



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL**

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS
MORNAS MODIFICADAS COM A ADIÇÃO DO ÓLEO DE SOJA**

LETÍCIA CARLOS SILVÉRIO

CAMPINA GRANDE - PB

2017

LETÍCIA CARLOS SILVÉRIO

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS
MORNAS MODIFICADAS COM A ADIÇÃO DO ÓLEO DE SOJA

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado
a Unidade Acadêmica de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG),
como requisito obrigatório para a obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a Dra. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena

Campina Grande - PB
2017

LETÍCIA CARLOS SILVÉRIO

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS
MORNAS MODIFICADAS COM A ADIÇÃO DO ÓLEO DE SOJA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado Unidade Acadêmica de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), como requisito obrigatório para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil, sob a orientação da Prof.^a Dra. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 01/09/2017.

BANCA EXAMINADORA

Orientadora: Prof^a. D. Sc. Lêda Christiane de Figueirêdo Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Examinador interno: Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Examinador externo: Eng. Me. Jonny Dantas Patricio
Universidade Federal do Pernambuco– UFPE

Dedico este trabalho aos meus pais João e Jucielma, meus irmãos Leandro e Lívia e aos meus avós João e Carmelita, a grande razão de todos os meus sonhos e base para minha vida.

A vocês, todo o meu amor, pois os méritos desta conquista são tanto meus, quanto vossos.

Muito Obrigada!

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, agradeço a Deus pela minha vida, por estar sempre ao meu lado, por todos os livramentos e proteção. Pela força sobrenatural que me permitiu transpor sem sucumbir todas as adversidades que surgiram em meu caminho, podendo assim, concluir mais esta etapa da minha vida.

Aos meus pais, João e Jucielma, por me fazerem ser uma pessoa melhor e mais forte a cada dia, por terem me apoiado na carreira escolhida e proporcionado condições para a obtenção de um curso superior, pela compreensão, educação e amor incondicionais dados ao longo de toda a minha vida. A quem devo tudo que sou.

Aos meus irmãos, Leandro e Lívia, e meus avós João e Carmelita, e Antônio e Terezinha, pelo carinho, amor, apoio, incentivo, compreensão e paciência.

Ao meu tio Judivan, que juntamente com meu pai e avô, foram minha fonte de inspiração para seguir o ramo da construção civil, exemplos de pessoas trabalhadoras, íntegras e de caráter.

Ao meu tio José Divaldo e meu padrinho Severino por todo suporte, disponibilidade e auxílio no traslado entre cidades sempre que precisei.

A minha orientadora, Prof.^a Dra. Lêda Christiane, por ser uma referência profissional, pela paciência, orientações, disponibilidade, dedicação, esclarecimento de dúvidas e transmissão de conhecimentos ao longo deste trabalho.

Aos meus amigos, Ablenya e Christian, ao Eng. Daniel Beserra e técnicos Jadilson e Nildinho, que junto ao meu irmão Leandro, me auxiliaram diretamente nas realizações dos ensaios laboratoriais e no esclarecimento de dúvidas durante toda a pesquisa.

Ao meu supervisor de estágio, Eng. Me. Breno Giotto, e a Eng. Viviane de Paiva por serem referências profissional e pessoal, pela confiança, paciência, compreensão, disponibilidade e transmissão de conhecimentos que me facultaram.

Ao Prof. Dr. Adriano Elísio e a Eng. Me. Thays Nogueira que me permitiram participar de um projeto de pesquisa, onde adquiri conhecimentos que contribuíram na minha familiarização com pesquisa científica para este trabalho.

A minha prima, Eng. Janaina Leite, pelo acolhimento desde o início do curso, pelo apoio, transmissão de conhecimentos, parceria, incentivos, conselhos, paciência e principalmente pela amizade conquistada.

A Karina e Regiane por terem sido verdadeiras irmãs e terem me emprestado suas famílias como minhas, em especial, seu Fábio e dona Márcia, pela amizade, fraternidade, acolhimento, carinho, conforto e dedicação nas noites viradas de estudo, longas conversas e horas de diversão, desde o início do curso, as quais eu espero poder levar por toda a vida.

A todos os meus colegas e amigos de curso, principalmente Giordanno, Hícaro, Luã e Paulo, que me acompanharam ao longo de toda a vida acadêmica, pelo carinho, parceria, incentivo, conhecimentos compartilhados e momentos de descontração.

A todos os professores e funcionários do Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) e da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil (UAEC) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), e aos meus professores do ensino médio e fundamental, em especial a minha madrinha Prof.^a Maria José, que contribuíram direta e indiretamente para a minha formação acadêmica e pessoal.

As minhas amigas de longa data, Aline, Andréia, Fernanda, Gabriela, e Jéssika, pela partilha de momentos e experiências maravilhosos, apoio, ombro amigo, compreensão, e contínua amizade ao longo da minha vida apesar de toda a distância.

E, finalmente, a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho e conquista de mais um sonho almejado.

A todos, eu dirijo o meu mais sincero e profundo Muito Obrigada!

“Entrega o teu caminho ao Senhor, confia nEle, e Ele tudo fará.”

(Sl 37:5)

RESUMO

A crescente preocupação por processos produtivos sustentáveis na pavimentação asfáltica vem impulsionando a busca pelo uso de misturas asfálticas com temperaturas de usinagem e compactação inferiores às tradicionalmente usadas, menor consumo energético na produção, menor emissão de poluentes na queima da mistura e maior segurança no trato desta. A incorporação de aditivos oriundos de oleaginosas ao ligante asfáltico é um agente viável para a redução de temperaturas de usinagem e aplicação da massa asfáltica. Estudos acerca de parâmetros reológicos comprovaram a viabilidade da adição do óleo de soja ao ligante asfáltico. O presente trabalho teve como objetivo estudar a adição no ligante 55/75 do óleo de soja (novo e residual) em substituição parcial ao asfalto, bem como verificar a influência da redução em 10 e 20°C da temperatura, determinada pelo ensaio de viscosidade, nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas. Foram realizados ensaios mecânicos de resistência à tração, módulo de resiliência, módulo dinâmico, Lottman modificado e flow number. Os resultados apontam que a adição do óleo de soja tende a reduzir a resistência à tração, rigidez e resistência à deformação permanente das misturas em relação ao ligante puro. Estes valores, contudo, continuaram atendendo as exigências normativas dos órgãos fiscalizadores, promovendo um menor impacto sobre o meio ambiente, redução dos custos energéticos e a correta destinação do resíduo do óleo de soja, caracterizando este como um "aditivo verde".

Palavras-chave: ligantes asfálticos modificados; temperatura de compactação; aditivo verde; rigidez

ABSTRACT

Concerns about sustainable production processes of asphalt paving have led to the development of asphalt mixtures produced and compacted at temperatures lower than those traditionally applied, obtaining reductions in energy consumption, greenhouse gases emissions and providing better working security on the field. Additions of organic additives derived from oilseeds into the asphalt binders can change its viscosity-temperature behaviour, working as a viable tool to reduce the temperatures of production and application. In this context, the feasibility of inserting soybean oil into the asphalt binder was analysed and confirmed on rheological and physical aspects. The present research has as objective to study the 55/75 asphalt binder partially substituted with new and after consumption (residual) soybean, as well as to verify the influence on mechanical properties of reducing 10 and 20 °C on the temperature obtained from the rotational viscosity test when compacting the asphalt mixtures. The tests of Indirect Tensile Strength, Resilience Modulus, Modified Lottman, Dynamic Modulus and Flow Number were performed. The results show that the addition of soybean oil tends to reduce the asphalt mixtures maximum strength, stiffness and resistance to permanent deformation. These values, however, still met the specifications for quality of the resulting pavement, promoting less environmental damage, lowering levels of energy consumption and proving an environmentally friendly dispose of the residual oil.

Key words: modified asphalt binders; compaction temperature; green additive; Stiffness

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Seção transversal típica de um pavimento: (a) Flexível e (b) Rígido (Menezes, 2003)	5
Figura 2 - Aplicação e transferência de cargas nos pavimentos rígidos e flexíveis (Specht, 2010)	6
Figura 3 - Estruturas representativas das quatro frações betuminosas: saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos (Bernucci et al., 2007)	12
Figura 4 - Teor de sílica presente nos principais tipos de agregados utilizados em misturas asfálticas (Liberatori e Constantino, 2006)	15
Figura 5 - Química do par ligante asfáltico/agregado (Shah, 2003)	17
Figura 6 – Ensaio para encontrar os parâmetros volumétricos (Rice Test)	25
Figura 7 – Compactador Giratório Servopac utilizado na compactação SUPERPAVE	25
Figura 8 - Fluxograma para a dosagem Superpave (modificado de Sousa, 2017)	25
Figura 9 - Classificação das misturas asfálticas em função da temperatura usinagem (Motta, 2011)	28
Figura 10 - Comportamento da viscosidade do ligante modificado com aditivo orgânico com a variação da temperatura (ANDERSON et al., 2008)	35
Figura 11 – Brasil – Percentagem da produção total por produto (CONAB, 2016)	40
Figura 12 - Série histórica da área plantada de soja (Conab, 2017)	41
Figura 13 - Agregado graúdo: (a) Brita 19mm; (b) Brita 12,5mm	44
Figura 14 - Agregado miúdo: (a) Areia; (b) Pó de pedra.	45
Figura 15 - CAP 55/75	45
Figura 16 - Óleo de soja	45
Figura 17 - Filtragem do óleo de soja residual	46
Figura 18 - Misturador mecânico FISATOM, modelo 722D	47
Figura 19 - Curva granulométrica dos agregados (Barros, 2017)	51
Figura 20 - Curva Fuller intermediária (Barros, 2017)	52
Figura 21 – Prensa Mecânica (Ensaio RT)	53
Figura 22 – Equipamento utilizada no Ensaio de Módulo de Resiliência	54
Figura 23 – Aplicação do vácuo nos corpos de prova (Ensaio de Lottman Modificado)	56
Figura 24 - CPs com plugs fixados para o ensaio de módulo dinâmico	56
Figura 25 - Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)	57
Figura 26 - CPs após ensaio de flow number	58
Figura 27 - Resistência à Tração Diametral	59
Figura 28 - Módulos de Resiliência (Norma Brasileira)	61
Figura 29 – RRT do Ensaio de Lottman Modificado	65
Figura 30 - Ensaio de módulo dinâmico para o ligante puro	68
Figura 31 - Ensaio de módulo dinâmico para a mistura asfáltica aditivada com 1% de óleo de soja novo usinada na temperatura de compactação (TC)	68
Figura 32 - Ensaio de módulo dinâmico para a mistura asfáltica aditivada com 2% de óleo de soja residual usinada na temperatura de compactação (TC)	69
Figura 33 - Ensaio de módulo dinâmico para a mistura asfáltica aditivada com 1% de óleo de soja novo usinada 10°C abaixo da temperatura de compactação (TC-10)	69
Figura 34 - Ensaio de módulo dinâmico para a mistura asfáltica aditivada com 2% de óleo de soja residual usinada 10°C abaixo da temperatura de compactação (TC-10)	70
Figura 35 - Ensaio de módulo dinâmico para a mistura asfáltica aditivada com 1% de óleo de soja novo usinada 20°C abaixo da temperatura de compactação (TC-20)	70

Figura 36 - Ensaio de módulo dinâmico para a mistura asfáltica aditivada com 2% de óleo de soja residual usinada 20°C abaixo da temperatura de compactação (TC-20)	71
Figura 37 - Curvas mestras do ligante puro e das misturas aditivadas com 1% de óleo de soja novo nas três temperaturas de compactação	71
Figura 38 - Curvas mestras do ligante puro e das misturas aditivadas com 2% de óleo de soja residual nas três temperaturas de compactação	72
Figura 39 - Curvas mestras de todas as misturas avaliadas	73
Figura 40 - Valores de Flow Number	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ensaio de caracterizações dos ligantes asfálticos _____	59
Tabela 2 - Resultados das caracterizações dos ligantes asfálticos (Barros, 2017) _____	60
Tabela 3 - Ensaio de caracterização dos agregados para as misturas asfálticas _____	61
Tabela 4 - Resultados de massa específica real e aparente, abrasão Los Angeles e equivalente de areia dos agregados (Barros, 2017) _____	62
Tabela 5 - Proporção de agregados encontrada a partir da composição granulométrica (Barros, 2017) _____	63
Tabela 6 - Temperaturas de usinagem e compactação para os ligantes asfálticos (Barros, 2017) _____	64
Tabela 7 – RRT do Ensaio de Lottman Modificado _____	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relação entre as propriedades mineralógicas do agregado com relação à resistência ao dano por umidade (Hanz et al., 2007) _____	31
Quadro 2 - Tecnologias existentes no mercado (adaptado de D'Angelo et al., 2008; Perkins, 2009; Austroads, 2012; e Rubio et al., 2012) _____	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIOVE	Associação Brasileira das Industrias de Óleos Vegetais;
ASTM	American Society for Testing and Material;
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
ABOISSA	Aboissa Óleos Vegetais;
AMP	Asfaltos Modificados por Polímeros;
AMPT	Asphalt Mixture Performance Tester
ANP	Agência Nacional de Petróleo;
AASTHO	American Association Of State Highway And Transportation Officials;
CA	Concreto Asfáltico;
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo;
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado à Quente;
CCP	Concreto de Cimento Portland;
CNT	Confederação Nacional dos Transportes;
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento;
cP	Centipoise;
CPs	Corpos de provas;
DMT	Massa Especifica Teórica das Misturas Asfálticas;
DNC	Democratic National Committee;
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem;
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte;
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária;
EVA	polietileno-Vinil-Acetato;
FHWA	Federal Highway Administration;
FN	Flow Number;
GEE	Gases do Efeito Estufa;
HMA	Hot Mix Asphalt;
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis;
LVTD	Linear Variable Differential Transformer;
LEA	Low Energy Asphalt
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
MD	Módulo Dinâmico;
ME	Método de Ensaio;
Mh	Massa, ao ar, do agregado na condição saturada superfície seca;
MPa	Mega Pascal;
MR	Módulo de Resiliência;
NAPA	National Asphalt Pavement Association;
NBR	Norma Brasileira Registrada;
NCAT	National Center for Asphalt Technology;
OMA	Óleo Residual de Cozinha;

Pa	Pascal;
Pa.s	Pascal Segundo;
PNV	Plano Nacional de Viação;
RBV	Relação Asfalto Vazios;
RPM	Rotações por minuto;
RT	Resistência à tração por Compressão Diametral;
RTFO	Rolling Thin-Film Over;
RRT	Relação da Resistência à Tração;
RTu	Resistência à Tração condicionado;
Sabesp	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo;
SBR	Estireno-Butadieno-Rubber;
SBS	Estireno-butadieno-estireno;
SGC	SUPERPAVE Giratory Compactor;
SHRP	Strategic Highway Research Program;
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavements System;
TC	Temperatura "Ótima" de Compactação
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande;
USDA	United States Department of Agriculture;
UTM	Universal Testing Machine
VAM	Vazios do Agregado Mineral;
VV	Volume De Vazios;
WMA	Warm Mix Asphalt;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVOS	3
1.1.1	Objetivo Geral	3
1.1.2	Objetivos Específicos	3
1.2	ESTRUTURA DO TEXTO DESTE PROJETO DE PESQUISA.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	CONCEITOS BÁSICOS E GENERALIDADES SOBRE A PAVIMENTAÇÃO	5
2.2	PANORAMA RODOVIÁRIO BRASILEIRO	6
2.3	LIGANTE ASFÁLTICO	8
2.3.1	Classificação dos Ligantes Asfálticos.....	10
2.3.2	Constituição Química do Ligante Asfáltico.....	10
2.3.3	Sustentabilidade de Ligantes Asfálticos	14
2.4	AGREGADOS	15
2.5	LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO	17
2.6	DOSAGEM E COMPACTAÇÃO DA MISTURA	21
2.7	TEMPERATURAS DE USINAGEM E DE COMPACTAÇÃO DA MISTURA.....	26
2.8	MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS OU WARM MIX ASPHALT	27
2.8.1	Técnicas Existentes na Produção de Misturas Asfálticas Mornas	34
2.8.1.1	Aditivos Incorporados as Misturas Asfálticas Mornas	38
3	METODOLOGIA.....	44
3.1	MATERIAIS	44
3.2	MÉTODOS	46
3.2.1	Misturas dos Materiais.....	46
3.2.2	Caracterização do Ligante	47
3.2.3	Temperatura Ótima de Usinagem e Compactação.....	49
3.2.4	Caracterização dos Agregados.....	50
3.2.5	Ensaio Mecânicos	52
3.2.5.1	Resistência à Tração (RT) por Compressão Diametral.....	53
3.2.5.2	Módulo de Resiliência	54
3.2.5.3	Dano por Umidade Induzida (Lottman Modificado)	55
3.2.5.4	Módulo Dinâmico (E*).....	56
3.2.5.5	Flow number.....	57
4	RESULTADOS	59
4.1	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (RT) POR COMPRESSÃO DIAMETRAL	59
4.2	MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	61
4.3	DANO POR UMIDADE INDUZIDA (LOTTMAN MODIFICADO)	63
4.4	MÓDULO DINÂMICO (E*).....	66
4.5	FLOW NUMBER.....	74
5	CONCLUSÃO.....	77
5.1	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	78
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80

1 INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário é essencial no transporte de passageiros e de cargas. De acordo com a Confederação Nacional dos Transportes (CNT), em 2016, no Brasil, o transporte de cargas e de pessoas são realizadas em sua maioria pelo meio rodoviário que, segundo o Plano Nacional de Viação (PNV), possui uma extensão total de 1.712.296,2 km de malha rodoviária, incluindo rodovias municipais, estaduais e federais. Desta quantia, 212.738 km correspondem a rodovias pavimentadas, 1.368.226,8 km correspondem a rodovias não pavimentadas e 131.331,4 km são referentes a rodovias planejadas. No entanto, a maioria das rodovias brasileiras se encontram em estado precário de conservação.

O ligante asfáltico é um material aglutinante de coloração escura que deve ser submetido a temperaturas que sejam capazes de promover a viscosidade adequada para que este envolva os materiais granulares das misturas asfálticas utilizadas nos pavimentos flexíveis, além disso este influencia o comportamento das misturas asfálticas quanto ao envelhecimento e quanto a sua resistência e durabilidade. No processo de usinagem à quente são utilizadas faixas de temperaturas que vão de 140°C a 180°C. Temperaturas tão altas assim podem ocasionar oxidação e envelhecimento precoce do ligante, uma vez que suas propriedades são modificadas, provocando um aumento em sua consistência e conseqüentemente da rigidez da mistura asfáltica (MELLO, 2014 apud CAVALCANTE, 2016).

Rubio et al. (2012) afirma que as misturas asfálticas produzidas à temperaturas elevadas causam a emissão de gases de efeito estufa, além de outras substâncias químicas poluentes que prejudicam a qualidade do ar e colaboram com o aquecimento global. Aliado a isto, a eminente necessidade de um desenvolvimento sustentável e uma maior eficiência energética no segmento da pavimentação tem motivado o estudo de ligantes asfálticos usinados em temperaturas inferiores a convencionalmente utilizada.

Dessa forma, foi iniciado na última década o estudo de Misturas Asfálticas Mornas - Warm Mix Asphalt (WMA) capazes de atingir reduções de temperaturas de 30°C até 50°C em relação as convencionais fabricadas, a partir da incorporação de modificadores ao ligante convencional (BANERJEE et al., 2012; PEINADO, 2011; AHMED et al., 2012; BUSS et al., 2015).

Segundo Budny (2012), uma das soluções usadas para a redução das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas é a adição de aditivos orgânicos no ligante asfáltico, devido à diminuição de viscosidade promovida por estes ao ligante.

Como exemplo para a diminuição das temperaturas de trabalho dos ligantes asfálticos tem-se a adição do óleo vegetal de cozinha, que aumenta a distância de transporte de massa asfáltica, provoca a redução da emissão de fumos, diminui o consumo de combustível da usina, além de proporcionar a utilização de uma maior quantidade de material de fresado na mistura.

No entanto, os processos de modificação pela adição de polímeros comumente tendem a aumentar a viscosidade dos ligantes asfálticos e, por conseguinte, as faixas de temperaturas de usinagem e de compactação destes materiais em relação às do material puro também são comumente superiores. Nesse âmbito, aditivos de origem oleaginosa surgem como motivadores viáveis para a solução desse problema, como verificado em Souza (2012), que utilizou o óleo da mamona, Lucena et al. (2016), por meio do óleo da moringa e Costa et al. (2015) pela adição do óleo de linhaça.

A Associação Brasileira das Industrias de Óleos Vegetais (ABIOVE) afirma houve um crescimento de 33,84% na produção de óleo vegetal e um aumentou em 92,62% do consumo doméstico deste produto no Brasil entre os anos de 2003 e 2013, sendo a soja o primeiro lugar na produção nacional de grãos, correspondendo a 48% desta (CONAB/2016).

Nada obstante as vantagens econômicas, os óleos extraídos desses grãos, amplamente empregues em processos de frituras, produzem uma preocupante quantidade de resíduos que geram profundos impactos ambientais devido descarte inadequado de seus rejeitos. Posto isso, é perceptível a progressiva preocupação com a correta destinação dos resíduos de óleos vegetais, fato demonstrado pelas inúmeras pesquisas que tratam do descarte adequado destes resíduos no intuito de minimizar o seu impacto ambiental, a exemplo disto, tem-se o emprego do óleo residual nas misturas asfálticas, caracterizando-o como um “aditivo verde”.

Portugal (2016) estudou e verificou que o uso do óleo de soja, novo e residual, como aditivo em misturas asfálticas modificadas, variando de 1% a 3% em relação ao peso do ligante, auxilia na diminuição das temperaturas de usinagem e compactação sem que as propriedades reológicas dos ligantes modificados sejam comprometidas, comprovadas por meio da realização de ensaios de caracterização física e de reologia.

Segundo Costa et al. (2015), o emprego de polímeros como modificadores do ligante asfáltico é uma frequente prática comercial, sendo o polímero estireno-butadieno-estireno (SBS) o mais empregue para esta finalidade. A adição do SBS gera melhorias físicas, químicas e reológicas ao asfalto convencional, fornecendo a este características elásticas e alta resistência à oxidação. No entanto, a adição do SBS aumenta a viscosidade do ligante modificado, e conseqüentemente sua temperatura de trabalhabilidade.

É neste cenário que a introdução dos óleos vegetais ao asfalto modificado por polímero é um propício agente no mantimento de suas características elásticas e resistência à oxidação, além de reduzir sua viscosidade e conseguinte faixa de temperatura de usinagem e compactação das misturas asfálticas modificadas.

Portanto, esta pesquisa teve por objetivo estudar, por meio do desempenho mecânico, as misturas asfálticas modificadas com a adição de óleo de soja ao ligante modificado por polímero SBS em temperaturas inferiores as determinadas por meio do ensaio de viscosidade rotacional, sendo avaliada também a influência do processo de cozedura dos óleos nesse comportamento.

Espera-se que os resultados obtidos contribuam para o avanço do conhecimento sobre o processo de adição de óleos vegetais em ligantes asfálticos, além de promover práticas de engenharia sustentáveis a partir do uso de resíduos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho foi verificar a influência da diminuição em 10 e 20°C das temperaturas de usinagem e compactação, determinadas por meio do ensaio de viscosidade rotacional, das misturas asfálticas produzidas com ligante E 55/75 (SBS) e adição de óleo de soja, novo e residual, quanto às propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- estudar as propriedades mecânicas do ligante modificado (E 55/75) em adições de 1% e 2% para óleo de soja novo e residual respectivamente, usinado 10 e 20°C abaixo da temperatura ótima de usinagem sobre algumas propriedades do mesmo ligante usinado na temperatura ótima;

- verificar a influência dos óleos no comportamento mecânico das misturas asfálticas;
- analisar se o processo de cozedura dos óleos interfere no comportamento mecânico das misturas asfálticas.

1.2 Estrutura do Texto Deste Projeto de Pesquisa

O capítulo 1 apresenta as considerações iniciais deste projeto de pesquisa, indicando, sucintamente, o problema objeto de estudo e a alternativa para solução do problema levantado, bem como a exposição dos objetivos (geral e específicos) que se pretende atingir com o estudo e pelo presente tópico, que tem o intuito de mostrar a organização do trabalho.

No capítulo 2 compreende a fundamentação teórica, onde são abordados os assuntos mais relevantes ao desenvolvimento deste trabalho tais como: uma visão geral do sistema rodoviário, informações relevantes sobre os ligantes asfálticos, misturas asfálticas e informações à respeito do óleo de soja.

O Capítulo 3 é destinado à descrição dos materiais e equipamentos utilizados na pesquisa e o detalhamento dos procedimentos laboratoriais adotados para o desenvolvimento desta pesquisa, bem como apresentados os resultados da caracterização dos materiais e da dosagem SUPERPAVE realizada.

No Capítulo 4 são apresentadas os resultados obtidos no programa experimental e a análise deles.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões que foram obtidas neste trabalho, além de sugestões para pesquisas futuras.

No Capítulo 6 são apresentadas as referências bibliográficas empregadas neste projeto de pesquisa.

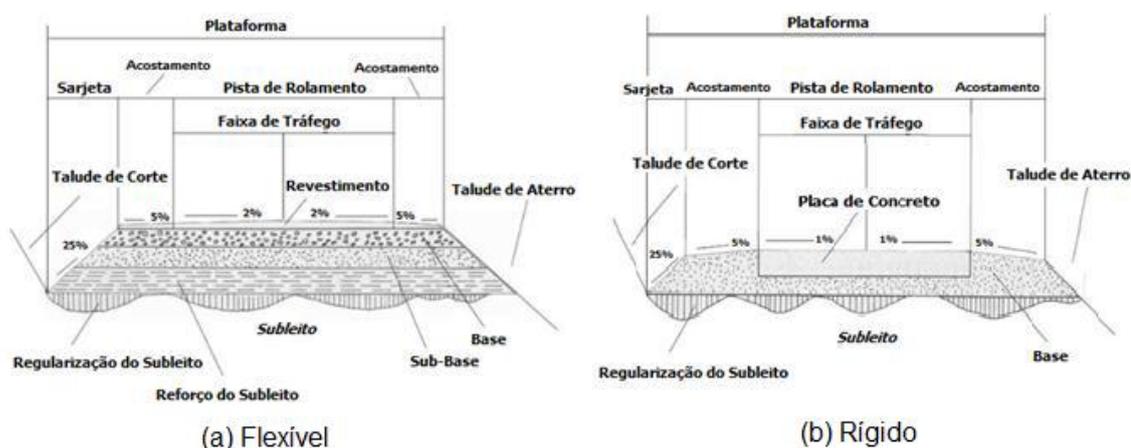
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Conceitos Básicos e Generalidades Sobre a Pavimentação

De acordo com Senço (1997) apud Pinto e Preussler (2001) geralmente os pavimentos rodoviários são classificados em dois tipos: flexível e rígido (Figura 1). Os pavimentos flexíveis (Figura 1- a) são definidos por apresentarem tipicamente a camada de revestimento com materiais asfálticos, que estão sujeitas a deformações elásticas e viscoelásticas sob o carregamento aplicado, de modo que as cargas são divididas em segmentos sensivelmente similares entre as camadas onde as deformações, até determinado ponto, não ocasionam o rompimento.

Bernucci et al. (2008) afirma que os pavimentos rígidos apresentam em sua constituição uma placa de Concreto de Cimento Portland (CCP) com desempenho simultâneo de revestimento e de base (Figura 1 - b). A placa tem espessura definida de acordo com a resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das subcamadas, esta apresenta pouca deformação e praticamente absorvem, quase que totalmente, as tensões advindas do carregamento aplicado pelo tráfego por apresentarem em relação às camadas inferiores ou às subcamadas uma maior rigidez

Figura 1 - Seção transversal típica de um pavimento: (a) Flexível e (b) Rígido (Menezes, 2003)



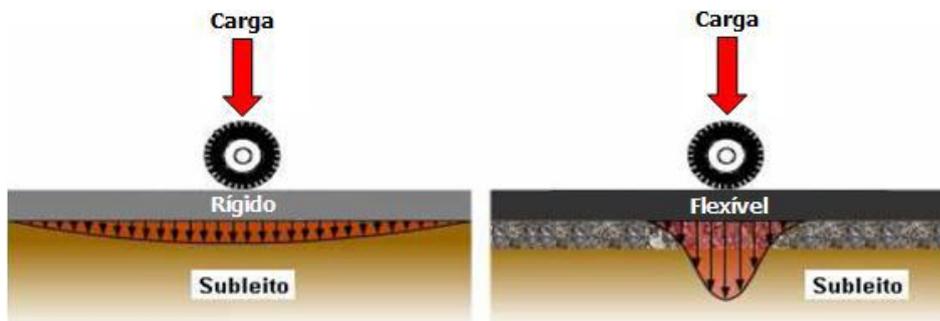
De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), no aspecto geométrico, o pavimento flexível é formado por: revestimento, base e sub-base. No que concerne a sua estrutura, este é formado por: revestimento, base, sub-base e reforço do

subleito, sendo este último assente sobre o subleito (Figura 1 - a). As especificações para o seu dimensionamento são fixadas em função das características técnicas e econômicas mínimas a serem obedecidas pelas diferentes camadas e, para cada uma destas características, escolhe-se a melhor solução técnico-econômica que melhor atendem as características pretendidas.

Os veículos provocam na superfície do pavimento cargas de caráter cíclico (repetitivas) e formam estados de tensões (verticais e horizontais) na estrutura que irão determinar o comportamento em campo de cada camada do pavimento. A forma como as cargas são transferidas para as subcamadas caracterizam a principal distinção entre os pavimentos rígidos e flexíveis.

Os pavimentos flexíveis transmitem as cargas para uma área menor do subleito requerendo material de melhor desempenho para a base devido ao fato de apresentarem de um número maior de camadas. Os pavimentos rígidos promovem a maior parte da capacidade de suporte estrutural devido ao elevado módulo de elasticidade do próprio CCP, transmitindo e distribuindo assim, as cargas sobre uma área consideravelmente grande do subleito (Figura 2).

Figura 2 - Aplicação e transferência de cargas nos pavimentos rígidos e flexíveis (Specht, 2010)



2.2 Panorama Rodoviário Brasileiro

Os meios de transporte são de fundamental importância para o desenvolvimento de um país, pois é por meio destes que há deslocamentos de bens, de serviços e de pessoas. Ao mencionar meios de transportes, podem-se citar: aéreo, fluvial, dutoviário, ferroviário, hidroviário e rodoviário.

No Brasil, em virtude dos poucos investimentos ferroviários e hidroviários, e do alto custo do transporte aéreo, a grande maioria das transferências de cargas e transporte de

pessoas são realizadas pelo meio rodoviário, vital para o bem-estar econômico e social da população, e com um papel fundamental no transporte de passageiros e cargas.

Em 1560 foi construída primeira estrada no Brasil, que ligava São Vicente a Piratininga. No estado de São Paulo, em meados de 1800, era iniciado o emprego de concreto em pavimentos nos trechos mais íngremes da “Estrada do Mar”. Em 1860, a Estrada de Rodagem União Indústria, que atualmente compõe parte da BR-040/RJ, foi a primeira a utilizar macadame como base de revestimento, substituindo as pedras importadas de Portugal (PILATI, 2008).

Foram fundamentais para a modernização do segmento rodoviário brasileiro e da pavimentação em revestimentos asfálticos: a criação do Fundo Rodoviário Nacional em 1946, a criação da Petrobras em 1953 e a construção da primeira fábrica de asfalto da Refinaria Presidente Bernardes da Petrobras. Possibilitando a concepção de grandes projetos rodoviários no setor de transportes e estradas, como a Rodovia Transamazônica e a Ponte Rio/Niterói entre os anos de 1960 e 1980 (PILATI, 2008).

Conforme o Plano Nacional de Viação (PNV) do DNIT, elaborado em 2010, foi possível constatar que o Brasil possui extensão total de 1.712.296,2 km de malha rodoviária, incluindo rodovias municipais, estaduais e federais. Desta quantia, 212.738 km correspondem a rodovias pavimentadas, 1.368.226,8 km correspondem a rodovias não pavimentadas e 131.331,4 km são referentes a rodovias planejadas.

Os ligantes asfálticos produzidos pelo refino do petróleo atendem satisfatoriamente à maioria das situações às quais os pavimentos são submetidos. No entanto, as rodovias brasileiras estão, em sua maioria, em péssimo estado de conservação, deixando a desejar em quesitos como segurança e conforto adequados aos usuários (PINHEIRO, 2004).

De acordo com a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2016), pavimentos deteriorados ou de pouca aplicação promovem o aumento nas despesas tanto nos custos de manutenção dos veículos como no aumento do consumo de combustíveis, além de propiciar o aumento no número de acidentes, dos índices de poluentes que são lançados na atmosfera e das perdas de safra devido ao aumento do tempo no transporte. Não apenas isso, a precária condição de uma infraestrutura rodoviária prejudica a integração produtiva, econômica e social comprometendo assim o desenvolvimento do país.

Estudos realizados pela CNT (2016) apontam que alguns fatores contribuem para a deterioração das rodovias brasileiras, como o próprio revestimento asfáltico, o crescimento da

frota circulante de veículos com maior capacidade de carga, o excesso de carga, a falta de manutenção, falta de drenagem adequada, materiais sem a qualidade desejada, geometria, má sinalização e execução, entre outros. Isto tem ocasionado o desgaste precoce dos pavimentos brasileiros.

A heterogeneidade dos ligantes asfálticos e a crescente aplicação de cargas nas rodovias instigam a refletir sobre como melhorar o desempenho mecânico das misturas asfálticas desenvolvidas no país. Devendo levar em consideração os danos causados pelas cargas solicitantes, pelo envelhecimento do ligante, e pelas ações do meio ambiente.

Atualmente, na procura por materiais com melhores características que minorem os efeitos das cargas solicitantes ou do envelhecimento do ligante, torna-se cada vez mais comum o emprego de ligantes asfálticos com adição de modificadores, tais como polímeros (SBR, SBS, EVA, etc.), óleos vegetais agentes rejuvenescedores, agentes melhoradores de adesividade, e também borracha de pneu moída.

Os ligantes asfálticos modificados possuem propriedades químicas, físicas, e mecânicas melhoradas em relação aos cimentos asfálticos convencionais, ocasionando o aumento da resistência ao aparecimento de defeitos e da durabilidade. Dentre os quais pode-se apresentar os asfaltos naturais, gilsonita ou asphaltita, mas especialmente polímeros de vários tipos que melhoram o comportamento do ligante (BERNUCCI et al; 2008).

Os processos de modificação comumente elevam a viscosidade dos ligantes asfálticos e, conseqüentemente das faixas de temperaturas de usinagem e de compactação destes materiais em relação às do material puro. Não obstante, o aumento da viscosidade depende da proporção e do tipo do modificador, bem como da interação entre o modificador e o ligante asfáltico de base na maior parte dos casos.

A indústria da pavimentação busca frequentemente maneiras de reduzir os impactos que são causados ao meio ambiente durante a usinagem do ligante asfáltico e aplicação da mistura, dado a alta emissões de gases poluentes e elevado consumo energético, fazendo uso das misturas asfálticas mornas em substituição as comumente utilizadas em pavimentos flexíveis.

2.3 Ligante Asfáltico

El Kowm Basin na Síria dispõe do registro mais antigo sobre a utilização do asfalto pelo homem, há cerca de 180.000 anos, em que o asfalto natural era utilizado para

aglutinar/unir utensílios à pedras e ferramentas para gerar faísca e, conseqüentemente, para controlar o fogo (LESUEUR, 2009).

Antigamente, o asfalto era muito usado como argamassa nas edificações e blocos de pavimento, calafetagem de navios e em aplicações como impermeabilizantes. No entanto, em Lyon, na França, no ano de 1829, ocorreu a primeira aplicação do asfalto na pavimentação por meio do uso de um mastique asfáltico para melhorar o estado de rodagem, sendo usado posteriormente, em 1838 nos Estados Unidos e em 1869 na Inglaterra. Apenas em 1909 que o asfalto passou a ser obtido a partir do petróleo (MANUAL DO ASFALTO, 1989).

O asfalto produzido nas refinarias de petróleo é denominado de ligante asfáltico ou Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), quando este possui a consistência necessária para a pavimentação.

Segundo Morilha (2004) os ligantes asfálticos são materiais aglutinantes e termoplásticos de natureza complexa e coloração escura, que quando submetidos à baixas temperaturas e/ou durante carregamento rápido podem se comportar como um sólido vítreo, ou se estiverem sob altas temperaturas ou ambiente e/ou ao carregamento lento podem desenvolver um comportamento elástico e viscoso, daí serem usualmente referidos como materiais viscoelásticos.

A utilização destes é dada pelos mais distintos motivos, como a alta capacidade de envolvimento dos agregados, agindo como um ligante que permite flexibilidade controlável, além de ser durável, impermeabilizante e resistente à ação da maioria dos ácidos, sais e álcalis, podendo ser utilizado aquecido ou emulsionado, em muitas combinações de esqueleto mineral, com utilização ou não de aditivos (BERNUCCI et al., 2002).

Os materiais ligantes possuem três grandes divisões:

- cimento Asfáltico Natural (asfalto natural): são depósitos formados pelo petróleo, oriundos de rochas asfálticas (xisto, lagos arenitos), na superfície da terra, que sofrem uma destilação natural pela ação do sol e do vento, que retiram os gases e óleos leves, deixando um resíduo que é o asfalto natural (GRECO, 2004). Porém, necessita ser misturado com Cimento Asfáltico de Petróleo para o uso em rodovias por ser um material muito duro (IBP, 1999; WAPA, 2004).
- asfáltico de Petróleo: são provenientes do petróleo e podem ser encontrados em três estados: sólido, semi-líquido e líquido. Este último pode ser dividido nos

asfaltos diluídos e nas emulsões asfálticas. Já o semi-líquido é conhecido como CAP;

- alcatrão: definição genérica de um produto que possui na sua composição hidrocarbonetos obtidos a partir da queima ou destilação do carvão, madeira etc. É produzido pela queima de material orgânico como madeira ou carvão. A maior parte dos alcatrões usados na pavimentação asfáltica são subprodutos oriundos da destilação destrutiva do carvão, que ao ser aquecido à 1000°C, gera o coque que origina o alcatrão bruto. O alcatrão fabricado pela combustão do carvão deve ser refinado, gerando assim, um líquido cujas propriedades físicas se assemelham às do cimento asfáltico, ao passo que possuem propriedades químicas muito distintas, visto que este possui inúmeros compostos carcinogênicos. Uma das utilizações remanescentes de alcatrão na pavimentação foi como selante, dada a insolubilidade deste material em relação a derivados do petróleo (DNIT, 2016; IBP, 1999).

2.3.1 Classificação dos Ligantes Asfálticos

Segundo o regulamento técnico da ANP (Agência Nacional de Petróleo), os ligantes asfálticos são comercializados usualmente em faixas padronizadas de consistência (tipos ou graus). Quanto à sua classificação, até 2005, os asfaltos eram classificados de duas maneiras: pela viscosidade, a uma temperatura de 60°C, resultando em três classes: CAP-7, CAP-20 e CAP-40; e/ou pela penetração, a uma temperatura de 25°C, resultando em quatro classes: CAP 30-45, CAP 50-60, CAP 85-100 e CAP 150-200 (ABNT MB-827).

Atualmente, os asfaltos são classificados pela penetração como: CAP 30-45, CAP 50-70, CAP 85-100 e CAP 150-200 (ASTM D5, 2005; ABNT NBR 6576, 2007). O “mais duro” (30-45) tem uma consistência que permite uma leve impressão do dedo polegar quando aplicado com força, enquanto o “mais mole” (150-200); com uma suave pressão do dedo deixa uma marca na superfície da amostra.

2.3.2 Constituição Química do Ligante Asfáltico

Estima-se que existam cerca de 1.500 tipos de petróleo explorados no mundo, que variam de líquidos viscosos e escuros até líquidos mais fluidos e claros, estes se distinguem em suas propriedades químicas e físicas, com composição química predominantemente

parafínica, naftênica ou aromática. No entanto, apenas uma ínfima parcela é julgada como apropriada para produzir asfalto (SHELL, 2003).

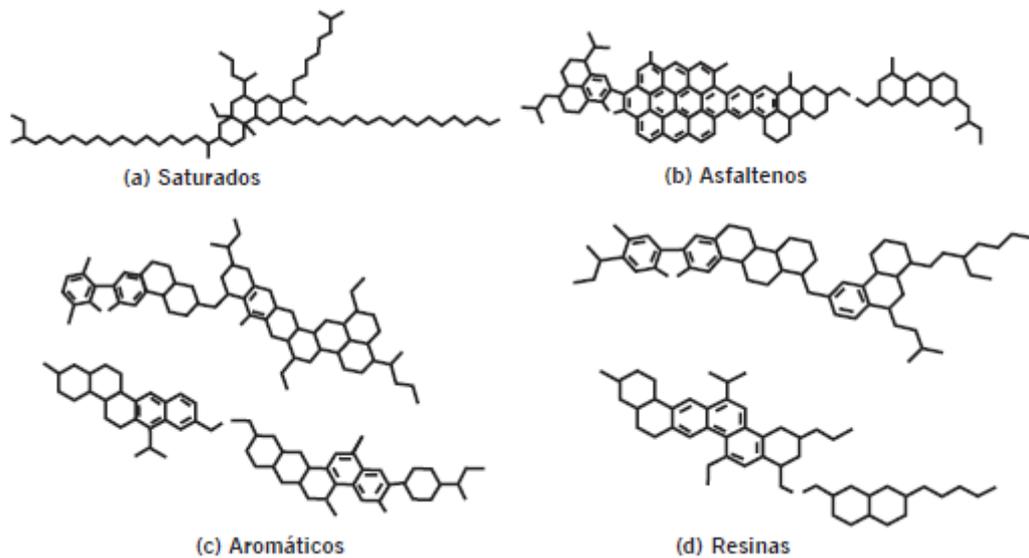
O asfalto, sendo uma mistura de grandes cadeias de hidrocarbonetos, possui como principais elementos na sua constituição o Carbono e o Hidrogênio correspondendo a, aproximadamente, 93% a 99% da sua constituição, dependendo do petróleo do qual é originado. Elementos como: Enxofre, Nitrogênio e Oxigênio, chamados de heteroátomos, depois do carbono e hidrogênio, são os mais presentes no asfalto. Os ligantes asfálticos de petróleos brasileiros têm baixo teor de enxofre e de metais e alto teor de nitrogênio, enquanto os procedentes de petróleos árabes e venezuelanos têm alto teor de enxofre. O desequilíbrio de cargas (polaridade) e a presença de grupos funcionais (funcionalidade) causados pelos heteroátomos têm grande contribuição nas características dos asfaltos (LEITE, 1999; PINHEIRO, 2004).

A composição química é imensamente complexa e interfere vigorosamente na eficiência física e mecânica das misturas asfálticas, no entanto, sua maior atuação está relacionada aos processos de inserção e interação com os agentes modificadores, como os polímeros e óleos.

A ciência da química do ligante asfáltico atual não é satisfatoriamente capaz de proporcionar a total compreensão das suas propriedades para a elucidação de todos os processos que ocorrem na pavimentação. Em tese, em termos de reologia, as propriedades mecânicas do ligante estão associadas com a estruturação intermolecular entre os componentes polares. Estas interações podem aparecer diante o envolvimento de qualquer um dos seus vários constituintes químicos. Portanto, existem diferenças significativas entre ligantes, e estas, por sua vez, são determinadas pela função do tipo de petróleo usado para produzi-los.

Assim, os componentes são geralmente separados em diferentes frações químicas, dependendo do seu tamanho e solubilidade em solventes polares, aromáticos ou não polares. O fracionamento químico mais empregado em Centros de Pesquisas na Europa e nos Estados Unidos separa o ligante asfáltico em compostos saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos (Figura 3) (MASSON e col., 2001). A identificação dos constituintes é realizada por cromatografia de camada fina com detecção por ionização de chama, conhecida por TLC-FID (LEITE, 1999; SHELL, 2003) e de acordo com Becker (2001) as propriedades do ligante asfáltico podem ser relacionadas com essas frações.

Figura 3 - Estruturas representativas das quatro frações betuminosas: saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos (Bernucci et al., 2007)



Estes compostos podem ser definidos, segundo Tissot e Weltre (1984) apud Antunes (2001), aproximadamente como:

- hidrocarbonetos saturados: formado por alcanos (parafínicos) que só possuem ligações simples entre os átomos de carbono e apresentam cadeias abertas normais e ramificadas. Possui a terminação "ano" (metano, etano, propano) em sua nomenclatura e representam a maior parte da constituição do gás natural e do petróleo; e cicloalcanos (naftênicos), que são compostos por cadeias cíclicas de ligações simples, não apresentam solubilidade em água, e influenciam negativamente a susceptibilidade térmica do asfalto.
- hidrocarbonetos aromáticos: são considerados os mais tóxicos dos hidrocarbonetos e são apresentam alta solubilidade em água, o que aumenta sua periculosidade para os organismos vivos, e apresentam influência positiva nas propriedades físicas do ligante. Os hidrocarbonetos aromáticos possuem em sua constituição um ou mais anéis benzênicos, em outras palavras, anéis que contêm seis átomos de carbono, incluindo moléculas de cicloalcanos aromáticos (naftênico-aromáticos), aromáticos puros, e benzotiofenos (compostos cíclicos contendo átomos de enxofre).
- resinas e asfaltenos: são compostos por parcelas policíclicas dos componentes do óleo cru, com átomos de Nitrogênio e Enxofre na sua maioria, apresentando alto peso

molecular. As resinas melhoraram a ductibilidade do asfalto, já os asfaltenos não apresentam solubilidade em alcanos leves (precipitam com n-hexano) e promovem o aumento da viscosidade, deixando os asfaltos mais resistentes as variações de temperatura. A pressão, temperatura e reações químicas, são fatores que podem desestabilizar a estrutura coloidal dos asfaltenos possibilitando a sua precipitação, que provoca danos e prejuízos à indústria do asfalto por causa do acúmulo destes nos equipamentos e tubulações que compõem processo de usinagem do ligante.

- hidrocarbonetos insaturados (Alquenos): apresentam átomos de carbono unidos por ligações covalentes duplas. Alquenos que possuem entre dois e quatro átomos de carbono são gases à temperatura ambiente, à medida que os que contém mais de cinco átomos são, em geral, líquidos. Mesmo que não estejam presentes no óleo bruto, os alquenos são formados em larga escala quando o óleo é craqueado. apresentam menos toxicidade que os aromáticos, porém mais que os alcanos.

Ao se levar em consideração a viabilidade econômica, é primordial para os usuários o aprimoramento de novas técnicas e especificações para descrever e gerar um comportamento reológico plausível e satisfatório rendimento mecânico da mistura asfáltica. A análise de custo-benefício sobre o fornecimento (de petróleo) provoca a problemática de uma larga variedade de materiais em contraste com a pouca chance de escolha dentre as opções disponíveis, ou seja, escolher de uma pequena amostra de óleos brutos para a produção do asfalto é técnica e economicamente inviável. Logo, é faz-se necessário o aprimoramento dos materiais que já são desenvolvidos para se alcançar um consistente funcionamento da mistura asfáltica.

Por isso, a relevância de estudos sobre a composição química de ligantes asfálticos está diretamente associada ao desenvolvimento da percepção de quais de seus constituintes são fundamentais para a produção de misturas asfálticas com as propriedades de estado, físicas e mecânicas mais adequadas à pavimentação, levando-se em consideração o custo de produção. Diante disso, estas informações podem ser utilizadas para a escolha e/ou modificações de ligantes que atendam as exigências do comportamento mecânico sob ação do tráfego de veículos e das situações do meio ambiente.

2.3.3 Sustentabilidade de Ligantes Asfálticos

Segundo Leite (2013), a melhor definição de sustentabilidade é a capacidade de haver interação entre o ser humano e o mundo, preservando o meio ambiente, sem comprometer os recursos naturais das gerações futuras.

As mudanças climáticas impõem avanços desafiadores à pavimentação asfáltica, em uma busca incessante pela sustentabilidade, que dão primazia a durabilidade e projetos de maior vida útil. Dessa forma, o uso de ligantes asfálticos modificados faz-se necessário para a melhoria de desempenho e atendimento de técnicas requeridas, e em resposta aos impactos gerados por estes, tem-se a incorporação de aditivos orgânicos, como por exemplo o óleo vegetal de cozinha.

A sustentabilidade pode ser atingida por meio da regulamentação e normalização de técnicas sustentáveis. Além disso, indicadores de sustentabilidade na pavimentação podem ajudar a tornar prioritários os projetos sustentáveis. Práticas sustentáveis tais como o emprego de rejeitos em camadas asfálticas ajudam na redução de passivos ambientais e o uso de misturas mornas surge como tecnologia importante para garantir a sustentabilidade.

Após o ano de 1997, depois de firmado o protocolo de Quioto, muitos países começaram a procurar soluções viáveis para diminuir os efeitos provocados pelas emissões de poluentes e gastos de energia. Quando os termos do protocolo de Quioto entraram em vigor em 2005, as indústrias de pavimentação começaram a desenvolver tecnologias para atender às exigências desse Protocolo.

Os países europeus foram os pioneiros com variados processos mecânicos e químicos para minimizar a resistência ao cisalhamento da mistura nas temperaturas de produção e compactação em pista. No entanto, todos os novos processos possuíam a mesma finalidade de diminuir custo e emissões de gases poluentes na atmosfera. Nesse contexto, surgiram as misturas asfálticas mornas, diminuindo a temperatura de produção e compactação, trazendo muitos benefícios, tanto para a saúde dos trabalhadores quanto econômicos e sem prejudicar a qualidade das misturas asfálticas.

Um estudo no Eurobitume (2012) apresentou que a refinaria francesa “Total S.A” verificou vantagens na utilização da mistura morna em relação à quente, como a redução na emissão em 77% de poeira no topo do caminhão que recebe a mistura do silo quente, redução em 38% de emissão de CO₂ na saída da chaminé da usina e redução em 31% do consumo e do

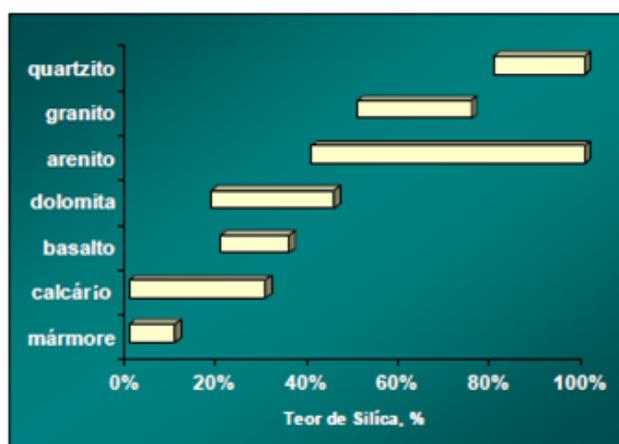
consequente gasto de energia para aquecimento dos agregados, constatando um enorme avanço para a sustentabilidade no segmento da pavimentação.

A queima de combustíveis fósseis emite Gases do Efeito Estufa (GEE), como o CO_2 , que contribuem para o aquecimento global. Leite (2013) define a “pegada de carbono” como a quantidade de dióxido de carbono (CO_2) produzida em cada processo que possa impactar o ambiente, a exemplo da utilização de combustíveis fósseis, como petróleo, carvão e gás. Em geral, uma população tecnologicamente avançada possui uma pegada maior de carbono, se comparada a uma população tecnologicamente subdesenvolvida. Tendo em vista o exposto, a diminuição na emissão de CO_2 na pavimentação de estradas com a utilização de misturas mornas contribui para a diminuição da “pegada de carbono” e sustentabilidade desse setor.

2.4 Agregados

O estudo realizado por Hanz et al. (2007) mostrou que as propriedades físicas e mineralógicas dos agregados fatores determinantes na adesão e no potencial ao dano por umidade das misturas asfálticas. As propriedades mineralógicas e as características das estruturas cristalinas dos agregados possibilitam os mesmos de serem classificados como ácidos ou básicos, conforme o teor de sílica (SiO_2) (Figura 4).

Figura 4 - Teor de sílica presente nos principais tipos de agregados utilizados em misturas asfálticas (Liberatori e Constantino, 2006)



Segundo Solaimanian et al. (2003) o ligante asfáltico possui como constituinte compostos de natureza ácida e básica sendo de natureza ácida a maioria destes. Em escala

molecular, os compostos ácidos e nitrogenados básicos são propícios a desenvolver maiores adsorções à superfície dos agregados em relação aos grupos nitrogenados não básicos e às cetonas. Foi estabelecido um ranking de alguns grupos funcionais em relação à afinidade de adsorções à superfície dos agregados: sulfóxidos > ácidos carboxílicos > compostos nitrogênicos não básicos \geq cetonas > compostos nitrogenados básicos > fenóis.

Liberatori e Constantino (2006) afirmam que, comumente, os agregados que possuem um alto teor de sílica dispõem de má adesividade com a maioria dos ligantes asfálticos ocasionada pela natureza ácida dos compostos polares que eles o compõem. Para os agregados alcalinos, adesividade irá depender sobretudo da acidez naftênica do ligante asfáltico, tal como o calcário.

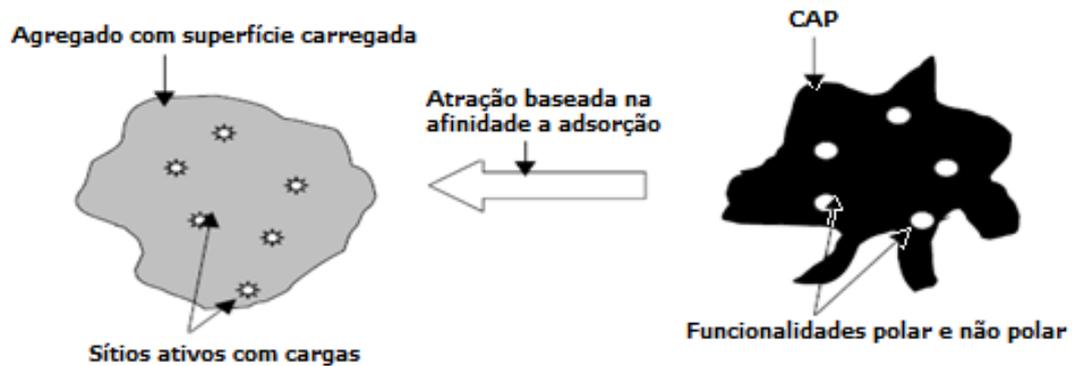
Os agregados hidrofílicos são aqueles que possuem alto teor de sílica e por isso uma maior afinidade com a água. Agregados de natureza básica são denominados de hidrofóbicos, possuem um desempenho superior frente ao efeito deletério da água nas misturas e baixa concentração de sílica (Quadro 1) (GOUVEIA et al., 2004).

Quadro 1 – Relação entre as propriedades mineralógicas do agregado com relação à resistência ao dano por umidade (Hanz et al., 2007)

Afinidade do Agregado com a Água	Definição	Composição	Teor de Sílica	Resistência ao Dano por Umidade
Hidrofílico	Possuem maior afinidade pela água	Ácido	Alto	Pobre
Hidrofóbico	Possuem maior afinidade pelo ligante asfáltico	Básico	Baixo	Boa

A composição de interações eletrostáticas é mais uma característica referente à adesão do ligante asfáltico à superfície do agregado. Segundo Liberatori e Constantino (2006) a intensidade destas interações eletrostáticas irá depender do par ligante asfáltico/agregado e a formação destas está associada à origem química dos materiais. Para Shah (2003) a heterogeneidade da superfície externa dos agregados são fatores que promovem nestes materiais a presença de sítios ativos os quais são constantemente carregados, ou ainda retenham cargas limitadas que conseguirão atrair e descolar constituintes do ligante asfáltico (Figura 5).

Figura 5 - Química do par ligante asfáltico/agregado (Shah, 2003)



As propriedades dos agregados influenciam intensamente a adesividade, inclusive de forma negativa, provocando a redução drástica desta. Tarrer e Wagh (1991) e Gouveia et al. (2004) em seu estudo, apresentaram uma inúmeros fatores que se relacionam com a interação química no par ligante asfáltico/agregados, tais como: características dos poros, textura superficial, formação química, origem dos agregados secos versus molhados, angularidade do agregado, coberturas adsorvidas nos agregados, desgaste da superfície do agregado por ação do intemperismo.

2.5 Ligante Asfáltico Modificado

O surgimento dos asfaltos modificados ocorreu devido ao crescimento do poder destrutivo do tráfego nas estradas aliado a crise que o petróleo enfrentou na década de 70. A necessidade de diminuir os custos de construção e de manutenção das rodovias motivou a pesquisa de soluções inovadoras, em particular para a conservação de capas de rolamento delgadas de alta durabilidade, tendo seu uso comercial se difundido nos anos 80 (AMARAL, 2000).

As primeiras aplicações em campo de asfaltos modificados foram iniciadas em 1901 na França, por meio da criação da Société du Pavage em Asphalt Coutchoute. Em 1902, na cidade de Cannes no sul da França, foi construída a primeira estrada construída com asfalto modificado por borracha. Antes da Segunda Guerra Mundial a modificação dos asfaltos era feita por meio da adição de borracha natural, devido ao seu baixo custo e disponibilidade do material acessível na época (AMARAL, 2000).

As técnicas utilizadas na pavimentação rodoviária para a aplicação de ligantes asfálticos é, em sua maioria, influenciado por observações no campo, em que muitas vezes os processos físico-químicos envolvidos são executados de forma negligente. Magalhães (2004) afirma que, para aumentar a resistência dos ligantes asfálticos de petróleo, é realizada a modificação destes por meio da adição de asfaltos naturais como gilsonita (EUA), asfaltita (Argentina), e asfalto de Trinidad ou ainda por adição de fileres (cal, cimento, sílica, etc.), fibras (fibra de vidro, fibras de celulose e fibras poliméricas).

Segundo Taira (2001) um asfalto modificado deve possuir algumas propriedades diferenciadas em relação ao asfalto convencional, tais como:

- aumento da coesão;
- aumento da adesão;
- diminuição da suscetibilidade térmica;
- aumento da resistência ao envelhecimento;
- aumento da elasticidade;
- melhoria das propriedades reológicas.

O programa SHRP (Strategic Highway Research Program), e as especificações resultantes do Superior Performing Asphalt Pavements, denominadas SUPERPAVE, foram desenvolvidos para controlar ou eliminar três tipos de falha em pavimentos: deformação permanente, trincamento por fadiga e trincamento térmico.

Os ensaios SUPERPAVE são realizados nos seguintes equipamentos:

- estufa RTFOT que simula o envelhecimento do ligante durante a produção e execução da mistura;
- vaso de pressão (PAV) que simula o envelhecimento durante a vida em serviço da mistura, viscosímetro rotacional;
- reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) usado para a caracterização do comportamento viscoso e elástico do ligante a temperatura elevada e intermediária;
- reômetro de fluência em viga (BBR) para medir a rigidez a baixa temperatura.

Os asfaltos modificados podem ser classificados em: Asfaltos Modificados por Agentes de Rejuvenescimento, por Produtos Naturais e por Polímeros.

Os agentes rejuvenescedores são empregados na reciclagem de revestimento afim de reduzir a viscosidade e de restituição dos compostos aromáticos do cimento envelhecido, resgatando assim, as propriedades químicas e físicas. Esses agentes são designados, segundo

o Regulamento técnico DNC nº 04/97, de aditivos asfálticos de reciclagem para mistura à quente (IBP, 1999).

Os asfaltos modificados por produtos naturais são elementos que recebem a adição de produtos naturais como fibras de biomassa, lodos, asfalto natural, enxofre e óleos ao cimento asfáltico de petróleo a fim de melhorar algumas das suas características mecânicas. (IBP, 1999). A grande acessibilidade que a adição de polímeros apresenta nas misturas asfálticas torna eles pouco difundidos na pavimentação, mas em contrapartida eles vem ganhando espaço com o passar dos anos, principalmente o acréscimo de óleos, devido aos seus benefícios tanto para a mistura asfáltica quanto para o meio ambiente.

Os asfaltos modificados por polímeros (AMP) são asfaltos cujas características sofreram modificações devido o uso de agentes químicos que alteram sua estrutura química e/o suas propriedades físicas e mecânicas. Os polímeros são produtos de origem orgânica, inorgânica ou sintética, de alto peso molecular, cuja estrutura molecular se caracteriza pela ligação através de reação química de pequenas unidades chamadas monômeros. Esta reação é nomeada polimerização e o tamanho final da molécula proveniente da reação com os polímeros é conhecida como macromolécula (AIPCR, 1999; BILLMEYER, 1984, apud MORILHA, 2004).

Existe uma imensidão de polímeros, cada qual com suas respectivas características, contudo apenas alguns apresentam propriedades interessantes na alteração de ligantes asfálticos. São os polímeros empregados nesta aplicação que concedem ao produto final (ligante modificado), em maior ou menor grau variando de acordo com o tipo de polímero, as características de restauração elástica, elevando ponto de amolecimento, aperfeiçoamento da suscetibilidade térmica, a adesão melhorada e principalmente coesão das misturas asfálticas e uma resistência superior ao desgaste com o passar do tempo.

Dentre os inúmeros polímeros aplicados na transformação de asfaltos os que mais se destacam são o SBS (eStireno- Butadieno-eStireno), EVA (poliEtileno-Vinil-Acetato), SBR (eStireno-Butadieno-Rubber).

A modificação dos ligantes asfálticos através do acréscimo de polímeros possibilita que, por meio da adição de doses pequenas ao ligante primário, é possível que se obtenha algumas propriedades distintas e essenciais (adaptação do DNER, 1998; ASPHALT ACADEMY, 2001; ZANZOTTO E KENNEPOHL, 1996, apud ODA, 2000), como por exemplo:

- menor suscetibilidade à variação da temperatura: a consistência do ligante asfáltico modificado tem uma resistência maior às alterações que podem ocorrer devido a variação de temperatura, podendo assim se trabalhar sob uma larga faixa de temperaturas. O ligante torna-se mais flexível em climas frios, que aumenta a resistência do revestimento à fissuração e ao trincamento. Já em climas quentes, resistência à deformação permanente do ligante é elevada, devido ao maior ponto de amolecimento e a maior viscosidade deste.
- maior resistência ao envelhecimento a curto prazo: o crescimento da viscosidade do ligante modificado reforça a espessura de película sobre o agregado, esta característica protege o revestimento do envelhecimento;
- maior resistência coesiva: os ligantes modificados apresentam uma maior capacidade de unir os agregados da mistura;
- maior poder de adesão: estes ligantes também aumentam a resistência da película de ligante ao desgaste da superfície do agregado, principalmente pela ação deletéria da água;
- a maior recuperação elástica do ligante modificado mantém a integridade do revestimento, mesmo quando sujeito a níveis elevados de deformação, ao contrário do comportamento puramente dúctil dos ligantes asfálticos convencionais;
- revestimentos com características de módulos elásticos dinâmicos que atendam as condições que são submetidos;
- inibição do pavimento a formação de trincas por fadiga;
- prolongamento da vida útil dos pavimentos.

Geralmente, os polímeros podem ser divididos em duas esferas: elastômeros e plastômeros. Os Elastômeros (SBS) têm como característica a alta resposta elástica e, desta forma, suportam a deformação permanente originada por alongamento e recuperação do seu aspecto inicial. Plastômeros (EVA) compõem uma consistente e rígida rede tridimensional para resistir à deformação. O copolímero de etileno e acetato de vinila, EVA, detém em sua composição uma quantidade de acetato com variação entre poucos por cento até cerca de 50%. Seus maiores benefícios são a invariabilidade térmica e a resistência à flexão, associadas a um custo comedido (LEITE, 1999). Os copolímeros em massa de estireno e butadieno, ou estireno e isopreno, SBS/SIS, dispõem de propriedades dos elastômeros termoplásticos escorrem livremente quando expostos à temperaturas elevadas e possuem boas características

tanto de resistência do mecanismo como de invulnerabilidade à temperatura ambiente (LEITE, 1999).

O SBR (copolímeros aleatório de estireno e butadieno) é outro polímero utilizado, este é obtido através do procedimento de polimerização de emulsão. A maneira de organização do SBR em emulsão, gera um polímero intimamente dividido em estado de látex, o que simplifica o seu espalhamento no ligante asfáltico. Há ainda outros modelos de polímeros, estes são pouco utilizados a exemplo do polietileno, etc.

O asfalto borracha ou ligante modificado por borracha de pneu processada, foi um meio alternativo de pavimentação que surgiu da necessidade de baratear a alteração do ligante asfáltico, devido ao fato dos polímeros habitualmente possuírem um alto custo, essa adaptação do orçamento se associou de forma positiva a eliminação dos pneus inaproveitáveis, segundo Specht & Ceratti (2003), seguem os seguintes benefícios técnicos e econômicos em relação aos ligantes tradicionais:

- permite a redução da espessura da camada asfáltica projetada;
- reduz o nível de ruído provocado pelo atrito pneu/pavimento;
- possui uma relação custo benefício vantajosa sobre os ligantes asfálticos convencionais, tendo em vista o baixo custo de manutenção ao longo dos anos;
- ideal para utilização em restauração sobre pavimentos com níveis de trincamento severos, devido a sua capacidade de retardar a reflexão destas trincas;
- possui grande elasticidade, ótima aderência e excelente resistência ao envelhecimento;
- além das características técnicas superiores em relação aos ligantes tradicionais ainda contempla o lado ecológico ao possibilitar uma destinação adequada aos pneus inservíveis.

2.6 Dosagem e Compactação da Mistura

A aplicação de misturas asfálticas deve ser precedida por ensaios laboratoriais que estimem o teor ideal de ligante asfáltico a ser usado, como forma de prevenir a rápida desagregação da mistura por falta de ligante asfáltico e/ou superfícies escorregadias e deformáveis pelo seu excesso.

Medir uma mistura asfáltica quer dizer determinar proporções de agregados e de ligante asfáltico, de acordo com Medeiros (2009) tais medidas devem atender aos critérios

normativos quando misturadas. A avaliação satisfatória do teor de ligante asfáltico em uma mescla com agregado é um trabalho elevadamente complicado, devido o seu valor estar ligado às características físicas, mecânicas e de estado da mistura compactada.

Em suma, o processo de dosagem é responsável por presumir um teor de asfalto baseado nos estudos das propriedades de condição da mistura asfáltica com uma estruturação pré definida (volumétrica), com base em corpos de prova compactados em temperaturas comedidas. Essas que serão empregadas durante o procedimento construtivo em campo.

Os processos de dosagem de misturas asfálticas podem ser motivados por inúmeros fatores, dentre eles as temperaturas de usinagem e compactação, a viscosidade do ligante, a quantidade do asfalto e a forma de compactação.

Foi observado em pesquisas relacionadas à dosagem das misturas asfálticas que a divergência de deformações entre as camadas na composição do pavimento podem ser relacionadas às fendas por fadiga, gerando assim um crescimento da rigidez da camada exterior do pavimento asfáltico, para que não ocorra o aumento do número de deformações definitivas causadas pelo aumento da vida fadigada.

A elevação da rigidez da camada exterior do asfalto é dada através da utilização de instrumentos capazes de suportar as tensões determinadas pelo tráfego sob inúmeros tipos diferenciados de carregamento com uma harmonia de alterações da composição do pavimento constituída por diferentes materiais. Desta maneira, deve-se utilizar uma combinação e proporção de agregados acessíveis economicamente (inclusive nas especificações pré-determinadas) com um teor de asfalto ideal com o intuito de obter a qualidade e adquirir as propriedades apropriadas para o projeto de misturas asfálticas.

A mistura deve conter as seguintes características:

- quantidade de asfalto suficiente para proporcionar um pavimento adequado com uma considerável vida útil;
- estabilidade mecânica que satisfaça o volume de tráfego sem distorções ou deslocamentos plásticos maiores que os limites estabelecidos;
- quantidade satisfatória de vazios na mistura compactada de maneira que permita a expansão do asfalto em concordância com a expansão dos agregados de acordo com a variação da temperatura;

- trabalhabilidade da mistura que admita a aplicação adequada desta sem divisão dos componentes;
- as camadas da estrutura do pavimento, em termos de deformações, precisam ter compatibilidade mecânica.

De acordo com Roberts et al, (1996) é recomendado que se execute simulações com a mistura asfáltica, compactando-a, para que se reproduza, da forma mais fielmente possível, as demandas impostas por diversos espécimes de carregamentos durante as fases de construção e de vida útil do pavimento. As propriedades que podem ser utilizados para contabilizar o teor de ligante asfáltico na mistura são as porcentagens de vazios, o tráfego e a vida útil da mistura.

Desta forma, os corpos de prova produzidos em laboratório denotam, de uma forma mais condizente com a realidade, as circunstâncias de campo melhorando assim o estudo do procedimento mecânico da mistura compactada e do valor aproximado do teor ótimo de “asfalto” em laboratório, fazendo relação com o desempenho do pavimento em campo.

Os métodos Hveem; Marshall; Triaxial d Smith e o método SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement) são os procedimentos mais conhecidos utilizados para estabelecer as relações dos ensaios executados em laboratório com os resultados apanhados em campo.

A primeira versão do método de misturas betuminosas, a “Marshall”, foi desenvolvida em 1939 por Bruce Marshall do Mississippi Highway Department (EUA). O desenvolvimento e a evolução do método Marshall foram norteados em duas variáveis, as quais na época, foram consideradas mais significativas para o bom desempenho da mistura asfáltica, são elas: o teor de asfalto e a densidade da mistura. Segundo White (1985) em campo o desempenho da mistura estaria relacionado ao teor ótimo de cimento de asfalto e a densidade da mistura. Porém, em laboratório a característica mais importante a selecionar seria a forma de compactação que reproduzisse a densidade induzida pelo tráfego e a escolha adequada das propriedades a serem “mensuradas” para estimativa do teor de cimento de asfalto que viesse a produzir um desempenho satisfatório em campo.

Nomeado de Superior Performing Asphalt Pavement System (SUPERPAVE), desde 1993, vem sendo utilizado pelas universidades e departamentos de estradas nos EUA. A dosagem SUPERPAVE foi realizada pelo método contido no Strategic Highway Research

Problem (SHRP) em substituição aos métodos de Hveem e Marshall. No qual a comum análise volumétrica destes dois métodos é base para o método SUPERPAVE. De acordo com Cavalcanti (2010) o SUPERPAVE se diferencia dos métodos Marshall e o Hveem pela forma de compactação, em que utiliza um compactador designado de giratório por meio da aplicação de energia por amassamento.

O método SUPERPAVE foi originado entre outubro de 1987 e março de 1993, onde o principal propósito é desenvolver especificações e elaborar novos instrumentos para ensaios em cimentos asfálticos e em misturas betuminosas a quente (HMA – Hot Mix Asphalt).

Neste método foram obtidas modificações no processo dos ensaios para estimar as características reológicas do ligante asfáltico, as propriedades de estado, físicas e mecânicas dos agregados graúdos e miúdos, a realização de compactação através de amassamento (SUPERPAVE Giratory Compactor - SGC) e os ensaios para averiguar o proceder mecânico de misturas asfálticas em laboratório.

Para Motta et al. (1996) os pesquisadores do programa SHRP tinham como meta encontrar um equipamento que compactasse a amostra de mistura asfáltica mais próxima da compactação em campo, de uma maneira que as “densidades” encontradas no final equivalessem àquelas alcançadas no pavimento sob reais circunstâncias de carregamento e temperatura, em que são avaliados amplas faixas de temperaturas do ligante asfáltico que visam simular as fases do processo de mistura, espalhamento e compactação, bem como esteja associada às temperaturas do pavimento ao longo da vida útil do trecho onde o mesmo será construído.

A metodologia SUPERPAVE consiste em alcançar o teor ótimo de ligante da mistura a partir da fixação de propriedades volumétricas e do conhecimento da granulometria dos agregados utilizados.. A premissa inicial do projeto de tais misturas é atingir o volume de vazios de 4%, verificando os parâmetros volumétricos pelo Rice Test (Figura 18), seguindo os procedimentos da norma ASTM 2041, à partir da fixação das proporções de agregados e da curva Fuller. Para isso, utilizando o compactador giratório Servopac (Figura 19), foram moldados corpos de prova no teor de ligante inicial de 4,5% estimado para a mistura, bem como em mais outros três teores de $\pm 0,5\%$ e $+ 1\%$ de ligante em relação ao teor inicial, com um número de giros igual a 100, determinando-se o teor ótimo de ligante igual a 4,87%. A Figura 20 esquematiza a dosagem SUPERPAVE descrita.

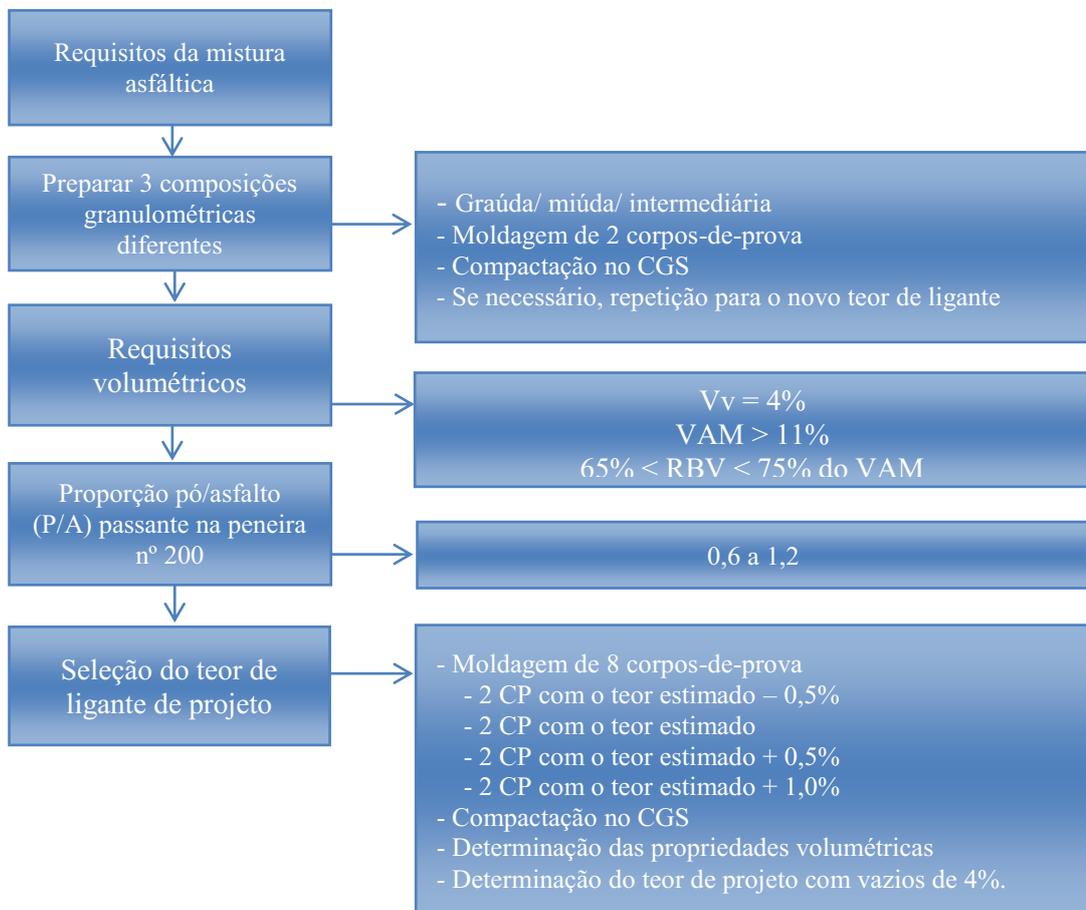
Figura 6 – Ensaio para encontrar os parâmetros volumétricos (Rice Test)



Figura 7 – Compactador Giratório Servopac utilizado na compactação SUPERPAVE



Figura 8 - Fluxograma para a dosagem Superpave (modificado de Sousa, 2017)



2.7 Temperaturas de Usinagem e de Compactação da Mistura

A inserção dos ligantes asfálticos modificados na pavimentação conferiu a construtores e pesquisadores o desafio de determinar temperaturas apropriadas para as operações de usinagem e de compactação das misturas asfálticas, que considerem as peculiaridades desses novos instrumentos, em especial a alta viscosidade presente mesmo a temperaturas muito elevadas, conforme a adição de determinados modificadores (BAHIA et al., 1998).

As temperaturas de usinagem e de compactação para ligantes asfálticos modificados têm sido determinadas com base nas regras empíricas: o DNIT recomenda temperatura de $150^{\circ}\text{C} + 3^{\circ}\text{C}$ por percentual de polímero, por exemplo. No entanto, ligantes asfálticos com alto índice de modificação apresentam comportamento semissólido, mesmo a temperaturas altas, e o simples aumento das temperaturas nem sempre é suficiente para melhorar a trabalhabilidade das misturas asfálticas.

O resultado dessa incompatibilidade entre os limites tradicionais especificados para a viscosidade e o comportamento diferenciado dos ligantes asfálticos modificados é o uso de temperaturas extremamente elevadas (BAHIA et al., 1998b), o que desperta dúvidas acerca da sua adequabilidade, pois o aquecimento excessivo pode comprometer o ligante asfáltico, além de implicar num aumento do consumo de energia, contribuindo para o aumento do custo do produto final, e de provocar o aumento das emissões de gases prejudiciais ao meio ambiente (KATRI et al., 2001).

São três as alternativas que poderiam ser empregadas para alcançar o nível de compactação adequado de uma mistura asfáltica: aumentar as temperaturas de processamento, aumentar o esforço de compactação e aumentar o teor de ligante asfáltico (KATRI et al., 2001). Com o aumento do uso de ligantes asfálticos modificados e com o uso crescente de novas composições granulométricas, passou a ser fundamental entender como a viscosidade pode afetar o grau de compactação da mistura asfáltica e quais níveis de compactação são de fato necessários para evitar a compactação extra ou a adição de teores mais altos de ligante asfáltico.

Ao estudar o volume de vazios de misturas asfálticas preparadas no compactador giratório SUPERPAVE e a viscosidade de ligantes asfálticos padronizados e modificados, Bahia et al. (2001) e Katri et al. (2001) é notado que as misturas compostas com ligantes

asfálticos alterados possuíam volumes de vazios maiores do que as compostas com ligantes asfálticos convencionais, para a viscosidade medida a 6,8 s⁻¹ (20 RPM com “spindle” 27).

Ao comparar esta viscosidade e a viscosidade medida no viscosímetro Brookfield a 6,8 s⁻¹ e o volume de vazios obtido de misturas compactadas com o mesmo número de giros no compactador giratório, verificou-se que, para um mesmo valor de viscosidade, volumes de vazios diferentes são obtidos, dependendo do tipo de ligante asfáltico (KATRI et al., 2001). Embora as misturas tenham sido compactadas em temperaturas de equiviscosidade, a densidade obtida é dependente do tipo de ligante asfáltico.

Katri et al. (2001) concluiu então que, a variabilidade do volume de vazios é mais bem explicada pela viscosidade medida a baixas taxas, por meio das correlações entre valores de viscosidade medidos a diversas taxas de cisalhamento e o volume de vazios das misturas asfálticas. E que ao se empregar a viscosidade a baixas taxas, é possível tornar a determinação das temperaturas de processamento de misturas asfálticas independente do tipo de ligante asfáltico.

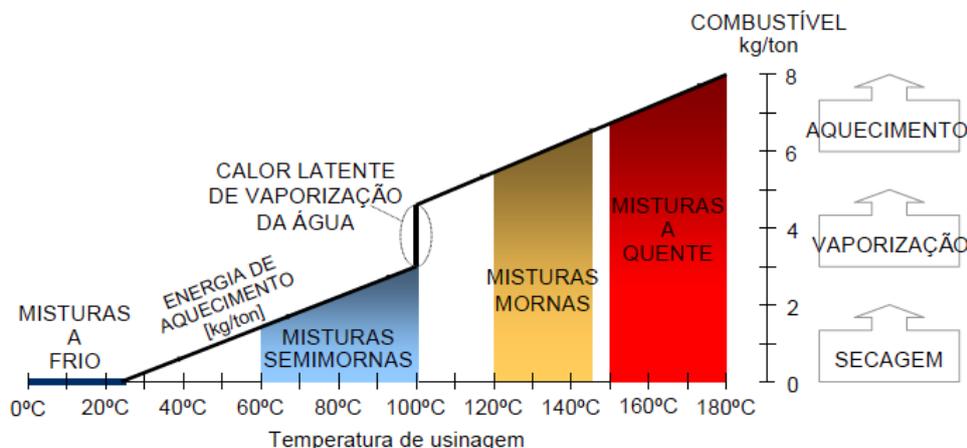
2.8 Misturas Asfálticas Mornas ou Warm Mix Asphalt

A decorrência da fusão do ligante com o agregado em proporções adequadas previamente obtidas em ensaios laboratoriais gera as misturas asfálticas. As mesmas, preparadas em usinas ou na própria pista podem ser usinadas à quente ou a frio.

As misturas asfálticas podem ser categorizadas em: frias, semi-mornas, mornas e misturas à quente. Quando a mistura é aquecida à temperatura de 10° a 15° acima da temperatura do ligante é qualificado como mistura à quente, com a ressalva de não ultrapassar 177°C (BERNUCCI et al., 2010). As misturas mornas são aquelas em que seu apresto está acima de 100°C, enquanto que misturas produzidas abaixo de 100°C são classificadas como semi-mornas. No geral, esse tipo de mistura deve ser confeccionado em temperatura inferior as misturas à quente (MOTTA, 2011).

As misturas a frio são produzidas com a adição de emulsão asfáltica, em temperatura ambiente e com a ausência de agregado pétreo (BERNUCCI et al., 2010). Vários pesquisadores do assunto revelam que em vias que possuem volume de tráfego pequeno a moderado tendem a usar mais esse tipo de tráfego (ASPHALT INSTITUTE, 2007). A Figura 6 apresenta um esquema ilustrativo da classificação das misturas em função das temperaturas de produção.

Figura 9 - Classificação das misturas asfálticas em função da temperatura usinagem (Motta, 2011)



As misturas à quente podem ser diferenciadas de acordo com os requisitos mecânicos e com o parâmetro granulométrico. O concreto asfáltico (CA) que é conhecido como concreto betuminoso usinado à quente (CBUQ) é um dos que são mais utilizados no Brasil. O mesmo é junção de agregados de diferentes tamanhos e cimento asfáltico, abrasado em temperaturas analisadas antecipadamente, com base nas características viscosidade-temperatura do ligante (BERNUCCI et al., 2010).

As misturas consideradas asfálticas à quente podem ser ramificadas em três:

- a) pela graduação dos agregados filer, grãos e miúdos: de forma a proporcionar um esqueleto mineral com poucos vazios a graduação densa possui uma curva granulométrica contínua e bem-graduada (CBUQ);
- b) insuficiência de material fino (camada porosa de atrito, CPA) com agregados de tamanhos parecidos são apontados de graduação aberta que possuem curva granulométrica uniforme;
- c) curva granulométrica com grãos de dimensões intermediárias (gap-graded) estão em quantidade inferior comparado com grãos de dimensões maiores, possuindo graduação descontínua.

O controle da temperatura é de suma importância, visto que, as faixas máximas e mínimas necessitam ser respeitadas. Para isso, são empregados na hora da execução controle tecnológico dos materiais, resultando o alcance do desempenho desejado.

A temperatura e a viscosidade possuem forte ligação. Se a viscosidade é alta, existe uma dificuldade na movimentação dos agregados na rolagem do rolo compressor. Se a viscosidade é baixa os agregados facilmente se movem, não possuindo aderência suficiente depois da compactação. Temperaturas muito altas induzem a aceleração do envelhecimento e a queima da mistura, em contrapartida temperaturas baixas não atingem a viscosidade correta para sua produção (PORTUGAL,2016).

Segundo Rubio et al. (2012) trabalhar com misturas asfálticas à quente causam impacto ambiental negativo colaborando com o aquecimento global, posto que produzem emissão de gases de efeito estufa, assim como substâncias químicas poluentes que prejudicam a qualidade do ar.

Este acontecimento, juntamente com o crescimento da preocupação mundial com os problemas causados pela poluição, como ainda a inevitabilidade de um desenvolvimento sustentável e uma eficiência energética maior no âmbito da pavimentação, novas alternativas são incentivadas, como o uso de produtos de origem vegetal, e o estudo aprofundado de ligantes asfálticos usinados em temperaturas menores das usadas convencionalmente, com a intenção de diminuir a emissão de poluição, diminuindo as toxicidades dos processos, principalmente aqueles derivados do petróleo (CAPITÃO et al, 2012).

Por causa desses fatores, nos últimos dez anos, foi iniciada uma pesquisa de Misturas Asfálticas Mornas ou Warm Mix Asphalt (WMA), onde são feitas em temperaturas menores que as usuais e carecem de durabilidade, resistência e desempenho iguais às misturas asfálticas quentes. As mesmas diminuem o dispêndio com combustível e reduzem as emissões de gases poluentes e a exposição aos fumos daqueles que trabalham durante a usinagem ou aplicação da mistura.

As misturas asfálticas mornas foram concebidas na Europa, no ano de 1997, com a função de conciliar aos procedimentos utilizados pela indústria da pavimentação às premissas do Protocolo de Kyoto. Em 2002 foi organizada uma comissão pela National Asphalt Pavement Association dos EUA (NAPA) para analisar os progressos adquiridos com essa tecnologia na Europa. Posteriormente, em 2007, realizou-se novamente este estudo, para coligir informações adicionais sobre as tecnologias WMA na Europa por engenheiros norte-americanos.

A tecnologia WMA, em comparação com outras tecnologias, é ecologicamente menos colérica, particularmente as misturas à quente (KOENDERS et al, 2000).

Apesar de trazer benefícios ecológicos, ocorre apreensão de que a diminuição da temperatura de produção pode colaborar para a deficiência da evaporação da água contida nos agregados, aumentando o potencial ao dano na mistura por umidade retida, fomentando uma lacuna na união entre o agregado e o ligante (ASCHENBRENER et al., 2011; SEBAALY et al., 2012).

Aschenbrener et al. (2011), discursam sobre o estudo realizado no National Center for Asphalt Technology (NCAT) e a última conclusão desse órgão é que devido a suscetibilidade ao dano por umidade retida no agregado, as misturas asfálticas mornas tendem a reduzir suavemente a resistência a tração indireta. Os próprios referem que para seguir-se em um ligante menos rígido é necessário a redução da temperatura, posto que, a oxidação é inferior, tendo como benefício uma mistura com menor rigidez melhorando a resistência à fadiga, ampliando a longevidade do projeto. Em contrapartida, pode promover menor resistência à tração direta e resistência à formação de trilha de roda.

Em inúmeros fatores as particularidades das misturas mornas são vulneráveis, como o uso de tipos distintos de aditivos, que muda suas propriedades mecânicas, e também, a alteração a resistência a danos causados pela umidade devido a temperatura para a secagem do agregado (AUSTROADS, 2012).

De acordo com a mesma pesquisa, o desempenho e a durabilidade a longo prazo do pavimento é influenciada pela alternância de temperaturas na mistura do ligante asfáltico.

Ínfimos produtos e processos possuem eficácia de diminuir a temperatura na qual o asfalto quente é misturado, sem danificar o desempenho estrutural dos pavimentos. As produções com estes novos produtos podem ser reduzidas em 40%. Minorar a temperatura de mistura na usina simboliza, entre outras coisas, a economia de custos com combustíveis ao contratante. Apurou-se que uma geração de redução de 30% no consumo de energia combustível é consequência da diminuição de temperatura de usinagem (OTTO, 2009).

Prowell e Hurley (2007) afirma que aditivos químicos comumente são usados para a fabricação de misturas asfálticas em temperaturas inferiores que as usadas convencionalmente. Estes são adicionados na mistura ou no ligante e/ou faz-se uma modificação do processamento da usinagem para a produção de asfalto espumado com água, todavia, essa modificação no processo de usinagem acarreta em um desembolso para a obra.

Benefícios importantes podem ser gerados através da redução de temperatura com as misturas mornas, tais como:

- redução da emissão de poluentes atmosféricos: Segundo Prowell e Hurley (2007) quando se diminui a temperatura, conseqüentemente existem menos quantidades de poluentes gerados e lançados para o ar, visto que diminui fumos e vapores de asfalto durante a execução no campo e na mistura da usina, como também, a quantidade de combustível usada é menor, diminuindo o consumo da queima. Dentro deste contexto, Olard (2008) afirma que a iniciativa de se diminuir as emissões de poluentes vai, cada vez mais, ao encontro de metas que visem a sustentabilidade do processo, podendo inclusive ser inserida em projetos para a obtenção de créditos de carbono, e a venda destes passaria ser um atrativo competitivo para as misturas mornas;
- melhoria do ambiente de trabalho na pavimentação: Um contato menos frequente por partes daqueles que manuseiam com pavimentação é de suma importância, posto que, produtos asfálticos submetidos a grandes temperaturas, dissipam elementos suspeitos de serem carcinogênicos e/ou mutagênicos. Quando se trabalha com misturas mornas, os operários ficam expostos a menores emissões asfálticas, um fator positivo para a saúde. Além de que um fator que prejudica o ambiente de trabalho é a dissipação de odores provenientes da elevada temperatura (quanto maior a temperatura, maior a quantidade de odores dissipados). É visto que com a aplicação do WMA, os operários passam a ter um ambiente de trabalho com melhor qualidade, pois as temperaturas são mais aprazíveis e com menores odores, contribuindo um aumento na segurança e na produção dos mesmos à exposição às altas temperaturas (NEWCOMB, 2006; PROWELL e HURLEY, 2007);
- retração do consumo energético: O aquecimento das misturas asfálticas é uma técnica altamente vinculada com combustíveis fósseis ou de energia elétrica. O uso de misturas mornas, que possuem temperaturas mais baixas de execução em comparativo com as misturas quentes, diminuem a quantidade de combustível necessário no processo de usinagem em cotejo com as misturas quentes, demonstrando ser uma forte aliada na busca da eficiência energética desses processos (NEWCOMB, 2006; PROWELL e HURLEY, 2007);
- menor envelhecimento do asfalto: O envelhecimento do ligante decorre em maior parte na etapa da usinagem (BERNUCCI et al., 2008), temperaturas acima de 150°C sujeitam o ligante ao envelhecimento precoce com a exposição ao ar e a perdas de voláteis, além da possibilidade de causar alterações reológicas levando ao aumento da

rigidez do pavimento. Sendo assim, a retração da temperatura nesta fase, pode levar a uma diminuição na oxidação do asfalto, gerando um amingramento no enrijecimento do ligante, deixando-o mais resistente e flexível a trincas por fadiga em vida de serviço e ampliando a durabilidade a longo prazo do pavimento (NEWCOMB, 2006; PROWELL e HURLEY, 2007);

- utilização de elevadas quantidades de material fresado: Devido à questão da temperatura em misturas asfálticas, a quantidade de material fresado em misturas recicladas comumente é restrito (até cerca de 25%), o uso de misturas mornas pode beneficiar o acréscimo de material fresado em maiores percentuais, com o intuito de se reciclar pavimentos, impactando diretamente no meio ambiente, como também reduzindo o emprego de novos materiais, causando efeito nos custos da produção do pavimento (OLARD, 2008; PROWELL e HURLEY, 2007);
- menos complexidade de aplicação em locais ou épocas de clima muito frio e maior habilidade de transporte por longas distâncias: De acordo com Motta (2011), misturas quentes só podem ser transportadas, fabricadas e aplicadas em temperaturas ambiente maiores que 10°C, visto que amplas variações de temperatura prejudicam a compactação do pavimento, segundo especificações do DNIT, DER-SP. Com isso, o uso de misturas mornas pode ser oportuno em situações que demandam uma estocagem e transporte mais prolongados ou há grande apreensão com a queda considerável de temperatura da mistura, determinando dificuldades de compactação e perda do material, posto que, a diferença da temperatura asfáltica e do meio ambiente é dada pela taxa de resfriamento. Neste caso, a mistura feita em temperatura menor esfria sob uma taxa menor, garantindo um menor gradiente térmico que uma mistura mais quente (NEWCOMB, 2006; PROWELL e HURLEY, 2007). Experiências na Alemanha revelaram que melhor densidade do que a quente de referência, com o equivalente número e até menos passagens do rolo compactador, em diferentes tecnologias de misturas mornas na pavimentação e sob temperatura ambiente entre -3° e 4° C (D'ANGELO et al., 2008).

Ainda que se evidenciem os aspectos positivos para o emprego de misturas asfálticas mornas, elas podem exibir características vulneráveis a diversos fatores, como: utilização de diferentes tipos de aditivos, que pode comprometer as propriedades mecânicas da mistura morna e; resistência a danos causados por umidade, que pode ser afetada pela temperatura

para a secagem do agregado. A longevidade e o desempenho podem ser instigados negativamente pela alternância de temperaturas na mistura do ligante asfáltico em futuro distante; a espuma asfáltica, a depender das modificações e especificações que são praticadas pela usina de asfalto, pode colaborar para o aumento no custo da obra (AUSTROADS, 2012).

A diminuição da temperatura para a fabricação das misturas mornas amplia a tendência de afundamento de adesividade e trilha de roda, segundo estudos do National Center for Asphalt Technology (NCAT,2007). Este fato se sucede porque os agregados não são completamente secos. O uso de agregados completamente secos e melhoradores de adesividade podem mitigar essas desvantagens.

A Federal Highway Administration (FHWA), agência do departamento de transportes dos Estados Unidos estimou que em 2010, 10% dos 358 milhões de toneladas de mistura asfáltica aplicadas corresponderiam a misturas mornas (HARRINGAN, 2012) e que para os próximos cinco anos estimava-se um acréscimo de 50% (SABITA, 2011) ou mais técnicas de misturas mornas estarão disponíveis no mercado como derivados de processos orgânicos, químicos (aditivos químicos) e processos como espumejo do asfalto (HARRINGAN, 2012).

De acordo com Lee et al. (2012), dado o rápido crescimento do uso desta tecnologia para a construção de estradas ao redor do mundo, uma série de tecnologias WMA têm sido desenvolvidas e sendo implementada sem comprometer, a curto prazo, o desempenho do pavimento. Os autores utilizaram um aditivo orgânico para reduzir a temperatura. A adição deste não promoveu alterações, significativas, em termos de volumetria e desempenho nos pavimentos.

Sargand et al. (2012) conduziram uma pesquisa com misturas mornas em Ohio (EUA). Os autores realizaram ensaios em laboratório e monitoramento, em campo, de pavimentos construídos com esta tecnologia. Os autores obtiveram as temperaturas máximas de compactação das misturas mornas de 13°C menores do que as tradicionais, além de reduzirem em pelo menos 50% de compostos orgânicos voláteis, 60% de monóxido de carbono, 20% de óxidos de nitrogênio, e 83% do dióxido de enxofre. Os resultados mecânicos foram satisfatórios pois as misturas mornas apresentaram maior densidade e maior resistência a tração quando comparada a tradicional.

Punith et al. (2013) estudaram a utilização de misturas mornas com agregados reciclados. A pesquisa envolveu ensaios de perda de peso, resistência à tração indireta (ITS), Ensaio de Lottman, porcentagem de perda dureza, trilha de roda e vida de fadiga. Os

resultados indicaram que embora as misturas mornas tenham apresentado melhor vida de fadiga, resistência ao envelhecimento e perda de peso em relação as que não usaram a tecnologia, as primeiras apresentarem maior susceptibilidade à presença de água.

2.8.1 Técnicas Existentes na Produção de Misturas Asfálticas Mornas

Atualmente, existem diversos produtos disponíveis no mercado, para a produção das misturas asfálticas mornas, que derivam de tipos de tecnologias diferentes. Cheng, Hicks e Teesdale (2011) apontam que a escolha do aditivo para a mistura asfáltica morna depende de diversos fatores, tais como: quantas toneladas de mistura serão produzidas e qual o custo do aditivo, pois alguns produtos possuem custo inicial elevado. Os mesmos autores afirmam que outra consideração é sobre qual a redução de temperatura esperada no projeto, uma vez que alguns processos reduzem mais a temperatura que outros.

Existem inúmeros aditivos no mercado e dependendo de qual for selecionado, pode haver ou não a precisão de transformações/adaptações na usina de asfalto. Estes fatores são expostos neste item. Os tipos de aditivos existentes no mercado atual são:

a) Aditivos orgânicos

Os aditivos orgânicos (ceras) estão entre os pioneiros tipos de aditivo para mistura asfáltica morna desenvolvida na Europa (BONAQUIST, 2011). Rubio et al. (2012) afirma que quando a temperatura do ligante encontra-se acima do ponto de amolecimento da cera, habitualmente a viscosidade diminui e, quando a mistura resfria, este aditivo se torna sólido, em formato de partículas microscópicas e repartidas uniformemente, o que aumenta a rigidez do ligante da mesma forma que aconteceria com a adição de fibras.

A escolha do aditivo orgânico deve ser feita minuciosamente, averiguando o ponto de amolecimento do aditivo e a temperatura de produção da mistura asfáltica, tanto para que não ocorra deformação permanente quanto para diminuir o potencial de trincamento térmico (PROWELL; HURLEY, 2007). Os padrões de ceras podem se distinguir entre Fischer-Tropsch, cera de amida ácida e cera tipo Montan ou cera de linhita.

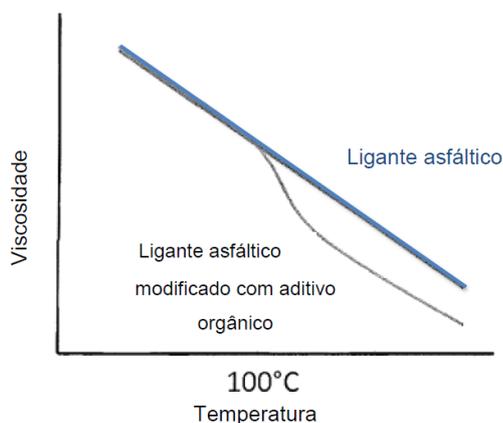
Entre alguns aditivos encontrados no mercado pode-se citar o Sasobit, produzido pela Sasol, CCBIT 113AD, realizado pela Dr. H Technologies e o Asphaltan-B, preparado pela Romonta GmbH. O Sasobit é uma cera sintética produzida a partir de gaseificação de carvão e exige pouca modificação na usina; o aditivo pode ser inserido diretamente no ligante ou na mistura (D'ANGELO et al., 2008). A substância possui ponto de amolecimento de

aproximadamente 100°C e é completamente solúvel em ligante asfáltico sob temperatura superior a 140°C (ANDERSON et al., 2008).

Estudos mostram que as ceras Fischer Tropsch, que são originárias da sintetização de hidrocarbonos e outros compostos asfálticos da síntese do gás carbono (RUBIO et al., 2012), detém boa oxidação e estabilidade ao envelhecimento (HURLEY; PROWELL, 2005).

A Figura 7 mostra o comportamento do ligante asfáltico e do ligante asfáltico modificado com aditivo orgânico. O ligante modificado com aditivo orgânico, com temperaturas maiores tem viscosidade menor se comparada com o ligante convencional.

Figura 10 - Comportamento da viscosidade do ligante modificado com aditivo orgânico com a variação da temperatura (ANDERSON et al., 2008)



b) Agentes surfactantes

Segundo Rubio et al. (2012) as misturas asfálticas que compõem este agente não dependem de espuma ou redução de viscosidade para que se diminuam as temperaturas de produção e compactação e em geral são formadas pela combinação de emulsificantes, surfactantes, polímeros e aditivos que auxiliam na melhor cobertura do agregado pelo ligante. Este tipo de aditivo ajuda melhorando a trabalhabilidade da mistura e compactação como também promove melhor adesividade (possuem agentes antidescolamento).

Segundo o relatório da Austroads (2012), os agentes surfactantes não interferem na viscosidade do ligante e sim age como agentes tenso ativos ou surfactantes para regular e reduzir forças de atrito na interface microscópica dos agregados e o ligante, em intervalos de temperatura entre 85°C a 140°C.

O primeiro agente surfactante desenvolvido na Europa e Estados Unidos foi o Evotherm® desenvolvido pela MeadWestvaco em 2005 e em 2007, foi introduzido nos Estados Unidos o Rediset WMX, produzido pela AzkoNobel (BONAQUIST, 2011).

Atualmente, existem diversos produtos desta tecnologia no mercado de pavimentação. O aditivo pode ser inserido na mistura asfáltica durante a usinagem ou adicionado ao tanque contendo ligante asfáltico, dependendo do tipo de aditivo utilizado (AUSTROADS, 2012).

c) Aditivos mistos – orgânicos, com agente surfactante;

Nesta categoria estão aqueles aditivos que adicionam parte química e orgânica ao ligante asfáltico (AUSTROADS, 2012). Os autores afirmam que a parte química adicionada ao ligante, por exemplo, o enxofre, melhora o desempenho do ligante asfáltico, enquanto a parte orgânica diminui a viscosidade do ligante na temperatura de compactação, melhorando a trabalhabilidade da amostra.

Um tipo de aditivo disponível é Shell Thiopave®, fabricado pela Shell, que combina aditivos plastificantes e outros tipos, necessita de pouca modificação e utiliza-se geralmente 25% deste aditivo por quilo de ligante asfáltico. O TLA-X, fabricado pela Trinibad and Tobago Ltd. consiste em pelotas com aditivo responsável pelo enrijecimento do ligante asfáltico (AUSTROADS, 2012).

d) Espuma de asfalto (espumejo de asfalto)

Tecnologia que envolve a adição uma pequena quantidade de água no asfalto quente, adição de material hidrófilo como as zeólitas ou agregado úmido (PROWELL; HURLEY, 2007). Tipicamente é adicionado 0,25% de zeólita sintética por peso de mistura asfáltica (BONAQUIST, 2011). Este tipo de tecnologia requer adaptações significativas na usina de asfalto e o projeto de mistura asfáltica precisa ser revisado para incluir injeção de água e etapas de ação da espuma de asfalto até chegar à meia vida (PERKINS, 2009).

Clark e Rorrer (2011), na implantação da mistura asfáltica morna na Virgínia concluíram que para a utilização da tecnologia de espuma de asfalto, há necessidade de iniciar a produção da usina na temperatura da mistura convencional a quente e quando a produção e a temperatura estiverem estabilizada, pode-se iniciar a redução de temperatura.

Um cuidado que deve ter ao escolher este tipo de tecnologia é a quantidade de água a ser inserida no ligante, que deve ser suficiente para causar o efeito espuma, e não superior, que possa causar problemas de falta de adesividade (RUBIO et al., 2012) Exemplos desta

tecnologia comercializada é o processo LEA (Low Energy Asphalt), Advera® WMA, Aspha-Min®, Double Barrel® Green e WAM-Foam.

O processo LEA foi desenvolvido na França e segundo Motta (2011) ocorre como descrito a seguir: Os agregados graúdos primeiramente passam por secagem em temperatura inferior ao processo usual e o ligante é aquecido em temperatura habitual para a mistura a quente e então são misturados. Após este processo, os agregados miúdos, contendo 3 a 4% de água são misturados aos agregados graúdos com ligante, resultando no espumejo do ligante, expansão que resulta na redução da temperatura da mistura a até aproximadamente 100°C. Por fim, segundo a autora, ocorre o equilíbrio térmico entre o agregado mineral, o ligante asfáltico e a água residual e então pode ser aplicada em pista.

O aditivo Aspha-Min é produzido pela indústria alemã Eurovia Services GmbH e MHI Group e sua base é a zeolita em pó, que é um silicato de alumínio e sódio sintético (PROWELL; HURLEY 2005). Segundo os autores, durante a produção da espuma de asfalto, o Aspha-min, que tem a capacidade de armazenar 21% de água por massa é adicionado ao ligante na temperatura de aproximadamente 86 a 177°C e o fornecedor indica adicionar 0,3% do aditivo por peso de mistura asfáltica.

O Quadro 2 descreve resumidamente alguns tipos de aditivos das categorias listadas acima, disponíveis no mercado. É importante destacar que a redução de temperatura nas tecnologias de misturas asfálticas mornas acontece durante a produção na usina, com a diminuição de temperatura do aquecimento do agregado, mantendo a temperatura do ligante alta, ou seja, na temperatura indicada pelo fornecedor do ligante para a produção de uma mistura a quente.

Quadro 2 - Tecnologias existentes no mercado (adaptado de D'Angelo et al., 2008; Perkins, 2009; Austroads, 2012; e Rubio et al., 2012)

Tecnologia	Nome comercial	Empresa fabricante	Descrição	Como funciona
Cera	Sasobit	Sasol (Fischer-Tropsch wax)	Cera sintética produzida a partir de gaseificação de carvão. A adição de cera altera a viscosidade do ligante. Pouca modificação da usina pode ser adicionada no ligante ou na mistura.	Na Alemanha adiciona-se 2,5% por peso de ligante. Nos Estados Unidos utilizam de 1,0 a 1,5% por peso de ligante. A temperatura varia de 20 a 30°C abaixo da temperatura da mistura convencional.
Zeólita - asfalto espuma	Aspha-min	Eurovia e MHI	Pó de Zeólita sintética que libera água durante a produção, formando espuma. Necessita modificação na usina de asfalto.	Utiliza-se aproximadamente 0,3% do peso da mistura. Temperatura varia de 20 a 30°C abaixo da temperatura da mistura convencional.
Asfalto espuma	Low energy asphalt (LEA2)	McConna ughay Technologies (USA)	Processo que envolve a mistura de agregados úmidos com o ligante, formando espuma de asfalto, que reduz a temperatura da mistura para 100°C. Modificação significativa da usina.	Adiciona-se entre 2 a 5% por peso de ligante. Mistura semimorna trabalha com temperatura abaixo de 100°C.
Agente surfactante	Evothem®	MeadWestvaco	Pacote químico de agentes surfactantes e melhoradores de adesividade.	Nos Estados Unidos trabalha-se com temperaturas entre 85 - 115°C.
Asfalto espuma	Double-Barrel Green	Astec	Um bico injeta uma pequena quantidade de água no ligante aquecido, formando espuma. Necessita modificação de asfalto.	Nos Estados Unidos trabalha-se com temperaturas entre 116 - 135°C.
Químico-orgânico	Shell Thiopave®	Shell	Combinação de vários aditivos, entre eles plastificantes.	Adiciona-se mais de 25% da massa de ligante asfáltico. Temperatura de produção e compactação aproximadamente igual a 130°C e 110°C. Pouca modificação na usina.

2.8.1.1 Aditivos Incorporados as Misturas Asfálticas Mornas

- **Óleo de Cozinha**

De acordo com informações da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) um litro de óleo de cozinha é capaz de poluir em torno de 20.000 (vinte mil) litros de água. O despejo inapropriado desse resíduo tanto provoca uma sucessão de danos ao meio ambiente, quanto aumenta significativamente as despesas com o tratamento de efluentes, bem como gera prejuízos que podem ser ocasionados na rede de coleta de esgoto.

Essa problemática se traduz em motivo suficiente para uma ação indutiva do poder legislativo que favoreça o reaproveitamento do composto. Em virtude disso, leis como a Lei Estadual de Nº 5065 em que o Governo do Estado do Rio de Janeiro institui o Programa Estadual de Tratamento e Reciclagem de Óleos e Gorduras de Origem Vegetal ou Animal e de Uso Culinário, estabelecem um incentivo aos usuários que promoverem o descarte ou

reutilização ambientalmente adequados de resíduos sólidos impactantes no serviço de esgotamento.

O principal objetivo para as várias pesquisas que foram desenvolvidas durante anos com emprego de óleos vegetais é alcançar um destino melhor para o reaproveitamento desse óleo de cozinha residual (PORTUGAL, 2016).

Diante deste cenário e do crescente emprego de técnicas de reciclagem de revestimentos asfálticos, surge a necessidade de pesquisar alternativas de incentivos para o desenvolvimento de tecnologias que promovam o rejuvenescimento dos ligantes a partir da recomposição de frações perdidas após o envelhecimento.

Uma aplicação ecologicamente correta pode ser a utilização deste, em pequena percentagem, para substituição parcial ao ligante asfáltico empregado na produção de misturas asfálticas semimornas e mornas, para a melhoria no asfalto envelhecido (PORTUGAL, 2016).

Segundo Zagonel et al (1999) reações hidrolíticas e oxidativas fazem com que os óleos e gorduras utilizados repetidamente em fritura, por imersão, sofram rápida degradação, o que resulta em modificação de suas propriedades físico-químicas e organolépticas. Neste caso, a oxidação, que é acelerada pela alta temperatura do processo, é a principal responsável por esta alteração. Em decorrência disto, o óleo torna-se escuro, com maior viscosidade e tem sua acidez aumentada. Embora a purificação destes óleos seja possível usando materiais adsorventes, sua viabilidade não é observada sob o ponto de vista econômico.

Conforme Chen et. al. (2014) o óleo de cozinha residual, comparado com outros componentes de baixa viscosidade, tem o ponto de fulgor acima de 220°C, o que significa que o cozimento do óleo de cozinha residual tem uma elevada segurança para aplicação nas misturas asfálticas. Além disso, o óleo de cozinha residual já passou pelo processo de cozedura em altas temperaturas, e conseqüentemente, quando aquecido novamente, não apresentará componentes voláteis como gases tóxicos. ().

A possibilidade de incorporação do óleo residual em misturas asfálticas está fundamentada em estudos que exibiram resultados positivos acerca da utilização do óleo residual no rejuvenescimento do CAP (ZARGAR et al, 2012) e das propriedades físicas do ligante asfáltico modificado (ASLI et al, 2012).

Um exemplo das pesquisas realizada com óleo residual é a desenvolvida por Wen et al (2013) que desenvolveram um estudo sobre a utilização do bioasfalto como uma possível

alternativa ao asfalto convencional. O bioasfalto foi produzido a partir de resíduos de óleo de cozinha e depois submetido a processo termoquímico. Foi misturado com o tradicional ligante em diferentes percentuais (0, 10, 30 e 60%), em peso do ligante base. Os resultados dos testes, com base na carga de cisalhamento constante e testes múltiplos de ensaio de fluência e de recuperação, mostraram que a adição de bioasfalto diminuiu a resistência a fadiga e deformação permanente.

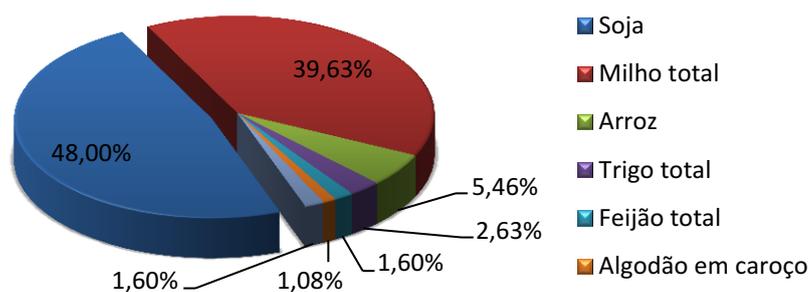
Asli et al. (2012) estudaram a utilização de óleo de cozinha residual (OMA) para rejuvenescer o ligante asfáltico. A pesquisa mostrou a capacidade e potencial de um rejuvenecedor, tal como resíduos de óleo de cozinha, para a reciclagem do asfalto, a fim de diminuir o custo de manutenção pavimento.

Zargar et al. (2012) analisaram a possibilidade de utilizar óleo de cozinha residual (OMA) como agente para uma opção natural de rejuvenescimento do ligante asfáltico envelhecido. As propriedades físicas e químicas do ligante asfáltico original, ligante asfáltico envelhecido e ligante asfáltico rejuvenescido, foram medidos e comparados pelos ensaios de ponto de amolecimento, penetração, viscosidade Brookfield, reômetro de cisalhamento dinâmico e espectroscopia de infravermelho. Na pesquisa foi verificado que a aplicação de OMA como um rejuvenecedor para ligante asfáltico envelhecido irá introduzir uma solução ambiental e econômica, para a reutilização deste resíduo.

Segundo a Associação Brasileira das Industrias de Óleos Vegetais (ABIOVE, 2012) apenas no Brasil, entre os anos de 2003 e 2013, houve um aumento de 33,84% na produção de óleo vegetal, paralelamente o consumo doméstico, no mesmo período, aumentou em 92,62%.

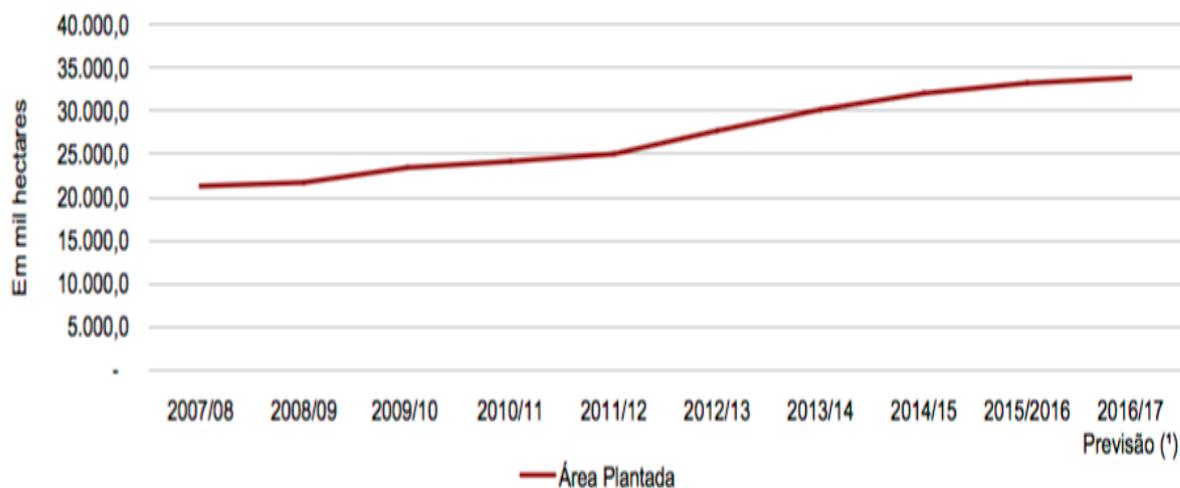
A Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), em 2016, divulgou que a soja tem sido a cultura mais representativa cultivada no Brasil, com cerca de 100,9 milhões de toneladas, correspondendo a 48% da produção nacional de grãos, como mostra a Figura 8.

Figura 11 – Brasil – Percentagem da produção total por produto (CONAB, 2016)



Devido a isso e sua alta rentabilidade, a produção de soja tem ocupado lugar de outras culturas no cenário agrícola brasileiro e avançado sobre áreas de pastagens revertidas para o cultivo de grãos conforme gráfico da Figura 9 (CONAB, 2017).

Figura 12 - Série histórica da área plantada de soja (Conab, 2017)



A importância dessa cultura na esfera mundial e nacional se baseia na sua utilização para a obtenção do farelo de soja e para extração do óleo. Segundo o United States Department of Agriculture (USDA), o Brasil é o maior exportador de soja em grãos do mundo, responsável por 42,46% de todas as exportações mundiais. Os Estados Unidos vêm em segundo lugar com 39,81% e a Argentina em terceiro lugar, com 6,42%. Juntos, estes três países são responsáveis por 88,70% de todas as exportações mundiais. Estima-se que na safra 2016/17 a exportação girará em torno de 59,50 milhões de toneladas; valor 9,41% maior que o estimado na safra 2015/16.

A crescente demanda pelo consumo de soja e, por conseguinte, do óleo extraído deste grão, desperta nos pesquisadores do cenário brasileiro interesse pela destinação correta do produto descartado. No âmbito das pesquisas de misturas asfálticas, a inserção do óleo de soja como modificante se configura em uma possível aplicação ecologicamente correta deste item em substituição parcial do óleo à base de petróleo considerado como recurso não renovável.

Portugal (2016) estudou a adição de óleo de soja novo e residual, variando de 1% a 3%, em peso do ligante. O autor realizou ensaios de caracterização física e de reologia, que

determinaram os teores ótimos do óleo de soja em adição ao ligante puro, os quais foram 1% e 2% para o óleo de soja novo e residual respectivamente, bem como a temperatura de 135°C para a mistura do ligante puro com o óleo.

Portugal (2016) verificou que a adição destes óleos contribui para a redução das temperaturas de usinagem e compactação sem comprometimento das propriedades reológicas dos ligantes modificados. Acresce-se, que adição do óleo de soja nas misturas asfálticas mornas se mostrou viável sob o ponto de vista ambiental (destinação correta do óleo), físico e reológico.

Acrescido o fato do óleo de soja ser um produto oleaginoso e biodegradável, este pode ser utilizado como “Aditivo Verde”, por suas características antioxidantes e suas propriedades “tensoativas” (PORTUGAL,2016).

A cadeia apolar do óleo de soja tende a promover a redução da viscosidade do ligante asfáltico por apresentar uma estrutura molecular mais organizada. Esta redução influencia positivamente a mistura, resultando em uma consequente redução da tensão superficial entre o agregado e o ligante, expulsando o ar retido e fortalecendo a coesão interfacial entre estes, melhorando, desta forma, as propriedades mecânicas (KAMARUDDIN et al, 2014; MAHARAJ et al, 2015).

A pesquisa de Portugal (2016) mostrou que a adição foi uma alternativa promissora para reduzir a elevada viscosidade das misturas asfálticas com ou sem aditivos, reduzindo gastos na usina, além de aumentar a estabilidade à estocagem e a adesividade nas misturas com os agregados.

Barros (2017) , por meio do ensaio de viscosidade rotacional, determinou as temperaturas ótimas de usinagem e compactação para a mistura do óleo de soja com adição de 1% de óleo de soja novo e para a mistura com adição de 2% de óleo de soja residual em relação ao peso do ligante puro.

Foi observado que adição do óleo de soja novo e residual promoveram uma redução nas temperaturas de usinagem e compactação, proporcional ao teor de óleo adicionado ao ligante puro, em relação a temperatura de usinagem do ligante puro. Essas reduções da temperatura melhoram a trabalhabilidade da mistura asfáltica durante a sua usinagem e compactação, além de proporcionar melhores condições para os trabalhadores, uma redução na emissão de gases do efeito estufa, maior viabilidade na utilização de material fresado e correta destinação para os resíduos do óleo de vegetal de cozinha (BARROS, 2017).

Com isso, a utilização do óleo de soja como aditivo orgânico para misturas asfálticas apresenta-se como um excelente redutor de temperatura e conseqüentemente dos impactos ambientais e de outras substâncias orgânicas, durante as etapas de processamento da mistura asfáltica na pavimentação. Portanto, esta pesquisa tem a finalidade de estudar a viabilidade de utilizar temperaturas de compactação e usinagem menores que as já tradicionalmente estudadas, determinadas por meio de ensaios de viscosidade rotacional.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são abordados as especificações e os ensaios de caracterização dos seguintes materiais usados nesta pesquisa: ligante asfáltico, óleo de soja, cal e agregados. Da mesma maneira, são descritos os procedimentos utilizados para a dosagem das misturas asfálticas e moldagem dos Corpos de Prova. Os métodos de ensaios utilizados foram, em sua grande maioria, propostos pelo Departamento Nacional de Infraestruturas e de Transportes – DNIT, Normas Brasileiras –NBR, American Society for Testing and Materials –ASTM e American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO.

Neste presente estudo foram utilizados os teores "ótimos" de óleo de soja novo e residual a serem adicionados ao ligante modificado, assim como a temperatura de mistura destes definidos por Portugal (2016). São apresentados também os ensaios de caracterização dos agregados graúdos e miúdos, de caracterização do ligante puro e o ligante aditivado com o óleo de soja, bem como a dosagem SUPERPAVE, realizados por Barros (2017), posto a utilização de materiais de mesma origem.

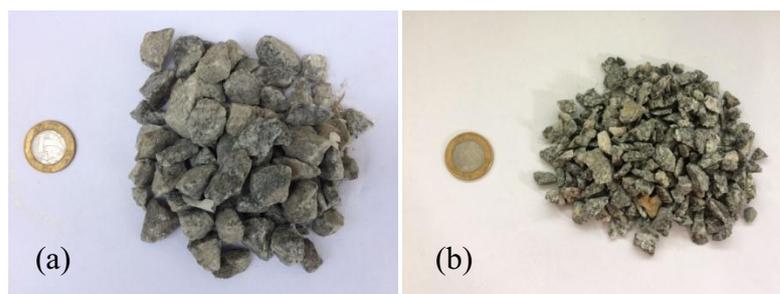
Os corpos de prova utilizados foram usinados e compactados nas temperaturas "ótimas" determinadas pelo ensaio de viscosidade rotacional realizado por Barros (2017), e em seguida realizados os ensaios mecânicos com o objetivo de caracterizar mecanicamente as misturas asfálticas com adição de ligantes asfálticos modificados com óleo de soja.

3.1 Materiais

Os materiais utilizados para moldagem das misturas asfálticas foram os seguintes:

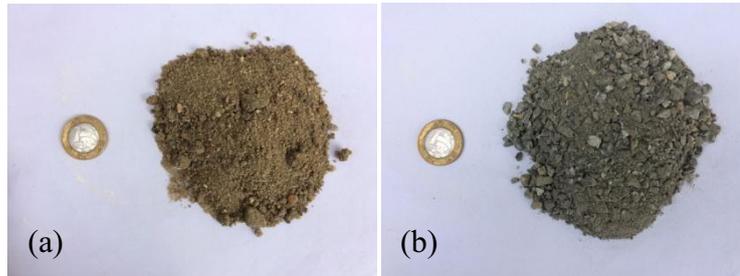
- Agregado graúdo: brita 19mm e brita 12,5mm, todos de origem granítica da construtora Rocha Cavalcante (Figura 10);

Figura 13 - Agregado graúdo: (a) Brita 19mm; (b) Brita 12,5mm



- Agregado miúdo: areia de leito de rio, pó de pedra, oriundo da jazida Serrinha no município de São Gonçalo do Amarante – RN (Figura 12);

Figura 14 - Agregado miúdo: (a) Areia; (b) Pó de pedra.



- Cal hidratada (fíler) da marca MegaO, obtida no comércio de Campina Grande (Figura 12)

Figura 15 - CAP 55/75



- CAP 55/75, ligante modificado pelo polímero estireno-butadieno-estireno (SBS), obtido da distribuidora Stratura Asfaltos S/A;
- Óleo de soja novo adquirido no comércio da cidade de Campina Grande-PB (Figura 13);

Figura 16 - Óleo de soja



- Óleo de soja residual, coletado após três reutilizações em frituras domésticas à partir do óleo de soja novo, da marca “Liza”, adquirido no comércio da cidade de Campina Grande-PB. Onde, em laboratório, após a coleta, foi realizado a decantação e posteriormente, filtração com utilização de filtro de papel (Figura 14).

Figura 17 - Filtração do óleo de soja residual



3.2 Métodos

3.2.1 Misturas dos Materiais

O processo de produção do ligante modificado para utilização nas misturas asfálticas aconteceu com a utilização de um agitador mecânico de baixo cisalhamento, o FISATOM, modelo 722D (Figura 15), com as condições de temperatura e rotações controladas, segundo os procedimentos utilizados em Faxina (2006), Souza (2012) e Portugal (2016). Os teores para cada modificador foram determinados com base nos resultados encontrados em pesquisa realizada por Portugal (2016).

O ligante modificado com SBS foi aquecido em estufa, a uma temperatura de 120°C durante aproximadamente uma hora e meia, como forma de garantir a fluidez do material. Depois de colocado em um béquer, que foi inserido no misturador até que fosse atingida a temperatura de estabilização da mistura, de 135°C. Em seguida, foram adicionados os teores ótimos dos óleos, 1% para o óleo novo e 2% para o residual em proporção ao peso do ligante modificado com SBS respectivamente, indicados como teores ótimos do óleo a ser empregado (PORTUGAL, 2016). Utilizando a rotação pré-estabelecida em 406 rpm, contabilizou-se um

período de 20 minutos para a homogeneização da mistura. Finalizado esse procedimento, armazenou-se a mistura em recipientes adequados, para posterior utilização.

Figura 18 - Misturador mecânico FISATOM, modelo 722D



3.2.2 Caracterização do Ligante

A caracterização dos ligantes modificados com adição de óleo de soja novo e residual foi realizada de acordo com as normas contidas na Tabela 1.

Tabela 1 - Ensaios de caracterizações dos ligantes asfálticos

ENSAIOS	METODOLOGIA
Penetração	DNIT 155/2010-ME
Ponto de amolecimento	DNIT 131/2010-ME
Viscosidade rotacional	ASTM D 4402
Envelhecimento a curto prazo	ASTM D 2872/13 e ABNT 15235/09

A Tabela 2 apresenta os resultados de caracterização do ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa.

Tabela 2 - Resultados das caracterizações dos ligantes asfálticos (Barros, 2017)

Característica	Ligante puro	+ 1% soja novo	+ 2% soja residual
Penetração (100g, 5s, 25°C), dmm	63,8	87,7	89,5
Ponto de amolecimento, °C	52,0	52,0	51,5
Viscosidade Rotacional a 135°C, cP	978,5	890,0	803,75
Viscosidade Rotacional a 150°C, cP	464,0	427,0	390,5
Viscosidade Rotacional a 177°C, cP	159,5	147,8	139,2
Viscosidade Rotacional a 135°C, cP (pós RTFOT)	1428,8	1188,7	1098,7
Viscosidade Rotacional a 150°C, cP (pós RTFOT)	650,5	554	518
Viscosidade Rotacional a 177°C, cP (pós RTFOT)	208,5	183,5	173,5
Penetração retida, %	69,8	61,3	73,2
Perda de massa, %	0,046	0,090	0,052
Variação do ponto de amolecimento, °C	+3,75	+4,5	+5,8

Quanto a penetração, observa-se que a adição dos óleos de cozinha promoveu um aumento na penetração do ligante em comparação ao ligante puro, o que indica uma diminuição da rigidez à temperatura de 25°C. Em relação ao envelhecimento a curto prazo, houve enrijecimento dos ligantes, devido ao seu envelhecimento. Quanto a penetração retida, capacidade que um ligante tem de manter sua característica de penetração após o procedimento de envelhecimento em estufa RTFO, quanto mais próxima de 100% menor é a alteração do valor de penetração no envelhecimento RTFO, logo todas as amostras se enquadraram no exigido pela norma ABNT NBR 15235/09, cujo valor mínimo é de 55%.

Os resultados para o ponto de amolecimento indicam que as amostras apresentam resultados que satisfazem a norma ABNT NBR 15235/09, que fixa um aumento máximo de 8°C e redução máxima de 5°C no ponto de amolecimento.

Todas as amostras do ensaio de viscosidade rotacional atenderam ao máximo de 3000 cP estabelecido na norma DNIT 129/2011-EM. As reduções das viscosidades da mistura CAP 55/75 (SBS) com as adições de óleos ocorreram de maneira proporcional aos percentuais adicionados. Observa-se que a adição dos óleos de cozinha possibilita uma diminuição significativa na viscosidade do ligante modificado, proporcionando consequentes reduções nas temperaturas de usinagem e compactação, o que melhora a trabalhabilidade massa asfáltica durante a sua compactação, estando estas dentro do limite da temperatura de misturas mornas. As amostras estudadas nesta pesquisa aumentaram a viscosidade após o envelhecimento, conforme o esperado.

Verifica-se que as amostras ensaiadas se enquadraram nas especificações da norma ABNT NBR 15235/09, cuja variação de massa máxima é de 1%. Todos os ligantes aditivados apresentaram maiores perdas de massa em comparação ao ligante sem a adição, uma vez que, segundo Cavalcante (2016) essa perda está relacionada a uma volatilização e oxidação dos óleos adicionados, pois esses são mais voláteis e permissíveis à oxidação que os componentes do ligante. Como houve uma menor perda em massa para o ligante aditivado com óleo residual, apesar de sua maior porcentagem adicionada, podemos concluir que há uma menor volatilização do óleo reutilizado.

3.2.3 Temperatura Ótima de Usinagem e Compactação

A partir dos resultados obtidos do viscosímetro rotacional para as temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C, Barros (2017) estabeleceu as temperaturas para a usinagem e compactação da mistura asfáltica do ligante 55/75 com a adição de 1% de óleo de soja novo e para a mistura com adição de 2% de soja residual. Estas temperaturas estão apresentadas na Tabela 6, bem como a redução de temperaturas alcançadas pelas adições dos óleos em comparação ao ligante puro.

Tabela 3 - Temperaturas de usinagem e compactação para os ligantes asfálticos (Barros, 2017)

Amostra	Temperatura		Temperatura de	
	de usinagem - TU (°C)	Redução (°C)	compactação - TC (°C)	Redução (°C)
CAP 55/75	175	-	162,5	-
CAP 55/75 + 1% óleo de soja novo	168,8	6,2	159	3,5
CAP 55/75 + 2% óleo de soja residual	167,5	7,5	156,85	5,6

O ligante 55/75 da Tabela 6 foi utilizado nesta pesquisa, apesar da alta temperatura a que o ligante 55/75 foi submetido, com o risco de oxidação e envelhecimento precoce do ligante, visto que, este ainda encontra-se abaixo da temperatura máxima de 177°C estabelecida pela norma DNIT 032.

Esperava-se que as amostras com adição de óleo residual apresentassem maior viscosidade que as amostras com adição de óleo novo. Entretanto, pela análise dos resultados de ensaios de viscosidade dos óleos obtidos por Barros (2017) este fato não pode ser confirmado, uma vez que a viscosidade reduziu, em relação ao ligante puro ,proporcionalmente conforme o teor de óleo adicionado.

A partir da temperatura de compactação e usinagem foi feita a redução de 10 e 20°C, para a moldagem dos CPs e realização dos ensaios mecânicos para as misturas com óleo de soja novo e residual.

3.2.4 Caracterização dos Agregados

A Tabela 3 apresenta os ensaios de caracterização dos agregados utilizados na composição das misturas asfálticas puras e modificadas.

Tabela 4 - Ensaios de caracterização dos agregados para as misturas asfálticas

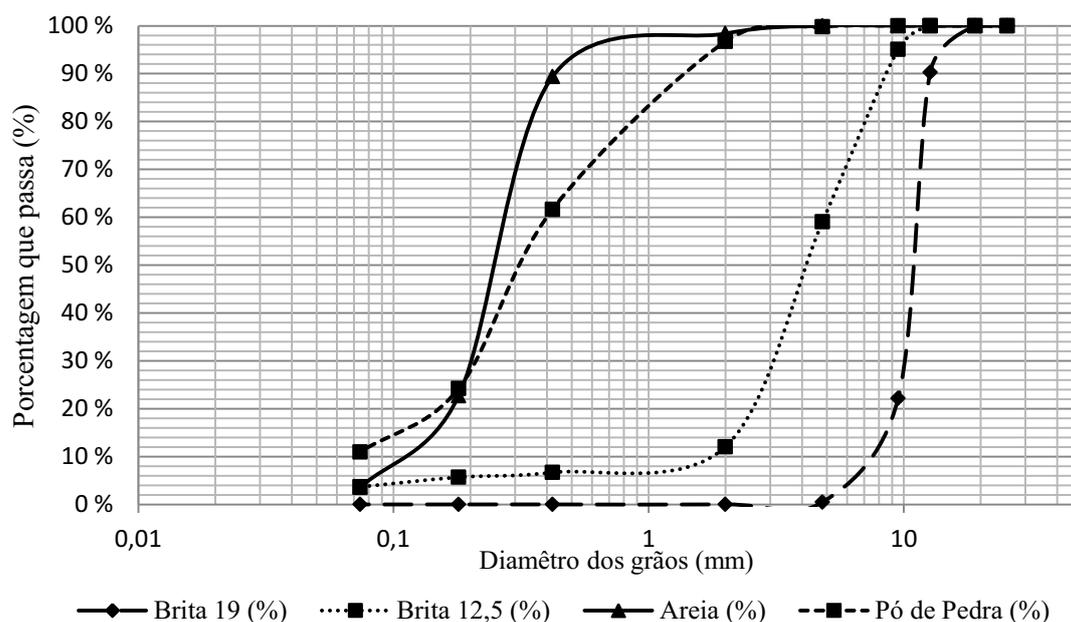
ENSAIOS	METODOLOGIA
Análise granulométrica	DNIT - ME 083/98
Massa específica real	DNIT - ME 081/98 e DNIT - ME 084/95
Equivalente de areia	DNIT - ME 054/97
Abrasão Los Angeles	DNIT - ME 035/98

A Tabela 4 apresenta os resultados de caracterização dos agregados graúdo e miúdo e granulometria dos agregados graúdo e miúdo são apresentados na Figura 16.

Tabela 5 - Resultados de massa específica real e aparente, abrasão Los Angeles e equivalente de areia dos agregados (Barros, 2017)

Característica	Brita 19	Brita 12,5	Areia	Pó de pedra
Massa específica Real, g/cm ³	2,49	2,76	2,60	2,58
Abrasão Los Angeles, %	17,4	25,4	-	-
Equivalente de Areia, %	-	-	87	60
Massa específica Aparente, g/cm ³	2,48	2,74	2,38	2,56

Figura 19 - Curva granulométrica dos agregados (Barros, 2017)



A partir da composição granulométrica dos agregados, enquadrada na faixa granulométrica “B” estabelecida pelo DNIT, e obedecendo aos critérios de pontos de controle e zona de restrição da metodologia SUPERPAVE foi traçada a curva Fuller intermediária (Figura 17), de acordo com as proporções de agregados apresentadas na Tabela 5.

Figura 20 - Curva Fuller intermediária (Barros, 2017)

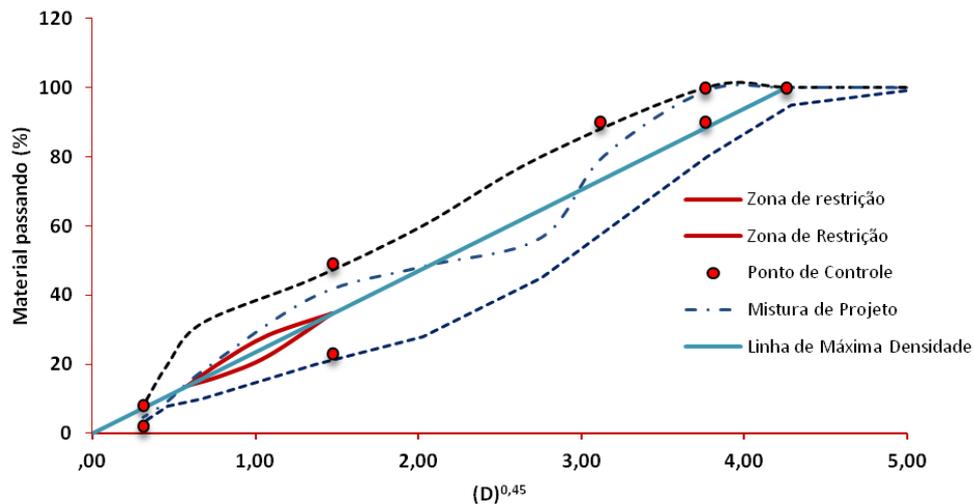


Tabela 6 - Proporção de agregados encontrada a partir da composição granulométrica (Barros, 2017)

Brita 19	Brita 12,5	Areia	Pó de pedra	Fíller
30%	23%	15%	30%	2%

3.2.5 Ensaios Mecânicos

Para fins de comparação entre os parâmetros mecânicos, as misturas asfálticas modificadas projetadas em laboratório foram avaliadas mecanicamente conforme ensaios: Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT), Módulo de Resiliência (MR), Dano por umidade induzida (Lottman), Módulo Dinâmico e Flow Number.

Os corpos de prova para esta pesquisa foram moldados e compactados com o ligante aquecido na "temperatura ótima", dada no ensaio de viscosidade, visto que adição do óleo de soja reduziu a viscosidade e conseqüentemente a temperatura de usinagem e compactação da mistura em relação ao ligante 55/75, e com 10 e 20°C a menos que do que esta. Em seguida, foram realizados os ensaios mecânicos para fins de comparação.

3.2.5.1 Resistência à Tração (RT) por Compressão Diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral constitui um arranjo simples que permite impor um plano de ruptura idêntico ao plano de aplicação da carga. O ensaio é bastante empregado na atualidade para a medida da resistência à tração indireta de amostras de concretos asfálticos (BALBO, 2007).

O equipamento utilizado para a realização do ensaio é a prensa mecânica (Figura 22) com sensibilidade de 19,60 N com o êmbolo movimentando-se a uma velocidade de $0,8 \pm 0,1$ mm/s.

Figura 21 – Prensa Mecânica (Ensaio RT)



A norma DNIT-ME 136/2010 define os procedimentos para a realização do ensaio de resistência à tração estática, o qual determina a tensão máxima suportada pela mistura asfáltica até sua ruptura, à temperatura de 25°C. Este ensaio foi realizado numa prensa mecânica, a uma velocidade de $0,8 \pm 0,1$ mm/s, sendo o corpo de prova apoiado ao longo de suas geratrizes por dois frisos metálicos posicionados na parte superior e inferior do corpo de prova e duas forças. O corpo de prova cilíndrico foi posicionado diametralmente em relação à direção de duas forças opostas, gerando tensões de tração uniformes perpendicularmente ao longo do plano diametral que promove a ruptura do corpo nesta direção, separando-o em duas metades.

A resistência à tração do corpo de prova rompido por compressão diametral é calculada por meio da seguinte equação:

$$\sigma_r = \frac{2F}{\pi DH}$$

Onde:

σ_r - Resistência à tração, em kgf/cm²;

F - Carga de Ruptura, em kgf;

D - Diâmetro do corpo de prova, em cm;

H - Altura do corpo de prova, em cm.

3.2.5.2 Módulo de Resiliência

A norma da ABNT 16018/2011 estabelece a medição das deformações reversíveis instantâneas provocadas por condições cíclicas de carregamento e descarregamento nos corpos de prova. O módulo de resiliência é definido como a relação entre a tensão de tração gerada no corpo de prova com a deformação de tração recuperável correspondente. Este ensaio foi realizado em um equipamento composto por um sistema pneumático de carregamento com controle do tempo e frequência de aplicação da carga, um sistema de medição do deslocamento axial do corpo de prova - LVDTs (*Linear Variable Differential Transducer*) e um software para coleta e análise de dados. Este ensaio consiste em solicitar o corpo de prova dinamicamente por uma carga de compressão distribuída ao longo de duas geratrizes opostas e medir a deformação resiliente ao longo do diâmetro horizontal, perpendicular à carga aplicada, simulando o efeito do tráfego de veículos.

O ensaio foi realizado na Universal Testing Machine (UTM-25), seu método consistiu na aplicação, a 25°C, de 50 ciclos ondas quadradas, com valor igual a 10% da força da Resistência à Tração obtida para cada mistura asfáltica com o seu respectivo teor de ligante asfáltico, frequência de 60 ciclos por minuto (1Hz), com duração de 1,0s, sendo que o mesmo tem um período de solicitação de 0,1s e um período de repouso de 0,9s. (Figura 23)

Figura 22 – Equipamento utilizada no Ensaio de Módulo de Resiliência



3.2.5.3 Dano por Umidade Induzida (Lottman Modificado)

O ensaio de Lottman, também conhecido como ensaio de “dano por umidade induzida”, é utilizado para avaliar a capacidade mecânica da mistura asfáltica, em termos de resistência a tração (RT) como um medidor de adesividade, sob a ação deletéria da água em ciclos de temperaturas intermediárias e baixas (Souza, 2012) a partir da verificação do potencial de deslocamento de sua película de asfalto sob a ação da água em ciclos de gelo e degelo.

Problemas de adesividade podem causar defeitos como a desagregação e o deslocamento (*stripping*) da camada de revestimento que, quando submetidas às ações do tráfego e da água, tendem a maximizar danos no pavimento, ocasionando o aparecimento de patologias como buracos e panelas (Barros, 2017).

Neste ensaio, segundo a Norma ME 136/2010 do DNIT e a Norma da AASHTO T 283-02, foram moldados quatro CPs com 1200g de mistura asfáltica e apresentando volume de vazios de $7\% \pm 1\%$ para cada tipo de mistura asfáltica e cada temperatura de usinagem, e divididos em dois grupos, onde um foi rompido à tração (sem condicionamento térmico), apenas regularizando sua temperatura num banho a 25°C. Para o outro grupo, os CPs foram saturados com aplicação do vácuo a um grau de 70% a 80% (Figura 24) e colocados em sacos plásticos com 10 ml de água adicional, os sacos foram vedados para passar por um congelamento em um período de 16 horas e em seguida por um degelo mergulhando esse grupo em banho de água a 60°C numa estufa por um período de 24 horas. Após o ciclo de gelo e degelo os corpos de prova foram retirados dos sacos plásticos e depositados em outro banho de água a 25°C por 2 horas, para assim sofrerem a ruptura (com condicionamento térmico). O rompimento dos CPs foi realizado através do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

A análise é dada pela relação entre a resistência à tração dos corpos de prova submetidos ao condicionamento (RTu) e não condicionados (RT), chamada de Resistência à Tração Retida ou Razão de Resistência à Tração por compressão diametral (RRT). A metodologia desenvolvida pelo projeto SUPERPAVE estabelece que este valor deve ficar acima de oitenta por cento (80%), enquanto a MP 8-01 da ASSHTO estabelece o limite mínimo para RRT de setenta por cento (70%).

Figura 23 – Aplicação do vácuo nos corpos de prova (Ensaio de Lottman Modificado)



3.2.5.4 Módulo Dinâmico ($|E^*|$)

Este ensaio é obtido usualmente por meio de um carregamento de compressão senoidal aplicado axialmente em corpos de prova cilíndricos de 100mm de diâmetro por 150mm de altura (Figura 25), e medindo os deslocamentos correspondentes, conforme o método da AASHTO TP-62/2009. A deformação axial recuperável resultante da amostra, oriunda da tensão aplicada, é medida com LVDTs e usada para o cálculo do módulo dinâmico.

Figura 24 - CPs com plugs fixados para o ensaio de módulo dinâmico



O procedimento foi realizado na realizado na Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) (Figura 26), em diferentes temperaturas e frequências de carregamento com o intuito de se construir uma curva mestra que incorpore os efeitos das duas variáveis citadas, tempo (t) e temperatura (FRANCKEN e PARTL, 1996 apud BERNUCCI, 2006). O dispositivo de carregamento deve ser capaz de transmitir ondas de forma senoidal em frequências de 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20 e 25Hz. Deve haver dispositivo para controle de temperatura uma vez que as amostras são testadas nas temperaturas de 4°C; 21°C e 37 °C.

Figura 25 - Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)



3.2.5.5 Flow number

Segundo Budny (2012) os ensaios de aplicação de cargas estáticas não representam bem as deformações permanentes verificadas em campo, sendo, por isso, mais indicado a utilização de ensaios com aplicações de cargas repetidas. Dessa forma, utilizou-se o ensaio de deformação pelo critério diametral, flow number (FN), para a avaliação da resistência das misturas a deformações permanentes e para comparação da resistência ao cisalhamento de várias misturas asfálticas, por meio da indicação do o ciclo onde a taxa de deformação plástica é mínima para estas.

A definição de flow number é o número de repetições de carga em que a deformação de cisalhamento, sob volume constante, se inicia. Podendo afirmar que o FN é o ponto onde a deformação permanente acumulada na mistura passa a aumentar rapidamente, o que indica que a amostra entrou em colapso. (BUDNY, 2012).

O flow number se relaciona melhor com a deformação permanente devido à aplicação uniaxial de cargas repetidas que simulam o efeito da passagem contínua de veículos pesados sobre a estrutura do pavimento. E está ligado ao ciclo onde a taxa de deformação plástica é mínima. A partir deste ciclo o corpo de prova entra na zona terciária e rompe (WITCZAK, et al. 2002 apud CAVALCANTI, 2010).

A execução do ensaio, que ainda não é normatizado no Brasil, seguiu a metodologia apresentada no Apêndice B do Report 465 do National Cooperative Highway Research

Program (NCHRP) denominado Simple Performance Test for SUPERPAVE Mix Design de 2002.

O ensaio por meio do qual o FN é determinado foi realizado na AMPT e consiste na aplicação de pulsos de carga cíclica na direção axial de amostras cilíndricas, onde se começa a verificar o cisalhamento a volume constante isto é, o número de ciclos de cargas tolerados pelo pavimento até a fluência. Os ciclos foram aplicados em uma frequência de 1 Hz (carregamento de 0,1 s e repouso de 0,9 s). Os corpos de prova para realização deste ensaio foram moldados com altura de 150mm, diâmetro de 100mm e volume de vazios de $7\% \pm 0,5$. O ensaio consistiu na aplicação de cargas repetidas de 204kPa em corpos de prova condicionados a uma temperatura de 60°C (Figura 27).

Figura 26 - CPs após ensaio de flow number

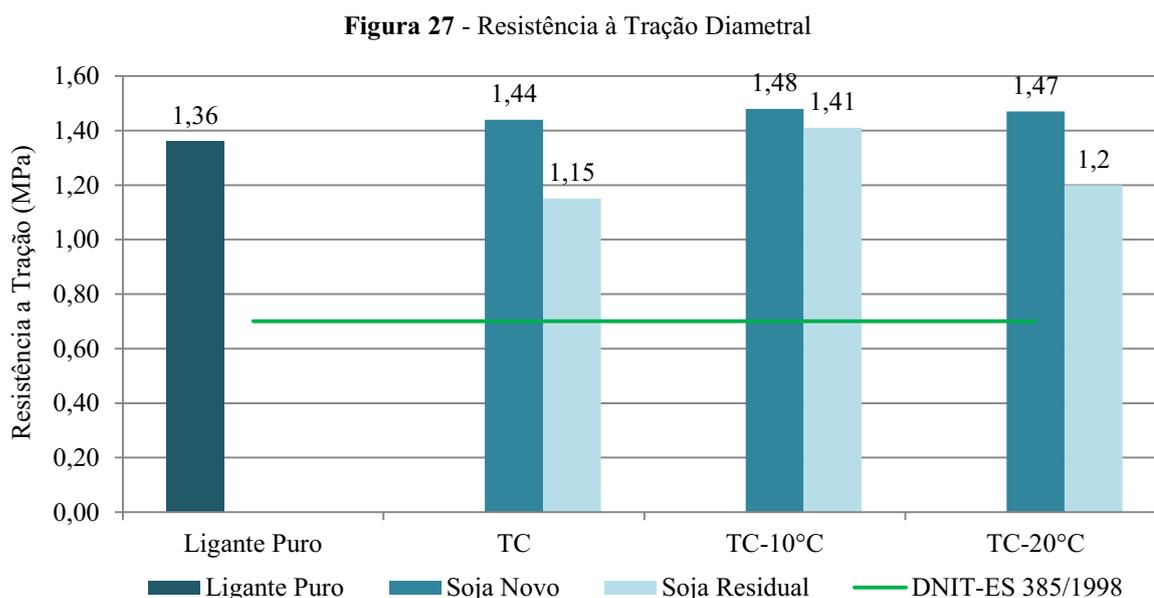


4 RESULTADOS

A avaliação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas nas três temperaturas de compactação em estudo pode ser realizada por meio da análise dos resultados dos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral Indireta, de avaliação ao dano por Umidade Induzida – Lottman Modificado, Módulo de Resiliência, Flow Number e de Módulo Dinâmico. Nota-se com esses resultados a influencia da temperatura e da adição do óleo de soja novo e residual no critério de “Resistência Mecânica”.

4.1 Resistência à Tração (RT) por Compressão Diametral

Na Figura 28 são apresentadas as médias dos resultados obtidos a partir dos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral Indireta para a mistura asfáltica aditivada com 1% de óleo de soja novo e para a mistura asfáltica aditivada com 2% de óleo de soja residual, ambas as misturas usinadas 10°C e 20°C abaixo da temperatura determinada no ensaio de viscosidade para cada teor de óleo. Ressalta-se que os resultados para a mistura asfáltica aditivada com 1% de óleo de soja novo e para a mistura asfáltica aditivada com 2% de óleo de soja residual usinadas na temperatura determinada no ensaio de viscosidade para cada teor de óleo, bem como para o ligante puro, foram obtidos a partir do estudo realizado por Barros (2017).



De acordo com Cavalcanti (2010) a resistência à tração de misturas asfálticas é diretamente proporcional à viscosidade do ligante, sendo esta uma tendência nos valores de RT. Neste estudo, não se pôde confirmar essa tendência, uma vez que os valores de resistência à tração aumentaram em alguns corpos de prova.

Verifica-se que os valores da RT atendem à tensão mínima de 0,65 MPa a 25°C estabelecida na norma DNIT-ES 385/1999 para concretos asfálticos com asfalto polímero.

As misturas usinadas com adição de 1% de óleo de soja novo apresentaram estatisticamente os mesmos valores de RT, evidenciando abstenção da interferência da adição de 1% do óleo de soja novo na resistência da mistura asfáltica, em comparação àquela com ligante puro. Este comportamento pode estar relacionado a um melhor envolvimento do ligante aditivado aos demais componentes da mistura asfáltica. Não foi observada interferência da redução de temperatura em 10 ou 20°C na resistência desta mistura.

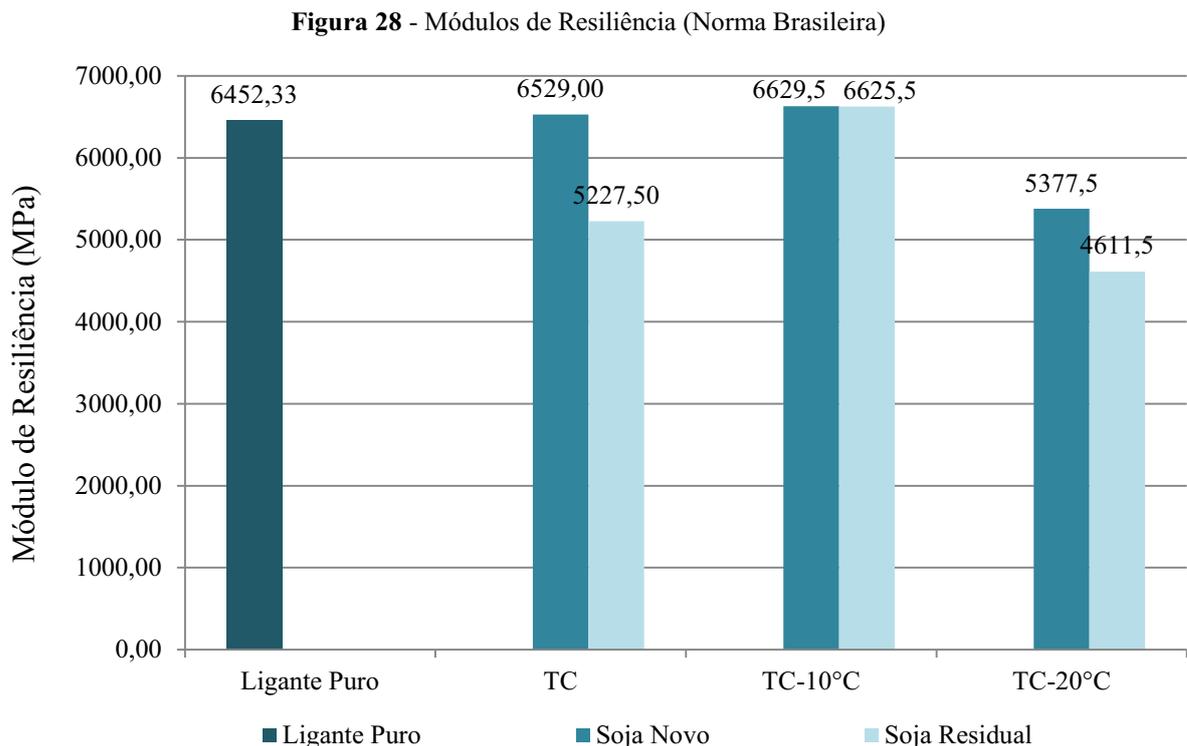
Nas misturas com adição de 2% de óleo de soja, no entanto, houve uma redução valores de RT em comparação ao ligante puro para todas as temperaturas do ensaio, com exceção do ensaio realizado 10°C abaixo da temperatura de usinagem determinada pelo ensaio de viscosidade, embora este comportamento não represente o esperado para a mistura, que era a diminuição da resistência conforme a redução de temperatura. A redução em 20°C da temperatura não interferiu na resistência desta mistura em relação a compactada na temperatura determinada pelo ensaio de viscosidade. A redução nos valores de RT devido à adição de 2% de óleo de soja residual pode estar relacionada ao maior percentual de óleo aditivado e ao efeito lubrificante deste, que pode ter comprometido a coesão dos componentes da mistura.

Motta (2009) menciona que o controle de temperatura de moldagem pode levar a uma alteração expressiva de quantidade de vazios das misturas e ter influência sobre a RT, promovendo assim uma variação de seus valores. Nestes resultados, não foram observadas variações significativas entre os valores de RT para o óleo de soja novo. Os valores de RT para o óleo de soja residual não apresentaram padrão com a diminuição da temperatura de compactação nos corpos de prova, podendo-se afirmar, no entanto, que a redução de 10 °C na temperatura determinada no ensaio de viscosidade apresenta resultados superiores em relação às demais temperatura e para o ligante puro, tanto para o óleo de soja novo quanto residual.

4.2 Módulo de Resiliência

Segundo Gama (2016) para se efetuar a análise de deformidade da estrutura de um pavimento é necessário conhecer as relações tensão-deformação dos materiais que compõem suas camadas, sendo o módulo de resiliência (MR) o parâmetro considerado chave para a compreensão desse comportamento.

Na Figura 29 são apresentadas as médias dos resultados obtidos a partir dos ensaios de Módulo de Resiliência para a mistura asfáltica aditivada com 1% de óleo de soja novo, e para a mistura asfáltica aditivada com 2% de óleo de soja residual, ambas as misturas usinadas 10°C e 20°C abaixo da temperatura determinada no ensaio de viscosidade para cada teor de óleo. Ressalta-se que os resultados para a mistura asfáltica aditivada com 1% de óleo de soja novo e para a mistura asfáltica aditivada com 2% de óleo de soja residual usinadas na temperatura determinada no ensaio de viscosidade para cada teor de óleo, bem como para o ligante puro, foram obtidos a partir do estudo realizado por Barros (2017).



Quanto mais rígido for o material, maior a capacidade de reter esforços em si mesmo, então, materiais com alto módulo de resiliência indicam alta rigidez, absorvendo elevadas tensões que poderão causar trincamento prematuro no pavimento.

Alguns fatores influenciam na estimativa do módulo de resiliência como o tipo de mistura, a faixa granulométrica (sendo maior quanto mais grossa for a faixa adotada), o tipo de ligante (sendo maior quanto menor for a penetração do asfalto ou maior a sua viscosidade), a temperatura do ensaio (sendo maior quanto menor for a temperatura), a temperatura e a energia de compactação, as propriedades volumétricas, entre outras variáveis. No entanto, tal parâmetro não é muito sensível ao teor de asfalto, dentro da faixa normal de dosagem (MARQUES, 2004; BERNUCCI et al., 2008).

Dessa forma, os valores encontrados nessa pesquisa, na ordem de 5000MPa, confirmam o pressuposto de que quanto mais grossa for a faixa granulométrica escolhida, maior o valor do MR, visto que foi utilizada para tal a faixa de 19mm

Nota-se que os valores encontrados para as misturas asfálticas estão dentro do intervalo citado. Segundo Silva (2011) a análise do Módulo de Resiliência não pode ser feita de forma direta, uma vez que ele está relacionado à rigidez da mistura. Valores maiores ou menores podem ser aceitos, dependendo da estrutura do pavimento, devendo ser considerada a compatibilidade de deformações entre as camadas que o constituem, principalmente a camada de base.

Em relação ao ligante puro, o módulo de resiliência sofreu uma variação insignificante com a adição de 1% de óleo de soja novo e reduziu em 20% com a adição de 2% de óleo de soja residual. Essa redução do módulo de resiliência conforme aumento do teor de óleo pode ser justificada pela desestabilização do ligante dada a diminuição da viscosidade, ocasionada pelo aumento do teor de óleo adicionado ao ligante puro, como foi observado no ensaio de viscosidade rotacional.

Em relação à mistura com adição de 1% de óleo de soja novo, o módulo de resiliência pouco variou com a diminuição em 10°C, e reduziu em 18% com a diminuição em 20°C da temperatura determinadas pelo ensaio de viscosidade em relação as usinadas nesta temperatura.

Em relação à mistura com adição de 2% de óleo de soja residual, o módulo de resiliência sofreu um aumento de 27% com a diminuição em 10°C, comportamento contrário ao esperado, e reduziu em 12% com a diminuição em 20°C da temperatura determinadas pelo ensaio de viscosidade em relação as usinadas nesta temperatura.

Nestes resultados não foram observadas variações significativas entre os valores de MR para o óleo de soja novo com a redução de 10°C. Os valores de MR para o óleo de soja

residual não apresentaram padrão com a diminuição da temperatura de compactação nos corpos de prova, podendo-se afirmar, no entanto, que a redução de 10°C na temperatura determinada no ensaio de viscosidade apresenta resultados equivalentes, comportamento este que é semelhante aos apresentados pelo ensaio de RT, comportamento esse que possivelmente foi provocado devido aos resultados do ensaio de RT utilizados para a realização do MR, transmitindo assim uma variação que não era esperada.

Os valores de MR das misturas com diferentes teores de óleos nas diferentes temperaturas estudadas sofreram uma influência da redução na ordem de 20°C da temperatura de compactação, porém são satisfatórios conforme a literatura. MR altos, entretanto, não refletem em excelência ao pavimento, pois as misturas asfálticas devem possuir resistência à ruptura por carregamento estático, mas também flexibilidade suficiente para suportar as solicitações do tráfego (SOUZA, 2012).

Afirmar que, quanto maior o valor do Módulo de Resiliência, melhor o desempenho da mistura asfáltica, pode não ser verdadeiro. As misturas asfálticas devem possuir resistência à ruptura por carregamento estático e “flexibilidade” suficiente para suportar as solicitações do tráfego, e boa resistência à tração para evitar rupturas prematuras. Para Balbo (2007), a relação entre o valor de módulo de resiliência e a resistência à tração do material tem sido empregada simultaneamente em projetos de dosagens de misturas asfálticas.

4.3 Dano por Umidade Induzida (Lottman Modificado)

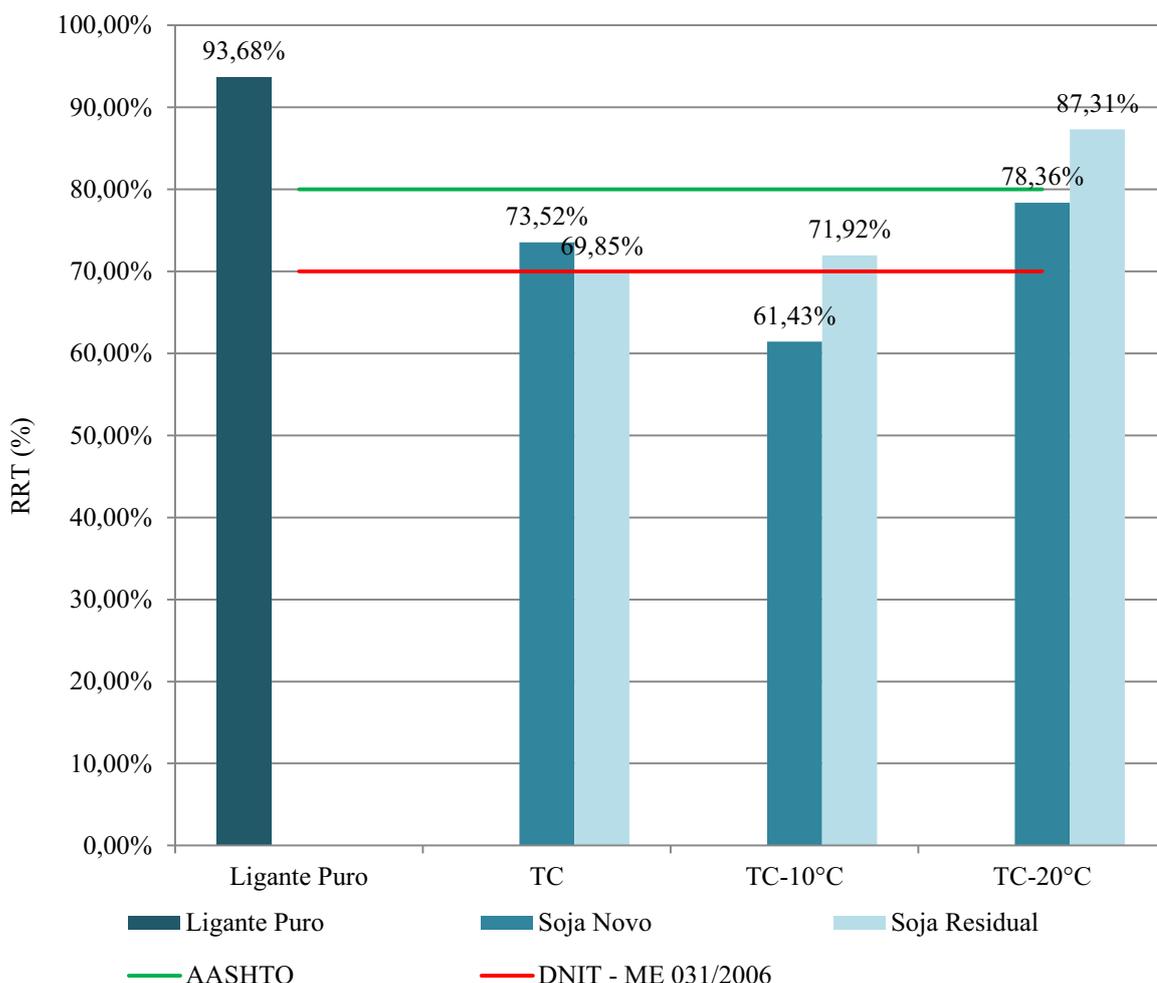
Na Tabela 8 são apresentadas as médias dos resultados obtidos a partir dos ensaios de Dano por Umidade Induzida para os dois CPs condicionados e dois CPs não condicionados para a mistura asfáltica aditivada com 1% de óleo de soja novo, e para a mistura asfáltica aditivada com 2% de óleo de soja residual, ambas as misturas usinadas 10°C e 20°C abaixo da temperatura determinada no ensaio de viscosidade para cada teor de óleo. Ressalta-se que os resultados para a mistura asfáltica aditivada com 1% de óleo de soja novo e para a mistura asfáltica aditivada com 2% de óleo de soja residual usinadas na temperatura determinada no ensaio de viscosidade para cada teor de óleo, bem como para o ligante puro, foram obtidos a partir do estudo realizado por Barros (2017). A Figura 30 apresenta a resistência ao dano (RRT) observada por meio da relação entre a resistência a tração por compressão diametral dos CPs com (RTu) e sem condicionamento (RT).

Para os resultados, os fatores determinantes no desempenho das misturas no ensaio de dano por umidade induzida são o grau de saturação, o ligante asfáltico, e a temperatura de usinagem e compactação, já que o agregado, a faixa granulométrica, bem como as demais condicionantes foram mantidas constantes.

Tabela 7 – RRT do Ensaio de Lottman Modificado

Amostra	RT (MPa)	RTu (MPa)	RRT (%)
Ligante puro	1,13	1,05	93,68
Soja Novo (TC)	1,09	0,8	73,52%
Soja Residual (TC)	1,03	0,72	69,85%
Soja Novo (TC-10°C)	1,08	0,75	61,43%
Soja Residual (TC-10°C)	1,08	0,78	71,92%
Soja Novo (TC-20°C)	1,19	0,93	78,36%
Soja Residual (TC-20°C)	1,02	0,89	87,31%

Figura 29 – RRT do Ensaio de Lottman Modificado



De acordo com a AASHTO, o valor de RRT mínimo para que a mistura seja considerada não susceptível à ação deletéria da água é 80%. Neste caso, apenas a mistura com adição de óleo soja residual usinada 20°C abaixo da temperatura determinada no ensaio de viscosidade foi considerada adequada, porém, como há uma tendência das misturas apresentarem uma maior sensibilidade à umidade e menor resistência conforme a diminuição da temperatura de usinagem, devido problemas com a adesividade, o resultado observado na redução de 20°C não atende ao esperado. A norma DNIT-ME 031/2006, entretanto, preconiza a RRT mínima de 70%. Para este valor, apenas as misturas com óleo soja residual usinada à temperatura determinada no ensaio de viscosidade e com óleo soja novo usinada 10°C abaixo desta não atenderam ao estabelecido.

Todas as amostras modificadas apresentaram sensibilidade à umidade maior do que aquela com ligante não aditivado, demonstrando a interferência destes aditivos quanto à

manutenção do comportamento adesivo das misturas asfálticas. Isto pode estar relacionado às menores temperaturas de trabalhabilidade, que podem acarretar umidade não completamente expulsa da mistura. Os valores de RRT tenderam a reduzir conforme o aumento do teor de óleo, o que evidencia que não há interferência no processo de fritura na resistência retida.

A redução da temperatura pode prejudicar a adesividade que, juntamente à ação deletéria da água, pode causar defeitos como a desagregação e o deslocamento da camada de revestimento que tendem a maximizar danos no pavimento e conseqüente diminuição da rigidez. No entanto, não houve padrão com a diminuição da temperatura de compactação nos corpos de prova, podendo-se afirmar, inclusive, que a redução de 20 °C da temperatura de compactação apresenta resultados superiores em relação às misturas usinadas na temperatura determinada pelo ensaio de viscosidade para ambos os teores de óleo.

4.4 Módulo Dinâmico ($|E^*|$)

As curvas mestras das misturas asfálticas foram elaboradas a partir dos dados de módulo dinâmico obtidos nas três temperaturas e seis frequências, por meio do processo de superposição tempo temperatura na temperatura de referência de 21°C. Para o traçado, adotou-se o método apresentado no documento “ E^* , Dynamic Modulus: Test Protocol – Problems and Solutions” do Departamento de Transportes dos EUA.

Os resultados deste ensaio para o ligante puro, Figura 31, a mistura asfáltica aditivada com 1% de óleo de soja novo e para a mistura asfáltica aditivada com 2% de óleo de soja residual usinadas na temperatura determinada no ensaio de viscosidade, as Figuras 32 e 33 respectivamente, foram obtidos a partir do estudo realizado por Barros (2017). As Figuras 34 e 35 apresentam em formato de curva mestra os valores dos ensaios de Módulo Dinâmico ($|E^*|$) em função da frequência para a mistura asfáltica aditivada com 1% de óleo de soja novo e para a mistura asfáltica aditivada com 2% de óleo de soja residual usinadas 10°C abaixo da temperatura determinada no ensaio de viscosidade respectivamente. As Figuras 36 e 37 apresentam em formato de curva mestra os valores dos ensaios de Módulo Dinâmico ($|E^*|$) em função da frequência para a mistura asfáltica aditivada com 1% de óleo de soja novo e para a mistura asfáltica aditivada com 2% de óleo de soja residual, usinada 20°C abaixo da temperatura determinada no ensaio de viscosidade respectivamente.

Como descrito em Costa (2017) as curvas mestras são representadas por meio de uma curva contínua ($\log |E^*|$ versus $\log f$) elaboradas a partir do processo de superposição tempo-

temperatura na temperatura de referência de 21°C. Esta representação gráfica, obtida a partir dos valores médios de dois CPs, fornece informações sobre o comportamento viscoelástico das misturas asfálticas. Uma curva mestra cujos valores formam uma linha horizontal caracterizaria uma mistura com comportamento puramente elástico. Já uma curva próxima do vertical corresponderia a um concreto asfáltico muito susceptível às variações de frequência e de temperatura (OTTO, 2009).

A rigidez de uma mistura asfáltica é dependente do tempo de carregamento (relacionado a velocidade de circulação dos veículos pesados) e também da temperatura que o asfalto é submetido. A rigidez é mais elevada em baixas temperaturas e em curtos prazos de carregamento, em contrapartida, a rigidez é reduzida em altas temperaturas e longos tempos de carregamento. Então é de fundamental importância o conhecimento do MD na previsão de deformações permanentes (SILVA, 2006).

Observando as curvas mestras individuais, percebe-se que todas as misturas usinadas a temperaturas de 10 e 20°C abaixo da temperatura determinada no ensaio de viscosidade respectivamente apresentaram comportamentos semelhantes as usinadas à temperatura determinada no ensaio de viscosidade assim como ao ligante puro no que diz respeito a queda da rigidez conforme o aumento da temperatura e da frequência de aplicação de carga.

Figura 30 - Ensaio de módulo dinâmico para o ligante puro

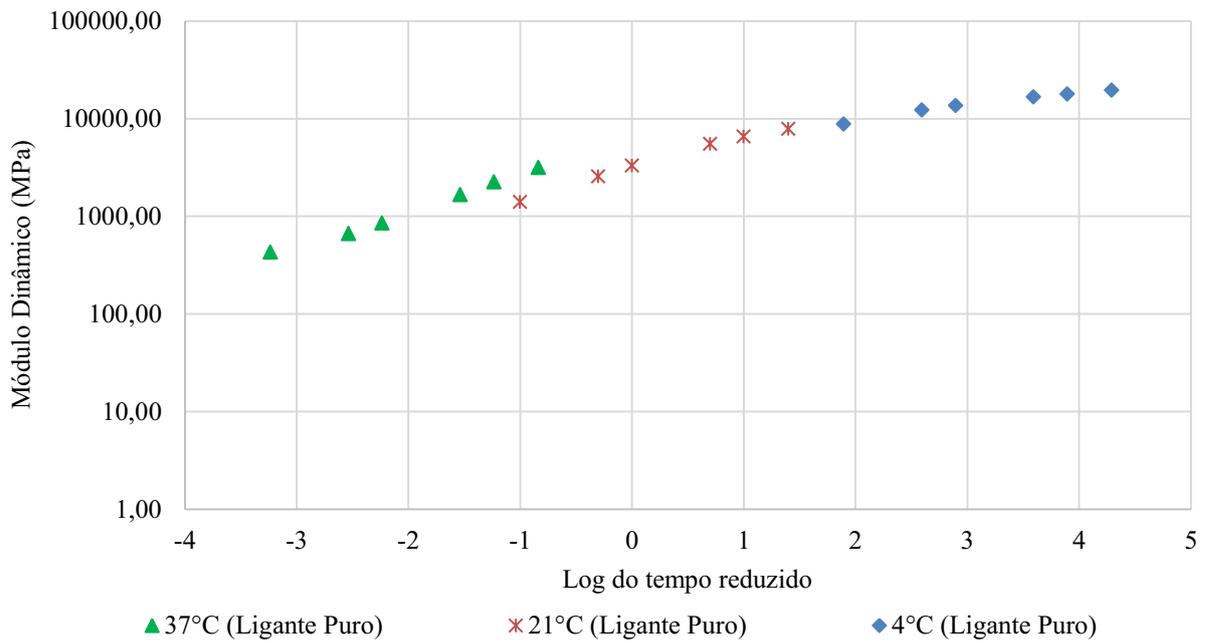


Figura 31 - Ensaio de módulo dinâmico para a mistura asfáltica aditivada com 1% de óleo de soja novo usinada na temperatura de compactação (TC)

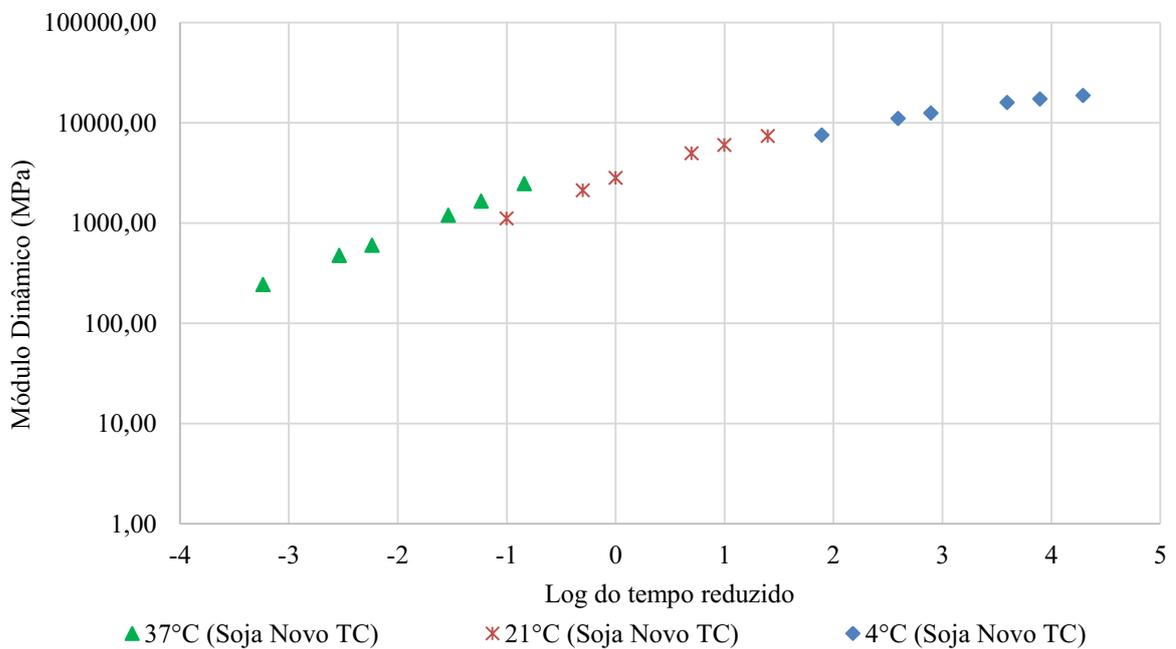


Figura 32 - Ensaio de módulo dinâmico para a mistura asfáltica aditivada com 2% de óleo de soja residual usinada na temperatura de compactação (TC)

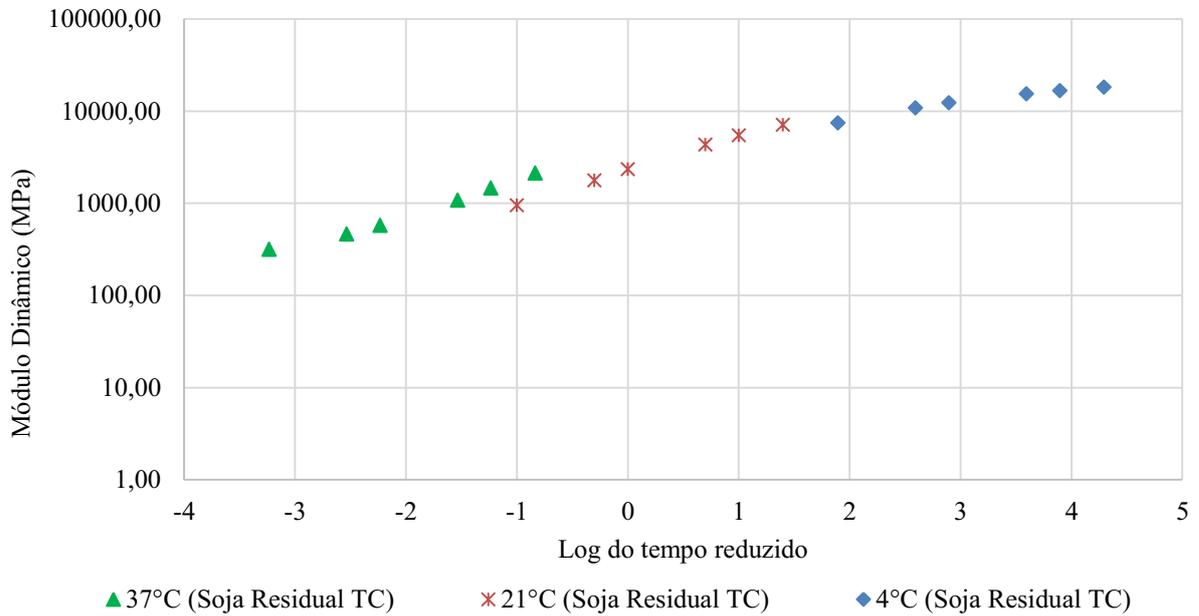


Figura 33 - Ensaio de módulo dinâmico para a mistura asfáltica aditivada com 1% de óleo de soja novo usinada 10°C abaixo da temperatura de compactação (TC-10)

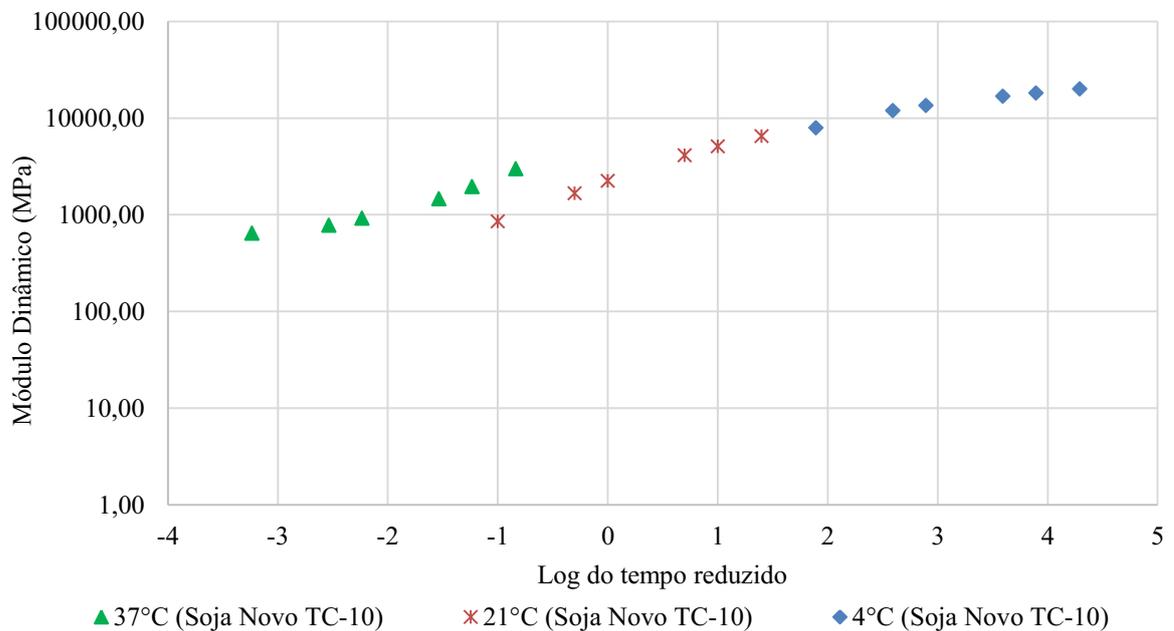


Figura 34 - Ensaio de módulo dinâmico para a mistura asfáltica aditivada com 2% de óleo de soja residual usinada 10°C abaixo da temperatura de compactação (TC-10)

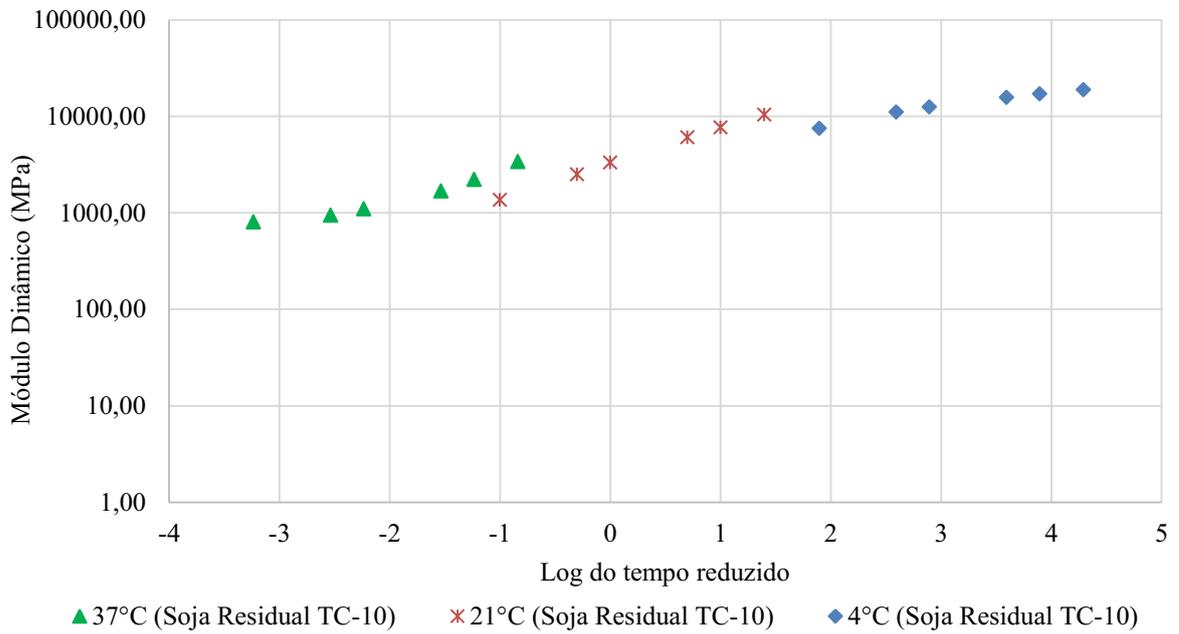


Figura 35 - Ensaio de módulo dinâmico para a mistura asfáltica aditivada com 1% de óleo de soja novo usinada 20°C abaixo da temperatura de compactação (TC-20)

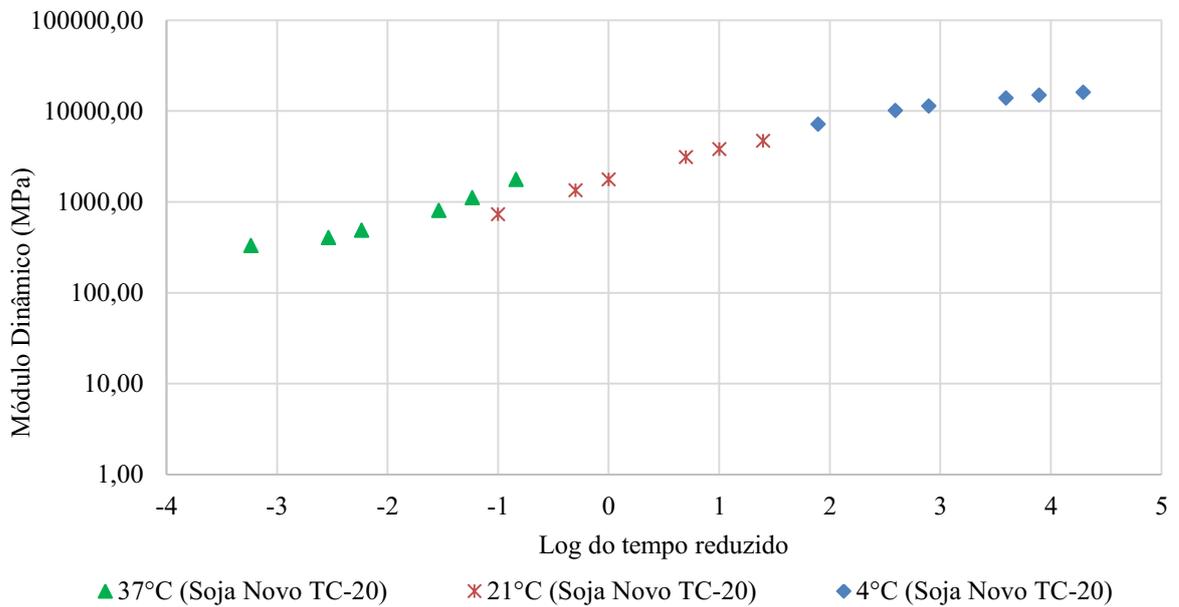
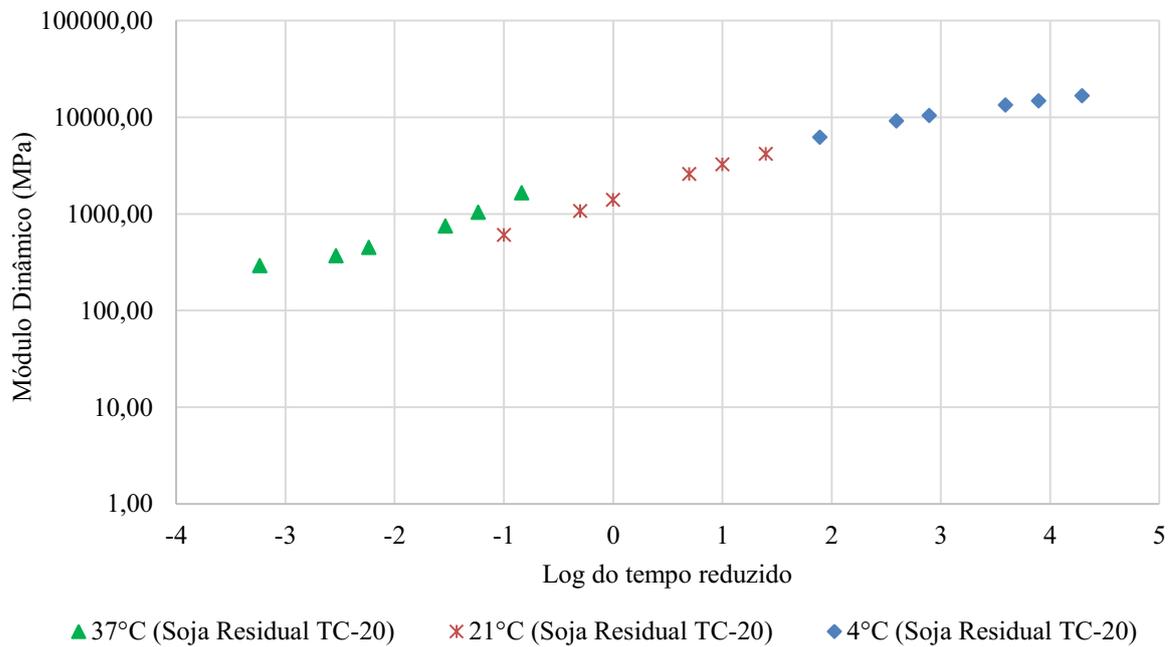


Figura 36 - Ensaio de módulo dinâmico para a mistura asfáltica aditivada com 2% de óleo de soja residual usinada 20°C abaixo da temperatura de compactação (TC-20)



Optou-se também por apresentar os resultados do ensaio de módulo dinâmico para o ligante puro realizado por Barros (2017) e comparar separadamente com os resultados obtidos para a mistura aditivada com 1% de óleo de soja novo (Figura 38) e para a mistura aditivada com 2% de óleo de soja residual (Figura 39) nas três temperaturas de compactação.

Figura 37 - Curvas mestras do ligante puro e das misturas aditivadas com 1% de óleo de soja novo nas três temperaturas de compactação

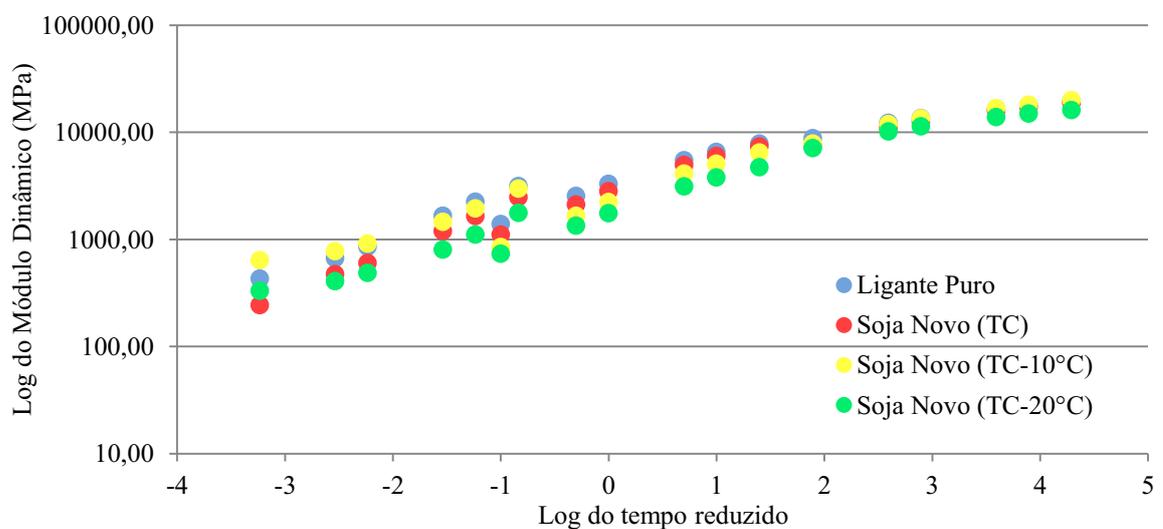
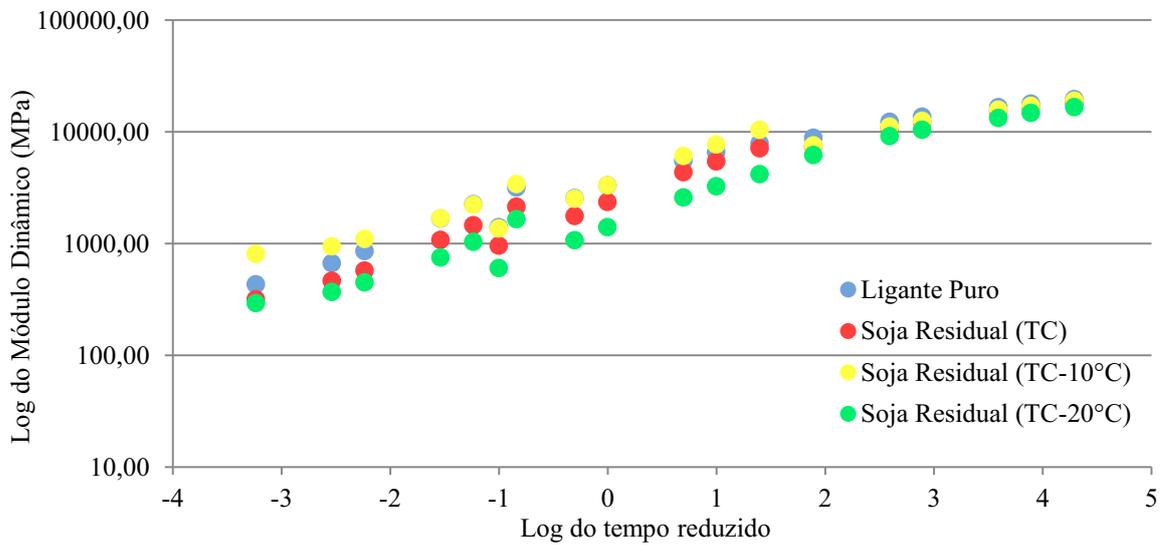


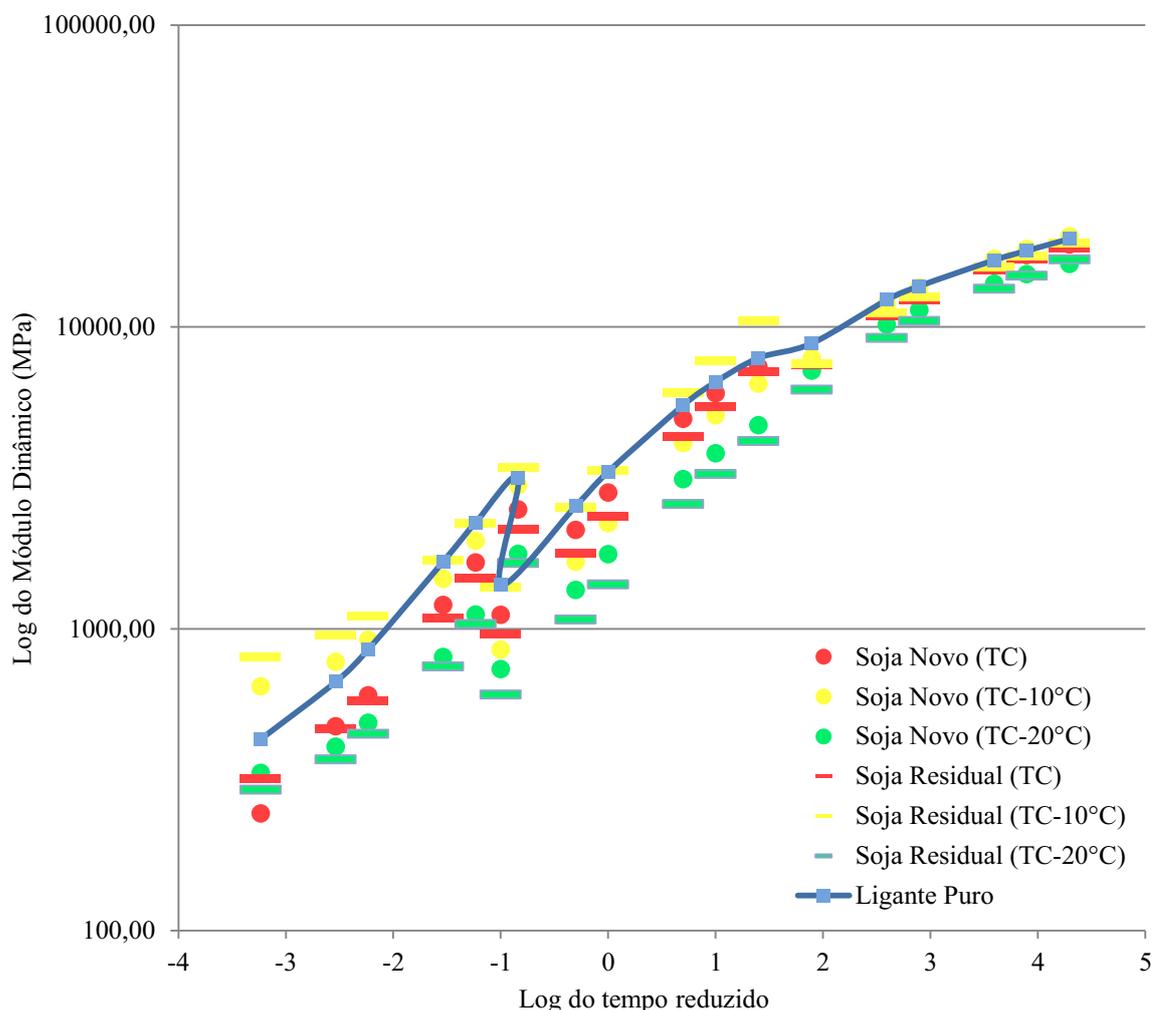
Figura 38 - Curvas mestras do ligante puro e das misturas aditivadas com 2% de óleo de soja residual nas três temperaturas de compactação



Observa-se que a adição de ambos os óleos (novo e residual), assim como a redução da temperatura de compactação, afetaram o parâmetro de rigidez das misturas avaliadas por meio da aplicação de carga senoidal em diferentes frequências. Foi constatado que tanto para o óleo novo quanto residual, as misturas usinadas 10°C abaixo da temperatura determinada no ensaio de viscosidade são menos susceptíveis a diminuição da rigidez com o aumento da temperatura e da frequência de aplicação da carga.

A fim de avaliar e comparar o comportamento das misturas aditivadas com adição de 1% de óleo de soja novo com as misturas aditivadas com 2% de óleo de soja residual, em relação ao ligante puro, optou-se por apresentar os resultados do ensaio de módulo dinâmico do ligante puro e de todas as misturas em todas as temperaturas de ensaio (Figura 40).

Figura 39 - Curvas mestras de todas as misturas avaliadas

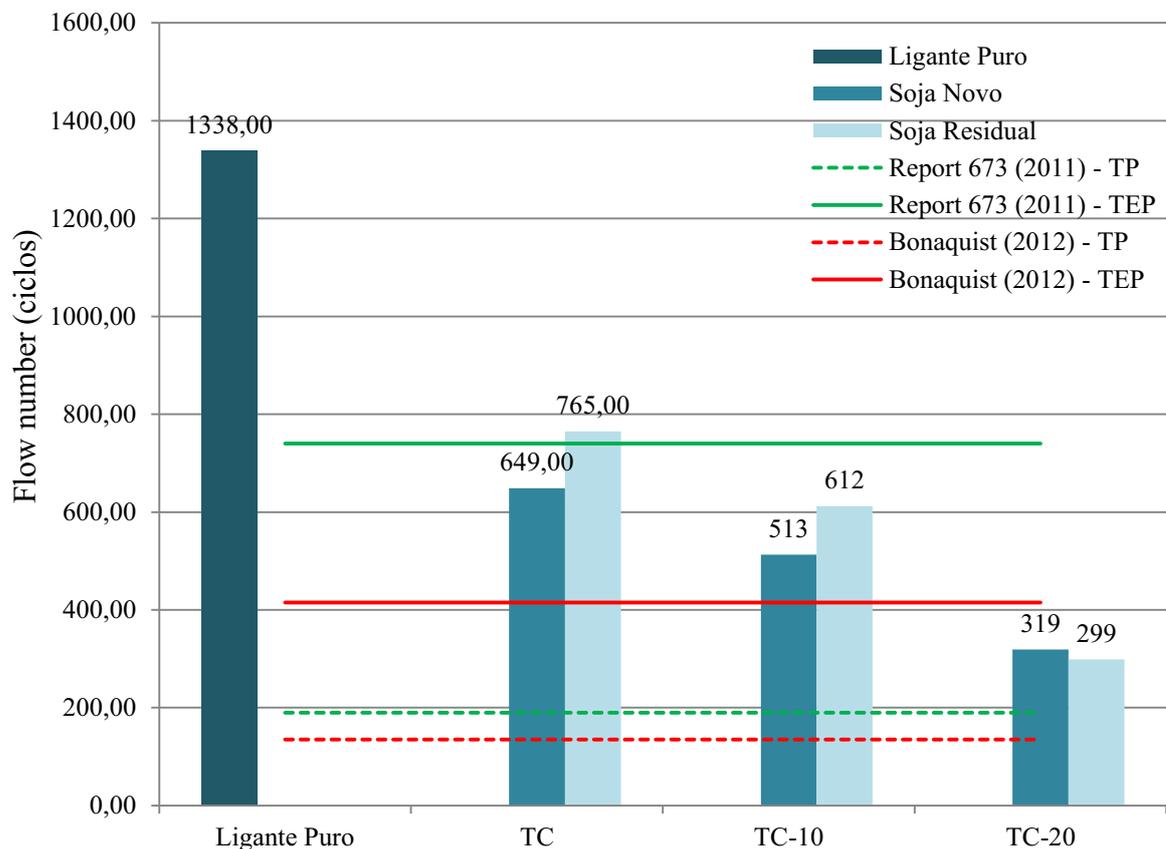


Pode-se observar que, quando usinadas na temperatura determinada pelo viscosímetro ou 20°C abaixo desta, as misturas aditivadas com 1% de óleo de soja novo apresentaram um melhor desempenho em relação as mistura aditivadas com 2% de óleo de soja residual quanto a rigidez, principalmente em situações de maior frequência de aplicação de carga e maiores temperaturas. As misturas usinadas 10°C abaixo da temperatura determinada pelo viscosímetro, as misturas aditivadas com 2% de óleo de soja residual obtiveram os melhores resultados em comparação a todas as misturas, tanto em relação aos demais teores quanto às temperaturas de compactação, quanto a rigidez sob as mesmas condições de frequência de aplicação de carga e temperaturas.

4.5 Flow Number

Na Figura 41 são apresentadas as médias dos resultados obtidos a partir dos ensaios de Flow Number para a mistura asfáltica aditivada com 1% de óleo de soja novo, e para a mistura asfáltica aditivada com 2% de óleo de soja residual, ambas as misturas usinadas 10°C e 20°C abaixo da temperatura determinada no ensaio de viscosidade para cada teor de óleo. Ressalta-se que os resultados para a mistura asfáltica aditivada com 1% de óleo de soja novo e para a mistura asfáltica aditivada com 2% de óleo de soja residual usinadas na temperatura determinada no ensaio de viscosidade para cada teor de óleo, bem como para o ligante puro, foram obtidos a partir do estudo realizado por Barros (2017).

Figura 40 - Valores de Flow Number



Quanto maior o FN menores serão as deformações sofridas pelo pavimento e menor a tendência de formação de trilhas de roda (WITCZAK et al., 2002). Percebe-se que a mistura usinada na temperatura determinada no ensaio de viscosidade apresentou resultados superiores de FN, suportando, portanto, um maior número de ciclos de carregamento até

chegar no ponto de transição da zona com taxa de deformação permanente constante para a zona de ruptura, o que indica uma maior resistência à deformação permanente.

As misturas usinadas 10°C abaixo desta temperatura, apresentaram valores de FN ligeiramente menores. A redução em 20°C da temperatura ocasionou a queda pela metade dos valores de FN de quando a usinagem é feita na temperatura determinada no ensaio de viscosidade.

Em relação ao ligante puro, o potencial à deformação permanente sofrida pelo pavimento aumentou em 51% com a adição de 1% de óleo de soja novo e em 43% com a adição de 2% de óleo de soja residual.

Em relação à mistura com adição de 1% de óleo de soja novo, o potencial à deformação permanente sofrida pelo pavimento aumentou 21% com a diminuição em 10°C, e em 51% com a diminuição em 20°C da temperatura determinadas pelo ensaio de viscosidade em relação as usinadas na temperatura de usinagem e compactação da mistura determinada por este ensaio.

Em relação à mistura com adição de 2% de óleo de soja residual, o potencial à deformação permanente sofrida pelo pavimento aumentou 33% com a diminuição em 10°C, e em 58% com a diminuição em 20°C da temperatura determinadas pelo ensaio de viscosidade em relação as usinadas na temperatura de usinagem e compactação da mistura determinada por este ensaio.

O que já era esperado, visto que a redução da temperatura pode diminuir a taxa de evaporação da água presente nos agregados elevando o potencial ao dano na mistura por umidade retida, reduzindo levemente à resistência a tração indireta e causando deficiência na junção entre o agregado e o ligante. A redução nas temperaturas de usinagem e compactação resultariam também em uma menor rigidez inicial da mistura, uma vez que a oxidação é menor, podendo acarretar em menor resistência à formação de trilha de roda e resistência à tração pobre, no entanto, como benefício, uma mistura menos rígida pode melhorar a resistência à fadiga, aumentando o tempo de vida do projeto. (FILHO, 2013; ASCHENBRENER; WEST, 2011)

Os autores também citam que a redução da temperatura também poderia resultar em um ligante menos rígido, uma vez que a oxidação é menor, podendo acarretar em menor resistência à formação de trilha de roda e resistência à tração pobre, no entanto, como

benefício, uma mistura menos rígida pode melhorar a resistência à fadiga, aumentando o tempo de vida do projeto.

Pode-se observar que o número de ciclos até a fluência das misturas usinadas 10°C abaixo da temperatura determinada pelo ensaio de viscosidade, bem como para as misturas modificadas com 1% de óleo de soja novo usinada 20°C abaixo da temperatura da temperatura determinada pelo ensaio de viscosidade, se enquadraram no valor recomendado por Nascimento (2008) para rodovias de tráfego médio, que deve ser superior a 300. Porém, para as misturas modificadas com 2% de óleo de soja residual usinadas 20°C abaixo da temperatura determinada pelo ensaio de viscosidade para este teor, o número de ciclos até a fluência não atende a esta recomendação.

Porém, segundo o National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), a Federal Highway Administration (FHWA) e o Advanced Asphalt Technologies (2011), nos Estados Unidos, usam critérios de FN presentes no Report 673 em que estradas com tráfego médio devem apresentar valores de FN maior que 53, ao passo que para aquelas destinadas ao tráfego pesado e extremamente pesado os FN devem ser maiores que 190 e 740, respectivamente. Desta forma, todas as misturas com óleo novo e residual, nas três temperaturas de compactação são satisfatórias para o tráfego médio e pesado, para o tráfego extremamente pesado apenas a mistura aditivada com 2% de óleo de soja residual usinada a temperatura ótima de usinagem e compactação determinada pelo ensaio de viscosidade é satisfatória.

Bonaquist (2012) adota os valores mínimos de FN de 15, 50, 135, e 415, para estradas com tráfego leve, médio, pesado e extremamente pesado, respectivamente. Desta forma apenas as misturas aditivadas com óleo de soja novo e residual compactadas 20°C abaixo da temperatura determinada pelo ensaio de viscosidade, não atendem o mínimo para tráfego extremamente pesado. Ainda de acordo com Banaquist (2012), todas as misturas podem ser submetidas ao tráfego de intensidade pesada.

5 CONCLUSÃO

Os resultados de RT aumentaram para todas as misturas em todas as temperaturas de usinagem deste ensaio em relação as misturas usinadas na temperatura determinada pelo ensaio de viscosidade. As misturas aditivadas com 1% de óleo de soja novo aumentaram levemente, enquanto que as aditivadas com 2% de óleo de soja residual sofreram um aumento mais considerável principalmente quando usinadas 10 °C abaixo da temperatura de compactação. Permanecendo assim, acima do mínimo normatizado.

Para os resultados de MR, as misturas usinadas 10 °C abaixo da temperatura de compactação sofreram um aumento em relação as misturas usinadas na temperatura determinada pelo ensaio de viscosidade, sendo maior para as misturas aditivadas com 2% de óleo de soja residual. As misturas usinadas 20 °C abaixo da temperatura de compactação sofreram uma leve redução em relação as misturas usinadas na temperatura determinada pelo ensaio de viscosidade para ambos os teores de óleo. Porém, apesar da redução, continuam acima do mínimo exigido pela norma.

Em relação ao dano por umidade induzida, apenas as misturas com óleo soja residual usinada à temperatura determinada no ensaio de viscosidade e com óleo soja novo usinada 10°C abaixo desta não atenderam ao estabelecido pela norma DNIT-ME 031/2006. Podendo-se afirmar, que a redução de 20 °C da temperatura de compactação apresenta resultados superiores em relação às misturas usinadas na temperatura determinada pelo ensaio de viscosidade para ambos os teores de óleo.

No que se refere às propriedades viscoelásticas, as misturas apresentaram a mesma tendência de queda de rigidez conforme o aumento da temperatura e diminuição da frequência de aplicação de carga.

Quanto à resistência à deformação permanente, houve uma queda dos valores de FN de em média 25% ao reduzir 10 °C da temperatura de compactação e 55% ao reduzir 10 °C da temperatura de compactação em comparação às misturas usinadas na temperatura determinada pelo ensaio de viscosidade para ambos os teores de óleo. Estes números de ciclos, entretanto, se enquadram no mínimo exigido para rodovias de tráfego médio e pesado, segundo o National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) e a Federal Highway Administration (FHWA) nos Estados Unidos.

Diante disto, pôde-se comprovar a viabilidade quanto ao desempenho mecânico da utilização do óleos de soja (novo e residual) como um promotor de redução das temperaturas

de produção e de compactação das misturas asfálticas, especialmente no teor de 2% de adição de óleo de soja residual e compactadas 10°C abaixo da temperatura de compactação determinada pelo ensaio de viscosidade rotacional para esta mistura.

Tendo em vista que a adição de 2% de adição de óleo de soja residual já havia diminuído 5,6°C na temperatura de compactação em relação ao ligante puro, que era de 162,4°C, e em detrimento do atendimento as normas de resistência mecânica apesar da redução de 10°C além da redução promovida pela adição do óleo, pode-se concluir que, somadas, a adição de 2% de óleo de soja residual promove uma redução de 15,6°C na temperatura de compactação em relação ao ligante puro, viabilizando a compactação da mistura aditivada na temperatura de 146,8°C, o que pode sugerir favorecimento na segurança dos trabalhadores durante a manipulação das misturas e atenuação da dissipação de agentes tóxicos na queima do ligante.

Tendo em vista que o processo de fritura não foi refletido nos resultados e o melhor resultado para este óleo, destaca-se o uso do óleo residual por apresentar maiores benefícios ambientais, sendo uma alternativa para misturas mornas além de promover um descarte ecológico para este insumo. Os ensaios mecânicos comprovam também a influencia deste nos parâmetros volumétricos e consequentemente na resistência mecânica.

5.1 Sugestões para pesquisas futuras

Com o objetivo de melhorar e dar continuidade e aprofundamento ao objeto desta pesquisa são sugeridos os seguintes estudos:

- efetuar uma análise comparativa entre o aditivo óleo de soja e outros aditivos sobre as dosagens de misturas asfálticas, utilizando as metodologias Marshall e SUPERPAVE;
- estudar outras faixas granulométricas para misturas asfálticas, para a verificação das propriedades volumétricas e mecânicas com o aditivo óleo de soja;
- realizar ensaios de “Creep dinâmico” e de Fadiga para uma previsão de deformação permanente das misturas asfálticas com aditivo óleo de soja;
- executar trechos experimentais com misturas modificadas com óleo de soja para monitoramento e criação de banco de dados relacionado ao desempenho obtido com este tipo de mistura em escala real;

- aprofundar o estudo por meio de ampliação da amostra e tratamento estatístico para avaliar possíveis correlações e associações entre o uso óleo novo ou óleo de reuso na confecção de mistura asfáltica.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO (2007) T 283/2007 – Standard Method of Test for Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage. American Association of State Highway and Transportation Officials, EUA.

AASHTO (2009) TP 62 – Determining modulus of hot mix asphalt (HMA). American Association of State Highway and Transportation Officials, EUA.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9935: agregados: terminologia. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT (2009) NBR 15235/09 – Materiais asfálticos - Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo.

ABNT (2011) NBR 16018/11 – Materiais asfálticos - Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo.

ADVANCED ASPHALT TECHNOLOGIES, LLC. A manual for design of hot mix asphalt with commentary, NCHRP Report 673, National Cooperative Highway Research Program, Washington, D.C, 2011.

AHMED, E. M.; HESP, S. M., SAMY, S. K. P.; RUBAB, S.D.; WARBURTON, G. Effect of warm mix additives and dispersants on asphalt rheological, aging, and failure properties. *Construction and Building Materials* 37, 493–498, 2012.

ALBUQUERQUE, A.P.F.; PINTO, S.; VIEIRA, A.; VENTORINI, L.A.; LOPES, L.A.S., Influência da Energia de Compactação e da Temperatura de Moldagem nas Propriedades Mecânicas de corpos de prova de Concreto Asfáltico. 35^a Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

ALENCAR, A. E. V.; Avaliação do Uso de Polímero EVA, Resíduo da Indústria de Calçados (EVAR) e Aditivos no Desempenho Reológico de Ligante Asfáltico de Petróleo. Fortaleza, 2009. Acesso em 31 de Janeiro de 2017, disponível em <<http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/11139>>.

ANP – AGENCIA NACIONAL DE PETROLEO, GAS NATURAL E BIOCOMBUSTIVEIS. Resolução ANP nº 19, de 11 jul. 2005. Estabelece as especificações dos cimentos asfálticos de petróleo (CAP). Brasília: Diário Oficial da União, publicada em 12 jul. 2005, republicada em 13 jul. 2005, retificada em 25 jul. 2005 e 17 mar. 2006. . Resolução ANP nº 39, de 24.12.2008. Brasília: Diário Oficial da União, 2008.

AMARAL, S. C.; Estudo de Misturas Asfálticas Densas com Agregados do Estado do Pará, Utilizando Asfalto Convencional (CAP-40) e Asfalto Modificado com Polímero SBS (BETUFLEX B 65/60). Universidade de São Paulo - USP. São Carlos, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 5821: Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate. Estados Unidos, 2013.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T 283: Resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage. Anexo de normas traduzidas – Rede Temática de Ligante asfáltico – PETROBRÁS, 1989.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 2872: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). Estados Unidos, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM (2013) D 4402 – Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer. American Society for Testing and Materials, EUA.

ANDERSON, R. M.; BAUMGARDNER, G.; MAY, R.; REINKE, G. Engineering properties, emissions, and field performance of warm mix asphalt technologies. NCHRP PROJECT 9-47. Transportation Research Board of The National Academies. Washington D.C., 2008.

ANTUNES, A. Estudo por ressonância paramagnética eletrônica da fotodegradação de petróleo brasileiro sob luz solar. 2001. Dissertação (Mestrado em Física). Universidade Estadual de Londrina – UEL/PR, 2001.

ARAGÃO, F. T. S.; OSMARI, P. H.; Avaliação do Resíduo de Óleo Vegetal como Agente Rejuvenescedor de Ligantes a Partir de Análises Reológicas e de Morfologia de Superfície. - XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET, Ouro Preto, 2015. Acesso

em 19 de Fevereiro de 2017, disponível em <<http://www.anpet.org.br/xxixanpet/anais/documents/AC984.pdf>>.

ASCHEBRENER, T.; SCHIEBEL, B.; WEST, R. Three-year of the Colorado Department of Transportation's warm mix Asphalt experimental feature on I- 70 in Silverthorne, Colorado. National Center of Asphalt Technology, Auburn, Alabama. 2011.

ASLI, H.; AHMADINIA, E.; ZARGAR, M.; KARIM, M. R. Investigation on physical properties of waste cooking oil – Rejuvenated bitumen binder. Construction and Building Materials. Malasia, 2012.

ASLI, H.; KARIM, M. R. Implementation of waste cooking oil as RAP rejuvenator. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. Malaysia. v. 9, p. 1336-1350. 2011.

ASSOCIATION MONDIALE DE LA ROUTE (AIPCR). Emploi des liants bitumineux modifiés, des bitumes spéciaux et des bitumes avec additifs em techniques routières. Guide Technique. september, 1999, La Défense, France.

ASPHALT ACADEMY, 2001, Technical Guideline: The Use of Modified Bituminous Binders in Road Construction – TG 1. Sabita e CSIR, Pretoria/South Africa.

ASPHALT INSTITUTE. The Asphalt Handbook. MS-4. 7th edit. Asphalt Institute, 2007.

AUSTROADS. Review of overseas trials of warm mix asphalt pavements and current usage by Austroads members. Austroads. Sydney, 2012.

AUSTROADS. Review of overseas trials of warm mix asphalt pavements and current usage by Austroads members. Austroads. Sydney, 2012.

AZAHAR, W. N. A. W.; BUJANG, M.; JAYA, R. P.; HAININ, M. R.; MOHAMED, A.; NGADI, N.; JAYANTI, D. S. The potencial of waste cooking oil as bio-asphalt for alternative binder – an overview. Jurnal Teknologi. Malaysia. v. 78, n. 4, p. 111-116, 2016.

BAHIA, H. U.; ZAI, H.; ZENG, M.; HU, Y; TURNER, P. Development of binder specification parameters based on characterization of damage behavior. Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 70, p. 442-470, 2001.

BAHIA, H.U.; HISLOP, W.P.; ZHAI, H.; RANGEL, A. Classification of Asphalt Binders Into Simple and Complex Binders, Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists. 1998, p. 01-41

BALBO, J. T. Pavimentação asfáltica: Materiais, projetos e restauração. Oficina de textos. São Paulo, 2007. 558p.

BANERJEE, A., SMIT, A. F., AND PROZZI, J. A. The effect of long-term aging on the rheology of warm mix asphalt binders. *Fuel*, 97, 603–611, 2012.

BARROS, A.; Avaliação da adição de óleo de cozinha em propriedades mecânicas de misturas asfálticas - Pró-reitoria de pesquisa e extensão. Programa institucional de bolsas de iniciação científica. Universidade Federal de Campina Grande. 2017.

BECKER, Y.; MENDEZ, M. P.; RODRIGUEZ, Y. Polymer Modified Asphalt. *Vision Tecnologica*, vol. 9, n.1, p. 39-50, 2001.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. DA, CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica : formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2010.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros. 3ªed. Rio de Janeiro: Petrobras – Asfalto/ABEDA, 2008. 475p.

BERNUCCI, L.B., LEITE, L.M. & MOURA, E., 2002, Propriedades Mecânicas em Laboratório de Misturas Asfálticas Convencionais e Modificadas por Polímeros. 16º Encontro de Asfalto, IBP Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Rio de Janeiro/RJ.

BILLMEYER, IRED W., 1984, *Polymers and Polymerization*. 35ª Edição Willey-Interscience, EUA.

BRINGEL, R. M.; SOARES, S. A.; Estudo Químico e Reológico de Ligantes Asfálticos Modificados por Polímeros e Aditivos. 2007. Acesso em 19 de Fevereiro de 2017, disponível em < <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/9529>>.

BUDNY, J. Avaliação do Comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas/ Jaelson Budny. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE. 137p. Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2012.

BUSS, A.; WILLIAMS, R. C.; SCHRAM, S. The influence of warm mix asphalt on binders in mixes that contain recycled asphalt materials. *Construction and Building Materials* 77, 50–58, 2015.

CASAGRANDE, M. D. T.; NASCIMENTO, D. R.; LIMA, C. S.; SOARES, J. B.; Estudo da Aplicabilidade de Borra Oleosa Asfáltica Pura como Material para Pavimentos de Baixo Volume de Tráfego. Acesso em 19 de Fevereiro de 2017, disponível em <<https://www.researchgate.net/publication/268346087>>.

CAPITÃO, S.D.; PICADO-SANTOS, S. G.; MARTINHO, F. Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 36,1016–1024, 2012.

CAVALCANTE, F. P.; Efeito da adição dos óleos de ricinus communis e linus asitatissimom nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo puro e modificado. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2016.

CAVALCANTI, L. S. Efeito de alguns modificadores de ligante na vida de fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas. Rio de Janeiro, 2010. Dissertação (Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia – COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 196p.

CHEN, M; LENG, B.; WU, S.; SANG, Y. Physical, chemical and rheological properties of waste edible vegetable oil rejuvenated asphalt binders. *Construction and Building Materials* 66, 286–298. 2014.

CHEN, M.; XIAO, F.; PUTMAN, B.; LENG, B; WU, S. High temperature properties of rejuvenating recovered binder with rejuvenator, waste cooking and cotton seed oils. *Construction and Building Materials*. China. n. 59, p. 10-16, 2014a.

CHENG, D.; HICKS, R. G.; TEESDALE, T. Assessment of warm mix technologies for use with asphalt rubber paving applications. In: *Transportation Research Board Annual Meeting*, 2011. Washington D.C.

CLARK, T. M.; RORRER, T. M. The rapid implementation of WMA in Virginia. In: *2nd International Warm Mix Conference*. 2011, St. Louis, Missouri, Estados Unidos.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Pesquisa CNT de rodovias 2016: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/>> Acesso em 21 de Fevereiro de 2017..

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos safra 2016/2017. Brasília, DF, 2017. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conabweb/>>. Acesso em 12 Janeiro. 2017.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Levantamento Safra 2016. Brasília, DF, 2016. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conabweb/>>. Acesso em 12 Janeiro. 2017.

CONAB (2016) – Observatório Agrícola – Acompanhamento da safra brasileira de grãos. Brasília, DF. <<http://www.conab.gov.br/conabweb/>>. Acesso em 20 fevereiro 2017.

COSTA, L. F.; Análise do Uso das Fibras do Pseudocaule da Bananeira em Misturas Asfálticas Mornas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Campina Grande, 2017.

COSTA, D. B.; CAVALCANTE, F. B.; RODRIGUES, J. K. G.; MENDONÇA, A. N. G. D.; LIRA, Y. C. (2015) Influência da adição do óleo de linhaça nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo. 44ª RAPv – Reunião Anual de Pavimentação.

D'ANGELO, J.; HARM, E.; BARTOSZEK, J.; BAUMGARDNIT, G.; CORRIGAN, M.; COWSERT, J.; HARMAN, T.; JAMSHIDI, M.; JONES, W.; NEWCOMB, D.; PROWELL, B.; SINES, R.; YEATON, B. Warm-Mix Asphalt: European Practice. International Technology Scanning Program. Virginia, 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . DNIT 095: Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . DNIT 148: Material betuminoso – determinação dos pontos de fulgor e combustão (vaso aberto Cleveland). Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . DNIT ME 131: Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . DNIT ME 054: Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . DNIT ME 078: agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994. 151

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . DNIT - ME 155: Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . DNIT - ME 043: Misturas betuminosas a quente: Ensaio Marshall: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . DNIT - ME 083: Agregados: Análise granulométrica: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . DNIT - ME 383: Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cântabro: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . DNIT - ME 163: Material betuminoso – determinação da ductilidade. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . DNIT - ME 035: Agregados: Determinação da abrasão “Los Angeles”: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . DNIT - ME 136: Pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . DNIT - PRO 199: Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório. Rio de Janeiro, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES . DNIT - PRO 195: Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1997.

DOMINGOS, MNI; FAXINA, AL. Avaliação do comportamento fluência-recuperação de ligantes asfálticos modificados com SBS e ácido polifosfórico. Transportes, v. 21, n. 1, p. 51–58, 2013.

DOMINGOS, MDI; PLAMPLONA, T.; FAXINA, AL.; GIGANTE, A.; Viscosidade rotacional de ligantes asfálticos modificados de mesmo grau de desempenho. *Transportes*, v. 20, n. 2, p. 15–22, 2012.

EMBRAPA. Agência Embrapa de informação Tecnológica. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fbl23vmz02wx5eo0sawqe3vtldl7vi.html>>. Acesso em: 08 fevereiro 2017.

EUROBITUME. 2012. *Life cycle inventory: Bitumen*. ISBN 2-930160-26-8. Istanbul, 2012.

FAXINA, A. L.; Estudo da Viabilidade Técnica do Uso do Resíduo de Óleo de Xisto como Óleo Extensor em Ligantes Asfalto-Borracha. São Carlos, 2006. Acesso em 19 de Fevereiro de 2017, disponível em <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-29052007-170231/en.php>>.

FÉLIX, G. B.; Estudo da Incorporação de Resíduo Polimérico no Asfalto – Propriedades Físicas. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2009.

FERNANDES, M. R. S. Efeito de aditivo tipo óleo e enxofre na reologia de asfaltos modificados com SBS. 2009. 118 p. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, RS.

FERNANDES, P. R. N.; Caracterização de Ligante Asfáltico Brasileiro e Avaliação da Presença de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs). Fortaleza, 2017. Acesso em 19 de Fevereiro de 2017, disponível em <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-13052016-155321/en.php>>.

FILHO, N. W. (2013) Avaliação da influência da redução das temperaturas de usinagem e de compactação no comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE

GAMA, D. (2016) Efeito da adição de polímeros reativo, não-reativo e ácido polifosfórico e suas combinações nas propriedades de ligantes asfálticos. Tese de doutorado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB.

GAMA, D. A. Avaliação do potencial do uso do Etileno Acetato de Vinila (EVA) descartado pela indústria calçadista em misturas asfálticas. 2013. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.

GOUVEIA, L. T.; FURLAN, A. P.; PARREIRA, A. B.; FERNANDES Jr., J. L.; FABBRI, G. T. P. (2004) Considerações Acerca da Absorção de Asfalto pelos Agregados e sua Influência na Suscetibilidade à Umidade. In: XVIII Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes (ANPET), Florianópolis, SC.

GRECO, J. A. S. Avaliação da influência de alguns fatores nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas à luz da técnica de planejamento e análise de experimentos fatoriais fracionários assimétricos. 2004. 367p. Tese (Doutorado em Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos.

HANZ, A; BAHIA, H. U; KANITPONG, K.; WEN, H. (2007) Test Method to Determine Aggregate/Asphalt Adhesion Properties and Potential Moisture Damage. Wisconsin Highway Research Program, Performing Organization Code, University of Wisconsin – Madison.

HARRIGAN, E. T. Research Results Digest 374: A proposed technology evaluation program for warm mix asphalt. Transportation Research Board of the National Academies. Washington, D.C., 2012

HURLEY, G. C.; PROWELL, B. D. Evaluation of potential processes for use in warm mix asphalt. In: Association of Asphalt Paving Technologists Annual Meeting, 81., Savannah, 2006. Annual Meeting and Technical Sessions. Savannah: AAPT, V.75, 2006.

IBP: Instituto Brasileiro de Petróleo. Informações Básicas sobre Materiais Asfálticos. IBP/Comissão de Asfalto. 6ª ed. rev. Rio de Janeiro, 1999.

IMPERPAV PROJETOS E CONSULTORIA . CAP 30-45 e CAP 50-70 sua utilização em revestimentos asfálticos: estudo comparativo: relatório técnico / Imperpav Projetos e Consultoria – SãoPaulo:ABCR, 2008.

KAMARUDDIN, N. H. M.; H.; HASSAN, N. A.; ABDULLAH, M. E.; YAACOB, H. Evaluation of pavement mixture incorporating waste oil. Jurnal Teknologi. Malaysia, n. 71:3 p. 93-98, 2014.

KANDHAL, P. S. warm mix asphalt technologies: an overview. In Journal of the Indian Roads Congress, 2010.

KATRI, A.; BAHIA, H.U.; HANSON, D. Mixing and compaction temperatures for modified binders using the Superpave gyrator compactor. Association of Asphalt Paving Technologists, v. 70, p. 368-402, 2001.

KOENDERS, B .G., STOKER, D. A., BOWEN, C., et al., Innovative processes in asphalt production and application to obtain lower operating temperatures. In: Congresso Eurasphalt & Eurobitume, Barcelona, Espanha, Set. 2000.

JUNIOR, A. M.; Estudo Sobre a Ação de Modificadores no Envelhecimento dos Ligantes Asfálticos e nas Propriedades Mecânicas e de Fadiga das Misturas Asfálticas. Florianópolis, 2004. Acesso em 31 de Janeiro de 2017, disponível em <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/87049>>.

LEE, S., KIM, H., AMIRKHANDIAN, S. Influence of Warm Mix Additives on PMA Mixture Properties, Journal Materials Civil Engineering, pp. 991–997, 2012.

LEITE, L. F. M. Sustentabilidade de Pavimentos Asfálticos. Sindicato da Indústria da Construção Pesada do Estado de São Paulo – Boletim técnico. Ed. 7. São Paulo, 2013.

LEITE, L.F.M. Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros. 1999. 266 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

LESUEUR, D. The colloidal structure of bitumen: consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. Advances in Colloid and Interface Science, vol.145, p. 42-82, 2009.

LIBERATORI, L. A.; CONSTANTINO. R. S. (2006) Melhoradores de Adesividade para Misturas Asfálticas – Estado da Arte. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP, 18º Encontro de Asfalto.

LIMA, C.S.; TOMÉ, L.G.A.; SANT’ANA, H.B.; SOARES, J.B.; SOARES, S. A. Estudo do comportamento reológico por meio de curvas mestres dos ligantes asfalto-borracha. 19º Encontro de Asfalto, IBP, 9 a 11 junho, RJ, 2008.

LING, M.; CURTIS, C.W.; HANSON, D.I.; HOLL, J.N. (1997) - Quantitative Analysis of Polymers and Crumb Rubber in Hot-Mix Asphalts. Transportation Research Record 1586 , TRB, Washington, DC, p. 57-67; 1997.

LUCENA L. C. F. L, SILVEIRA I. V.; COSTA, D. B. Avaliação de ligantes asfálticos modificados com óleo da Moringa Oleífera Lam para uso em misturas mornas. Revista

Matéria. artigo 11681, pp.65-75, 2016. Acesso em 31 de Janeiro de 2017, disponível em <<https://revistas.ufrj.br/index.php/rm/article/view/3558/2712>>.

LUZ P. M.; Avaliação das propriedades mecânicas de misturas asfálticas modificadas com a adição do óleo de milho. Trabalho de Conclusão do Curso. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2016.

MAGALHÃES, S. T.; Misturas asfálticas de módulo elevado para pavimentos de alto desempenho. 2004. 188f. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação) – Mestrado em Ciências em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

MAHARAJ, R.; HARRY, V.; MOHAMED, N. The rheological properties of Trinidad asphaltic materials blended with waste cooking oil. Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology. Trinidad e Tobago, v. 31, n. 4, p. 265- 278, 2015.

MARQUES, G. L. OLIVEIRA.; Utilização do Módulo de Resiliência como Critério de Dosagem de Mistura Asfáltica; Efeito da Compactação por Impacto e Giratória. Rio de Janeiro, RJ. 2004.

MARENDA, F.; ROGGENBACK, J.; ADAMOVICZ, J. A.; HILGENBERG, M. ; CALAÇA, V. Óleo de Milho. Ponta Grossa, Paraná, PR. 2011.

MASSON, J. F.; Pelletier, L.; Collins, P. Rapid FTIR Method for Quantification of Styrene Butadiene Type Copolymers in Bitumen. Journal of Applied Polymer Science, vol. 79, p. 1034-1041, 2001.

MEDEIROS, D. F. de , Influência Da Granulometria Nas Características Mecânicas De Misturas Asfálticas Para Aeródromos. Dissertação de Mestrado, UFCG. Engenharia Civil, Campina Grande. 2009.

MELLO, S. M. Avaliação das propriedades reológica e mecânica de ligantes e misturas asfálticas irradiadas. Tese de Doutorado. Universidade Federal do rio de Janeiro/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ. 2014.

MERIGHI, C. F.; Estudo do Comportamento de Misturas Asfálticas Mornas em Revestimentos de Pavimento com Adição de Borracha Moída de Pneu. São Paulo, 2015.

MORILHA JUNIOR, A.; Estudo Sobre a Ação de Modificadores no Envelhecimento dos Ligantes Asfálticos e nas Propriedades Mecânicas das Misturas Asfálticas. Florianópolis, SC, 2004, 165 p.

MOTHÉ, M. G. Estudo do comportamento de ligantes asfálticos por reologia e análise térmica. Dissertação (Mestrado em Ciências)– Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Escola de Química, Curso de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos – EQ, 2009.

MOTTA, L. M. G.; TONIAL, I.; LEITE, L. M., et al, Princípio do Projeto e Análise. Tradução comentada da publicação FHWA-SA- SUPERPAVE de Misturas Asfálticas 95-003. Federal Highway Administration, Instituto Brasileiro do Petróleo. Rio de Janeiro, 1996.

MOTTA, L. M. G. (1998) Contribuição para a Estimativa do Módulo Resiliente de Misturas Asfálticas. 14º Encontro de Asfalto, IBP, Rio de Janeiro, RJ;1998.

MOTTA, R. S. Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para a redução de emissão de poluentes e consumo energético. 229 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transporte) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). São Paulo. 2011.

NASCIMENTO, L. A. H. (2008) Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro, RJ.

NAPA – NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (2002). Designing and Constructing SMA Mixtures – State of Practice. Quality Improvement Series 122. Lanham, MD, EUA.

NEWCOMB, D. An Introduction to Warm-mix Asphalt. Disponível em: <http://www.hotmix.org>. Acesso em 10 de fevereiro de 2017.

NOGAMI, J. S.; Misturas Asfálticas para Revestimentos de Pavimentos Produzidas com Baixa Energia e Redução de Temperatura, para Diminuição de Consumo Energético e de Emissão de Poluentes. São Paulo, 2010.

NYNAS (2009). “Asfalto templado, semi-templado y frío: el caso a favor de laostenibilidad”. NynasBitumen Magazine: Performance; 2009.

ODA, S. (2000). Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação. 251p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

OLARD, F. Low energy asphalts. Routes Roads, n. 336-337, p. 131-145, 2008. Apresentado a 23 World Road Congress: General Report and Conclusions: PIARC Prizes, 23., Paris, 2008.

OTTO, G. G. Misturas asfálticas mornas: verificação da fadiga e do módulo complexo. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Santa Catarina, SC, Florianópolis, 2009.

PATRIOTA, M. B. Análise laboratorial de concreto betuminoso usinado a quente modificado com adição de borracha reciclada de pneus – processo seco. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2004.

PEINADO D, DE VEGA M, GARICA-HERNANDO N, MARUGAAN-CRUZ C. Energy and exergy analysis in an asphalt plant's rotary dryer. Appl Therm Eng . 31(6– 7):1039–49. 2011.

PEREIRA, M. N .L.; Estudo de Mistura Asfáltica de Módulo Elevado para Camadas de Base de Pavimento. São Paulo, 2012. Acesso em 19 de Fevereiro de 2017, disponível em <file:///C:/Users/Let%C3%ADcia/Desktop/PPA/Dissertacao_MarianaMinittiLeitePereira.pdf>.

PERKINS, S. W. Synthesis of Warm Mix Asphalt Paving Strategies for use in Montana highway construction – FHWA/MT-09-009/8117-38 Final Report. Montana, 2009.

PILATI, F.; Análise dos efeitos da borracha moída de pneu e do resíduo de óleo de xisto sobre algumas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas. 210p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

PINHEIRO, J.H.M. Incorporação de Borracha de Pneu em Misturas Asfálticas de Diferentes Granulometrias (Processos Úmido e Seco). 2004. 166p. Dissertação (Mestrado em Transportes), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

PINTO, S.; PREUSSLER, E., 2001, Pavimentação Rodoviária. Rio de Janeiro/RJ.

PORTUGAL, A. C. X. Avaliação Reológica de Cimentos Asfálticos de Petróleo Modificados com Óleo de Soja e de Milho. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2016.

- PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C. Warm-mix asphalt: Best Practices. Quality Improvement Series 125. Lanham: NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION, 2007
- PUNITH, V., XIAO, F., and WINGARD, D. Performance Characterization of Half Warm Mix Asphalt Using Foaming Technology. *Journal Materials Civil Engineering* ,382–392, 2013.
- RIBEIRO, E. A. O efeito da modificação de ligante asfáltico com o líquido da castanha de caju (LCC) na resistência ao dano por umidade em misturas asfálticas. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011. Acesso em 31 de Janeiro de 2017, disponível em < <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/3681>>.
- ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R.; LEE, D.Y. ; KENNEDY, T.W.; Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction, NAPA Educational Foundation. Lanham, Maryland, 1996.
- RUBIO, M. C; MORENO, F; MARTINEZ-ECHEVARRIA, M. J; MARTINEZ, G. Comparative analysis of emissions from the manufacture and use of hot and half-warm mix asphalt. *Journal of Cleaner Production*. Espanha, 2012.
- SABITA. Manual 32: Best practice guideline for warm mix asphalt. ISBN 978- 1-8974968-55-1. South Africa, 2011.
- SALES, P. M. Avaliação das características físicas e mecânicas de misturas asfálticas modificadas com adição do CCBt. Campina Grande. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, 2015.
- SARGAND, S., NAZZAL, M., AL-RAWASHDEH, A., Field Evaluation of Warm-Mix Asphalt Technologies, *Journal Materials Civil Engineering*, pp.1343–1349, 2012.
- SEBAALY, P. E.; HAJJ, E. Y.; HITTI, E. Performance of recycled rubber modified binders in warm mix Asphalt mixtures. Asphalt Rubber Conference 2012 Munich. Munique, Alemanha, 2012.
- SEIDEL, J. C.; HADDOCK, J. E. Rheological characterization of asphalt binders modified with soybean fatty acids. *Construction and Building Materials*. EUA. n. 53, p. 324-332, 2013.
- SENÇO, W.; Manual de técnicas de Pavimentação. 1ª ed. São Paulo: Pini, 1997. v. 1.

- SHAH, B. D. (2003) Evaluation of Moisture Damage Within Asphalt Concrete Mixes. Dissertação de Mestrado, Texas A&M University, College Station, Texas.
- SHELL. The Shell bitumen handbook. 5. ed. London: Shell Bitumen/Thomas Telford Publishing, 2003.
- SILVA, H.M.R.D. Caracterização do Mástique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mástique - Contribuição para o estudo do comportamento das misturas betuminosas. Tese de Doutorado. Universidade do Minho, Guimarães, Portugal. 2006.
- SILVA, J. A.A.; Estudo das Propriedades Físicas, de Estado e Mecânicas de Misturas Asfálticas párea os revestimentos de pista de aeródromo/José de Arimatéia Almeida e silva.- Campina Grande,2011.
- SILVA, J. P. S. Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas. 2011. 145 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade de Brasília. Brasília, DF.
- SOLAIMANIAN, M.; HARVEY, J.; TAHMORESSI, M.; TANDON, V. (2003) Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot Mix Asphalt Pavements. Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements: a National Seminar. San Diego, California Washington DC: National Academies Press.
- SOUSA, T. M. Avaliação das propriedades mecânicas de misturas asfálticas modificadas com adição do ccbt. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso – UFCG. Campina Grande, PB.
- SOUZA, J. L. S. Estudo das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas com Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado com Óleo de Mamona. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.
- SPECHT, L. Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 280 p, 2004.
- SPECHT, L.P; CERATTI, JA.P. & PALUDO, I. Laboratorial evaluation of tire rubber use as hot mix aggregate. In: ASPHALT RUBBER 2003 CONFERENCE – Proceedings, Brazilian, Brazil, 2003, p 603-614, 2003.

SULTANA, S.; BHASIN, A. Effect of chemical composition on rheology and mechanical properties of asphalt binder. Construction and Building Materials. EUA. n. 72, p. 293-300. 2014.

USDA . Balance crop 2016. United States Department of Agriculture, 20 set. 2016. Disponível em: <<http://www.usda.gov/wps/portal/usdahome>>. Acesso em 12 Janeiro de 2017.

USDA. Production, Supply and distribution on line. Disponível em <www.usda.gov.br>, acesso em 15 de janeiro de 2017

TAIRA, Cláudio Avaliação do desempenho em laboratório de misturas asfálticas densas utilizando asfalto convencional (CAP-20) e asfalto modificado com polímero SBS. 2001. Dissertação (Mestrado em Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

TARRER, A. R.; WAGH, V. (1991) The Effect of the Physical and Chemical Characteristics of the Aggregate on Bonding. SHRP, National Research Council, Washington, D.C.

TISSOT B.P., WELTRED.H. (1984). Petroleum formation and occurrence, Springer Verlag, Berlim.

VALKERING, C.P.; LANCON, D.J.L.; HILSTER, E.D.; STOKER, D.A. 1990, Rutting resistance of asphalt mixes containing non-conventional and polymer modified binders. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 59, p.590-609.

VASCONCELOS, K. L., Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a Quente Dosadas pelas Metodologias Marshall e SUPERPAVE com Diferentes Granulometrias. Dissertação de Mestrado, PETRAN/UFC, Fortaleza, CE,2004.

WAPA – WASHINGTON ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. The Wapa asphalt pavement guide. Washington, DC, 2004.

WITCZAK, M.W., KALOUSH, K., PELLINEN, T., EL-BASYOUNY, M., e VONQUINTUS, H., “Simple Performance Test for SUPERPAVE Mix Design,” NCHRP Report 465, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2002.

WEN, H., BHUSAL, S., WEN, B. Laboratory Evaluation of Waste Cooking Oil-Based Bioasphalt as an Alternative Binder for Hot Mix Asphalt, Journal of Materials in Civil Engineering, v. 25, pp. 1432-1437, 2013.

ZAGONEL, G.; COSTA NETO, P. R.; RAMOS, L. P.; ROSSI, L. F. S.; Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras. Centro Nacional de Pesquisa de Soja; Empresa Nacional de Pesquisa Agropecuária; Londrina, PR, 1999.

ZANZOTTO, L., KENNEPOHL, G.J. (1996) – Development of Rubber and Asphalt Binder by Depolymerization and Devulcanization of Scrap tires in Asphalt. Transportation Research Record 1530, TRB, Washington, DC, P. 51-58; 1996.

ZARGAR, M.; AHMADINIA, E.; ASLI, H.; KARIM, M. R. Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen. Journal of Hazardous Materials. Malasia, 2012.

WHITE, T.D. Marshall Procedures For Design And Quality Control Of Asphalt Mixtures. Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists Technical Sessions, San Antonio, v. 54, 1985.