2007). Esse comportamento foi observado na amostra de CAP 005 que em baixas frequências teve o melhor comportamento, sendo capaz de absorver uma grande quantidade de energia e dissipá-la por meio de processos de relaxação que estão ligados ao copolímero dibloco SB que tem esse comportamento devido ao fato de ser um elastômero termoplástico composto de blocos de polibutadieno e poliestireno.

O CAP 003 teve o desempenho menor entre os ligantes modificados, entretanto superior aos ligantes convencionais não modificados.

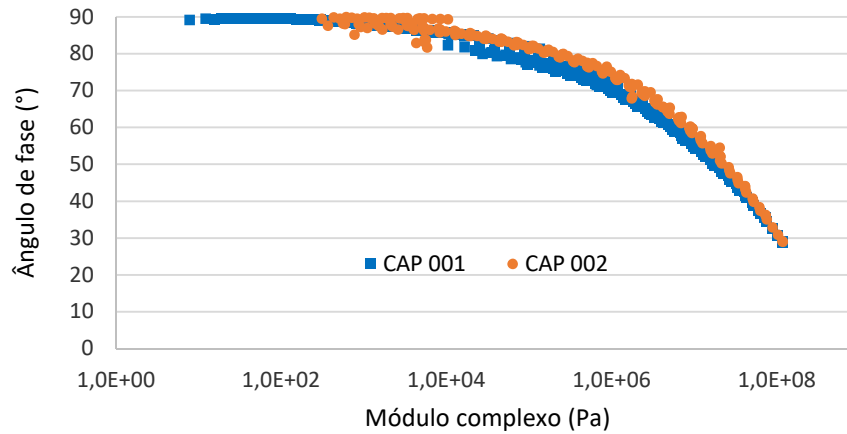
4.2.4 Curvas “black”

As curvas “black” (FIGURA 32 e FIGURA 33) foram úteis para a caracterização das propriedades do ligante. Foi possível verificar que a adição de polímero conduziu a um ligante que funciona melhor sob temperaturas elevadas e baixas frequências (valores mais baixos de G^*). Em comparação com o ligante não modificado, os ligantes modificados com o polímero tiveram uma resposta mais elástica nestas condições.

As amostras de ligantes asfálticos não modificados tiveram um perfil semelhante em relação às análises das curvas “black”, entretanto o CAP 002 teve um desempenho inferior no que tange à variação do módulo complexo com o ângulo de fase, o que pode indicar uma tendência superior às deformações em valores menores de módulo complexo que ocorrem em situações de altas temperaturas e baixas frequências de carregamento. Em valores altos de

módulo complexo o comportamento é semelhante em ambas as amostras de CAP não modificados.

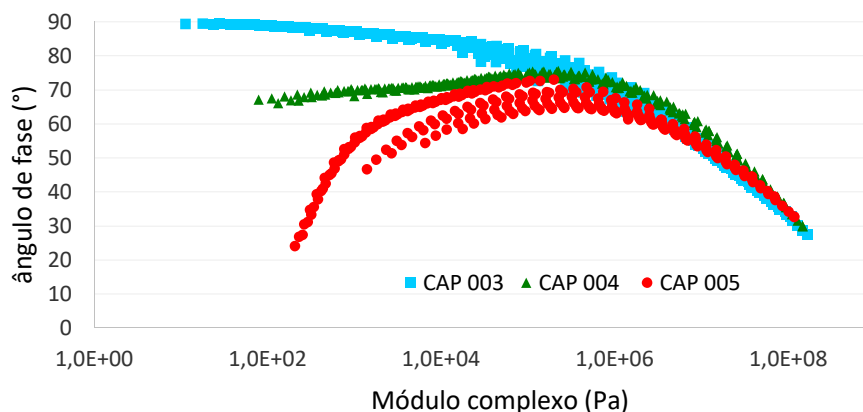
FIGURA 32- SOBREPOSIÇÃO DAS CURVAS “BLACK” DOS LIGANTES NÃO MODIFICADOS



FONTE: O autor (2017)

O CAP 003 teve o pior desempenho de acordo com a avaliação da curva “black” em relação aos ligantes modificados. Em baixas frequências foi possível visualizar na FIGURA 33 que o ângulo de fase se aproximou de 90° o que indicou o comportamento viscoso da amostra que ocorre em altas temperaturas. A amostra de CAP 004 teve um desempenho intermediário e mesmo em baixas frequências o ângulo de fase ficou próximo de 70° tendo uma menor tendência a fluir a altas temperaturas ou baixas frequências.

FIGURA 33- SOBREPOSIÇÃO DAS CURVAS “BLACK” DOS LIGANTES MODIFICADOS



FONTE: O autor (2017)

A amostra de CAP 005 teve o melhor desempenho pela avaliação da curva “black”. Mesmo com baixas frequências estas tiveram os menores ângulos de fase e o maior módulo

complexo entre os ligantes modificados o que pode ser explicado pela elevada resistência que o polímero SB conferiu ao ligante modificado.

Em altas frequências os valores de ângulo de fase foram similares em todas as amostras. Um fato interessante foi o comportamento da amostra de CAP 005 em baixas frequências, onde o ângulo de fase teve um valor próximo daqueles encontrados em todas as amostras em altas frequências, o que pode ser explicado pelo tempo de relaxação dos grupos moleculares do copolímero dibloco SB que não são observados em altas frequências, sendo que esse fato confirma a inversão de fases do polímero e do ligante, pois esse comportamento não é tão acentuado na amostra de CAP 004.

Em relação as amostras não modificadas de CAP 001 e CAP 002, o desempenho dos ligantes modificados foi superior. A amostra de CAP 003 foi a que teve a curva “black” mais semelhante ao CAP 001 e CAP 002, entretanto os valores do CAP 003 se aproximaram do ângulo de 90° próximo a frequências na ordem de $1,0E+02$ e no CAP 001 e CAP 002 em frequências na ordem de $1,0E+03$, isto mostra a capacidade superior do CAP 003 de resistir ao fluxo viscoso em relação aos ligantes não modificados, o que pode ser ratificado pelos valores de grau de desempenho as amostras de CAP 001 e CAP 002 tiveram grau de desempenho de 64 enquanto a amostra de CAP 003 teve o grau de desempenho de 70.

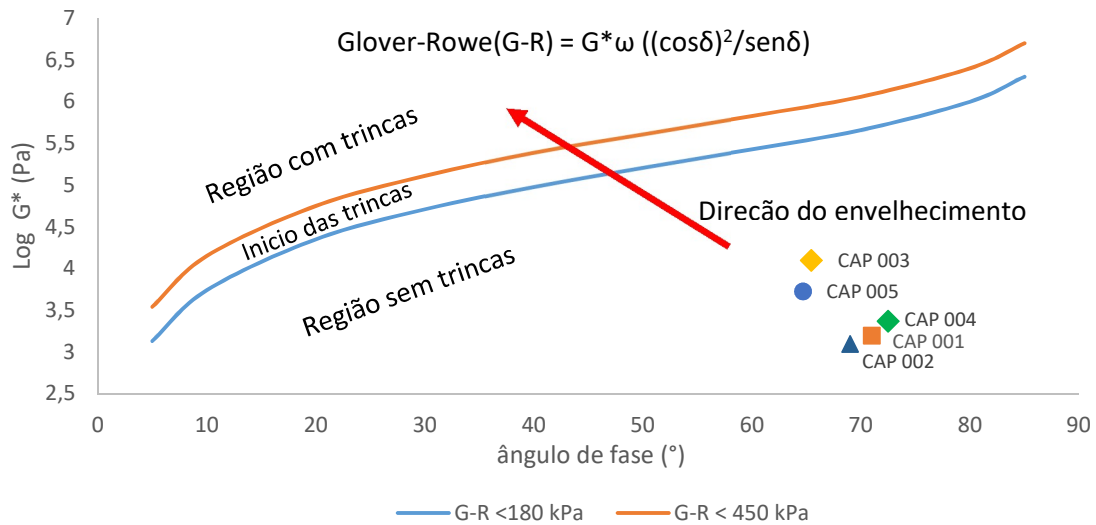
4.2.5 Diagrama de Glover-Rowe

O diagrama foi feito utilizando os dados obtidos na varredura de frequências para a construção das curvas mestras. O parâmetro de Glover-Rowe foi calculado com os dados a 15°C e $0,005\text{ rad/s}$ de frequência para as amostras não envelhecidas. Os resultados do parâmetro podem ser visualizados na FIGURA 34.

Diversos fatores podem ter contribuído para o envelhecimento das amostras, entre eles o contato com o oxigênio do ar por tempos prolongados, o tempo de armazenamento das amostras por tempo prolongado e o aquecimento elevado durante a manipulação.

Todas as amostras analisadas tiveram bons resultados para o parâmetro de Glover-Rowe, onde é possível visualizar a região onde a combinação do módulo complexo com o ângulo de fase inicia-se o processo de formação de trincas devido ao envelhecimento do ligante. Com isto, os ligantes vão se tornando mais rígidos, gerando reflexos nos valores do módulo complexo que aumenta devido à maior resistência a deformação, entretanto o material se torna mais frágil e, conseqüentemente, tende a formar as trincas.

FIGURA 34- DIAGRAMA DE GLOVER-ROWE COM OS DADOS DE ENVELHECIMENTO PARA OS LIGANTES ASFÁLTICO MODIFICADOS E NÃO MODIFICADOS



FONTE: O autor (2017)

Uma outra maneira de se avaliar o envelhecimento é o ângulo de fase, que em ligante não envelhecido é maior, como no caso dos ligantes modificados, com valores resultantes entre 65° e 73°, e nos ligantes puros de 69° a 73°. Com o passar do tempo, esses valores vão reduzindo e o material tem um comportamento mais próximo de um sólido, com baixo módulo elástico e uma tendência a formar trincas por fadiga devido a aplicação de tensões cisalhantes do tráfego.

Todas as amostras tiveram bons resultados, ficando com valores abaixo do limite de formação de trincas de 180 kPa.

Não foram realizados ensaios de envelhecimento em longo prazo nas amostras devido à necessidade de se avaliar melhor a correlação entre o mecanismo de envelhecimento em laboratório e em campo. Soenen et al. (2012) chegou a essa conclusão devido, principalmente, às discrepâncias dos modelos para a formação de trincas obtidos dos ensaios de envelhecimento acelerado e dos ensaios conduzidos em campo. Silva (2005) relatou a severidade do envelhecimento de ligantes asfálticos em regiões tropicais, causados por intempéries climáticas e radiação ultravioleta, que são fatores não contemplados no ensaio de envelhecimento em longo prazo utilizado em laboratório atualmente.

4.3 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE AS METODOLOGIAS EMPREGADAS

As análises empíricas estão sendo utilizadas por muito tempo como ferramenta para a seleção dos ligantes asfálticos, principalmente pela simplicidade de execução, pois medem as propriedades físicas do ligante, entretanto com a evolução do mercado, novas exigências de qualidade relacionadas às propriedades mecânicas dos ligantes asfálticos surgiram com o objetivo de construir pavimentos com maior desempenho e maior durabilidade.

Os ensaios dinâmico-mecânicos têm sido utilizados como ferramenta de seleção de ligantes asfálticos devido ao fato das suas propriedades medidas terem uma boa correlação com o desempenho esperado para uma determinada obra de pavimentação.

Neste trabalho, foi possível diferenciar os ligantes asfálticos típicos, modificados com cera de Fischer-Tropsch, copolímero SBS e SB, por meio de ensaios dinâmico-mecânicos realizados no DSR.

As temperaturas máximas e mínimas do pavimento foram calculadas por meio de equações desenvolvidas no projeto SUPERPAVE, que correlacionaram a temperatura máxima e mínima do ar com a latitude e levaram ao resultado da temperatura do pavimento usualmente a 2 cm abaixo da superfície. A cidade de Curitiba teve os valores de 58,4 °C de temperatura máxima do pavimento e 1 °C de temperatura mínima.

O grau de desempenho para as amostras de ligantes puros foi de 64, o que indica a temperatura superior no qual esse ligante pode ser utilizado. A amostra modificada com a cera de Fischer-Tropsch teve um grau de desempenho de 70 assim como o CAP 004. Já, o CAP 005 teve um grau de desempenho de 82.

No ensaio de MSCR foi possível obter o parâmetro J_{nr} para os ligantes, onde os ligantes comuns foram indicados para uma classe de tráfego padrão, o CAP 003 foi indicado para tráfego pesado, o CAP 004 para um tráfego muito pesado, e o CAP 005 para um tráfego extrapesado. Com esse parâmetro foi possível diferenciar o efeito da adição dos modificadores nas propriedades mecânicas dos ligantes o que não pode ser observado com ensaios empíricos, como nos ensaios de penetração, no ponto de amolecimento e da viscosidade, por isso não se pode mensurar desempenho por meio de ensaios empíricos.

As curvas mestras foram ferramentas valiosas para avaliar o comportamento do ligante com relação à variação da frequência de carregamento e a temperatura com relação ao módulo complexo. Foi possível observar que o copolímero dibloco SB, utilizado como modificador no ligante altamente modificado, conferiu ao ligante a capacidade de suportar altas taxas de carregamento e recuperar elasticamente a deformação, sendo o ligante que teve o melhor

desempenho tanto para temperaturas altas com baixas frequências e também para temperaturas baixas com altas frequências.

O CAP 003 teve um bom desempenho em baixas frequências, assim como o CAP 004, entretanto inferior às demais amostras modificadas em altas frequências, ainda assim teve um melhor desempenho que as amostras não modificadas.

As curvas “black” são ferramentas que podem auxiliar na avaliação do envelhecimento dos ligantes por meio das mudanças do módulo complexo, do ângulo de fase e do comportamento desse material quando submetido às taxas de tensões. O CAP 005 teve os melhores resultados ao se analisar as curvas “black”, com os valores do ângulo de fase próximo a 30° mesmo em baixos valores de módulo complexo, valor este que comparado às outras duas amostras de ligantes modificados foi encontrado para os altos valores de módulo complexo, e isso foi resultado principalmente da relaxação que ocorreu em baixos valores de frequência, que pode ser percebido em menor grau no CAP 004.

O parâmetro Glover-Rowe é uma maneira clara de prever e de avaliar o envelhecimento de diferentes ligantes, estabelecendo valores mínimos para as suas utilizações, o que é útil para a avaliação da incorporação de material fresado (reciclado) ao ligante convencional e, também, na avaliação de processos de rejuvenescimento de ligantes asfálticos.

Essa caracterização por desempenho permite aos engenheiros da área de pavimentação selecionar o melhor material para uma determinada solução de pavimentação, obtendo um pavimento com melhor qualidade e durabilidade reduzindo assim os custos com manutenção, gerando melhores condições de rodagem com mais conforto e segurança aos usuários.

Uma característica importante em uma boa especificação é sempre estar em constante atualização em consonância com o surgimento de novas tecnologias e novos métodos de ensaio que representem de forma mais eficaz o comportamento dos materiais.

Uma boa especificação do ligante asfáltico deve ser combinada com um correto dimensionamento do pavimento baseado em técnicas modernas de dosagem e de construção. As mudanças são necessárias para garantir uma maior sustentabilidade no meio rodoviário e assim impulsionar o desenvolvimento de novas obras com garantia de qualidade.

Na TABELA 7 é possível visualizar um comparativo entre os ensaios empíricos e os ensaios dinâmico-mecânicos realizados nas amostras e sua correlação com desempenho do ligante. Dos parâmetros empíricos a viscosidade é o único que traz alguma relação com desempenho quando o ensaio realizado próximo a temperatura de utilização do pavimento (60 °C), entretanto em materiais com comportamento reológico complexo como ligantes




modificados é difícil avaliar desempenho por meio desse ensaio. Em materiais sem modificação é mais fácil prever o desempenho por meio de análises simples.

O ensaio de penetração tem alguma correlação com desempenho em materiais simples (não modificados), porém em materiais complexos como ligantes modificados não é possível fazer essa correlação. Isso ficou evidenciado, nos valores de penetração encontrados nas amostras de CAP 002 e CAP 004. Não foi possível diferenciar um ligante não modificado (CAP 002) e um modificado (CAP 004) por meio desse ensaio, pois os valores encontrados de 53 e 51 dmm, respectivamente, são praticamente iguais. Entretanto por meio dos ensaios de desempenho os ligantes foram considerados com características diferentes, sendo indicados para diferentes classes de tráfego e aplicações. O CAP 002 foi indicado para tráfego padrão enquanto o CAP 004 foi indicado para classe de tráfego muito pesado, isso ratifica a superioridade dos ensaios dinâmico-mecânicos sobre os ensaios empíricos no que tange ao desempenho do produto, levando assim a diminuição de custos com manutenção prematura, devido a escolha do ligante adequado para cada obra de pavimentação.

O grau de desempenho, Jnr e a curva mestra são parâmetros que estão diretamente ligados as propriedades mecânicas do ligante asfáltico em determinada temperatura, pois são obtidos por ensaios dinâmico-mecânicos e devido a isso podem ser indicadores de desempenho do ligante em campo.

TABELA 7 - COMPARATIVO ENTRE OS PARÂMETROS EMPÍRICOS E OS PARÂMETROS DINÂMICO-MECÂNICOS E SUA RELAÇÃO COM O DESEMPENHO DOS LIGANTES ASFÁLTICOS ANALISADOS

	ENSAIOS EMPÍRICOS			ENSAIOS DINÂMICO-MECÂNICOS		
	penetração	viscosidade	ponto de amolecimento	grau de desempenho	Jnr	curva mestra
CAP 001	—	✓	—	✓	✓	✓
CAP 002	—	✓	—	✓	✓	✓
CAP 003	✗	✗	✗	✓	✓	✓
CAP 004	✗	✗	✗	✓	✓	✓
CAP 005	✗	✗	✗	✓	✓	✓

-  Boa correlação com desempenho
 Baixa correlação com desempenho
 Sem correlação com desempenho

FONTE: O autor (2017)

5 CONCLUSÕES

Os ensaios dinâmico-mecânicos mostraram vantagens sobre os ensaios empíricos como ferramenta para a seleção de ligantes asfálticos, por correlacionarem a temperatura do ensaio com a temperatura de utilização do pavimento, por meio do ensaio de grau de desempenho, bem como correlacionar fatores como volume e velocidade do tráfego na seleção do ligante asfáltico, por meio do parâmetro Jnr. Os ensaios empíricos não são capazes de fornecer tais informações, pois estão relacionados com propriedades físicas do ligante e não com propriedades mecânicas. As curvas mestras, “black” e o parâmetro de Glover-Rowe forneceram informações sobre o comportamento do ligante em relação a variação de frequências de carregamento, a variação de temperatura e sobre a suscetibilidade ao envelhecimento.

O ligante altamente modificado (CAP 005) mostrou o melhor desempenho mecânico entre as amostras testadas, sendo indicado para um nível de tráfego extrapesado, por meio do ensaio MSCR, isso ratifica a superioridade dos ensaios dinâmico-mecânicos, onde é possível selecionar o ligante adequado para cada obra de pavimentação, garantindo assim um desempenho adequado ao uso e também evitando a formação de deformação permanente e trincas por fadiga, prematuramente.

Em vias com volume de tráfego moderado os ligantes asfálticos não modificados (CAP 001, CAP 002) são capazes de atender os requisitos de qualidade necessários, entretanto se a via for de tráfego pesado o CAP 003 seria o ligante adequado para ser utilizado e em vias com tráfego muito pesado ou com velocidades baixas o CAP 004 é o mais indicado.

Outro benefício dos ensaios dinâmico-mecânicos sobre os ensaios empíricos consiste no fato de ser possível selecionar qualquer tipo de ligante asfáltico por meio dessa metodologia, desde os ligantes simples não modificados até os ligantes modificados, não sendo necessário uma especificação para cada categoria de modificador como acontece atualmente.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento contínuo em busca na excelência na qualidade dos materiais passa pelo aprimoramento e pelo desenvolvimento de estudos complementares, devido a isso estão listadas algumas sugestões para trabalhos futuros que complementem e aprimorem o resultado desse estudo.

- desenvolvimento de trabalhos relacionados ao envelhecimento e a formação de trincas por fadiga no pavimento;
- desenvolvimento de testes relacionados aos materiais utilizados nos tratamentos superficiais;
- estudos relacionados ao envelhecimento dos ligantes asfálticos com o desenvolvimento de novas técnicas para a reciclagem de pavimentos, seja na utilização de material fresado ou de rejuvenescimento do ligante;
- desenvolvimento de mais trabalhos que comprovem a superioridade dos ensaios dinâmico-mecânicos para a seleção de ligantes asfálticos que estimule o desenvolvimento de uma especificação por desempenho para os ligantes asfálticos no Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGLAN, H.; OTHMAN, A.; FIGUEROA, L.; ROLLINGS, R. Effect of styrene–butadiene–styrene block copolymer on fatigue crack propagation behavior of asphalt concrete mixtures. **Transportation Research Board**, Washington DC, 1993.
- ALANI, H.; ALBAYATI, A.; ABBAS, A. The transition to a PG grading system for asphalt binders in Iraq. **Journal of Engineering**. n°. 4, vol. 16, dez. de 2010.
- ANDERSON, D. A.; CHRISTENSEN, D.W.; BAHIA, H. U.; DONGRE, R.; SHARMA, M.G.; ANTLE, C.E.; BUTTON, J. Binder Characterization and Evaluation, vol. 3: Physical Characterization, **Asphalt Research Program, Report SHRP-A-369**, 1994.
- ANDERSON, M.; KING, G.; HANSON, D.; BLANKENSHIP, P. Evaluation of the Relationship between 11 Asphalt Binder Properties and Non-Load Related Cracking. **Journal of the Association of Asphalt. 12 Paving Technologist**, Vol. 80, pp. 615-661, 2011.
- ANDRIESCU, A.; GIBSON, N.; YOUTCHEFF, J.; QI, X.; HESP, SAM. Critical crack tip opening displacement as a fatigue cracking criterion for asphalt mixtures, **International conference on maintenance and rehabilitation of pavements and technological control (MAIREPAV6)**, 6th, Turin, Italy, pp. 252-61, 2009.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO M320-10**, Standard specification for performance-graded asphalt binder, 2010.
- _____**AASHTO M332-14**, Standard specification for performance-graded asphalt binder using multiple stress creep recovery (MSCR) test, 2014.
- _____**AASHTO T315-12**, Standard method of test for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR), 2012.
- _____**AASHTO T350-14**, Standard method of test for multiple stress creep recovery (MSCR) test of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR), 2104.
- _____**AASHTO TP101-12**, Standard method of test for estimating fatigue resistance of asphalt binders using the linear amplitude sweep, 2012.
- ANIP – Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos. **ANIP em números – 2015**. 2015. Disponível em: < <https://goo.gl/aDZxGV> >. Acesso em: 22 set. 2016.
- ASPHALT ACADEMY, **Technical Guideline: The use of Modified Bituminous Binders in Road Construction**, 2ª ed, Pretoria, 2007.
- AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS STANDARDS. **ASTM D5/D5M-13**, Standard test method for penetration of bituminous materials.
- _____**ASTM D36/D36M-14**, Standard test method for softening point of bitumen (ring-and-ball apparatus).

_____ **ASTM D92-12**, Standard test method for flash and fire points by Cleveland open cup tester.

_____ **ASTM D113-07**, Standard test method for ductility of bituminous materials (withdrawn without a replacement on 28 January 2016).

_____ **ASTM D946/946M-15**, Standard specification for penetration-graded asphalt cement for use in pavement construction.

_____ **ASTM D2042-15**, Standard test method for solubility of asphalt materials in trichloroethylene.

_____ **ASTM D2872-12**, Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt (rolling thin-film oven test).

_____ **ASTM D3381/D3381M-13**, Standard specification for viscosity-graded asphalt cement for use in pavement construction

_____ **ASTM D4402/D4402M-15**, Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer.

_____ **ASTM D6373-15**, Standard specification for performance graded asphalt binder.

_____ **ASTM D7175-15**, Standard test method for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer.

_____ **ASTM D7405-15**, Standard test method for multiple stress creep and recovery (MSCR) of asphalt binder using a dynamic shear rheometer.

AUSTROADS 2016, **Review of Australasian and Overseas specifications and performance tests for bitumen**, AP-T308-16. Austroads, Sydney, NSW, 2016.

BALBO, J.T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo; Oficina de Textos, 2007.

BAHIA, H.U.; HANSON, DI, ZENG M.; ZHAI, H, KHATRI, M.A.; ANDERSON, RM. Characterization of modified asphalt binders in Superpave mix design. **NCHRP report 459, Transportation Research Board**, Washington, DC. USA, 2001.

BARCENA, R.; EPPS. MARTIN. A.; HAZLETT. D. Performance-graded binder specification for surface treatments. **Transportation Research Record**, nº.1810, Washington, DC. pp. 63–71, 2002.

BARNES, H. A.; HUTTON, J.F.; WALTERS, E.K. **An introduction to rheology**, Elsevier, Amsterdam, 1993.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura e transporte (DNIT). Diretoria de planejamento e pesquisa. Coordenação geral de estudos e pesquisa, Instituto nacional de pesquisas rodoviárias. **Manual de pavimentação**, 3 ed., Rio de Janeiro, 2006.

BRASIL. Resolução nº 19, de 11 julho de 2005. Estabelece as especificações dos cimentos asfálticos de petróleo (CAP). **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 12 jul. 2005.

BRASIL. Resolução nº 39, de 24 dezembro de 2008. Estabelece as especificações dos cimentos asfálticos de petróleo modificados por borracha moída de pneus, designados como Asfaltos Borracha. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 26 dez. 2008.

BRASIL. Resolução nº 32, de 21 setembro de 2010. Estabelece as especificações dos cimentos asfálticos de petróleo modificados por polímeros elastoméricos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 22 set. 2010.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P. *et al.*, **Pavimentação asfáltica – formação básica para engenheiros**. 1 ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Petrobras/Abeda, 2008.

BURGER, A.F. **Rheology of polymer modified bitumen**, dissertação de mestrado Universidade de Stellenbosch, Fevereiro, 2001.

CALLISTER, W.JR., *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*, 8ª Ed..Rio de Janeiro, RJ. LTC. 2015.

CEN – Comité Européen de Normalisation. **EN 12591: 2009**, Bitumen and bituminous binders: specifications for paving grade bitumens.

EN 14023: 2010, Bitumen and bituminous binders: specification framework for polymer modified bitumens.

CHARLES, R.; GRIMALDI, F. Trinidad lake asphalt in pavement performance. *West Indian Journal of engineering*. Trinidad e Tobago,1996.

CHOI, YK. Visco-elastic analysis of the binder shear resistance in relation to asphalt rutting, **Road Materials and Pavement Design**, vol. 12, no. 4, pp. 767-94, 2011.

CHOI, YK. Comparison of the visco-elastic properties of bituminous binders assessed by the elastometer and the dynamic shear rheometer, **Road & Transport Research**, vol. 22, nº. 3, pp. 3-16, 2013.

CLAXTON, M.; LESAGE, J.; PLANQUE, L. When can bitumen rheological properties be used successfully to predict asphalt mix performance? **1st Eurasphalt & Eurobitume Congress**, Strasburg. 1996.

CORTIZO, M.S; LARSEN, D.O.; BIANCHETTO, H.; ALESSANDRINI, J. L. Effect of the thermal degradation of SBS copolymers during the ageing of modified asphalts. **Polymer Degradation and Stability**, vol. 86, no. 2, pp. 275–282, 2004.

CNT. Pesquisa CNT de rodovias 2015: **Relatório gerencial**. Brasília: CNT. SEST.SENAT, 420p., 2015.

D'ANGELO, J.; HARM, E; BARTOSZEK, J.; BAUMGARDNER, G.; CORRIGAN, M.; COWSERT, J.; HARMAN, T.; JAMSHIDI, M.; JONES, W; NEWCOMB, D.; PROWELL,

B.; SINES, R.; YEATON, B. **Warm-Mix Asphalt: European Practice**, 2008. Disponível em: < [tps://goo.gl/UeS9bk](https://goo.gl/UeS9bk) > Acesso em: 05 de nov. 2016.

D'ANGELO, J. The relationship of the MSCR test to rutting. **Road Materials and Pavement Design**, vol. 10, suppl. 1, pp. 61-80, 2009.

D'ANGELO, J.; KLUTTZ, R.; DONGRÉ, R.; STEPHENS, K.; ZANZOTTO, L. Revision of the Superpave high temperature binder specification: the multiple stress creep recovery test. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, vol. 76, pp. 123-62, 2007.

EDWARDS Y.; ISACSSON, U. Wax in bitumen-State of the art: Part2- Characterization and effects. **Road Mater Pavement**, vol 6, 30p., 2005.

FERRY, J. **Viscoelastic properties of polymers**. John wiley e sons, 3ª ed., 1980.

FONTES, L. P. T. L. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos**. Tese de Doutorado. Universidade do Minho. Universidade Federal de Santa Catarina. 545 p., 2009.

GLOVER, C.J.; DAVISON, R.R.; DOMKE, C.H.; RUAN, Y.; JURISTYARINI P, P.; KNORR, D.B.; JUNG, S.H. Development of a New Method for Assessing Asphalt Binder Durability with Field Evaluation. **Federal Highway Administration and Texas Department of Transportation Report**, TX-17 05/1872-2, agosto de 2005.

GOODRICH, J.L. Asphalt and polymer modified asphalt properties related to the performance of asphalt concrete mixes. **Journal of the Association of Asphalt Pavement Technologists**, vol.57, pp.116-160, 1988.

HANSEN, K.R.; D.E. NEWCOMB, D.E. Asphalt Pavement Mix Production Survey: Reclaimed Asphalt Pavement, Reclaimed Asphalt Shingles. Warm-Mix Asphalt Usage: 2009–2010 (IS 138). **National Asphalt Pavement Association**, Lanham, Maryland, 2011.

HINTZ, C. **Understanding mechanisms leading to asphalt binder fatigue**. Tese Doutorado, University of Wisconsin – Madison, Madison, 2012.

HINTZ, C.; VELASQUEZ, R.; JOHNSON, C.; BAHIA, H. Modification and validation of the linear amplitude sweep test for binders fatigue specification. **Transportation Research Record**, no. 2207, pp. 99-106, 2011.

HUANG, W.; TANG, N.; LIU S. Comparative evaluation of dynamic oscillatory test and multiple stress creep recovery test in characterizing polymer-modified asphalt at varying contents. **Transportation Research Board annual meeting**, 94th, 2015, Washington, DC, USA, 2015.

HURLEY, G. C.; PROWELL, B. D. Evaluation of asphaminzeolite for use in warm mix asphalt. **National Center for Asphalt Technology (NCAT)**. Auburn Universit, 2005.

HURLEY, G. C.; PROWELL, B. D. Evaluation of Evotherm for use in Warm Mix Asphalt. **National Center for Asphalt Technology (NCAT)**. Auburn Universit, 2006.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA- INMET- **Normal climatológica temperatura mínima série histórica 1961–1990.** < disponível em: <https://goo.gl/WY6Lr6>> Acesso em: 10 de jan. 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA- INMET- **Normal climatológica temperatura máxima série histórica 1961–1990.** < disponível em: <https://goo.gl/O9mXYs> > Acesso em: 10 de jan. 2017.

JOHNSON, CM.; WEN, H.; BAHIA, HU. Practical application of viscoelastic continuum damage theory to asphalt binder fatigue characterisation, **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, vol. 78, pp. 597-638, 2009.

KIM, Y.; LEE, H.J.; LITTLE DN.; KIM, YR. A simple testing method to evaluate fatigue fracture and damage performance of asphalt mixtures, **Journal of Association of Asphalt Paving Technologists**, vol. 75, pp 755-88, 2006.

KLUTTZ R. Q.; JELLEMA, E.; WOLDEKIDAN, M.F.; HUURMAN, M. Highly Modified Binder for Prevention of Winter Damage, **OGFCs, Am. Soc. Civil E.**, 2013.

LEITE, L.F.M. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros.** 199 p., Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

LUZ, L.; DURANTE, D. **A guerra dos pneus: a controvérsia entre Brasil e Comunidades Europeias sobre o comércio internacional de pneus usados.** Desenvolvimento e Meio ambiente, v.27, p.37-55, 2013.

MARTINS A. **Contribuição para a validação do ensaio de resistência ao dano por fadiga para ligantes asfálticos** - Dissertação de mestrado. COPPE/UFRJ, 2014.

MARTONO, W.; BAHIA, HU; ‘Developing a surrogate test for fatigue of asphalt binders’, **Transportation Research Board annual meeting, 87th**, 2008, Washington DC, USA, Transportation Research Board, Washington DC, 17 pp., 2008.

MAHMOUD, A. F. F.; BAHIA, H. **Using the gyratory compactor to measure mechanical stability of asphalt mixtures**, Wisconsin highway research program 0092-01-02 Madison, Wisconsin, EUA, Outubro, 2004.

MANOEL, G.F. **Caracterização físico-química e estudo reológico de asfaltos modificados pelos polímeros pead, pebd e pelbd e contribuição ao estudo do envelhecimento do cimento asfáltico de petróleo.** 141 p., Tese Doutorado em Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

MEDINA, J. **Mecânica dos pavimentos.** 1. ed. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 380 p. 1997.

MENSCHING, D. J.; ROWE, G. M.; DANIEL, Jo. S.; BENNERT, T. Exploring low-temperature performance in Black Space. **Road Materials and pavement Design.** Vol 16, 2015.

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

MURAYAMA, T.; MARK, H. F.; BIKALES, N. M.; OVERBERGER, C. G.; MENGES, G.; KROSCHWITS, J. I. **Encyclopedia of Polymer Science and Engineering**. 2 eds., John Wiley & Sons: New York, 1988, vol. 5, p. 299.

NASCIMENTO, L.; CHACUR, M.; LEITE, L. Uso do compactador giratório na previsão do desempenho de misturas asfálticas. **Anais do 19º Encontro do IBP**, Rio de Janeiro, Maio, 2008.

NOELTING M.; ARNOLD J.; JONES, B. Heavy duty pavement – new asphalt designs meet extreme challenges. **China–Japan paving technology symposium**. Nanjing, China, 2005.

ROMIER, A.; AUDEON, M.; DAVID, J.; MARTINEAU, Y. Low-energy asphalt (LEA) with the performance of hot-mix asphalt. **Annual Meeting of the Transportation Research Board**. Washington, DC, 2006.

ROWE, G. Analysis of SHRP Core Asphalts – New 2013/14 Test Results. Presentation .**20 Binder Expert Task Group Meeting**, San Antônio, abril, 2014.

PFEIFFER, J.P., VAN DOORMAAL, P.M. The rheological properties of asphaltic bitumens. **J. Inst. Pet. Technol**. Vol 22, 414–440, 1936.

PREGO, A.S.S. **A memória da pavimentação no Brasil**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 2001.

PROWELL, B. D. Warm mix asphalt the international technology scanning program: **summary report**. **American Trade Initiatives**, 2007.

ROBINETTE C, EPPS J. Energy, emissions, material conservation, and prices associated with construction, rehabilitation, and material alternatives for flexible pavement. **Transport Res Rec: J Transport Res Board**, 2179:10–22, 2010. <http://dx.doi.org/10.3141/2179-02>.

SENGOZ, B.; ISIKYAKAR, G. Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen, **Construction and Building Materials**, vol. 22, no. 9, pp. 1897–1905, 2008.

SHELL. **The Shell bitumen handbook**. 5. ed. Cambridge, 2003.

SILVA, L.S. **Contribuição ao estudo de envelhecimento de ligantes asfálticos. Influência da adição de polímero e comportamento frente a radiação UV**. Tese de doutorado. Universidade Federal do rio grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

SILVA, P. A. – **Nanocompósitos de borracha termoplástica do tipo poli (estireno-b-butadieno-b-estireno)-SBS e poli(estireno-butadieno) SB**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2007.

SILVA, L.S.; FORTE, M.M.C.; SPECHT, L.P.; CERATTI, J.A. Polímeros como modificadores asfálticos. *Revista Transportes* vol 10, nº 1, 2002. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v10i1.164>> acesso em 15 jan. 2017.

SOENEN, H.; HEYRMAN, S.; LU, X.; REDELIUS, P. **Aging of Bituminous Films under Ambient Conditions Compared to Accelerated Aging in the Pressure Aging Vessel.** Antuérpia, Bélgica, 2012. <Disponível em: <https://goo.gl/GN6E4A>> Acesso em: 19 jan. 2017.

STASTNA, J.; ZANZOTTO, L.; VACIN, O. J. Viscosity function in polymer-modified asphalts. **Journal of Colloid and Interface Science**, 259, 2003.

TAYFUR, S.; OZEN, H.; AKSOY, A. Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers. **Construction and Building Materials**, vol. 21, 2007.

TONIAL, I.A. **Influência do envelhecimento do revestimento asfáltico na vida de fadiga de pavimentos.** 244 p. Dissertação (Mestrado) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

TONIAL, L. A.; BASTOS, A. C. R. **Rotas de produção e asfalto;** Relatório interno Petrobras, 1995.

TIMM, D.; ROBBINS, M.; KLUTTZ, R. Full-scale structural characterization of a highly polymer-modified asphalt pavement. **Proceedings of the 90th Annual Transportation Research Board**, Washington, D.C, 2011.

TIMM, D.; POWELL, R.; WILLIS, J.; KLUTTZ, R. Pavement rehabilitation using high polymer asphalt mix, submitted for the Proc. 91st Annual **Transportation Research Record**, Washington, DC, 2012.

YEN, T.F. Asphaltene/resin plus oil interconversion: an investigation into colloidal model of asphaltenes. **Workshop the chemical components and structure of asphaltic materials**, 1991, Roma, Itália, 1991.

WEST, R.; TIMM, D.; WILLIS, R.; POWELL B.; TRAN, N.; WATSON, D.; BROWN, R.; ROBBINS, M.; NORDCBECK, A.; ANDNELSON, J. Pavement test track findings. **Report, National Center for Asphalt Technology**, Auburn University, fev. 2012.

WINTER, A.; SBAITE, P.; BATISTELLA, C. B.; MACIEL FILHO, R.; WOLF MACIEL, M. R.; MEDINA, L.; GOMES, A.; KUNERT, R.; MATHIAS LEITE, L.F.; PONTES BITTENCOURT, C. Caracterização de correntes de resíduos pesados de petróleos obtidas pelo processo de destilação molecular. **3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás**, Salvador, out. 2005.

WU, J.P.; HERRINGTON, P.; HENNING, T.F.P.; BROWN, D. Chipseal cracking, research report no. 579, **New Zealand Transport Agency**, Wellington, New Zealand. 2016.

WONG W.; LI, G. “Analysis of the effect of wax content on bitumen under performance grade classification” **Construction and Building Materials**, 23, 2504–2510. 2009.

ZHOU, F.; MOGAWER, W.; LI, H.; ANDRIESCU, A.; COPELAND, A. 'Evaluation of fatigue tests for characterizing asphalt binders', **Journal of Materials in Civil Engineering**, vol. 25, no. 5, pp 610-17, 2013.