



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL  
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE  
ÁREA GEOTÉCNIA**

**Jeovanesa Régis Carvalho**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO ASFALTO MODIFICADO  
COM ÓLEO DE GIRASSOL VISANDO À OBTENÇÃO DE  
MISTURAS MORNAS**

**Campina Grande – PB**

**2018**

**JEOVANESA RÉGIS CARVALHO**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO ASFALTO MODIFICADO  
COM ÓLEO DE GIRASSOL VISANDO À OBTENÇÃO DE  
MISTURAS MORNAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre (Msc) em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Geotécnica

Orientador: Prof. Dsc. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena

Campina Grande – PB

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

C331e

Carvalho, Jeovanesa Régis.

Estudo do comportamento do asfalto modificado com óleo de girassol visando à obtenção de misturas mornas / Jeovanesa Régis Carvalho. - Campina Grande, 2018. 122 f. il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2018.

"Orientação: Prof. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena".

Referências.

1. Ligante Asfáltico. 2. Óleo de Girassol. 3. Misturas Asfálticas. 4. Propriedades Mecânicas. I. Lucena, Adriano Elísio de Figueiredo Lopes. II. Título.

CDU 625.8(043)

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Autora: Jeovanesa Régis Carvalho

**Título: ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO ASFALTO MODIFICADO COM  
ÓLEO DE GIRASSOL VISANDO À OBTENÇÃO DE MISTURAS MORNAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de Concentração – Geotécnica

Dissertação defendida e aprovada em: 23/02/2018

Pela Banca Examinadora:

(Assinatura): \_\_\_\_\_

Orientador: Prof. Dsc. Adriano Elísio, de Figueiredo Lopes Lucena  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura): \_\_\_\_\_

Avaliadora Interna: Prof. Dsc. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura): \_\_\_\_\_

Avaliador Externo: Prof. Dsc. Fernando Silva Albuquerque  
Universidade Federal de Sergipe -UFS

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, que me ajudou até aqui. À minha mãe, Eclésia, por seu amor e apoio incondicional. À minha tia, Edlene, aos meus irmãos, Danielle, Flávia e Lucas e à minha prima Maria Helena, pelo encorajamento e apoio em tudo que planejo.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo seu amor e graça derramados sobre a minha vida, por efetuar seus planos que são maiores e melhores que os meus. A Ele seja a glória para sempre.

À minha mãe Eclésia Régis, por toda dedicação em prol dos meus estudos, a ela todo amor e agradecimento e ao meu pai Rivaldo Carvalho (in memoriam), por ter me deixado como legado os ensinamentos de honestidade e integridade.

Aos meus irmãos Lucas, Flávia e Danielle, e meu cunhado Tiago, pela união e companheirismo em todos os momentos da minha vida.

Aos meus tios Edlene e Herick, e à minha priminha Maria Helena, pelo estímulo e companheirismo de sempre.

Ao meu padrasto Flávio e meu avô Edmilson, pelo incentivo em tudo que planejo.

Às minhas tias, Mônica, Olga e Hortência, pela amizade e torcida.

Ao meu orientador, professor Adriano Elísio, pela paciência, pela disponibilidade, pelo incentivo desde os tempos de quando eu era aluna de iniciação científica e por me ajudar a construir uma carreira acadêmica. Muito obrigada!

À minha amiga Érika Vitória, pela amizade que seguiu da graduação para a vida.

Ao meu amigo Daniel, pela ajuda durante as fases experimentais e análise da pesquisa.

Aos meus amigos do LEP, Thamires, Thalita, Gabryelle, Tássila, Kênia, Daniela, Raquel, Conrado e Christian, pela boa convivência e amizade durante todos os momentos dessa jornada.

Aos professores Fernando Silva Albuquerque e Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena, pelas participações e contribuições na banca examinadora.

Aos técnicos e amigos do LEP, Nildinho e Jadilson, pela ajuda na execução de várias etapas deste trabalho.

Aos professores John Kennedy, Ana Maria e Veruschka Escarião, pelos ensinamentos repassados.

Aos pesquisadores iniciantes, Felipe e Renato, pela ajuda durante a execução dos ensaios laboratoriais.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, pela oportunidade de cursar o mestrado.

À CAPES, pela bolsa concedida para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

Muito obrigada!

“Tu és o meu Deus; graças te darei! Ó meu Deus, eu te exaltarei! Deem graças ao Senhor, porque ele é bom; o seu amor dura para sempre.”

(Salmos 118:28-29)

## RESUMO

No setor de pavimentação asfáltica, a emissão de gases-estufa para a atmosfera é decorrente principalmente das altas temperaturas de mistura e compactação. A tecnologia de Misturas Asfálticas Mornas (MAMs), se apresenta como um processo alternativo de fabricação das misturas asfálticas, pois as mesmas proporcionam uma redução das altas temperaturas de mistura e compactação, propiciando benefícios de sustentabilidade evidentes a curto, médio e longo prazo, possíveis de agrupar em vantagens sociais, econômicas e ambientais. Esta pesquisa tem por objetivo estudar as propriedades físicas e mecânicas de misturas asfálticas com ligante modificado pela adição do óleo de girassol. O óleo de girassol, aditivo utilizado nesta pesquisa, foi adotado em virtude de o mesmo encontrar-se entre as quatro oleaginosas mais consumidas mundialmente, respondendo pelo equivalente a 8,74% do consumo total de óleos vegetais segundo os usos alimentar e industrial. O óleo de girassol foi adicionado ao ligante asfáltico nos teores de 1, 2 e 3%. Para a avaliação das propriedades físicas do ligante asfáltico com e sem o aditivo, foram realizados os ensaios físicos de: penetração, ponto de amolecimento e o ensaio de Espectroscopia Infra Vermelho por Transformada de Fourier (FTIR) antes e após o procedimento de Rolling Thin-Film Oven (RTFO), além do ensaio reológico de viscosidade rotacional. Para a caracterização mecânica das misturas asfálticas dosadas a partir da metodologia SUPERperforming asphalt PAVements (SUPERPAVE), foram realizados os ensaios de: Flow Number, Lottman Modificado, Módulo de Resiliência, Resistência à Tração e Vida de Fadiga. Os resultados indicaram a viabilidade técnica da incorporação do óleo de girassol ao ligante asfáltico, pois possibilitou a vantagem de reduzir as temperaturas de mistura e compactação em até 6°C, porém, esta redução, não possibilita a classificação do ligante modificado em uma típica MAM. Contudo, as misturas produzidas com ligante modificado proporcionaram um aumento da lubricidade e da resistência ao dano por umidade, contribuindo para adesividade e coesão da mistura asfáltica e ainda apresentaram um maior limite de resistência à fadiga. Os corpos de prova moldados com a adição de 2% do aditivo, apresentaram propriedades mecânicas e volumétricas satisfatórias em relação aos critérios preconizados pelas normas adotadas.

**Palavras Chave:** óleo de girassol, ligante asfáltico, misturas asfálticas, propriedades mecânicas.



## ABSTRACT

In the asphalt pavement sector, the emission of greenhouse gases to atmosphere is mainly due to high temperatures of mixing and compaction. The Warm Mix Asphalt (WMA) technology is an alternative process of manufacturing the asphalt mixtures. This technology provides reduction of the high temperatures of mixing and compaction and provide sustainable benefits in short, medium and long term to social, economic and environmental advantages. This research aims to study the physical and mechanical properties of asphalt mixtures with modified binder by the addition of sunflower oil. Sunflower oil, additive used in this research, was adopted because it is among the four most consumed oleaginous plants worldwide. Sunflower oil accounting for the equivalent of 8.74% of the total consumption of vegetable oils in food and industrial uses. The sunflower oil was added to the asphaltic binder in the contents of 1, 2 and 3%. In order to evaluate the physical properties of the asphalt binder with and without the additive, the physical tests of penetration, softening point and the Fourier Transformed Infra Red (FTIR) test were performed before and after the Rolling Thin-Film Oven (RTFO) in addition to the rheological test of rotational viscosity. For the mechanical characterization of asphalt mixtures dosed by Superior PERforming Asphalt PAVements (SUPERPAVE), the following tests were performed: Flow Number, Modified Lottman, Resilience Modulus, Tensile Strength and Fatigue Life. The results indicated technical feasibility of sunflower oil incorporation to the asphalt binder. Sunflower oil provided advantages as reducing the mixing and compacting temperatures up to 6°C. However, this reduction does not allow classify modified binder as a typical WMA. However, mixtures produced with modified binder provided a greater increase in lubricity and resistance to moisture damage, contributing to tackiness and cohesion of the asphalt mixture and still provided an increase in fatigue strength. The specimens molded with the addition of 2% of the additive had satisfactory mechanical and volumetric properties in relation to the criteria recommended by the adopted standards.

**Keywords:** sunflower oil, asphalt binder, asphalt mixtures, mechanical properties.

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	16
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	16
1.1. Objetivos .....	18
1.1.1. Objetivo Geral .....	18
1.1.2. Objetivos Específicos .....	18
1.2. Justificativa .....	18
1.3. Organização do Trabalho .....	20
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	21
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	21
2.1. Misturas asfálticas .....	21
2.2. Misturas asfálticas mornas .....	25
2.2.1. Breve histórico .....	27
2.2.2. Experiências brasileiras com o uso de misturas mornas .....	29
2.2.3. Classificação das misturas mornas .....	32
2.2.4. Custos .....	47
2.2.5. Vantagens das misturas mornas .....	49
2.2.6. Desvantagens das misturas mornas .....	50
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	51
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	51
3.1. Materiais .....	52
3.1.1. Ligante asfáltico .....	52
3.1.2. Agregados .....	52
3.1.3. Óleo de girassol .....	53
3.2. Métodos .....	54
3.2.1. Propriedades físicas dos materiais .....	54
3.2.2. Caracterização do Cimento Asfáltico de Petróleo .....	58
3.2.3. Análise do óleo de girassol e do ligante com e sem o aditivo por meio de FTIR .....	63
3.2.4. Dosagem SUPERPAVE .....	64
3.2.5. Caracterização mecânica .....	71
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	79
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	79

4.1.	Caracterização do ligante asfáltico .....	79
4.1.1.	Ensaio de penetração .....	79
4.1.2.	Ensaio de Ponto de amolecimento.....	81
4.1.3.	Viscosidade Rotacional .....	82
4.1.4.	Perda de massa .....	86
4.2.	Caracterização química do óleo de girassol e do ligante CAP 50/70 puro e modificado com o aditivo por meio de FTIR.....	87
4.3.	Caracterização mecânica.....	93
4.3.1.	Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral (RT).....	93
4.3.2.	Módulo de Resiliência (MR).....	94
4.3.3.	Dano por umidade induzida - Lottman Modificado .....	96
4.3.4.	Vida de fadiga.....	98
4.3.5.	Flow Number (FN) .....	102
<b>CAPÍTULO 5</b>	.....	<b>106</b>
<b>5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b>	.....	<b>106</b>
5.1.	Conclusões .....	106
5.2.	Sugestões para pesquisas futuras .....	107
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	.....	<b>109</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplos de composições granulométricas dos tipos de misturas à quente .	22
Figura 2 - Exemplos de curvas granulométricas de diferentes misturas asfálticas à quente .....	23
Figura 3 - Classificação de misturas de acordo com a temperatura e consumo de combustível para produção .....	25
Figura 4 - Ligante asfáltico modificado com aditivo orgânico .....	33
Figura 5 - Sasobit em flocos e em pastilha, respectivamente .....	34
Figura 6 - CCBit 113 AD .....	36
Figura 7 - Cera de carnaúba.....	37
Figura 8 - Óleo de mamona .....	37
Figura 9 - Flor de girassol e semente de girassol, respectivamente. ....	39
Figura 10 - Rediset WMX granulada .....	41
Figura 11 -Estrutura de uma Zeólita.....	43
Figura 12 - Amostra de Aspha-min® .....	44
Figura 13 - Sistema Double Barrel® Green Instalado em Usina retirado de .....	45
Figura 14 - Fluxograma de Caracterização dos Materiais.....	51
Figura 15 - CAP 50/70 .....	52
Figura 16 - Agregados: areia, pó de pedra, brita 12.5mm e brita 19mm.....	53
Figura 17 - Óleo de girassol .....	53
Figura 18 - Curva granulométrica dos agregados.....	55
Figura 19 - Secagem do material.....	56
Figura 20 - Fluxograma da incorporação do óleo de girassol ao ligante e posterior caracterização física.....	59
Figura 21 - Agitador mecânico FISATOM .....	59
Figura 22 - Inserção do óleo de girassol ao ligante no misturador.....	60
Figura 23 - Penetrômetro .....	60
Figura 24 - Realização do ensaio de ponto de amolecimento .....	61
Figura 25 - Viscosímetro Brookfield.....	61
Figura 26 - Aparelho de RTFO .....	63
Figura 27 - Fluxograma de dosagem SUPERPAVE .....	65
Figura 28 - Compactador Giratório SUPERPAVE .....	65
Figura 29 - Curva granulométrica Superior.....	66
Figura 30 - Curva granulométrica Intermediária.....	66
Figura 31 - Curva granulométrica Inferior .....	67
Figura 32 - Procedimento do ensaio para determinação da Gmm.....	68
Figura 33 - Corpos de prova no teor estimado de 5% de ligante CAP 50/70 puro .....	69
Figura 34 - Estimativa do Teor ótimo de ligante.....	70
Figura 35 - Fluxograma de Caracterização Mecânica.....	71
Figura 37 - Prensa do ensaio de Resistência à Tração.....	72
Figura 36 - Prensa UTM-25 utilizada para o ensaio de Módulo de Resiliência.....	73
Figura 38: Procedimentos do ensaio de Lottman modificado .....	74

Figura 39 - Ensaio de vida de fadiga realizado na Prensa UTM-25.....	75
Figura 40 - Ensaio de Flow Number .....	77
Figura 41 - Regiões durante o ensaio uniaxial de carga repetida e obtenção do FN.....	78
Figura 42 - Ensaio de penetração antes e após o RTFO .....	79
Figura 43 - Ensaio de ponto de amolecimento antes e após o RTFO.....	81
Figura 44 - Viscosidade rotacional antes do RTFO .....	83
Figura 45 - Viscosidade rotacional após o RTFO .....	83
Figura 46 - Curvas Variação da Viscosidade Rotacional em função da temperatura [Ligante Puro].....	84
Figura 47 - Curvas Variação da Viscosidade Rotacional em função da temperatura [Ligante + 1% ÓLEO DE GIRASSOL] .....	84
Figura 48 - Curvas Variação da Viscosidade Rotacional em função da temperatura [Ligante + 2% ÓLEO DE GIRASSOL] .....	84
Figura 49 - Curvas Variação da Viscosidade Rotacional em função da temperatura [Ligante + 3% ÓLEO DE GIRASSOL] .....	85
Figura 50 - Resultados da perda de massa após o ensaio RTFO.....	87
Figura 51 - Espectros gerais da amostra de óleo de girassol .....	87
Figura 52 - FTIR do ligante puro e modificado com o óleo de girassol antes do RTFO .....	89
Figura 53 - FTIR do ligante puro e modificado com o óleo de girassol após o RTFO..	90
Figura 54 - Resultados do ensaio de Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral .....	93
Figura 55 - Resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência.....	95
Figura 56 - Resultados da Relação da Resistência Retida à Tração .....	96
Figura 57 - Vida de Fadiga x Diferença de Tensões .....	100
Figura 58 - Vida de Fadiga x Deformação específica resiliente.....	101
Figura 59 - Resultados do ensaio de Flow Number.....	102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização do CAP .....	52
Tabela 2 - Ensaio e normas utilizadas para caracterização dos agregados .....	54
Tabela 3 - Granulometria dos agregados .....	55
Tabela 4 - Massa específica real e aparente e absorção dos agregados graúdos e miúdo .....	57
Tabela 5 - Normas dos ensaios de caracterização física do ligante .....	58
Tabela 6 - Proporções dos agregados nas granulometrias .....	66
Tabela 7- Parâmetros volumétricos obtidos em função dos Teores de ligantes iniciais calculados. ....	69
Tabela 8 - Parâmetros volumétricos obtidos em função dos Teores de ligantes iniciais calculados. ....	70
Tabela 9 - Penetração retida .....	80
Tabela 10 - Aumento de temperatura após o RTFO.....	82
Tabela 11 - Temperaturas de mistura e compactação.....	85
Tabela 12- Grupos de compostos orgânicos identificados por espectroscopia de infravermelho de acordo com o número de onda e modo de vibração.....	88
Tabela 13 - Grupos de compostos orgânicos identificados por espectroscopia de infravermelho de acordo com o número de onda e modo de vibração para o ligante puro e modificado antes do RTFO.....	89
Tabela 14 - Grupos de compostos orgânicos identificados por espectroscopia de infravermelho de acordo com o número de onda e modo de vibração para o ligante puro e modificado após o RTFO.....	90
Tabela 15 - Oxidação das amostras de ligante com e sem o óleo de girassol antes e após o envelhecimento no RTFO.....	91
Tabela 16 - Diferença entre as áreas oxidadas e percentual oxidado das amostras de ligante com e sem aditivo de MAM e antes e após o envelhecimento no RTFO.....	92
Tabela 17 - Parâmetros obtidos das curvas de fadiga desta pesquisa.....	102
Tabela 18 - Valores mínimos de Flow Number para diferentes níveis de tráfego .....	103
Tabela 19 - Resultados do ensaio de FN em misturas asfálticas contendo os mesmos agregados de origem granítica com graduação fina e com diferentes ligantes .....	104

## LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEMA	Asphalt Emulsion Manufacturers Association
APA	Asphalt Pavement Analyser
ASTM	American Society for Testing Materials
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CENPES	Centro de Pesquisa da Petrobras
CP	Corpo de Prova
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EPI's	Equipamentos de Proteção Individual
EUA	Estados Unidos da América
FHWA	Federal Highway Administration
FN	Flow Number
FTIR	Fourier Tranformed Infra Red
GI	Massa Específica do Ligante
Gmm	Massa Específica Máxima Medida da Mistura
HMA	Hot Mix Asphalt
HPAs	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
LAPAV	Laboratório de Pavimentação - UFRG
LCC	Líquido da Castanha de Caju
LEA	Low Energy Asphalt
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
LTP/EPUSP	Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
LVDTs	Linear Variable Differential Transducer
Mag	Massa de agregado
MAMs	Misturas Asfálticas Mornas
MARMs	Misturas Asfálticas Recicladas Mornas
MARQs	Misturas Asfálticas Recicladas a Quente
ME	Método de Ensaio
MR	Módulo de Resiliência
N	Número
NAPA	National Asphalt Pavement Association
NBR	Norma Brasileira Registrada
NCAT	National Center for Asphalt Tecnology
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
NM	Norma Mercosul
Pag	Percentual de Agregado na Mistura
PB	Paraíba

PI	Teor de Ligante
Pli	Teor de Ligante Inicial
RBV	Relação Betume x Vazios
RRT	Relação de Resistência Retida à Tração
RT	Resistência à Tração
RTFO	Rolling Thin-Film Oven
SHRP	Strategic Highway Research Program
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavements
TLA	Trinidad Lake Asphalt
TNM	Tamanho Nominal Máximo
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
USDA	Departamento de Agricultura dos Estados Unidos
VAM	Vazios do Agregado Mineral
V <sub>la</sub>	Volume de Ligante Absorvido
V <sub>le</sub>	Volume de Ligante Efetivo
V <sub>v</sub>	Volume de vazios
WMA	Warm Mix Asphalt



## 1. INTRODUÇÃO

A degradação dos sistemas naturais ocorrida desde o advento da Revolução Industrial, o crescimento populacional e o atual modelo de produção de bens e consumo da população têm acarretado diversos problemas ambientais. Convergindo para uma mudança comportamental das pessoas e um maior comprometimento dos países com o desenvolvimento sustentável.

No setor de pavimentação asfáltica, a emissão de gases-estufa para a atmosfera é decorrente principalmente das altas temperaturas de mistura e compactação. Em virtude disso, tem-se desenvolvido pesquisas que se apresentem como um processo alternativo de fabricação das misturas asfálticas, tal como a tecnologia de Misturas Asfálticas Mornas (MAMs).

Os primeiros experimentos com aditivos que utilizaram a tecnologia de MAMs foram inicialmente desenvolvidos na Europa, a partir de 1995. Com uso de produtos como: zeólitas naturais ou sintéticas, parafinas, ceras e produtos orgânicos. Em 2002, cresceu nos Estados Unidos (E.U.A.) o interesse por essas tecnologias. Desde então, foram desenvolvidos uma série de novos produtos, tais como: CCBit 113 AD, pertencente à classe de aditivos orgânicos, Evotherm® e o Rediset™ WMX, aditivos pertencentes à classe surfactante, Double Berrel Green, tipo de tecnologia de espuma de asfalto (KVASNK *et al.*, 2009).

Segundo Nynas (2009) a redução das temperaturas de produção e aplicação das misturas betuminosas proporciona benefícios de sustentabilidade evidentes a curto, médio e longo prazo, possíveis de agrupar em vantagens sociais, econômicas e ambientais.

As misturas asfálticas a frio são executadas a uma faixa de temperatura entre 20 e 50°C. As misturas asfálticas mornas são produzidas em temperaturas entre 105 e 135°C, esta redução de temperatura pode levar a um menor enrijecimento do ligante, porém, pode proporcionar um aumento nos custos de produção com a necessidade de modificação nas especificações da usina de asfalto e com a aquisição dos produtos. Já as misturas asfálticas à quente são produzidas em temperaturas variando de 140 a 180°C (BUDNY, 2012). Portanto, as misturas mornas buscam manter as mesmas propriedades

das misturas à quente, que atendem as condições de tráfego as quais são submetidas, porém, são fabricadas em temperaturas mais baixas.

No Brasil, estudos sobre a utilização de óleos foram desenvolvidos por Ribeiro (2011) através da utilização do Líquido da Castanha de Caju como modificador do ligante asfáltico. Souza (2012) estudou as misturas asfálticas com ligantes modificados pela adição do óleo de mamona. Portugal (2016) avaliou o efeito da incorporação de óleo de soja e de milho, novo e residual sobre as propriedades físicas e reológicas do ligante asfáltico. Silva (2016) estudou a influência da adição dos óleos de girassol e de moringa para a redução da temperatura de mistura de ligantes asfálticos. Lucena et al. (2016) que utilizou o óleo de moringa para a produção de MAMs, esses aditivos possibilitaram redução das temperaturas de mistura e compactação das misturas asfálticas.

O óleo de girassol, aditivo utilizado nesta pesquisa, se apresenta como produto promissor para a fabricação de MAMs, pois para o atendimento da demanda mundial de óleos vegetais, mediante as diversas oleaginosas existentes, o óleo de girassol está entre as quatro oleaginosas que respondem pelo equivalente a 87,8% do consumo total de óleos vegetais segundo os usos alimentar e industrial. O óleo de palma, é o mais consumido com representação de 33,22%. O óleo de soja é o segundo mais importante ao representar 29,22%. O uso de óleo de canola corresponde por 15,64% e o óleo de girassol responde pelo equivalente a 8,74% do total, de acordo com o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 2016).

Nesse contexto, o que corrobora para escolha da utilização do óleo de girassol é ser um composto oriundo de fonte renovável e de baixo custo. Dentre os diferentes tipos de aditivos disponíveis no mercado para a fabricação de misturas mornas, o óleo de girassol apresenta potencial para ser empregado na fabricação de misturas mornas no Brasil, uma vez que a agricultura de girassol tem sofrido um considerável aumento devido à alta demanda do setor produtivo já que, por ser um produto versátil, pode ser utilizado tanto na alimentação de humanos e de animais quanto na produção de bicomcombustíveis.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo Geral**

Estudar as propriedades físicas e mecânicas de misturas asfálticas com ligantes modificados pela adição do óleo de girassol.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- quantificar a redução das temperaturas de mistura e compactação de concretos asfálticos com ligante modificado com a adição dos diversos teores do óleo de girassol;
- comparar o comportamento das misturas asfálticas com ligantes modificados com a adição do óleo de girassol em diversos teores com os valores de referência das misturas quentes;
- avaliar as propriedades das misturas asfálticas modificadas com o óleo de girassol utilizando ensaios mecânicos de: resistência à tração, módulo de resiliência, lottman, fadiga e flow number;
- propor a utilização de um material de fonte renovável na fabricação de MAMs, contribuindo assim com o desenvolvimento sustentável.

## **1.2. Justificativa**

Chowdhury e Button (2008) indicam como benefícios das misturas asfálticas mornas as temperaturas de produção e aplicação significativamente mais baixas. Além disso, relatam uma diminuição do consumo de combustível, reduzindo assim os custos e um aumento da vida útil do pavimento, devido ao menor envelhecimento do ligante durante a mistura e compactação. Segundo os mesmos autores, as MAMs proporcionam melhorias das condições de trabalho no local de pavimentação e uma diminuição das emissões de gases poluentes à atmosfera.

Segundo dados da Confederação Nacional de Transportes (CNT) de 2017, em 15 anos, as rodovias pavimentadas cresceram 23,2% no Brasil, uma média de apenas 1,5% ao ano. Enquanto em 2001, o país possuía 170,9 mil quilômetros com pavimento (9,8% do total), em 2015, esse número chegou a 210,6 mil quilômetros (12,2% do total). Essa

quilometragem resulta em uma densidade de infraestrutura rodoviária de 24,8 km por 1.000 km<sup>2</sup> de área. Segundo a CNT, o valor ainda é considerado baixo quando comparado a outros países de dimensão territorial semelhante. Por exemplo, nos Estados Unidos são 438,1 km por 1.000 km<sup>2</sup> de área e na Rússia, 54,3 km.

Poucos experimentos com uso de MAMs foram aplicados em campo no Brasil. Fritzen et al. (2009) relatou a execução de um trecho experimental realizado na ilha do Fundão, Cidade Universitária da UFRJ, com a técnica por molhagem com o processo A-SAT desenvolvido pelo CENPES/PETROBRAS. O processo A-SAT consiste em um procedimento de mistura morna feita sem uso de produto especial, mas com espumação provocada pelo umedecimento do agregado miúdo. Com base nas análises realizadas, as MAMs apresentaram uma excelente trabalhabilidade desde sua mistura até a aplicação nos trechos experimentais mesmo com temperatura de compactação baixa em relação às misturas convencionais utilizadas. Observou-se ainda que os trechos experimentais das misturas mornas sem a utilização do processo A-SAT apresentou pequeno aumento de afundamento na trilha de roda em relação ao obtido na mistura asfáltica com a utilização do A-SAT.

Além disso, Motta (2011) mencionou em sua tese a construção de um trecho experimental, executado pela concessionária AutoBAn (Grupo CCR) em parceria com o LTP/EPUSP, na Rodovia dos Bandeirantes, na pista Sul, e compreendeu 400 metros de revestimento com mistura asfáltica de graduação gap-graded e asfalto borracha, com aditivo Gemul XT14. As obras ocorreram entre julho e setembro de 2010. Segundo a mesma autora, a mistura morna apresentou valores de resistência à tração e deformação permanente próximos aos resultados da mistura à quente preparada em laboratório, e a resistência ao dano por umidade, com valor acima do prescrito na norma.

A produção de girassol foi introduzida no Brasil pelos colonizadores europeus. A planta da família Asteracea, se adapta a diferentes condições de clima e solo, inclusive ao clima predominante da Região Nordeste. Essa dicotiledônea produz grãos, dos quais se extrai o óleo, e forragem que é utilizada como ração animal. Atualmente, ganha espaço entre os agricultores familiares em virtude da sua capacidade de se consorciar com outras culturas a exemplo do feijão e de se integrar à apicultura e à pecuária. O girassol é uma cultura anual, que apresenta viabilidade no Nordeste, sob o ponto de vista econômico, pois, possibilita o aproveitamento de suas sementes e de sua massa seca, produzindo ainda um teor de óleo em torno de 40%, aliado à sua adaptabilidade (FREITAS, 2012).

Portanto, sabendo-se do potencial que o Brasil possui para pavimentação, e que o óleo de girassol é um material de fácil acesso no país e possui um custo mais baixo, principalmente, quando comparado com outros aditivos orgânicos já utilizados em misturas mornas, como o CCBit, Asphaltan-B e o Sasobit, houve a motivação de estudar o comportamento do ligante modificado com óleo de girassol visando à obtenção de misturas mornas.

### **1.3. Organização do Trabalho**

Esta dissertação é composta de seis capítulos e anexos, a seguir uma breve descrição do assunto abordado em cada um deles.

- Capítulo 1 - Composto pela introdução, pela exposição dos objetivos que se pretende atingir com este estudo, pela justificativa e ainda pelo presente tópico, que apresenta a organização do trabalho.
  - Capítulo 2 - Compreende a fundamentação teórica, são tratados os assuntos de maior relevância para o desenvolvimento desta dissertação. Primeiramente faz-se uma abordagem sobre as misturas asfálticas convencionais, posteriormente é apresentado um breve histórico sobre as misturas asfálticas mornas, as experiências brasileiras, classificação, os custos e as vantagens e desvantagens dessas misturas.
  - Capítulo 3 - São descritos todos os materiais utilizados na pesquisa, bem como os procedimentos experimentais adotados para o desenvolvimento desta dissertação.
  - Capítulo 4 - São apresentados os resultados e as discussões obtidos no programa experimental.
  - Capítulo 5 - Apresentam-se as conclusões que foram obtidas neste trabalho e algumas sugestões para pesquisas futuras.
  - Capítulo 6 – São apresentadas as referências bibliográficas.
- No final do trabalho estão inseridos os anexos.

### 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são tratados os assuntos de maior relevância para o desenvolvimento desta pesquisa, coletadas em publicações correntes. Primeiramente faz-se uma abordagem sobre as misturas asfálticas convencionais, posteriormente é apresentado um breve histórico sobre as misturas asfálticas mornas, as experiências brasileiras, classificação, os custos e as vantagens e desvantagens dessas misturas.

#### 2.1. Misturas asfálticas

O asfalto é uma mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo, cujo principal componente é o betume. Sua extração pode ser feita na natureza em rochas asfálticas e em lagos naturais, ou por meio de técnicas de processamento do petróleo. São comumente utilizados em serviços de impermeabilização e juntamente com agregados para a produção de misturas asfálticas. No Brasil, o asfalto é conhecido como Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) e é definido como um produto semi-sólido a temperaturas baixas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas (BERNUCCI *et al.*, 2008).

O uso do CAP em pavimentação é um dos mais importantes entre todas as suas aplicações, e isso se deve ao fato de ser um material aglomerante, com grande adesividade, proporcionando forte união dos agregados e permitindo flexibilidade controlável. Este é impermeável, durável e resiste à ação da maioria dos ácidos, álcalis e sais, podendo ainda ser utilizado com ou sem aditivos. Por consequência, na maioria dos pavimentos brasileiros usa-se como revestimento uma mistura de ligantes asfálticos com agregados minerais, de vários tamanhos.

Segundo Bernucci *et al.* (2008) as misturas asfálticas que compõe a camada de pavimento devem garantir impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previstos para o local. No Brasil, um dos tipos mais empregados são as misturas asfálticas betuminosas à quente, mais conhecidas como Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ).

Para garantir uma mistura com um bom desempenho e resistente aos esforços de contato pneu-pavimento é necessária uma distribuição granulométrica adequada ao tipo de mistura asfáltica. De acordo com Bernucci *et al.* (2008) as misturas asfálticas à quente podem ser subdivididas pela graduação dos agregados e fíler como ilustrado nas Figuras 1 e 2. Os três tipos mais usuais são:

- graduação densa: curva granulométrica contínua e bem graduada e com poucos vazios. Exemplo: concreto asfáltico (CA);
- graduação aberta: curva granulométrica uniforme com agregados quase exclusivamente de um mesmo tamanho e com elevado volume de vazios com ar e, portanto, drenante, possibilitando a percolação de água no interior da mistura asfáltica. Exemplo: camada porosa de atrito (CPA);
- graduação descontínua: curva granulométrica com proporcionamento dos grãos de maiores dimensões em quantidade dominante em relação aos grãos de dimensões intermediárias, completados por certa quantidade de finos, de forma a ter uma curva descontínua em certas peneiras e com um maior número de contatos entre os agregados graúdos, tornado o esqueleto mineral mais resistente à deformação permanente. Exemplo: matriz pétrea asfáltica (stone matrix asphalt – SMA); mistura sem agregados de certa duração (gap-graded).

Figura 1 - Exemplos de composições granulométricas dos tipos de misturas à quente



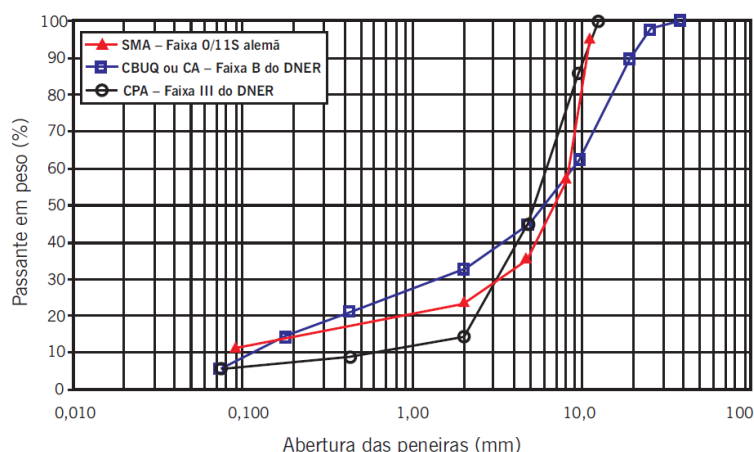
(a) Aberta

(b) Descontínua

(c) Densa ou bem-graduada

(Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2008)

Figura 2 - Exemplos de curvas granulométricas de diferentes misturas asfálticas à quente



(Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2008)

Existem diversos métodos de dosagem de misturas asfálticas, sendo o método Marshall, desenvolvido nos Estados Unidos em 1930, o mais difundido no país. Segundo Nascimento (2008) a dosagem Marshall se baseia principalmente em parâmetros volumétricos, que consideram a distribuição granulométrica dos agregados e sua influência nas misturas asfálticas de forma indireta.

O método de dosagem SUPERperforming asphalt PAVements (SUPERPAVE) foi desenvolvido pelo Strategic Highway Research Program (SHRP), um programa de pesquisa de asfalto dos Estados Unidos. Sua finalidade é atender e minimizar a deformação permanente, trincas por fadiga e variação de temperatura, além de analisar os efeitos do envelhecimento e danos de umidade (KENNEDY *et al.*, 1994). O procedimento da dosagem SUPERPAVE consiste basicamente em estimar o teor de projeto de CAP por meio da fixação do volume de vazios e conhecendo a granulometria dos agregados disponíveis.

A maior diferença entre as dosagens Marshall e SUPERPAVE é a forma de compactação, enquanto na dosagem Marshall a compactação é por impacto, na SUPERPAVE é por amassamento. Outra diferença é a forma de escolha da granulometria que na metodologia SUPERPAVE inclui os conceitos de pontos de controle e zonas de restrição, muito utilizada pelos departamentos de transporte dos EUA desde 1993, porém, ainda em fase de testes no Brasil (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Além desses, na França, utiliza-se um procedimento de dosagem que prevê ensaios específicos para o controle das propriedades das misturas. O método francês de



dosagem foi desenvolvido na década de 60 devido a necessidade da existência de um método que levasse em consideração as condições de clima e de tráfego às quais o pavimento estaria submetido (BROSSEAUD, 2002). Segundo ainda o autor, esse método de formulação de misturas asfálticas é caracterizado por apresentar uma abordagem baseada em desempenho. Onde, cada critério (volume de vazios, adesividade, fadiga, resistência ao acúmulo de afundamentos nas trilhas de rodas, faixa de variação do módulo) é avaliado por um ensaio tipo e comparado com valores especificados por normas sobre misturas, em função de classe de desempenho definida.

De acordo com D'ANGELO *et al.* (2008) as misturas asfálticas podem ser classificadas em função da temperatura de aplicação subdividindo em quatro grupos: misturas frias, misturas semimornas, misturas mornas e misturas quentes. As misturas semimornas diferem da mistura morna pela temperatura de mistura, se a temperatura de mistura na usina é abaixo de 100°C a mistura é semimorna.

As misturas à frio são aquelas cujo ligante é a emulsão asfáltica ou asfalto diluído. Esse tipo de mistura é bastante utilizado no Brasil em revestimentos de vias urbanas sujeitas à baixo volume de tráfego, em camadas intermediárias e em serviços de regularização de revestimento. Estas são produzidas em temperatura ambiente entre 20 e 50°C e não é necessário aquecer o agregado.

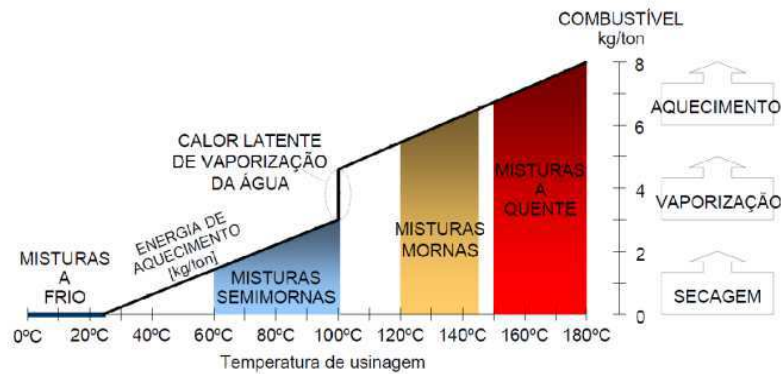
As misturas semimornas e mornas são preparadas em temperaturas intermediárias das misturas à quente e à frio, geralmente são executadas com aquecimento parcial dos agregados. O intervalo de temperatura de produção das misturas mornas varia entre 20 a 30 °C abaixo da temperatura de produção da mistura quente.

As misturas à quente são produzidas a partir do aquecimento dos agregados e do ligante, sendo executadas a uma temperatura de mistura entre 150 e 180°C. Apresentam uma boa durabilidade, suportam bem o tráfego pesado e são menos suscetíveis à ação deletéria da água no processo de fabricação das misturas asfálticas.

Segundo Motta (2011) a energia consumida varia de acordo o nível de aquecimento da mistura como pode ser visualizado na Figura 3, onde são apresentadas as misturas asfálticas em função da indicação do consumo de combustível em cada caso. Ainda de acordo com a Figura 3, para uma mistura à quente que apresente uma temperatura de mistura de aproximadamente 165°C o consumo de combustível seria de 7,4 Kg/ton, ao mesmo tempo que para uma mistura morna com uma temperatura de

mistura de 132°C o consumo de combustível seria de 6,0 Kg/ton. Logo, a mistura morna proporcionaria uma economia de combustível de 1,4 Kg/ton.

Figura 3 - Classificação de misturas de acordo com a temperatura e consumo de combustível para produção



(Fonte: D'ANGELO *et al.*, 2008)

## 2.2. Misturas asfálticas mornas

Há uma preponderância entre as indústrias de asfalto nos Estados Unidos definindo a tecnologia misturas mornas como um material que essencialmente tem os mesmos parâmetros volumétricos básicos e propriedades de desempenho que as misturas convencionais à quente. (HARRIGAN, 2012).

Segundo a AUSTROADS, organização máxima das agências de transporte rodoviário e de trânsito na Australásia (região que inclui a Austrália, a Nova Zelândia, a Nova Guiné e algumas ilhas menores da parte oriental da Indonésia), as características das misturas mornas são vulneráveis à diversos fatores, tais como: a utilização de diferentes tipos de aditivos (que pode afetar as propriedades mecânicas da mistura morna) e a temperatura para a secagem do agregado (que pode afetar a resistência à danos causados por umidade). De acordo com o mesmo estudo, a variação de temperaturas na mistura do ligante asfáltico pode influenciar na durabilidade do pavimento em longo prazo e também seu desempenho (AUSTROADS, 2012).

Atualmente, existem diversos produtos disponíveis no mercado, entre os quais pode-se citar o Asphaltan-B, Gemul XT14, Cecabase RT® e a Advera WMA para a produção de misturas asfálticas mornas, que derivam de tipos de tecnologias diferentes. Cheng *et al.* (2011) apontam que a escolha do aditivo para a mistura asfáltica morna depende de diversos fatores como toneladas de mistura que serão produzidas e qual o

custo do aditivo, pois alguns produtos possuem custo inicial elevado. De acordo com os mesmos autores outra consideração a fazer é sobre qual a redução de temperatura esperada no projeto, uma vez que alguns processos reduzem mais a temperatura que outros.

Além disso, diversas pesquisas foram realizadas (Asli *et al.*, 2012; Yu *et al.*, 2014; Nayak e Sahoo, 2015 e Ji *et al.*, 2016) com o emprego de aditivos orgânicos a base de óleos vegetais para atuar no rejuvenescimento do RAP. A avaliação reológica sobre o efeito dos rejuvenescedores no ligante envelhecido proporcionou uma diminuição da viscosidade e da rigidez do ligante asfáltico. Segundo essas pesquisas o ligante envelhecido apresentou um comportamento semelhante ao ligante novo em termos de penetração e ponto de amolecimento e ainda possibilitou um aumento da quantidade de RAP dentro das misturas asfálticas.

Zhao *et al* (2012) analisaram o comportamento de MAMs utilizando a tecnologia de espumação e contendo porcentagens de RAP variando de 0 a 50%. Os resultados apresentaram maior resistência à deformação permanente, maior resistência ao dano por umidade induzida, indicando melhor adesividade das misturas asfálticas e ainda apresentou uma maior vida de fadiga quando comparadas as misturas à quente.

Oliveira (2013) avaliou o comportamento mecânico em laboratório e em campo de Misturas Asfálticas Recicladas Mornas (MARMs) confeccionadas com diferentes percentuais de Asfalto Reciclado (RAP) em sua composição. O ligante utilizado foi o tipo CAP 50/70 e para as produções das misturas mornas foi adotado um aditivo surfactante, comercializado com o nome de Gemul XT-14®, adicionado em teor de 0,3% em relação à massa do ligante. A porcentagem de RAP utilizada para compor as MARMs foram de 15, 35 e 50%. As temperaturas de mistura e compactação foram reduzidas em 40°C em relação as temperaturas utilizadas para as misturas à quente. Com relação aos resultados obtidos no ensaio de RT das MARMs e os resultados obtidos no ensaio de RT da MAM, percebeu-se que a medida que se aumentou o percentual de material fresado, os resultados de RT aumentaram em até 67%. Para os ensaios de vida de fadiga percebeu-se uma o grupo das Misturas Asfálticas Recicladas a Quente (MARQs) apresentou uma capacidade maior de resistir aos golpes se comparados às MARMs. Para as misturas avaliadas em campo os valores obtidos nos ensaios de MR e de RT apresentaram a mesma tendência evidenciada nas misturas asfálticas avaliadas na fase de laboratório do presente trabalho.

### 2.2.1. Breve histórico

Em 1956, Dr. Ladis H. Csanyi, professor da Estação de Experimentação de Engenharia da Universidade Estadual de Iowa, estudou sobre o potencial das misturas espumadas para serem usadas como pasta selante. Desde então, esta tecnologia vem sendo utilizada por diversos países. O processo originalmente consistia em injetar vapor de água nas misturas quentes. Em 1968, a Mobil Oil Australia, adquiriu as patentes da invenção de Csanyi, passou a adicionar água fria em vez de adicionar água em forma de vapor e assim o processo se tornou mais prático e econômico (MUTHEN, 1998).

No início da década de 1970, a empresa de asfalto Chevron desenvolveu metodologias de projeto de mistura e de pavimento para misturas asfálticas de graduação aberta e densas estabilizadas com asfalto emulsionado. Em 1977, a Chevron publicou seu "Bitumuls Mix Manual" que contém muitas informações para especificar, projetar e produzir misturas estabilizadas em emulsão. Posteriormente, seguiram-se outras diretrizes semelhantes como a Federal Highway Administration (FHWA) em 1979 e a Asphalt Emulsion Manufacturers Association (AEMA) em 1981. (CHOWDHURY e BUTTON, 2008).

Na década de 90 começaram a surgir tecnologias de mistura morna que se valiam da técnica de espumar o ligante para que a mistura pudesse ocorrer em temperaturas mais baixas. Nesse processo, o asfalto quente em contato com a água, em temperatura ambiente, faz com que esta se torne vapor e expanda significativamente (PROWELL e HURLEY, 2007).

Em 1992, no Rio de Janeiro, ocorreu um dos mais importantes debates acerca dos problemas ambientais decorrentes do lançamento de gases-estufa para a atmosfera. No evento, conhecido como ECO-92, foi feito um balanço dos problemas existentes e foram elaborados documentos importantes para a conservação e gestão dos recursos naturais de maneira sustentável (DORCHIES APUD BUTTON *et al.*, 2007).

Em 1995, a empresa Shell International Petroleum desenvolveu um processo de MAMs que utilizava dois tipos de ligantes asfálticos, sendo um ligante de baixa e outro de alta viscosidade (esse último entra espumado no sistema), para produzir um ligante final com uma determinada consistência. Esse processo, foi testado em laboratório e avaliado em ensaios de campo em diversos países, tais como Noruega, no Reino Unido e na Holanda. O trabalho da Shell resultou no desenvolvimento da WAM-Foam (KOENDERS *et al.*, 2000).

Em 1996, o ministro do Trabalho e das Relações Sociais da Alemanha questionou os limites de exposição dos trabalhadores aos fumos de asfalto. Por esse motivo foi criado o Fórum de Asfalto da Alemanha que buscava estudar e debater sobre tecnologias que proporcionassem a redução de temperatura do processo de produção das misturas asfálticas. Além disso, o Fórum também almejava discutir a incidência de câncer nos operários do setor, os constituintes do asfalto, o uso de equipamentos de proteção individual (EPI's), e a redução da emissão de gases (NASCIMENTO *et al.*, 2008).

Em 1997, no Japão, foram formalizados por meio do Protocolo de Kyoto metas de redução da emissão de gases-estufa para a atmosfera. Este acordo entrou em vigor em 13 de fevereiro de 2005. Nesse mesmo ano, o Sasobit, aditivo orgânico, cera parafínica, que permite a produção de misturas mornas por redução da viscosidade do ligante, começou a ser comercializado na Europa por meio da empresa Sasol Wax International AG (CHOWDHURY e BUTTON, 2008).

De acordo com Koenders *et al.* (2000) no segundo Eurasphalt & Eurobitume Congress realizado nos dias 20-22 de setembro, em 2000 na Barcelona, Espanha, foram publicados resultados de laboratório, e de trechos experimentais em grande escala de uma tecnologia chamada de Warm Mix Asphalt Foam Emulsion com testes na Noruega, Reino Unido e Holanda entre os anos de 1996 e 1999. Essa tecnologia proporcionou uma redução de 2% nas emissões de CO<sub>2</sub> em comparação com a mistura à quente de referência. Além disso, os resultados mostraram que ocorreu uma economia de energia de 20 a 30%.

Em 2002, a National Asphalt Pavement Association (NAPA), associação comercial dos EUA que representa os interesses do produtor e contratante de materiais para pavimentos de asfalto, realizou um estudo na Alemanha, Dinamarca e Noruega, visando à análise de algumas tecnologias de MAMs, e a partir daí os EUA começou a conceder importância as MAMs. A Federal Highway Administration (FHWA) designou como área de foco as misturas mornas e juntamente com a NAPA criou um grupo técnico para avaliação desta tecnologia no campo. Agências de pesquisas como a National Center for Asphalt Technology (NCAT) e várias universidades conduziram os testes em laboratórios (FERREIRA, 2009).

Segundo D'Angelo *et al.* (2008) devido ao crescimento e interesse nas MAMs a American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) e a FHWA organizaram uma pesquisa na qual os especialistas americanos tivessem contato

com as agências europeias, pioneiras no uso desta tecnologia, e com os fornecedores e empreiteiros que a desenvolveram. Neste trabalho foi possível obter a análise do desempenho de alguns antigos projetos de MAMs. Com base nos dados de desempenho de campo laboratoriais e de curto prazo (3 anos ou menos), as MAMs forneceram o mesmo desempenho ou melhor que as misturas asfálticas à quente. O pior desempenho foi observado em seções limitadas na Noruega, mas não foi atribuído ao uso das MAMs.

No ano de 2007, treze especialistas americanos visitaram quatro países europeus - Bélgica, França, Alemanha e Noruega – para ter contato com os fornecedores e empreiteiros que desenvolveram a tecnologia de MAM. Alguns dos benefícios identificados como o desenvolvimento do uso de MAM na Europa foram: a redução do consumo de energia, redução das emissões de CO<sub>2</sub>, melhoria na compactação de campo e ainda aumento da distância de transporte da mistura (D'ANGELO *et al.*, 2008).

De acordo com Harringan (2012) foi estimado pelo FHWA que nos Estados Unidos, em 2010, 10% dos 358 milhões de toneladas de mistura asfáltica aplicadas seriam misturas mornas. Atualmente, pelo menos 30 departamentos de transportes dos Estados Unidos (Department of Transportation – DOTs) estabeleceram especificações para o uso da mistura asfáltica morna.

Atualmente, as misturas asfálticas mornas estão sendo empregadas no mundo inteiro, contribuindo com o meio ambiente na remissão de agentes poluentes à atmosfera.

### **2.2.2. Experiências brasileiras com o uso de misturas mornas**

No Brasil, Sousa Filho (2006) deu início aos estudos de misturas mornas e analisou as propriedades mecânicas das misturas produzidas com um tipo de zeólita, em comparação com misturas asfálticas convencionais. Os resultados mostraram que a adição de material zeolítico com o teor variando de 0 a 1%, não proporcionou comprometimento dos parâmetros mecânicos das MAMs, tanto no que diz respeito à Resistência a Tração (RT), quanto com relação ao Módulo de Resiliência (MR), garantindo uma redução de até 20°C na temperatura de produção. Os valores de RT aumentaram ou se mantiveram praticamente constantes em todos os teores estudados. A razão MR/RT refletiu a manutenção da trabalhabilidade e compactabilidade da mistura estudada.

Em 2008, a CONCEPA e o LAPAV, realizaram um estudo com uso de emulsão asfáltica modificada por aditivo a base de enxofre e outra mistura com uso de zeólita sintética. Para o projeto da mistura asfáltica tanto para adição de emulsão como para adição de zeólita, os teores dos aditivos foram de 0,3% sobre o peso total (ligante + agregado). A redução nas temperaturas de produção e aplicação das misturas estudadas foi de aproximadamente 50°C. Os valores de MR e RT obtidos para as misturas mornas avaliadas foram próximos aos observados as misturas à quente (da ordem de 4.000 MPa e 1 MPa, respectivamente). O estudo concluiu que os dois processos para produção de misturas mornas se mostraram eficientes (CONCEPA-LAPAV, 2008).

Otto (2009) estudou o comportamento mecânico das misturas asfálticas mornas com adição de zeólita, por meio da análise dos parâmetros de módulo complexo e fadiga. As MAMs apresentaram um desempenho de fadiga inferior aos apresentados pela mistura de controle, porém, seus parâmetros de módulo complexo foram relativamente superiores, com exceção das temperaturas acima de 30°C. Nos resultados referentes ao ensaio de Lottman, a mistura com adição de zeólita apresentou maior suscetibilidade ao dano por umidade induzida, indicando a necessidade de correção da adesividade pela adição de DOPE.

Cavalcanti (2010) realizou um estudo com a adição de um aditivo utilizado para a fabricação de misturas mornas, com nome comercial de Rediset™ e avaliou o efeito deste aditivo na vida de fadiga e na resistência à deformação permanente das misturas mornas. A quantidade de aditivo incorporado ao ligante de penetração 30-45 foi a mesma indicada pelo fabricante de 2% em massa de ligante. O autor concluiu que ocorreu melhoria na trabalhabilidade e na compactação, redução da permeabilidade e do endurecimento do ligante. As misturas com o Rediset™ dosadas pelo critério SUPERPAVE nas temperaturas de compactação de 130°C e 120°C obtiveram resultados de vida de fadiga inferiores ao da mistura de referência utilizada para comparação. Porém, apresentaram valores de RRT maiores do que o limite, indicando que o aditivo também pode ser utilizado como aditivo melhorador de adesividade.

Em junho de 2010, pesquisadores da COPE/UFRJ e da CONCER liderados pela professora Laura Motta elaboraram um relatório para a Associação Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) avaliando o comportamento de misturas asfálticas em trechos experimentais, na BR-040 sob concessão da CONCER. Onde, foram adotadas duas tecnologias de misturas asfálticas: mistura morna e mistura de módulo elevado além da mistura usual convencional, de referência. Em dezembro de 2010, foram

implantados os dois primeiros segmentos experimentais de mistura utilizando o ligante tipo CAP 50/70 e de mistura de módulo elevado com ligante especial (MOTTA *et al.*, 2012).

O objetivo da pesquisa para a elaboração do relatório da ANTT consistiu em avaliar o desempenho de um trecho dimensionado pelo método mecanístico empírico SisPav, em comparação com uma mistura convencional, dosadas pelo método SUPERPAVE. O segmento executado com mistura asfáltica morna com tecnologia de epumejo foi implantado em abril de 2012. O acompanhamento do desempenho sob a ação do tráfego foi realizado com medição de deflexão, atrito, levantamento de defeitos e retirada de corpos de prova. A pesquisa foi encerrada oficialmente em agosto de 2012 e o segmento de mistura morna até o momento da conclusão do trabalho não apresentou conclusões definitivas sobre o seu desempenho, porém, a mistura morna mostrou-se adequada para o espalhamento e compactação em temperaturas mais baixas do que as habituais (MOTTA *et al.*, 2012).

Souza (2012) estudou as propriedades mecânicas de misturas asfálticas com cimento asfáltico de petróleo modificado com óleo de mamona, em teores variando de 2 a 10%. Para as temperaturas de mistura e de compactação, o óleo de mamona reduziu a viscosidade do CAP, proporcionando uma diminuição destas temperaturas em média de 8°C, devido à adição de 5% de óleo de mamona, o que reflete em melhoria da trabalhabilidade das misturas asfálticas. Segundo o autor, foi realizada uma estimativa por engenheiros presentes e atuantes em usinas de asfalto, onde se definiu uma percentagem econômica do óleo BPF por hora, tanto para o ligante, quanto para os Agregados. Para o ligante asfáltico e para a variação de temperatura desejada (8°C) os resultados indicaram que o óleo de mamona pode ser utilizado como aditivo verde, promovendo um menor impacto sobre o meio ambiente e uma diminuição dos custos de nove por cento (9%) no quantitativo de óleo BPF utilizado na confecção da mistura convencional.

Sales (2015) realizou um estudo sobre o efeito da incorporação do aditivo CCBit nas propriedades mecânicas. Os teores de aditivo incorporados ao ligante asfáltico foram de 2,0; 2,5 e 3,0%, apresentando uma redução nas temperaturas de mistura e compactação de até 10,8°C, para o teor de 3,0% de CCBit. Além disso, não comprometeu os parâmetros volumétricos e mecânicos das misturas asfálticas, podendo considerar o aditivo como uma alternativa promissora e interessante por apresentar boas propriedades ao ligante asfáltico.



Silva (2016) realizou um estudo sobre os comportamentos reológicos de aditivos (CCBit, óleo de girassol, óleo de moringa e cera de carnaúba) utilizados na fabricação de misturas mornas. Esse autor, concluiu que o teor ideal para utilização do CCbit seria entre 2 e 2,5% tendo em vista que estes teores apresentaram bons resultados em termos de resistência ao envelhecimento. Para os óleos deveria considerar o teor de 1,0%, pois este teor possibilitou reduções de até 8,5°C nas temperaturas de mistura e de 11°C nas temperaturas de compactação sem comprometer significativamente o seu desempenho. No caso da cera de carnaúba o teor de 2,0% seria o ideal, pois possibilitou uma redução média de 8,5°C nas temperaturas de mistura e compactação.

Barros (2017) utilizou o ensaio uniaxial de carga repetida para avaliação da deformação permanente das misturas asfálticas quentes e mornas. As misturas asfálticas mornas foram realizadas com quatro ligantes diferentes: concreto asfáltico com polímero AMP – 60/85-E; concreto asfáltico convencional com adição de TLA (asfalto natural); concreto asfáltico modificado por borracha de pneu AB-8 e concreto asfáltico convencional CAP 30/45. A pesquisa utilizou o mesmo aditivo surfactante nas misturas estudadas, sendo incorporado 0,4 % do produto em relação ao peso do ligante. Os resultados mostraram que a maioria das misturas mornas obtiveram valores de RT e MR levemente inferior ao da sua mistura quente. Com relação ao ensaio uniaxial de carga repetida, observou-se que as misturas mornas obtiveram desempenho inferior que as misturas quentes com exceção da mistura morna com AMP 60/85 que teve desempenho superior à sua mistura quente segundo a ABNT.

### **2.2.3. Classificação das misturas mornas**

Existem diversas tecnologias disponíveis no mercado para a fabricação de misturas mornas, sendo elas derivadas de processos químicos (aditivos surfactantes), orgânicos e de processos como espumejo do asfalto. Cada um desses processos ajuda a melhorar a capacidade de trabalho da mistura a temperaturas mais baixas de diferentes maneiras.

Os aditivos orgânicos ao serem submetidos a temperaturas acima de seu ponto de amolecimento interferem nas propriedades do ligante, fazendo com que haja redução da viscosidade. Os aditivos surfactantes geralmente possibilitam uma maior trabalhabilidade do ligante em temperaturas mais baixas. Estes aditivos atuam como agentes ativos de superfície, conseguindo reagir simultaneamente com o ligante e com o

agregado, melhorando a lubrificidade do ligante asfáltico. Dessa forma, a redução da temperatura de produção é obtida pelo melhor envolvimento entre o ligante e o agregado, mesmo em baixas temperaturas. Finalmente, a água pode ser adicionada ao ligante asfáltico aquecido, ocasionando a expansão do ligante e a formação da espuma asfáltica, diminuindo a viscosidade da mistura.

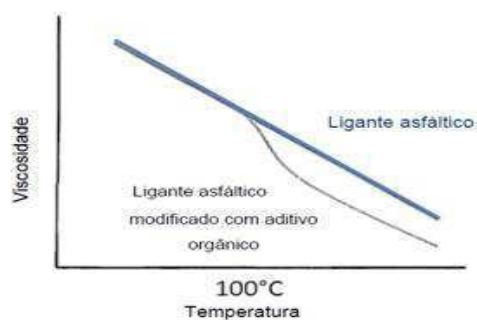
### 2.2.3.1. Aditivos orgânicos

De acordo com Oliveira (2014) quando os aditivos orgânicos são misturados ao ligante modificam suas propriedades reológicas, diminuindo a viscosidade do ligante e permitindo que a mistura asfáltica tenha trabalhabilidade superior quando comparada com a mesma no ponto de fusão.

Para os aditivos orgânicos no momento em que acontece um aumento da temperatura acima de seu ponto de fusão, acaba acarretando geralmente uma diminuição na viscosidade. Conforme a mistura esfria, estes aditivos se solidificam em partículas microscópicas que ocasionam um aumento a rigidez do ligante (RUBIO *et al.*, 2012).

Na Figura 4, pode ser visto o comportamento do ligante asfáltico modificado com aditivo orgânico. A inserção do aditivo possibilita uma viscosidade mais baixa em comparação com o ligante asfáltico convencional, para temperaturas mais altas.

Figura 4 - Ligante asfáltico modificado com aditivo orgânico



(Fonte: ANDERSON *et al.*,2008)

A escolha do tipo e da taxa de aditivo orgânico utilizados para a produção de misturas mornas deve ser feito de forma cautelosa, observando a temperatura que ocorre o ponto de amolecimento do aditivo e à temperatura esperada na vida de serviço do

pavimento, visando minimizar o potencial de trincamento por baixas temperaturas e a deformação permanente (PROWELL e HURLEY, 2007).

Entre alguns aditivos orgânicos que têm disponibilidade para ser usado comercialmente pode-se citar: a) Sasobit; b) CCBIt 113 AD; c) Asphaltan-B; d) Cera de carnaúba; e) Óleo de mamona; f) Óleo de girassol.

#### a) Sasobit

O Sasobit (Figura 5) é fabricado pela Sasol Wax International e é comercializado na Europa e na Ásia desde 1997. Este é uma cera sintética produzida a partir de gaseificação de carvão e requer pouca modificação na usina; o aditivo pode ser inserido diretamente 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 (D'ANGELO *et al.*, 2008).

Figura 5 - Sasobit em flocos e em pastilha, respectivamente



(Fonte: ZAUMANIS, 2010)

A adição do Sasobit permite a redução da viscosidade do ligante asfáltico, possibilitando que se trabalhe com um decréscimo de temperatura entorno de 18° a 54°C, se comparado com as temperaturas usuais das misturas quentes. Na temperatura inferior ao ponto de amolecimento, a cera Sasobit apresenta-se sob a forma de uma estrutura de cadeia cristalina compatível com o ligante (HURLEY *et al.*, 2005).

O ponto de amolecimento da cera Sasobit é em torno de 100°C e completamente solúvel em temperaturas superiores a 120°C. Esta cera reduz a viscosidade do ligante na temperatura de trabalho, o que facilita o processo de mistura do asfalto. De acordo com a Sasol Wax a adição ótima de Sasobit é em torno de 3% em massa de ligante (SASOL WAX, 2005).

Hurley e Prowell (2005) observaram que a adição de Sasobit® à mistura asfáltica reduz os proporciona melhorias na compactação das misturas a temperatura

consideravelmente baixa de 88°C. A temperatura final da mistura morna com Sasobit® é até 30°C menor do que a temperatura de uma mistura convencional (MALLICK *et al.*, 2009).

#### **b) CCBit 113 AD**

O CCBit 113AD é fabricado pela Dr. Hutschenreuther Technologies na Alemanha, podendo ser fornecido na forma de pó (Figura 6) e também na forma de grânulos ou flocos. Este possui cor amarela esbranquiçada, não possui odor, seu ponto de liquefação é de aproximadamente 139°C e ponto de fulgor de 279°C. O mesmo é insolúvel em água à 20°C, sua densidade varia entre 0,99 – 1,01 g/cm<sup>3</sup> (23°C), seu ph é 9 (10g diluídos em 100 ml de água) e sua viscosidade dinâmica é de aproximadamente 150°C.

Sales (2015) estudou a incorporação do CCBit para a produção de MAM e os resultados apresentaram uma perda de RT dos corpos de prova, relacionada à diminuição da temperatura de moldagem. Contudo, os valores de módulo de resiliência e de resistência retida à tração sofreram um aumento significativo para as misturas produzidas com o ligante modificado indicando aumento da rigidez da mistura asfáltica e da adesividade do ligante.

Oliveira (2014) analisou o comportamento mecânico de misturas asfálticas com ligante sem e com o aditivo CCBit-113AD, nas concentrações de: 1,5; 2,0 e 2,5%. O comportamento reológico do material ao acúmulo de deformações permanentes ( $G^* \cdot \text{sen} \delta$ ) para o CAP 50/70 com o aditivo a 60°C, apresentou melhor resistência à deformação permanente possibilitando maior durabilidade ao pavimento. Os resultados de RT e módulo de resiliência reduziram em função da diminuição das temperaturas de mistura e compactação, porém esse decréscimo é menos acentuado quanto menor for essa temperatura. A adição de 2,5% de CCBit permitiu reduzir a temperatura de mistura e compactação em até 40°C, sem haver uma perda significativa das características mecânicas das misturas originais.

Figura 6 - CCBit 113 AD



(Fonte: SALES, 2015)

### c) Asphaltan-B

O Asphaltan B é um produto da Romonta GmbH, Amsdorf, Alemanha. Romonta recomenda adicionar 2 a 4% de Asphaltan B por peso de mistura. Similarmente ao Sasobit, o seu ponto de fusão próximo aos 100°C e melhora as características do ligante a baixas temperaturas, além de aumentar a compactabilidade e resistência à fadiga (CHOWDHURY e BUTTON, 2008). A Romonta não especifica o quanto a temperatura de produção pode ser reduzida. O Asphaltan B está disponível em forma granular em sacos de 25 kg. Foram realizadas poucas pesquisas com este produto. Edwards *et al.* (2006) concluiu que o aditivo possibilitou melhorias na compactação e aumento da resistência à umidade das misturas asfálticas.

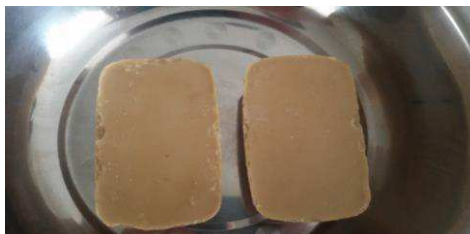
### d) Cera de carnaúba

Esta cera (Figura 7) é obtida da carnaúba (*Copernicia prunifera*), uma palmeira nativa da região semiárida do Nordeste brasileiro. É encontrada em grande quantidade no estado do Ceará sendo considerada uma planta xerófila, ou seja, capaz de resistir às secas. A carnaúba tem folhas em forma de leque, cobertas em ambas as superfícies, por uma camada cerosa (D'ALVA, 2004).

Silva (2016) estudou o comportamento reológico da cera de carnaúba visando a obtenção de MAMs, este aditivo foi adicionado ao ligante em concentrações de 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5%. O comportamento do módulo complexo em função da temperatura diminuiu proporcionalmente à adição de cera de carnaúba e aumento da temperatura, este fato implica na redução da resistência à deformação do ligante. A partir dos teores analisados, o teor de 2,0% foi o que propiciou uma melhor trabalhabilidade,

apresentando uma redução média de 8,5°C nas temperaturas de mistura e compactação e ainda aumentou a resistência do ligante ao envelhecimento.

Figura 7 - Cera de carnaúba



(Fonte: SILVA, 2016)

#### e) Óleo de mamona

De acordo com Costa *et al.* (2004) o óleo de mamona é um produto de uma oleaginosa (Figura 8), oriundo de fonte renovável e biodegradável e pode ser utilizado como “Aditivo Verde”, por suas características antioxidantes e suas propriedades “tensoativas”. O óleo de mamona caracteriza-se por ser bastante estável em variadas condições de pressão e temperatura. O teor de óleo das sementes de mamona pode variar de 35% a 55% (Vieira *et al.*, 1998).

Estudo realizado por Souza (2012) verificou o comportamento mecânico de misturas asfálticas dosadas segundo a metodologia SUPERPAVE, com a utilização de ligantes modificados à base de óleo da mamona. O aditivo propiciou a redução da viscosidade dos ligantes asfálticos. Os valores de módulo de resiliência e resistência à tração obtidos para as misturas asfálticas avaliadas foram próximos aos observados para a mistura à quente de referência, produzida com ligante convencional (da ordem de 4.000 MPa e 1 MPa, respectivamente). Portanto, considerando o desempenho mecânico das amostras, a técnica empregada com o óleo de mamona se mostrou adequada para a produção de misturas asfálticas a temperaturas intermediárias.

Figura 8 - Óleo de mamona



(Fonte: SOUZA, 2012)

## f) Óleo de girassol

Segundo a resolução da ANVISA nº 482, de 23 de setembro de 1999, o óleo de girassol é definido como óleo comestível obtido de semente de *Helianthus annuus* (Figura 9) por meio de processos tecnológicos adequados sendo classificado como:

- refinado - óleo obtido pelos processos de extração e refino;
- semi-refinado - óleo obtido pelos processos de extração e neutralização;
- bruto - óleo obtido pelo processo de extração;
- virgem - óleo obtido por processo de prensagem a frio e que não tenha sido submetido a outro tratamento que não a lavagem, decantação, centrifugação e filtração.

O girassol é cultivado principalmente na Rússia, Argentina, Europa Ocidental e Oriental, China e Estados Unidos. Tem se observado uma produção crescente no Brasil, já que representa uma alternativa econômica na rotação de cultivares (TELLES e BLOCK, 2010). Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2017), as estimativas da produção nacional, para a safra de 2016/17, girou em torno de 72,5 mil toneladas, aumento em torno de 14,9%, se comparadas com a safra anterior.

Segundo Castro *et al.* (1997), dentre os óleos vegetais, o óleo de girassol destaca-se por suas excelentes características físico-químicas e nutricionais. Possui alta relação de ácidos graxos poliinsaturados/saturados (65,3 %/11,6 %, em média), sendo que o teor de poliinsaturados é constituído, em sua quase totalidade, pelo ácido linoléico (65 %, em média).

Além da fração saponificável de um óleo (ácido linoléico, ácido oleico e outros.), existem compostos (fração insaponificável) presentes em pequenas quantidades, que também são importantes do ponto de vista da qualidade e estabilidade dos óleos vegetais. Dentre esses, destacam-se os tocoferóis ou vitamina E, os esteróis, os fosfolípidos (lecitinas) e os  $\beta$ - carotenos que aumentam a estabilidade dos óleos à luz. O óleo de girassol possui maior estabilidade em relação ao óleo de soja quando exposto a luz devido ao seu maior conteúdo em  $\beta$ -carotenos (OLIVEIRA e VIEIRA, 2004).

Figura 9 - Flor de girassol e semente de girassol, respectivamente.



Silva (2016) realizou estudos reológicos com a adição de óleo de girassol nos teores de 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5% ao ligante visando a fabricação de misturas mornas e constatou uma redução de temperatura de 11,3°C para mistura e de 14,8°C para compactação para o teor de 2,5% de óleo. Além disso, o autor também verificou que ocorreu uma perda de resistência do CAP devido à redução no módulo complexo ( $G^*$ ), justificado pela redução da viscosidade.

### 2.2.3.2. Agentes surfactantes

Estes produtos não dependem da formação de espuma ou da redução das temperaturas de mistura e de compactação. Geralmente incluem uma combinação de agentes de emulsificantes, surfactantes, polímeros e aditivos para melhorar o revestimento, a trabalhabilidade da mistura, e compactação, promovendo uma melhor adesividade do material (RUBIO *et al.*, 2012).

Os aditivos surfactantes podem ser incorporados às misturas previamente ou durante o processo de mistura. Estes produtos vêm se mostrando como uma alternativa viável economicamente, pois os aditivos podem ser incorporados à mistura sem alterações na planta da usina.

Alguns exemplos de aditivos pertencentes à classe surfactante são: a) Evotherm®; b) Gemul XT14; c) Rediset™ WMX; d) Revix™ e e) Cecabase RT®.

#### a) Evotherm®

Hurley e Prowell (2006) estudaram e realizaram ensaios no equipamento Asphalt Pavement Analyser (APA) em misturas mornas com aditivo Evotherm®, utilizando dois tipos de agregado – granito e calcário, e dois tipos de ligante – PG 64-22 e PG76-22. De acordo com os autores, foram moldados corpos de prova de mistura



morna e mistura de referência em diferentes temperaturas (149, 129, 110 e 88°C). Após os ensaios, os pesquisadores chegaram à conclusão que o aditivo melhora a trabalhabilidade da mistura.

#### **b) Gemul XT14**

O Gemul XT14 é um produto da empresa brasileira Quimigel, que atua como tensoativo, permitindo que o ligante possa recobrir os agregados adequadamente quando a mistura ocorre em temperaturas mais baixas que o habitual para a produção de misturas mornas. Além disso, o aditivo proporciona melhorias na adesividade do ligante.

Oliveira (2013) adotou o aditivo comercializado com o nome de Gemul XT-14® para a produção de MAMs. Segundo o autor o aditivo não alterou a curva de viscosidade versus temperatura do CAP modificado por se tratar de um aditivo tensoativo surfactante. No entanto, esse comportamento foi observado somente quando se analisou as amostras sem envelhecimento. As amostras que passaram pelo envelhecimento de curto prazo, simulado em laboratório com o uso do RTFO, apresentaram variação significativa para este parâmetro. Tal tendência também foi observada nos ensaios conduzidos no infravermelho (FTIR). Dessa forma, é possível que as MAMs que usarem aditivo surfactante apresentem uma maior rigidez após alguns anos de serviço se comparadas aos seus respectivos CAPs dosados sem o uso deste aditivo de MAM.

#### **c) Rediset™ WMX**

Rediset™ WMX é produzido pela empresa holandesa Akzo Nobel, é obtido por meio de uma combinação de surfactantes catiônicos e modificadores de reologia baseados em aditivos orgânicos (Figura 10). Esta combinação contém elementos que melhoram o recobrimento do ligante sobre a superfície dos agregados, atuam como melhoradores de adesividade e ainda conferem alguma redução da viscosidade do ligante à temperatura de produção. Possui forma granular e não contém água. A adição de 1,5-2,0% em peso de ligante permite uma redução de temperatura de 15 a 30°C (ZAUMANIS, 2010).

Cavalcanti (2010) realizou estudos em laboratório verificando o comportamento mecânico de misturas mornas com Rediset™ WMX e foram comparadas com um ligante convencional (CAP 30/45). Os resultados de resistência à tração destas misturas apresentaram valores próximos às misturas de referência, enquanto que os valores de módulo de resiliência foram inferiores às misturas convencionais.

Figura 10 - Rediset WMX granulada



(Fonte: ZAUMANIS, 2010)

#### **d) Revix™**

Revix™ é um aditivo surfactante, que não depende da formação de espuma ou da redução da viscosidade. Este produto foi desenvolvido pelas empresas norte-americanas Mathy Technology and Engineering Services e Paragon Technical Services. Uma variedade de surfactantes, ceras, auxiliares de processamento, polímeros e outros materiais são usados para esta tecnologia, permitindo que haja uma redução do atrito interno entre as partículas de agregados e as finas películas de ligante quando estes materiais são submetidos às altas taxas de cisalhamento no processo de mistura e compactação. Permite uma redução de temperatura em cerca de 15 a 30°C. O Revix™ não requer nenhum processo de modificação para adição deste, podendo ser misturado ao ligante na própria usina (ZAUMANIS, 2010).

Hanz *et al*, (2010) avaliaram a viscosidade de ligantes asfálticos com e sem a presença do aditivo surfactante Revix™ em um teor de 0,5% referente ao peso do ligante e verificaram que as viscosidades das amostras não foram alteradas pela presença do aditivo surfactante, pois geralmente esses aditivos não alteram as propriedades de consistência do ligante. Devido a esta ausência de mudanças, acredita-se que outro fator deva ser levado em conta para análises de misturas mornas. Os autores verificaram a lubricidade por meio de um equipamento normalmente utilizado

para caracterização de lubrificantes. Os resultados mostraram diferenças expressivas na propriedade de lubricidade dos asfaltos com e sem o aditivo para misturas mornas nas temperaturas abaixo de 100°C, dando indícios que o ensaio de lubricidade deve ser estudado.

#### e) **Cecabase RT®**

O Cecabase RT® é fabricado pela empresa francesa Ceca do grupo Arkema. O aditivo Cecabase RT® atua na interface entre o agregado mineral e o asfalto, e não altera as propriedades reológicas do asfalto. A CECABASE RT 945 pode ser utilizada como redutora da temperatura de produção da mistura de asfalto comum, estabelecendo uma redução de temperatura de 20 a 40°C. O Cecabase RT® apresentou uma redução de temperatura de até 27°C, obtendo-se uma MAMs com propriedades semelhantes a uma típica mistura a quente (SHETH,2010).

Ferreira (2009) realizou uma análise comparativa do desempenho mecânico (em laboratório e num trecho experimental) das misturas mornas com uso do aditivo Cecabase® em comparação com uma mistura à quente convencional. Foi adicionado o teor de 0,3% do aditivo Cecabase® aos ligantes B35/50 e B50/70 (classificados de acordo com a Norma Europeia 12591). A MAM apresentou uma vida de fadiga inferior a mistura à quente, os valores de resistência à fadiga foram de 93E-6 para a mistura com o aditivo e de 173E-6 para a mistura à quente de referência. Porém, os valores do módulo de rigidez obtidos para a MAM foram superiores a mistura à quente, sendo de 6500 MPa para a mistura com Cecabase® e 4700 MPa para a mistura à quente, o que confirma que é possível produzir MAM sem comprometer o seu desempenho desde que esteja garantido um eficiente controle da qualidade.

### **2.2.3.3. Espuma de asfalto**

Este tipo de tecnologia envolve a adição de uma pequena quantidade de água no asfalto quente, adição de material hidrófilo como as zeólitas ou agregado úmido (PROWELL e HURLEY, 2007). Nesta ocorre um contato da água fria com o asfalto aquecido, ocasionando a expansão do ligante e a formação da espuma asfáltica, diminuindo a viscosidade e melhorando a trabalhabilidade da mistura.

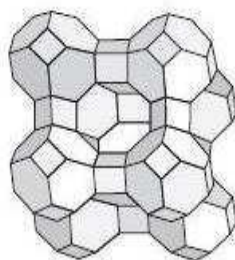
Rubio *et al.*, (2012) menciona que ao escolher este tipo de tecnologia deve-se ter um cuidado com a quantidade de água a ser inserida no ligante, pois, esta deve ser suficiente para causar o efeito espuma, e não superior, que possa causar problemas de falta de adesividade.

São exemplos desta tecnologia as: a) zeólitas; b) Low Energy Asphalt (LEA); c) Double Berrel Green; d) Aquablack WMA e e) WAM-Foam.

#### a) Zeólitas

As zeólitas são alumino-silicatos hidratados com estrutura molecular aberta com íons positivos que estão fracamente ligados à estrutura e assim permitem a absorção e liberação de água como pode ser visto na Figura 11. Sendo as zeólitas mais usadas para a produção de MAMs a Advera WMA e Aspha-Min®.

Figura 11 -Estrutura de uma Zeólita



- **Advera WMA**

A zeólita Avera WMA produzida pela empresa da Eurovia Services GmbH, Bottrop, na Alemanha. Ela está disponível em uma forma fina de pó branco em sacos de 25 ou 50 kg ou em massa para silos. É uma zeólita sintético (Silicato de alumínio de sódio), que foi hidrelétrica termicamente cristalizado. A percentagem de água contida internamente pelo zeólita é de 21 por cento, em massa, e é libertado na gama de temperaturas de 85 - 182°C. Ao adicionar Advera® à mistura ao mesmo tempo que o ligante, uma pulverização de água muito fina é criada. Esta liberação de água cria uma expansão volumétrica do ligante (SHETH, 2010).

De acordo com o fabricante, adicionando Advera a uma taxa de 0,3 a 0,9% por cento de massa da mistura, pode resultar em uma potencial redução de 12°C na

temperatura de produção de mistura a quente e conseqüentemente uma redução de 30% no consumo de combustível.

- **Aspha-Min®**

Aspha-min® está disponível em forma de pó ou granulada (Figura 12) e é fabricado pela empresa alemã Eurovia Services GmbH. Geralmente é adicionado à mistura de asfalto a uma dosagem de 0,3% em peso da mistura. Ao adicioná-lo à mistura juntamente com o asfalto, um spray de água muito fino é criado, que provoca uma expansão de volume do asfalto, aumentando assim a trabalhabilidade da mistura a uma temperatura mais baixa. O fabricante da Aspha-min® afirma que a temperatura de mistura pode ser reduzida em 30°C.

Figura 12 - Amostra de Aspha-min®



### **b) Low Energy Asphalt (LEA)**

Segundo Motta (2011) o processo LEA é uma tecnologia de mistura semimorna desenvolvida na França, sendo comercializada pela empresa francesa Lea-Co e pela norte-americana McConnaughay Technologies. A produção desta mistura se dá por espumejo do asfalto quente em contato com a água contida na fração miúda dos agregados, a uma temperatura de aplicação da mistura asfáltica abaixo de 100°C. O processo LEA pode ser resumido da seguinte forma: primeiramente os agregados graúdos passam por secagem em temperatura inferior ao processo usual e o ligante é aquecido em temperatura habitual para a mistura quente e então são misturados. Em seguida, os agregados miúdos, contendo de 3 a 4% de água são misturados aos agregados graúdos com ligante, resultando no espumejo do ligante. Finalmente, ocorre o equilíbrio térmico entre o agregado mineral, o ligante asfáltico e a água residual.

Romier *et al.* (2006) relataram que a temperatura de aplicação do processo LEA é da ordem de 60 ° C a 71 ° C. O teor residual de água nas misturas foi de cerca de 0,5%. Como a diferença com a temperatura ambiente é menor para as misturas LEA do que para as contrapartes de alta temperatura, a taxa de queda na temperatura com o tempo é menos significativa. A mistura LEA exibiu uma aparência superficial comparável a mistura a quente.

### c) Double Barrel Green

Double Barrel® Green (Figura 13) aborda a produção de mistura morna por formação de espuma, mas não se trata de um aditivo e sim de um processo. Esta é indicada para usinas drum-mixer, sendo produzida pela empresa norte-americana Astec Industries. O processo Double Barrel Green tem sido realizado do mesmo modo que os de misturas à quente, mas para reproduzir as condições de campo é necessário que haja a instalação de um equipamento de espumejo em laboratório (PROWELL e HURLEY, 2007).

Normalmente, as misturas mornas no sistema Double Barrel® Green são usinadas entre 116 e 135°C (D'ANGELO *et al.*, 2008).

Figura 13 - Sistema Double Barrel® Green Instalado em Usina retirado de



Fonte: [www.astecinc.com](http://www.astecinc.com).

### d) Aquablack WMA

O processo de produção de MAMs conhecido como Aquablack é similar ao processo de produção da Double Barrel Green e consiste em usar algum tipo de bico

para injetar água na corrente de ligante asfáltico. Porém cada tecnologia utiliza equipamentos desenvolvidos pela empresa individual. Os bicos são controlados por computador para ajustar a taxa de espuma. Uma pequena quantidade de água é adicionada para espumar microscopicamente o ligante. A água cria vapor que está encapsulado em um grande volume de ligante, que diminui a viscosidade e as temperaturas de produção são reduzidas em aproximadamente 20-30 °C (ZAUMANIS, 2010).

Em abril de 2010, uma avaliação de campo WMA foi construída em Walla Walla, WA, para comparar uma mistura a quente convencional com MAM produzido usando o sistema de espuma de asfalto AquaBlack™ desenvolvido pela Maxam Equipment. Podem-se destacar as seguintes conclusões:

- a temperatura de produção de MAM foi aproximadamente 10 °C menor do que a da mistura a quente;
- a MAM e a mistura a quente exibiram rigidez semelhante em toda a gama de testes temperaturas e frequências no teste do módulo dinâmico;
- os resultados de fadiga da MAM e da mistura a quente não foram estatisticamente diferentes, com a MAM com um maior limite de resistência à fadiga.

Portanto, a MAM deve ter desempenho igual ou melhor do que a mistura de controle em termos de fadiga. Após 13 meses de serviço, as seções de MAM e mistura a quente exibiram similar desempenho em campo (KVASNAK *et al.*, 2010).

#### **e) WAM-Foam.**

WAM-Foam tecnologia é desenvolvida pela empresa inglesa Shell Bitumen juntamente com a empresa norueguesa Kolo-Veidekke. A WAM-Foam utiliza dois sistemas de ligantes em sua composição, sendo um de baixa viscosidade e outro de alta viscosidade. O agregado é aquecido a cerca de 130°C e depois revestido com o ligante menos viscoso, que é normalmente de 20 a 30 por cento do ligante total. O ligante mais viscoso é então espumado na mistura adicionando água fria (2% a 5% da massa do ligante duro) a cerca de 180°C. O revestimento do agregado graúdo com o ligante

menos viscoso atua para satisfazer a absorção de asfalto do agregado graúdo que, de outra forma, não pode ocorrer com o ligante mais viscoso a baixa temperatura (ZAUMANIS, 2010).

Ao usar WAM-Foam, a Shell relatou economia de combustível de planta e reduções de CO<sub>2</sub> de 30%. As medições de uma fábrica de tambores na Noruega mostraram que a produção de WAM-Foam produziu as seguintes reduções, em comparação com as misturas a quente a taxas de produção idênticas: 40% no consumo de diesel, 31% em emissões de CO<sub>2</sub>, 29% em emissões de CO e 62% em NOX emissões (Larsen *et al.*, 2004).

#### **2.2.4. Custos**

Na pavimentação asfáltica os processos que concentram a maior utilização de energia ocorrem durante o processo de mistura da mistura asfáltica. Na usina de asfalto, a energia é gerada a partir da queima de combustível fóssil ou energia elétrica. Durante a obra de pavimentação é necessário o uso de combustível fóssil para movimentar as máquinas de espalhamento e compactação do asfalto (MERIGHI, 2015).

Segundo Anderson *et al.*, (2008) existe uma economia de combustível com a utilização das MAMs ao invés das misturas a quente que são tradicionalmente produzidas. No entanto, deve-se notar que a economia de combustível pode ser compensada pelo custo dos aditivos MAMs, estimado em US \$ 2 a US \$ 4 por tonelada de MAMs produzida.

Em um relatório realizado pelo Programa Nacional de Pesquisa Rodoviária Cooperativa (NCHRP) em 2013, foi fornecido uma comparação do consumo de combustível entre a produção de mistura a quente e MAM. Enquanto o consumo inicial de combustível para a produção de mistura a quente foi de 2,0 litros de galões de diesel por tonelada, foi fornecido por um documento técnico da FHWA a partir de 1980, o número de consumo de combustível da MAM não foi medido fisicamente, mas foi designado como 20% menor que o da produção de mistura a quente. Este pressuposto traduz-se em uma redução de 0,4 galão de combustível diesel por tonelada de mistura de asfalto (SKOLNIK, J.; BROOKS, M.; OMAN, J., 2013).

A PCA AMERICA'S CEMENT MANUFACTURERS (2017) investigou as economias de combustível para cada um dos três métodos (aditivos orgânicos, aditivos surfactantes e asfalto espumado) e afirmou que os aditivos surfactantes economizam até



50% (1,0 galão), as tecnologias de aditivos orgânicos economizam até 35% (0,7 galão) e espuma à base de água até 20 por cento (0,4 galão). Foram avaliados três processos populares de MAMs, cada um representando uma das três categorias de métodos: o processo Double-Barrel Green® para base de água, Sasobit® para aditivos orgânicos e Advera® para as tecnologias de aditivos químicos. A pesquisa sugere que as estimativas de economia associadas as MAMs podem ser exageradas. Os aditivos surfactantes e orgânicos apresentam uma maior redução no uso de combustível, porém, estes aditivos adicionam um custo com a aquisição do aditivo para cada tonelada de mistura de asfalto produzida. O processo a base de espuma asfáltica não apresenta custos adicionais com a obtenção de aditivo, mas possuem custos com a modificação da usina.

Segundo a pesquisa da PCA devido as temperaturas das MAMs serem mais baixas do que os níveis de produção de mistura à quente, o risco de secagem incompleta do agregado aumenta, podendo apresentar uma maior suscetibilidade à umidade. A umidade excessiva em pavimentos de asfalto pode causar um fenômeno chamado "stripping", no qual a agregado separa-se do ligante. Isso pode fazer com que o pavimento falhe estruturalmente, sendo necessário a adição de Agentes Anti-Stripping (ASA), que reduzem o potencial de danos causados pela umidade em MAM aumentando os custos dessas misturas.

A PCA utilizou os menores custos de admissão possíveis para obtenção dos aditivos pertencentes aos grupos surfactantes e orgânicos e realizou uma simulação da economia gerada com a fabricação das MAMs. Devido a redução das temperaturas foi possível alcançar uma economia projetada de custos de combustível de US \$ 3,4 bilhões para 2020. Após incorporar os gastos com os aditivos (surfactantes e orgânicos) para alcançar uma economia líquida, e contabilizando os gastos a economia líquida cairia para US \$ 2,7 bilhão. Com os custos com a aquisição dos ASA incluídos, a economia líquida para 2020 cairia para US \$ 300 milhões, uma diferença de dez vezes. Portanto, apesar dessa redução na economia, a produção de MAM ainda se apresenta como sendo mais econômica que o processo de produção da mistura à quente convencional.

Kristjánsdóttir *et al*, (2007) concluíram que o aumento no custo da produção da mistura morna é decorrente do custo com o aditivo e com a modificação na usina de asfalto, quando necessário. Em lugares onde o custo do combustível é alto, a utilização da tecnologia de MAM pode receber grande incentivo. Além disso, os autores também verificaram que, caso seja incluído material fresado na mistura morna, o custo de produção pode ser ainda mais baixo, em relação a mistura à quente, devido ao

reaproveitamento de material. Enquanto uma mistura morna com 50% de reciclados e 50% de materiais novos custaria U\$ 45,63 por tonelada, o gasto com uma mistura convencional com 100% de agregados novos seria de U\$ 60,25, gerando uma economia de U\$ 14,62 por tonelada.

### **2.2.5. Vantagens das misturas mornas**

Diversos estudos realizados nos últimos anos apontam benefícios das misturas mornas em relação às misturas usinadas a quente e a frio. Merighi (2015) reuniu algumas das vantagens da produção de misturas mornas, tais como:

- habilidade de incorporar maior quantidade de material reciclado, devido a redução da temperatura de mistura, que proporciona menor envelhecimento do ligante, neutralizando a rigidez do ligante do material reciclado;
- possibilidade de aplicação em regiões geográficas mais frias, pois sua temperatura é menor que a temperatura convencional;
- aumento da distância de transporte de massa asfáltica, além da possibilidade da execução de remendos e aplicação de camadas mais delgadas com melhor qualidade, devido ao menor potencial de resfriamento;
- redução do envelhecimento do ligante asfáltico, devido ao menor aquecimento do ligante na produção das misturas;
- redução do consumo de combustível, como a mistura morna requer aquecimento a temperaturas menores, o consumo de energia no aquecimento é reduzido, diminuindo conseqüentemente o consumo de combustíveis fósseis;
- redução da emissão de agentes nocivos na usina e no campo, pois a mistura não chega a temperaturas que são responsáveis pela maior emissão de gases;
- melhores condições aos trabalhadores, pois ocorre redução da exposição dos trabalhadores aos fumos (fumaça causada devido à alta temperatura da mistura) e odores;

### 2.2.6. Desvantagens das misturas mornas

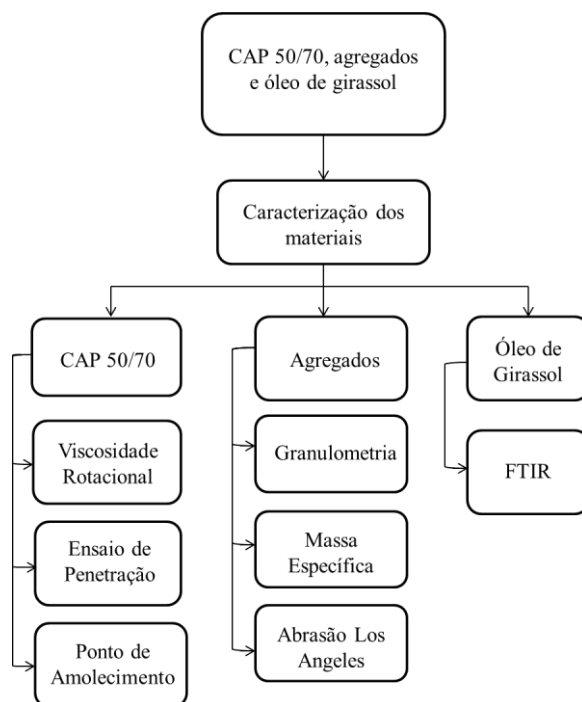
Segundo Bundy (2012) as misturas mornas apresentam alguns problemas, dentre as desvantagens/cuidados, citam-se:

- pode ocorrer trincamento precoce devido à presença de umidade residual na interface ligante-agregado. Devido a aplicação de temperaturas de mistura e compactação reduzidas, pode ocorrer de esta umidade não ser totalmente expulsa da mistura, prejudicando o potencial adesivo do ligante sobre a superfície do agregado. Porém, esse impasse pode ser resolvido com a utilização de um aditivo melhorador de adesividade, pois a utilização de um aditivo melhorador de adesividade geralmente não sobrepõe a economia de energia proporcionada pela utilização do aditivo de MAMs;
- dados insuficientes para avaliar algumas técnicas e produtos que vêm sendo testadas;
- incógnitas sobre o real valor da redução de custos. É necessário verificar se a redução no consumo de energia é suficiente para diminuir os custos de produção, pois às vezes o valor do aditivo utilizado talvez não seja economicamente viável; e
- alguns aditivos que fazem uso de ceras em sua composição não apresentam um comportamento satisfatório a temperaturas atmosféricas muito baixas, devido à cristalização das ceras, que geralmente aumentam a viscosidade e a rigidez do ligante;

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os procedimentos utilizados durante a fase experimental da pesquisa. A metodologia adotada para a caracterização dos materiais está detalhada no Fluxograma da Figura 14, neste são apresentados os materiais utilizados e as especificações para a obtenção das propriedades físicas dos agregados e dos ligantes asfálticos.

Figura 14 - Fluxograma de Caracterização dos Materiais



Os métodos de ensaios utilizados foram baseados em normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), da ASTM (American Society for Testing Materials), do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).

### 3.1. Materiais

#### 3.1.1. Ligante asfáltico

O ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa foi o CAP 50/70, mais utilizado na região Nordeste, fornecido pela empresa Rocha Cavalcante de Campina Grande (Figura 15), com caracterização física apresentada na Tabela 1.

Figura 15 - CAP 50/70



Tabela 1 - Caracterização do CAP

CARACTERÍSTICA	CAP PURO	LIMITES	NORMA
Penetração (0,1mm)	63,8	50 -70	NBR-6576
Ponto de amolecimento (°C)	47,5	46 (mín)	NBR-6560
Viscosidade Rotacional 135 °C (cp)	457,5	274 (mín.)	NBR-15184
Viscosidade Rotacional 150 °C (cp)	223,5	112 (mín.)	NBR-15184
Viscosidade Rotacional 177 °C (cp)	80,75	57 – 285	NBR-15184

#### 3.1.2. Agregados

Os agregados graúdos utilizados nessa pesquisa foram a brita 19mm e a brita 12,5mm. Os agregados miúdos empregados foram o pó de pedra e areia. O filer utilizado foi a cal hidratada da marca MegaO (Figura 16), fornecidas pela Pedreira Rocha Cavalcante - PB e pela Pedreira Serrinha - RN, respectivamente. Porém, a areia e cal foram utilizados apenas na composição das curvas de Fuller da dosagem SUPERPAVE. A amostra foi selecionada por quarteamento (método B) da norma DNER-PRO 199/96.

Figura 16 - Agregados: areia, pó de pedra, brita 12.5mm e brita 19mm.



### 3.1.3. Óleo de girassol

O aditivo utilizado foi o óleo de girassol (Figura 17) da marca Liza e foi obtido no comércio local e adotado devido ao seu potencial como aditivo orgânico redutor de viscosidade.

Figura 17 - Óleo de girassol



## 3.2. Métodos

### 3.2.1. Propriedades físicas dos materiais

#### 3.2.1.1. Agregados

Nesta seção são apresentados os ensaios de granulometria, massa específica dos agregados graúdos e miúdos, abrasão Los Angeles e absorção, utilizados para caracterização dos agregados (Tabela 2).

Tabela 2 - Ensaios e normas utilizadas para caracterização dos agregados

ENSAIOS	METODOLOGIA
Análise granulométrica dos agregados por peneiramento	DNIT - ME 083/98
Massa específica real dos agregados graúdos	DNIT - ME 081/98
Massa específica real dos agregados miúdos	DNIT - ME 084/95
Abrasão “Los Angeles”	DNIT - ME 035/98
Absorção	DNIT - ME 081/98

##### 3.2.1.1.1. Análise granulométrica

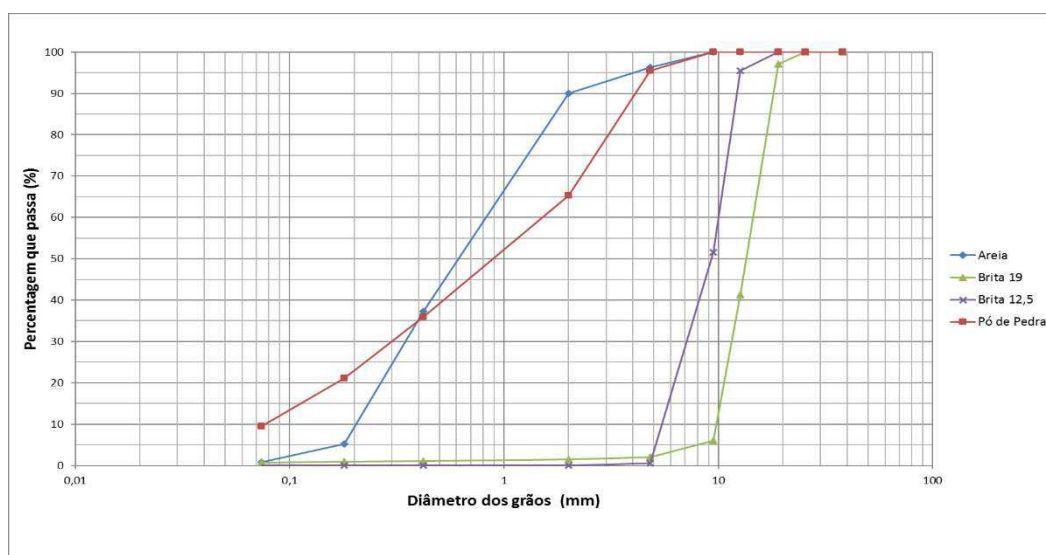
A análise granulométrica dos agregados graúdos e miúdo utilizados nesta pesquisa foi realizado segundo a norma DNIT-ME 083/98, com peneiras de malhas de abertura 0,075mm, 0,18mm, 0,42mm, 2,0mm, 4,8mm, 9,5mm, 12,7mm e 19,1mm. O material utilizado foi colocado em estufa a 110°C por 4 horas para a retirada da umidade e o peneiramento foi realizado manualmente, onde a massa total foi dividida em faixas de tamanhos de grãos, exprimindo-se a massa de cada faixa em porcentagem da massa total.

A Tabela 3 e a Figura 18 apresentam a distribuição dos tamanhos das partículas dos grãos dos materiais granulares utilizados nesta pesquisa.

Tabela 3 - Granulometria dos agregados

QUANTIDADE PASSANTE ACUMULADA (%)					
Peneira	Peneira (mm)	Brita 19	Brita 12,5	Areia	Pó de pedra
1 1/2"	38,1	100	100	100	100
1"	25,4	100	100	100	100
3/4"	19,1	97,1	100	100	100
1/2"	12,7	41,29	95,43	100	100
3/8"	9,5	6	99,76	100	100
Nº 4	4,8	2,01	51,6	96,24	95,44
Nº 10	2	1,46	0,54	90,06	64,31
Nº 40	0,42	1,07	0,07	37,23	35,88
Nº 80	0,18	0,9	0,05	5,19	21,13
Nº 200	0,074	0,66	0,03	0,75	9,5

Figura 18 - Curva granulométrica dos agregados



### 3.2.1.1.2. Massa Específica e Absorção

Os ensaios de massa específica e de absorção dos agregados graúdos foram realizados segundo o método do DNIT-ME 081/98. As amostras separadas foram 3.000g de brita 19mm e 2.000g de brita 12,5mm. Cada amostra foi lavada para retirada de pó e impurezas e colocadas em estufa a 110°C por 4 horas. Após ser resfriada à temperatura ambiente, cada amostra foi colocada imersa em água à temperatura ambiente por 24 horas. Após este tempo o material foi retirado e seco superficialmente para verificar a massa saturada com superfície seca. Em seguida o material foi colocado



em um recipiente para verificação da massa submersa. Por fim, o material foi colocado novamente em estufa por 4 horas, resfriado à temperatura ambiente e verificada sua massa seca, para obter a massa específica aparente e a absorção dos agregados.

A determinação da massa específica dos agregados miúdos foi realizada segundo a norma NM 52/2009 e a absorção por meio da NM 30/01. Utilizaram-se duas amostras de 500g de agregado miúdo passantes na peneira de 4,8mm e retidos na peneira de 0,074mm. O material foi colocado imerso em água e deixado em repouso por um período de 24 horas. Em seguida, foi colocado em uma superfície plana submetendo-o à ação de uma corrente de ar, secando-o de maneira uniforme (Figura 19).

Figura 19 - Secagem do material



Para verificação do estado do agregado como saturado superfície seca, fez-se a secagem até que os agregados não ficassem fortemente unidos entre si, colocando o agregado miúdo num molde tronco-cônico e compactando sua superfície suavemente com a haste de compactação com 25 golpes. Ao retirar o molde, observou-se se o agregado conservava a forma do molde, isso aconteceria se ainda houvesse umidade superficial. Continuou-se a secagem e repetiu-se o procedimento até que o cone de agregado miúdo desmoronasse ao se retirar o molde. Neste momento, o agregado teria chegado à condição de saturado superfície seca.

Pesou-se 500g de amostra e em seguida colocou-se no picnômetro cuidadosamente, registrando a massa do conjunto. Colocou-se, então, água destilada no picnômetro até cobrir a amostra de agregado. O picnômetro foi mantido durante 1 hora em um banho a temperatura constante de  $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$ . Em seguida, completou-se o picnômetro com água (Figura 19) e então foi determinada a massa do picnômetro mais amostra mais água.

O agregado miúdo foi retirado do frasco e seco em estufa a  $(105 \pm 5)^{\circ}\text{C}$  até a constância de sua massa. Após esse processo, foi realizada a determinação da massa específica aparente do agregado miúdo.

Os valores da massa específica real e aparente e da absorção dos agregados graúdos e miúdos utilizados nessa pesquisa estão mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Massa específica real e aparente e absorção dos agregados graúdos e miúdo

<b>AGREGADO</b>	<b>MASSA ESPECÍFICA REAL (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>MASSA ESPECÍFICA APARENTE (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>ABSORÇÃO (%)</b>
<b>Brita 19mm</b>	2,80	2,75	0,61
<b>Brita 12,5mm</b>	2,73	2,69	0,51
<b>Pó de pedra</b>	2,52	2,47	0,74
<b>Areia</b>	2,43	2,42	0,16

Os valores de massa específica real e aparente dos agregados se encontram dentro dos valores esperados na literatura para cada tipo de material utilizado na região (Nascimento, 2011; Souza, 2012; Gama, 2013; Sales, 2015). Esses dados foram utilizados para a determinação do teor ótimo de CAP para a dosagem SUPERPAVE.

### **3.2.1.1.3. Abrasão Los Angeles**

Esse ensaio foi realizado de acordo com a norma do DNIT-ME 035/98. Este consistiu em submeter certa quantidade de amostra à choques e desgastes durante a rotação de tambor metálico de 80 centímetros de diâmetro a uma velocidade de 30 a 33 rpm, com a presença de doze bola de aço. O ensaio foi concluído após 500 ou 1.000 rotações a depender da faixa granulométrica. Em seguida o material foi peneirado e o desgaste foi determinado pela razão entre a quantidade de material que passou na peneira de 1,7 mm após o ensaio e a quantidade total que foi colocada inicialmente no tambor.

O ensaio de abrasão Los Angeles foi realizado nos agregados graúdos. A brita 19 mm e a brita 12,5 mm apresentaram um desgaste Los Angeles respectivamente de 26,05% e 25,4%, valores abaixo da especificação do DNIT 031/2006 ES, que recomenda valor máximo igual ou inferior a 50%. Portanto, os agregados graúdos utilizados nesta pesquisa atenderam ao critério estabelecido.

### 3.2.2. Caracterização do Cimento Asfáltico de Petróleo

Nesta seção são apresentados o processo de produção do ligante modificado com óleo de girassol e os ensaios de: penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional e Rolling Thin Film Oven Test (RTFO) utilizados na caracterização do mesmo.

Foram realizados os ensaios de caracterização física das amostras em laboratório com o intuito de verificar as propriedades tanto para o ligante CAP 50/70 puro quanto para o ligante modificado com diferentes teores de óleo de girassol. Na Tabela 5 estão apresentadas as normas utilizadas para a realização dos ensaios.

Tabela 5 - Normas dos ensaios de caracterização física do ligante

ENSAIOS	MÉTODOS
Viscosidade Rotacional	NBR 15184/04
Ponto de Amolecimento	DNIT ME 131/2010
Penetração	DNIT ME 155/2010
RTFO	ASTM D 2872-97

#### 3.2.2.1. Mistura do ligante com o óleo de girassol

O Fluxograma da Figura 20 demonstra a sequência que foi utilizada para caracterização do ligante após incorporação do aditivo. Foi utilizado um agitador mecânico FISATOM, Modelo 72 (Figura 21) para o processo de produção do ligante modificado com óleo de girassol. Foi adicionado ao ligante tipo CAP 50/70 o óleo de girassol em teores de 1,0; 2,0 e 3,0%. Estes foram escolhidos baseados na pesquisa realizada por Silva (2016) que analisou os teores de óleo de girassol variando de 1,0 a 2,5% e indicou que o teor ideal para utilização do óleo seria de 1%, pois reduziu a temperatura de mistura e compactação sem comprometer o seu desempenho em relação aos ensaios das propriedades reológicas do ligante asfáltico (PG, MSCR e Curva Mestre). Porém, o autor apresentou uma redução de viscosidade consideravelmente maior para o teor de 2,5%. Portanto, resolveu-se testar também os percentuais de 2 e 3% do produto, para obter uma maior redução nas temperaturas de mistura e compactação e

verificar até que ponto as propriedades mecânicas seriam preservadas ou totalmente perdidas.

O processo de produção do ligante modificado com o óleo de girassol foi realizado conforme as instruções da pesquisa de Silva (2016). O ligante foi inicialmente aquecido a uma temperatura de 135°C sendo mantida a temperatura de mistura constante. O tempo de mistura foi de 20 minutos, onde gradativamente os teores de óleo de girassol foram adicionados ao ligante, a uma velocidade máxima de 410 rpm no misturador mecânico. Os componentes foram misturados com agitação frequente, tomando-se cuidado para não exceder a temperatura e o tempo de reação.

Figura 20 - Fluxograma da incorporação do óleo de girassol ao ligante e posterior caracterização física

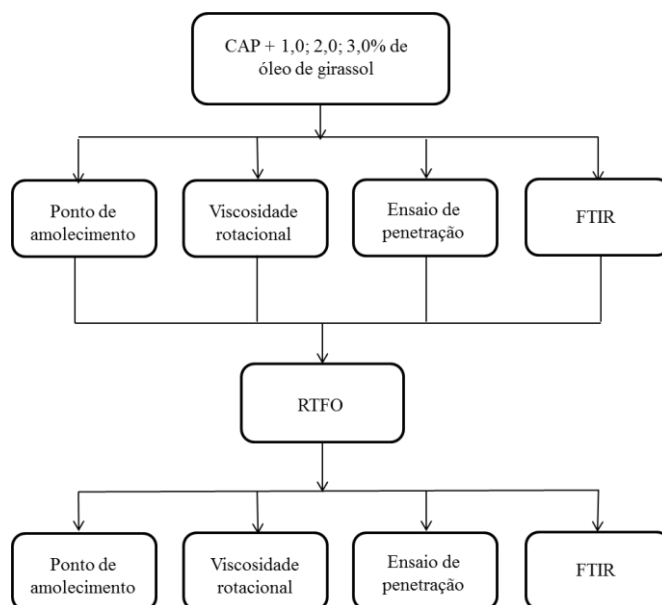


Figura 21 - Agitador mecânico FISATOM



Para a inserção do aditivo no misturador com o ligante, manteve-se a tampa do misturador entreaberta, pois o ligante à temperatura de 135°C encontra-se demasiadamente líquido e isto poderia causar respingos e prováveis acidentes, como queimaduras. A Figura 22 ilustra o modo que foi inserido o óleo de girassol no misturador. Os componentes foram misturados com agitação frequente, tomando-se cuidado para não exceder a temperatura e o tempo de reação.

Figura 22 - Inserção do óleo de girassol ao ligante no misturador



### 3.2.2.2. Ensaio de Penetração

O ensaio de penetração foi realizado Segundo a Norma do DNIT 155/2010 – ME, onde é definida a penetração na profundidade, em décimos de milímetro. Uma agulha padrão penetra verticalmente na amostra de material sob condições prefixadas de carga, tempo e temperatura. O ensaio foi executado como é mostrado na Figura 23, em um penetrômetro, nas condições de tempo de 5s, carga de 100g à 25°C.

Figura 23 - Penetrômetro



### 3.2.2.3. Ponto de Amolecimento

O ensaio de Ponto de Amolecimento (Figura 24) foi realizado conforme a norma do DNIT 131/2010, ao qual o conjunto do equipamento anel e bola foram colocados dentro de um banho de água num béquer e a temperatura foi marcada no instante em que a mistura amolecida toca a placa do fundo do conjunto.

Figura 24 - Realização do ensaio de ponto de amolecimento



### 3.2.2.4. Viscosidade Rotacional

O ensaio foi realizado em viscosímetro Brookfield, modelo DVII (Figura 25) com controlador de temperatura THERMOSEL. O ensaio caracteriza as propriedades reológicas dos ligantes convencionais e modificados durante manuseio do asfalto, nas temperaturas de 135, 155 e 170°C, a partir do torque necessário para rotacionar um splindle imerso na amostra de aproximadamente 8 gramas de asfalto à velocidade de 20, 50 e 100 rpm respectivamente. O ensaio foi realizado segundo a norma NBR 15184/2007.

Figura 25 - Viscosímetro Brookfield



### 3.2.2.5. RTFO (Estufa de Filme Fino Rotativo)

O procedimento RTFO permite avaliar o envelhecimento do ligante asfáltico por oxidação e evaporação pelo efeito de calor e ar sobre uma película de material asfáltico em movimento. Uma fina película de asfalto de 35g é continuamente girada dentro de um recipiente de vidro a 163°C por 85 minutos, com injeção de ar. Os efeitos do calor e do ar são determinados a partir de alterações nos valores das análises físicas como medidos antes e depois do tratamento na estufa RTFO (Figura 26).

A realização dos ensaios obedeceu ao preconizado pela NBR 15235/2005 e foi realizado para o e CAP 50/70 puro e para todos os teores de óleo de girassol incorporados ao ligante, estudados nesta pesquisa. O procedimento também foi usado para determinar a variação de massa indicando assim a volatilidade do asfalto.

Para determinação da variação de massa (Equação 1), ao final do ensaio de RTFO as amostras foram pesadas e comparadas com o peso antes e depois do teste. As amostras após envelhecidas foram novamente caracterizadas por meio dos ensaios empíricos e de viscosidade rotacional.

$$\Delta M = \left( \frac{M_{inicial} - M_{final}}{M_{inicial}} \right) \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$\Delta M$  = variação em massa (%)

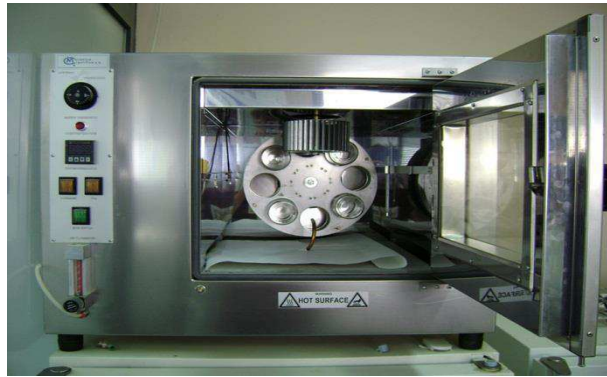
$M_{inicial}$  = massa do ligante antes do RTFO (g)

$M_{final}$  = massa do ligante após o RTFO (g)

Após o processo de envelhecimento e com os dados da penetração, antes e após tal procedimento, é possível obter a penetração retida, apresentada pela Equação 2, que representa a sensibilidade do material ao envelhecimento.

$$\text{PEN retida} = \left( \frac{\text{PEN}_{final}}{\text{PEN}_{inicial}} \right) \times 100 \quad \text{Equação 2}$$

Figura 26 - Aparelho de RTFO



### **3.2.3. Análise do óleo de girassol e do ligante com e sem o aditivo por meio de FTIR**

Nesta seção são apresentados o método de caracterização química do óleo de girassol e do CAP 50/70 puro e do ligante modificado com a adição do óleo de girassol, nos teores de 1, 2 e 3%.

#### **3.2.3.1. Ensaio de FTIR**

Para a caracterização química do óleo de girassol e do CAP 50/70 puro e do ligante modificado com o óleo de girassol, foi empregado ensaio de espectroscopia FTIR (Infra Vermelho por Transformada de Fourier, do inglês Fourier Transformed Infra Red), para identificar os grupos funcionais e os modos vibracionais presentes nas suas formulações. Esse método foi escolhido devido a sua elevada sensibilidade, resolução e ainda a rapidez do registro. Além de ser o método de espectroscopia infravermelho mais utilizado para a caracterização de óleos.

Após incorporação do óleo de girassol nos teores de 1, 2 e 3%, conforme procedimento de mistura, foi realizada a análise da composição química dos ligantes por meio do ensaio de FTIR para verificar se ocorreram alterações na química do ligante após a inserção do óleo de girassol na matriz asfáltica.

Para quantificar a intensidade do envelhecimento das amostras de ligante com e sem o aditivo, as amostras foram submetidas ao procedimento de RTFO e posterior análise por FTIR. Após os registros dos espectros de FTIR, foi realizado o cálculo da



concentração dos grupos funcionais, baseado na comparação das áreas de absorção características.

De acordo com Mouillet (2010) para o cálculo dos índices de oxidação Carbonilas e Sulfóxidos, foram utilizadas as Equações 3 e 4, retiradas do método MLPC N°69 (apud GENNESSEAU, 2015). Nestas equações, supõe-se que o grupo Etileno ( $\text{CH}_2$  – em torno de  $1460\text{ cm}^{-1}$ ) e o grupo Metil ( $\text{CH}_3$  – em torno de  $1375\text{ cm}^{-1}$ ) são pouco alterados quando o ligante é oxidado. Em compensação, os grupos Carbonilas ( $\text{CO}$  - em torno de  $1700\text{ cm}^{-1}$ ) e Sulfóxidos ( $\text{SO}$  – em torno de  $1030\text{ cm}^{-1}$ ) aumentam com a oxidação.

$$CO (\%) = 100 \times ICO = 100 \times \frac{(\text{Área em torno de } 1700\text{ cm}^{-1})}{(\text{Área em torno de } 1460\text{ cm}^{-1}) + (\text{Área em torno de } 1375\text{ cm}^{-1})}$$

Equação 3

$$SO (\%) = 100 \times ISO = 100 \times \frac{(\text{Área em torno de } 1030\text{ cm}^{-1})}{(\text{Área em torno de } 1460\text{ cm}^{-1}) + (\text{Área em torno de } 1375\text{ cm}^{-1})}$$

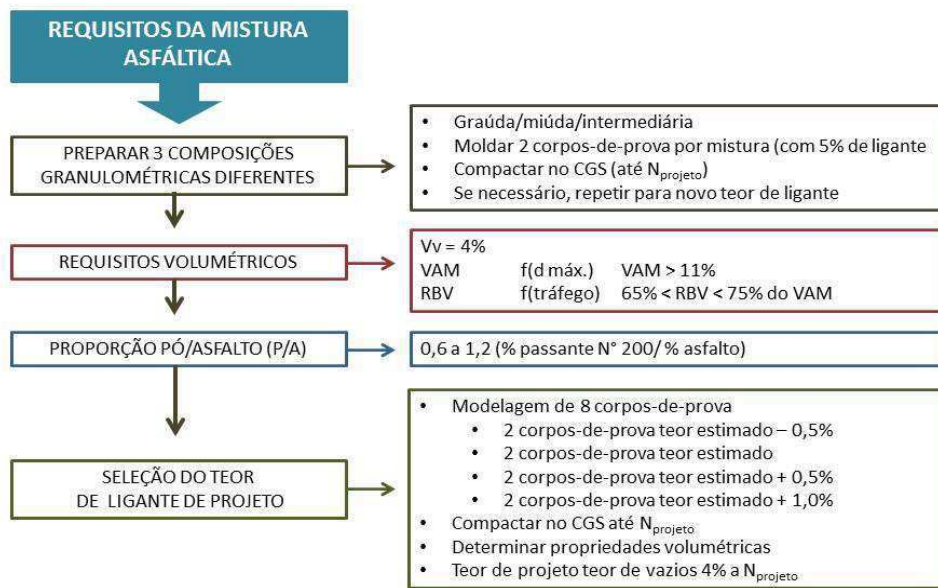
Equação 4

Os ensaios foram realizados no LAMMEN – Laboratório de Materiais Multifuncionais e Experimentação Numérica – ECT da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Estas análises foram realizadas em 16 varreduras de espectro com resolução de  $4\text{ cm}^{-1}$ . O equipamento utilizado foi um espectrômetro BRUKER, modelo FT-IR VERTEX 70.

### 3.2.4. Dosagem SUPERPAVE

O Fluxograma da Figura 27 ilustra o processo da dosagem SUPERPAVE.

Figura 27 - Fluxograma de dosagem SUPERPAVE



(Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2008)

A compactação dos corpos de provas foi realizada por amassamento com o auxílio do compactador giratório (Figura 28) segundo a norma ASTM D 6925-09 (*Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor*).

Figura 28 - Compactador Giratório SUPERPAVE



O primeiro passo da dosagem SUPERPAVE compreendeu a escolha de três composições granulométricas com os agregados disponíveis (brita 19, brita 12,5, areia, pó de pedra e fíler), uma superior, uma intermediária e uma inferior dentro da Faixa C de granulometria do DNIT, incluindo os conceitos de Pontos de Controle e Zonas de Restrição (Figuras 29 a 31).

As curvas de Fuller superior, intermediária e inferior contêm as proporções de agregados mostradas na Tabela 6.

Tabela 6 - Proporções dos agregados nas granulometrias

CURVA	BRITA 19	BRITA 12,5	AREIA	PÓ-DE-PEDRA	FÍLLER
Superior	0%	35%	29%	34%	2%
Intermediária	34%	21%	9%	35%	1%
Inferior	35%	30%	0%	35%	0%

Figura 29 - Curva granulométrica Superior

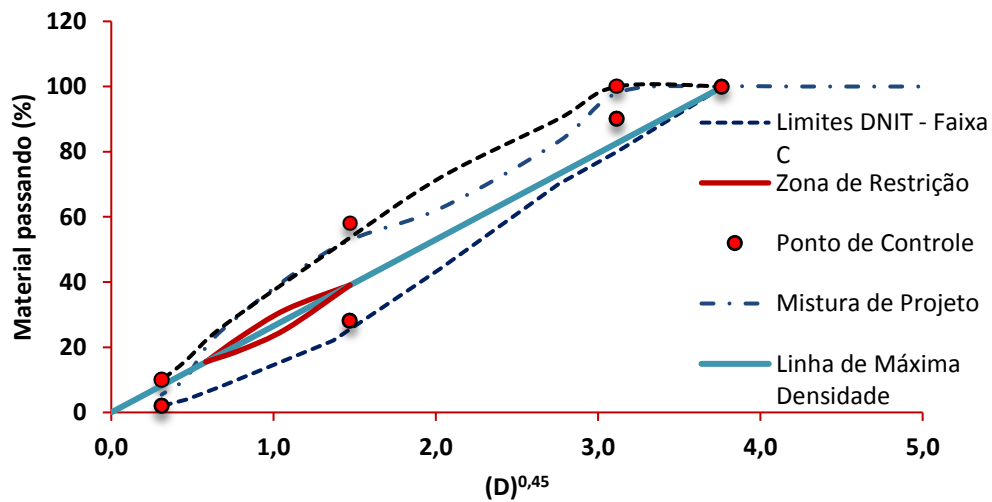


Figura 30 - Curva granulométrica Intermediária

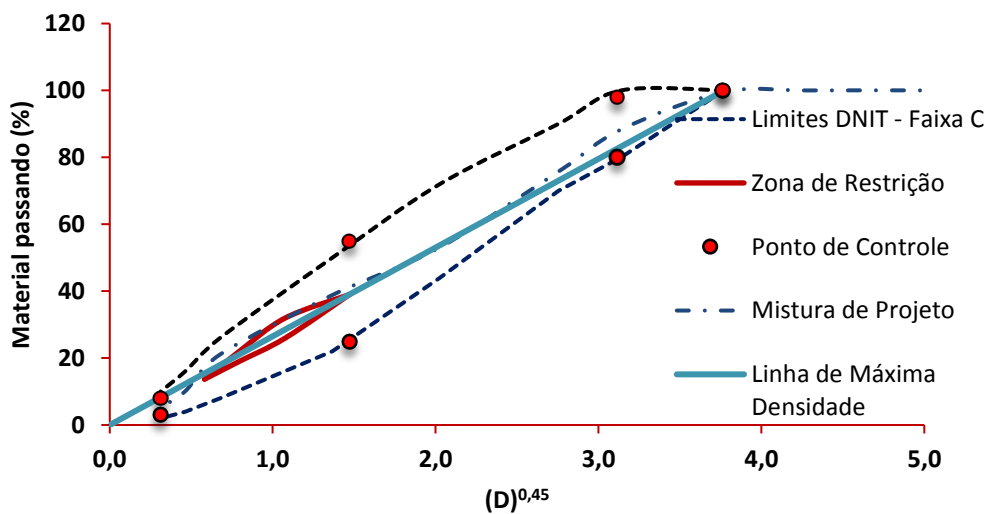
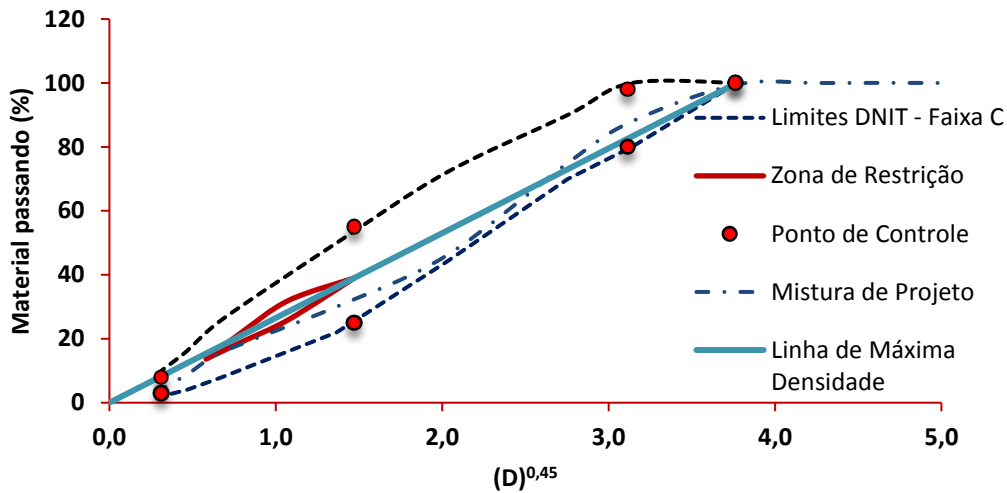


Figura 31 - Curva granulométrica Inferior



A densidade máxima medida foi obtida pelo método Rice (James Rice desenvolveu esse procedimento de teste), também denominada de Gmm, preconizado pela norma americana ASTM D2041. Para a realização do ensaio pesou-se, inicialmente, 1500 g da mistura (para tamanho máximo nominal de até 12,5 mm) ou 2500g da mistura (para tamanho máximo nominal de até 19,0 mm) em um recipiente metálico de peso conhecido. Em seguida, este foi preenchido com água a 25°C até que toda a mistura ficou coberta. E então foi aplicada uma pressão a vácuo no recipiente de 30 mmHg, por um período de 15 minutos, a fim de expulsar os vazios existentes entre os filmes de ligante. Logo após esse período foi restabelecida pressão ambiente no recipiente metálico. Finalmente, o recipiente, juntamente com a mistura e a água, foi pesado imerso. Na Figura 32 pode ser visto o procedimento do ensaio para a determinação da Gmm, determinada por (Equação 5):

$$G_{mm} = \frac{A}{A-(C-B)} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

A = massa da amostra seca ao ar (g);

B = massa do recipiente metálico imerso em água (g);

C = massa do recipiente + amostra imerso em água (g).

Com os dados de Massa Específica Real e Aparente dos agregados, do ligante e a massa específica máxima medida da mistura (Gmm), calculado a partir do Rice Test, foi feita a determinação do teor de ligante inicial para confecção dos corpos de prova.

Figura 32 - Procedimento do ensaio para determinação da Gmm



Após a definição das composições granulométricas das três misturas (inferior, intermediária e superior) e a partir das proporções de agregados associado às características físicas dos agregados, obteve-se o teor inicial de ligante, segundo Equação 6. A estimativa do teor de ligante inicial foi feita da seguinte forma:

$$P_{li} = \left[ \frac{G_l \times (V_{le} + V_{la})}{G_l \times (V_{le} + V_{la}) + M_{ag}} \right] \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

Mag = Massa de agregado (g);

G<sub>l</sub> = Massa específica do ligante (g/cm<sup>3</sup>);

Pl = teor de ligante (% em massa);

Pag = percentual de agregado na mistura (% em massa);

Pli = teor de ligante inicial (% em massa);

V<sub>la</sub> = volume de ligante absorvido (%);

V<sub>le</sub> = volume de ligante efetivo (%).

Conforme a norma ASTM D 6925-09, os corpos de prova foram compactados em diferentes números de giros de acordo o volume de tráfego considerado (BERNUCCI *et al.*, 2008). Neste caso, foi considerado o tráfego Médio a Alto, desta forma, considerou-se N<sub>inicial</sub> = 8 giros, N<sub>projeto</sub> = 100 giros (no qual V<sub>v</sub> deve ser igual

a 4%) e  $N_{\text{máximo}} = 160$  giros no compactador giratório. O  $N_{\text{inicial}}$  e  $N_{\text{máximo}}$  servem apenas para avaliar a compactabilidade da mistura, e o  $N_{\text{projeto}}$  deve atender aos 4% de  $V_v$  e é usado para selecionar o teor de ligante da mistura.

A compactação foi realizada no CGS com pressão aplicada de 600kPa e o ângulo de rotação de  $1,25^\circ$  conforme a premissa do SUPERPAVE. A mistura, ainda não compactada, permaneceu em estufa por um período de 2 horas antes da compactação de modo a simular o envelhecimento de curto prazo durante a mistura (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Para o teor de ligante inicial foi calculado o valor de 5% e foram moldados 18 corpos de prova (Figura 33), para fazer a verificação do volume de vazios obtido, sendo 6 corpos-de-prova para cada curva granulométrica, divididos em dois CPs para  $N_i$ , dois para  $N_p$  e dois para  $N_m$ . Na Tabela 7 estão listados os teores de ligantes iniciais, bem como uma síntese dos resultados iniciais, os quais foram essenciais para a definição da curva de projeto (Curva Inferior), a qual teve os parâmetros volumétricos mais próximos dos critérios da dosagem SUPERPAVE. A determinação do teor inicial de ligante foi realizada apenas para o ligante CAP 50/70 puro.

Figura 33 - Corpos de prova no teor estimado de 5% de ligante CAP 50/70 puro



Tabela 7- Parâmetros volumétricos obtidos em função dos Teores de ligantes iniciais calculados.

MISTURA	LIGANTE %	%Gmm NINICIAL	%Gmm NPROJETO	%Gmm NMÁXIMO	VAM (%)	Vv(%)
<b>Inferior</b>	5,0	92,83	95,73	97,27	14,82	4,27
<b>Intermediária</b>	5,0	93,12	97,37	97,89	13,70	2,63
<b>Superior</b>	5,0	88,66	94,24	95,21	17,37	5,76
<b>Crítérios da dosagem</b>	-	<89%	96%	<98%	13 mín	4%

Posteriormente foram compactados os corpos de prova (Curva Inferior) com variação sobre teor inicial de 5,0 % nas seguintes proporções:  $\pm 0,5\%$  e  $+1\%$ , ou seja: 4,5%; 5,0%; 5,5% e 6,0%.

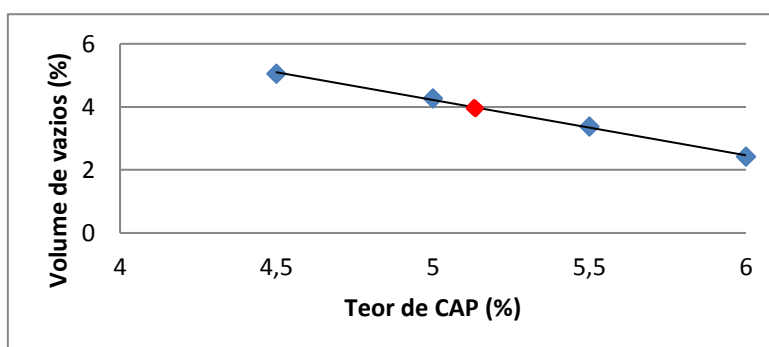
Na Tabela 8 são apresentados os resultados dos parâmetros volumétricos da Segunda Fase da Dosagem. Estes parâmetros permitiram a definição do teor de projeto, o qual foi usado na composição das misturas para a avaliação das propriedades mecânicas.

Tabela 8 - Parâmetros volumétricos obtidos em função dos Teores de ligantes iniciais calculados.

zLIGANTE %	%GMM NPROJETO	VAM (%)	VV (%)	RBV (%)	MASSA ESPECÍFICA(G/CM <sup>3</sup> )
4,5	94,95	14,52	5,05	72,04	2,565
<b>5,0</b>	<b>96,12</b>	<b>14,47</b>	<b>3,88</b>	<b>73,47</b>	<b>2,536</b>
5,5	96,62	14,75	3,38	73,09	2,514
6,0	97,58	14,29	2,42	72,60	2,503
<b>Crítérios da dosagem</b>	96	13 mín	4,00	65 a 75	-

Nesta etapa ainda não foi possível encontrar o volume de vazios de 4%, então, a partir da curva Teor de ligante em função do volume de Vazios (Figura 34), foi estimado um novo teor de 5,1% que atendesse a este critério, e novamente foram moldados seis corpos de prova, desta vez, todos no Np com 100 giros, para a verificação das propriedades volumétricas da mistura compactada e confirmação do valor de 4% de Volume de Vazios.

Figura 34 - Estimativa do Teor ótimo de ligante



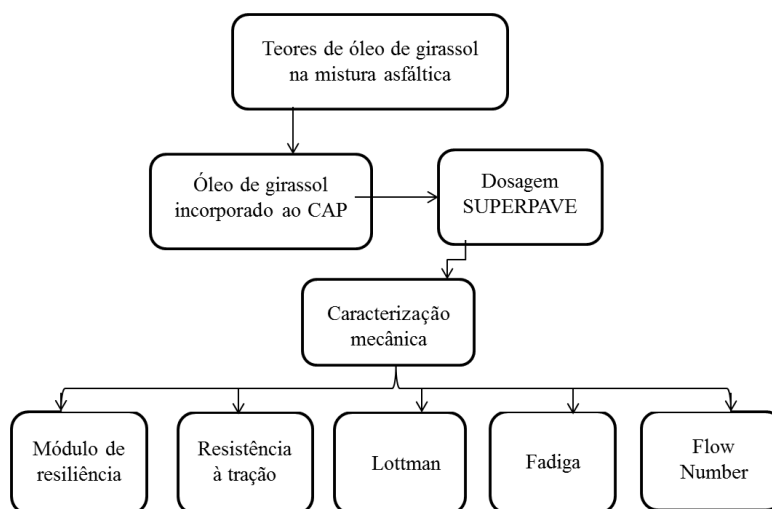
Para realização dos ensaios mecânicos ficou definido que a partir da dosagem encontrada para o ligante CAP 50/70 puro, esta também seria utilizada para a moldagem dos corpos de prova com os diferentes teores de aditivo nos ligantes, ou seja, que o teor

de aditivo foi incorporado na porcentagem encontrada pela dosagem para o ligante CAP 50/70 puro. Assim pode-se comparar as características mecânicas do ligante puro e com a presença do aditivo para a mesma porcentagem de ligante na mistura. A compactação das misturas asfálticas foi realizada segundo a metodologia SUPERPAVE, com energia de 100 giros.

### 3.2.5. Caracterização mecânica

A Figura 35 apresenta o fluxograma dos ensaios realizados a partir da mistura do ligante com o óleo de girassol. Os ensaios mecânicos foram os ensaios de: Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral (RT), Módulo de Resiliência (MR), Dano por Umidade Induzida (Lottman Modificado), Vida de Fadiga e Flow Number (FN), realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) do Unidade Acadêmica de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Figura 35 - Fluxograma de Caracterização Mecânica



#### 3.2.5.1. Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral

O ensaio brasileiro por compressão diametral para determinação indireta da Resistência à Tração (RT) foi desenvolvido pelo professor Lobo Carneiro no Rio de Janeiro para concreto de cimento Portland.



O ensaio de Tração Indireta por Compressão Diametral foi realizado segundo a norma ME 138/94 do DNIT com a moldagem dos corpos-de-prova realizada no compactador giratório. Para realização deste ensaio foram moldados corpos-de-prova com teor de ligante obtido por meio da dosagem SUPERPAVE e com a incorporação do óleo de girassol nos teores de 1, 2 e 3%.

A aplicação das forças ocorreu por meio de frisos metálicos com comprimento igual ao do corpo de prova, com objetivo de garantir a distribuição do carregamento ao longo das duas geratrizes opostas do corpo de prova. Aplica-se um deslocamento progressivamente a uma razão de  $0,8 \pm 0,1$ mm/s até que se dê a ruptura do corpo de prova segundo um plano diametral vertical (Figura 36).

A resistência à tração foi determinada pela Equação 7:

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi DH} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

$\sigma_t$  = resistência à tração;

F = carga de ruptura;

D = diâmetro do corpo de prova;

H = altura do corpo de prova.

O resultado final foi a média de 3 CPs, expresso em MPa.

Figura 36 - Prensa do ensaio de Resistência à Tração



### 3.2.5.2. Módulo de Resiliência

O ensaio do módulo de resiliência para as misturas asfálticas estudadas foi realizado por meio da norma brasileira NBR 16018/2011 na prensa hidráulica UTM-25 (Figura 37). Esta norma determina o Módulo de Resiliência Instantâneo ( $MR_I$ ), obtido pela diferença entre o pico de deslocamento propiciado pelo carregamento e um ponto determinado a partir do ajuste de duas regressões lineares.

O ensaio consistiu na aplicação de pulso de cargas com frequência de 1Hz, de duração 0,1 s e repouso de 0,9 s, no plano diametral vertical do corpo de prova. Essa carga gera uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação da carga, e os LVDTs (Linear Variable Differential Transformers) medem o deslocamento diametral recuperável na direção correspondente à tensão gerada (deslocamento horizontal). A força utilizada para o ensaio de Módulo de Resiliência foi correspondente a 10% da Resistência à Tração. O resultado final foi a média de 3 CPs, expresso em MPa.

Figura 37 - Prensa UTM-25 utilizada para o ensaio de Módulo de Resiliência



### 3.2.5.3. Ensaio de Lottman Modificado

O ensaio foi realizado de acordo com a norma AASHTO T 283/2002 com o intuito de avaliar os danos causados nas misturas asfálticas, tendo em conta o efeito destrutivo da umidade nos corpos-de-prova e consistiu em submetê-los à ação da água e a ciclos de gelo-degelo. O ensaio foi realizado em CPs cilíndricos moldados, com volume de vazios de  $7 \pm 1\%$ , segundo a metodologia SUPERPAVE.

Os procedimentos do ensaio ocorreram da seguinte maneira (Figura 38):

- colocou-se o CP em um recipiente com água destilada e aplicou-se o vácuo a uma pressão de 250-650mmHg por um período de 5 a 10 minutos. Finalizado o tempo, a mostra permaneceu em repouso na água por mais 5 a 10 minutos sem aplicação de vácuo;
- retirou-se o CP e em seguida as amostras foram colocadas dentro de sacos plásticos, adicionando 10ml de água e colocados em uma geladeira a -18 °C por um período de 16hrs;
- após esse período, colocou-se o CP em imersão a 60°C por um período de  $24 \pm 1h$ . Ao retirar, deixou-se o CP ainda envolto no saco plástico submerso em água a 25°C para estabilização da temperatura;
- realizou-se então, o ensaio de Resistência à Tração no CP, e encontrou-se os resultados de resistência à tração por compressão diametral das amostras com condicionamento (RTu) e das amostras não condicionadas (RT) e calculou a Resistência à Tração Retida por umidade induzida (RRT), que é a relação (em porcentagem) entre a RTu das amostras condicionadas e a RT das amostras não condicionadas; e
- os resultados obtidos foram moldados em 6 CPs para cada teor utilizado e 6 CPs para a mistura com o ligante CAP 50/70 puro e dividido em dois grupos (condicionados e não condicionados) de 3 CPs.

Figura 38: Procedimentos do ensaio de Lottman modificado



#### 3.2.5.4. Vida de Fadiga

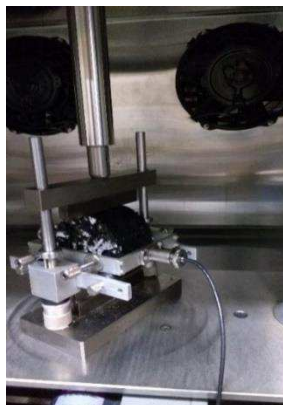
O ensaio de fadiga busca obter um número de solicitações que uma determinada carga levaria a mistura asfáltica a se romper. Ainda não existe um método preconizado

no Brasil para a realização desse ensaio. Devido à facilidade de execução, principalmente na moldagem dos corpos-de-prova, no sistema de carregamento e operação mais simples do equipamento de carga repetida, a realização do ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada é o mais usual no Brasil (MORILHA JÚNIOR, 2004). Diante disso, este foi o tipo de procedimento adotado nesta pesquisa.

O ensaio de compressão diametral para fadiga de misturas asfálticas é um ensaio de tração indireta conduzido com cargas repetidas em vários CPs cilíndricos da mesma mistura, moldados nas mesmas condições. Neste são aplicadas cargas de compressão diametralmente ao CP, submetendo este a um estado biaxial de tensões, sendo que seções verticais do CP ficam sujeitas a esforços de compressão e seções horizontais, por sua vez, a esforços de tração (BUNDY, 2012).

O ensaio ocorreu na câmara da prensa UTM-25, por compressão diametral à tensão controlada, numa frequência de pulso de 1 Hz, sendo 0,1s para a aplicação da carga senoidal e 0,9s de repouso (Figura 39). A temperatura de ensaio foi de 25°C e foram adotados os níveis de tensão no intervalo de 20 a 55% da resistência à tração da mistura, obedecendo a capacidade máxima do equipamento que é de 5000N.

Figura 39 - Ensaio de vida de fadiga realizado na Prensa UTM-25



A vida de fadiga das misturas asfálticas estudadas foi expressa em função da diferença de tensões ( $\Delta\sigma$ ) entre a tensão de tração e de compressão e em função do parâmetro  $\varepsilon_i$  (deformação resiliente), calculados por meio das Equações 8 e 9:

$$\Delta\sigma = \frac{8F}{100\pi dh}$$

Equação 8

$$\varepsilon_i = \frac{(\%RT)}{MR}$$

Equação 9

Onde:

$\Delta\sigma$ = diferença de tensões no centro do corpo de prova (MPa);

$\varepsilon_i$ = deformação resiliente específica;

F= carga aplicada (N);

d= diâmetro do corpo de prova (cm);

h= altura do corpo de prova (cm);

RT= resistência à tração (MPa);

MR= módulo de resiliência (MPa);

A vida de fadiga foi representada pelas equações que indicam o N, expressando o número de solitação de carga; em termos das tensões ou deformações iniciais, sendo K e n parâmetros de fadiga determinados nos ensaios. Dentre as formas de representação usuais destacam-se as seguintes expressões:

$$N = k_1 \left( \frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_1}$$

Equação 10

ou

$$N = k_2 \left( \frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{n_2}$$

Equação 11

Onde:

N = número de repetições do carregamento necessário à ruptura completa da amostra (vida de fadiga);

$\Delta\sigma$  = diferença algébrica entre tensão horizontal de tração e vertical de compressão no centro da amostra;

$\varepsilon_i$  = deformação de tração inicial;

K, n = constantes obtidas através da regressão dos resultados experimentais (em escala log).

### 3.2.5.5. Flow Number

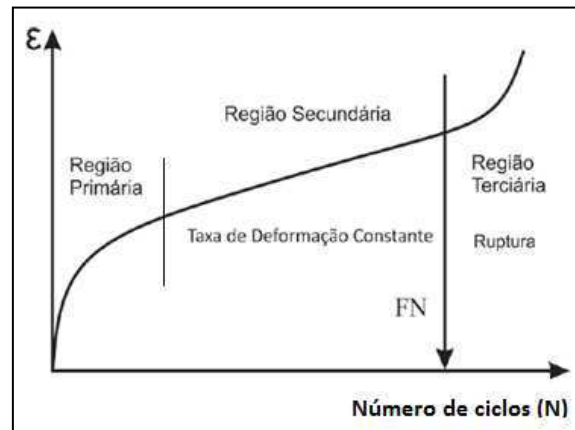
O ensaio foi realizado segundo a norma brasileira (NBR 16505/2016), foi realizado na AMPT (Figura 40), numa temperatura de 60°C e ciclos de carga uniaxial compressiva de 204 kPa. O ensaio consiste em aplicar um carregamento repetido, com o tempo de aplicação da carga de 0,1 s com período de repouso de 0,9 s, em corpos-de-prova com volume de vazios de 7% e diâmetro e altura de 100 mm e 150 mm respectivamente.

Figura 40 - Ensaio de Flow Number



O resultado do ensaio é mostrado num gráfico que relaciona deformação permanente com o número de ciclos aplicados. A Figura 41 indica a existência de três zonas de deformação: a região primária (côncava para baixo), a região secundária (reta) e a região terciária (côncava para cima).

Figura 41 - Regiões durante o ensaio uniaxial de carga repetida e obtenção do FN



(Fonte: WITCZAK *et al.*, 2002)

O carregamento foi aplicado durante um período de 0,1s com repouso de 0,9s, e o critério de parada foi o alcance de 10.000 ciclos ou uma deformação de 50.000 *microstrains*. Quando o ensaio atingiu uma das duas condições, foi dado por encerrado.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

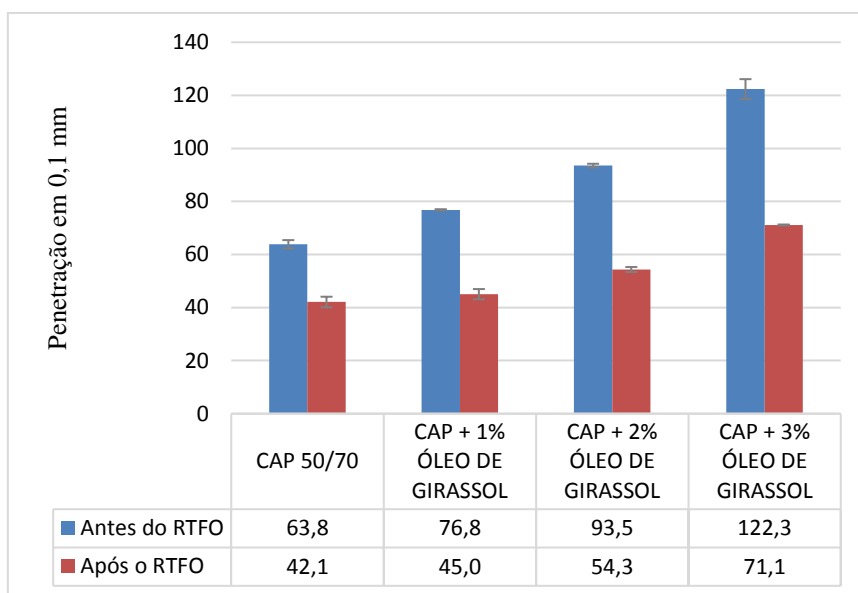
Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na fase experimental desta pesquisa. Neste são apresentados os resultados da caracterização física do ligante CAP 50/70 e do ligante com a adição do óleo de girassol, a caracterização química do óleo de girassol e do ligante puro e modificado por meio de FTIR, além dos resultados da caracterização mecânica das misturas com o ligante modificado.

### 4.1. Caracterização do ligante asfáltico

#### 4.1.1. Ensaio de penetração

O ensaio de penetração serve para determinar a consistência e classificar o ligante asfáltico. Os resultados obtidos são apresentados no gráfico da Figura 42.

Figura 42 - Ensaio de penetração antes e após o RTFO





Com a incorporação do óleo de girassol no ligante asfáltico ocorreu um crescente aumento da penetração conforme foram incrementados os teores estudados como pode ser visualizado na Figura 42. Este resultado já era esperado, pois o óleo de girassol é um aditivo orgânico que atua na redução da viscosidade e conseqüentemente reduz a consistência do ligante. Em estudo realizado por Silva (2016), o autor também constatou que com a incorporação do óleo de girassol ao ligante asfáltico foi possível observar que mesmo para o teor de 1% do óleo, percebeu-se um aumento na penetração que continuou crescendo até que se atingisse o último teor analisado do aditivo.

Zargar *et al.* (2012) analisaram o efeito da utilização do óleo de cozinha residual como agente rejuvenescedor para o ligante envelhecido. Na pesquisa foram adicionados teores de 1% a 5% do óleo. Segundo os autores foi possível constatar o aumento linear do valor da penetração diante do aumento do teor de óleo estudado, causado principalmente pela redução na proporção de asfaltenos para maltenos.

De acordo com Souza (2012) nas misturas asfálticas com ligante modificado pelo o óleo de mamona até o teor de 5% do aditivo, os valores de penetrações foram compatíveis com os obtidos para o ligante puro. Porém, a partir da adição de 6% do óleo houve um aumento da penetração média chegando a uma variação de 54 décimos de milímetros para a adição de 10% do óleo quando comparado com o ligante puro.

Portugal (2016) avaliou o efeito adição do óleo de soja e de milho, novo e residual, sobre as propriedades físicas e reológicas do ligante e verificou um aumento nos valores da penetração em relação ao ligante tipo CAP 50/70 puro, indicando uma diminuição na rigidez. Além disso, foi possível observar que não houve diferença significativa em utilizar na mistura, o ligante com óleo de soja novo ou residual.

A norma do DNIT 095/2006 –ME determina a penetração retida mínima de 55%. Pode ser verificado na Tabela 9 que todas as amostras atingiram o valor preconizado na norma.

Tabela 9 - Penetração retida

AMOSTRA	CAP PURO	CAP + 1,0% ÓLEO DE GIRASSOL	CAP + 2,0% ÓLEO DE GIRASSOL	CAP + 3,0% ÓLEO DE GIRASSOL
<b>Penetração Retida (%)</b>	65,93	58,61	58,11	58,14

#### 4.1.2. Ensaio de Ponto de amolecimento

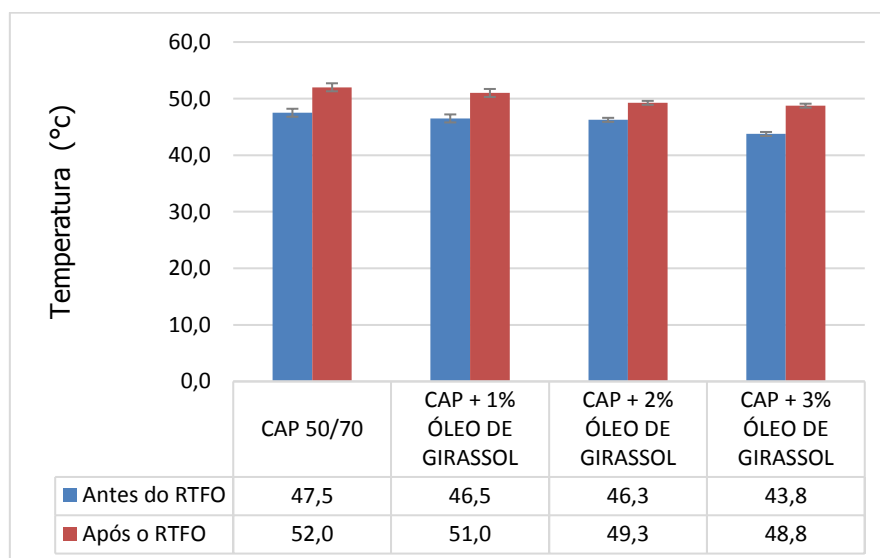
A Figura 43 apresenta o efeito do teor de óleo de girassol no ponto de amolecimento do ligante asfáltico antes e após o ensaio de RTFO.

A adição do óleo de girassol ao ligante puro proporcionou uma redução de temperatura máxima de ponto de amolecimento de 3,7°C para o teor de 3,0% de óleo de girassol. Tal redução implica na perda de resistência do ligante, porém apresenta um ganho na sua trabalhabilidade. Silva (2016) utilizou o mesmo aditivo e também obteve uma redução do ponto de amolecimento atingindo 4,5°C para o teor de 2,5%. Ainda segundo o autor, os resultados de Grau de Performance (PG) constataram a mesma tendência de redução de temperatura. A temperatura de PG reduziu de 64°C do ligante puro para uma PG de 58°C para o ligante modificado com os teores de óleo de girassol, perfazendo uma redução de 6°C na temperatura de PG.

Zargar *et al.* (2012) obtiveram uma diminuição dos valores do ponto de amolecimento em relação ao ligante puro, diante do aumento do teor adicionado de óleo de cozinha residual.

Lucena *et al.* (2016) pesquisou a mudança das propriedades de consistência do ligante asfáltico com a adição de óleo de moringa nos teores de 0% a 3%. A adição sucessiva de óleo de moringa ao ligante puro teve como resultados a redução do ponto de amolecimento em função da modificação da sua viscosidade.

Figura 43 - Ensaio de ponto de amolecimento antes e após o RTFO



Realizando uma comparação do ponto de amolecimento das amostras modificadas com óleo de girassol após o procedimento de RTFO em relação ao ligante puro envelhecido, foi possível observar que as temperaturas do ponto de amolecimento das amostras mantiveram-se abaixo da temperatura do ligante puro envelhecido, caracterizando a contribuição do aditivo na diminuição do envelhecimento. Verifica-se por meio dos dados da Tabela 10 que o ligante puro e modificado encontraram-se dentro do limite da norma, DNIT 095/2006 – ME, que determina um limite máximo de variação de 8°C do ponto de amolecimento após RTFO. Percebe-se que o aumento máximo foi de 5°C para a amostra com adição de 3,0% de óleo de girassol.

Tabela 10 - Aumento de temperatura após o RTFO

AMOSTRA (APÓS RTFO)	CAP PURO	CAP + 1,0% DE ÓLEO DE GIRASSOL	CAP + 2,0% DE ÓLEO DE GIRASSOL	CAP + 3,0% DE ÓLEO DE GIRASSOL
<b>Aumento de temperatura (°C)</b>	4,5	4,5	3,0	5,0

#### 4.1.3. Viscosidade Rotacional

O ensaio de viscosidade rotacional foi realizado para o ligante CAP 50/70 puro e para o ligante modificado com o óleo de girassol antes e após o RTFO. As Figuras 44 e 45 apresentam os resultados do ensaio de viscosidade rotacional com ligante puro e com incorporação do óleo de girassol nos teores de 1,0; 2,0 e 3,0%. Todos os resultados do ensaio de viscosidade rotacional atenderam ao mínimo exigido nas especificações dos ligantes (DNIT 095/2006).

Verifica-se a redução da viscosidade do ligante, tanto antes como após o procedimento de RTFO diante do aumento do teor de óleo de girassol. A menor viscosidade apresentada pelo ligante modificado ocorre para o maior teor de óleo de girassol (3,0%). Este comportamento indica uma redução nas temperaturas de mistura e compactação. Ribeiro (2011) obteve resultados semelhantes quando estudou a incorporação do Líquido da Castanha de Caju (LCC) ao ligante nos seguintes teores: 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0%, obtendo as maiores reduções da viscosidade para a adição de 2% do líquido.

Figura 44 - Viscosidade rotacional antes do RTFO

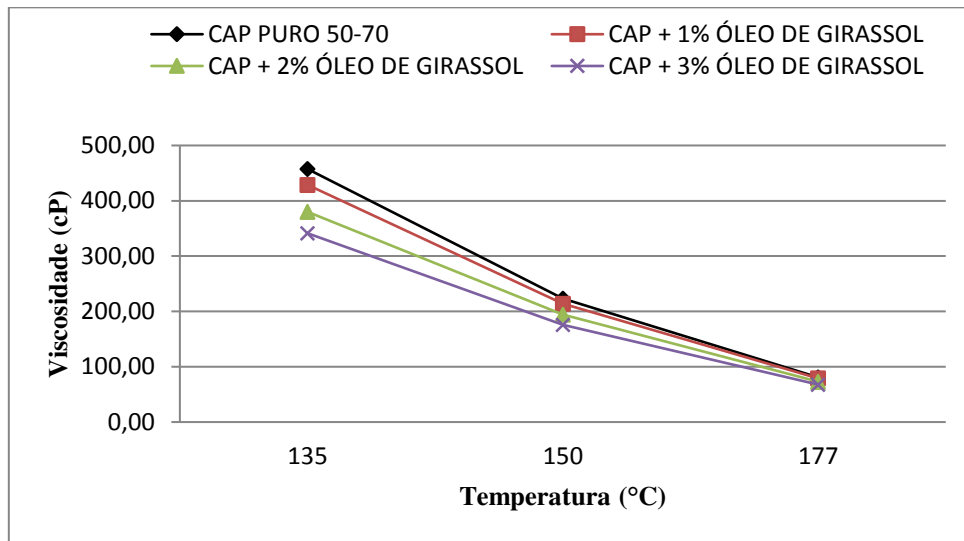
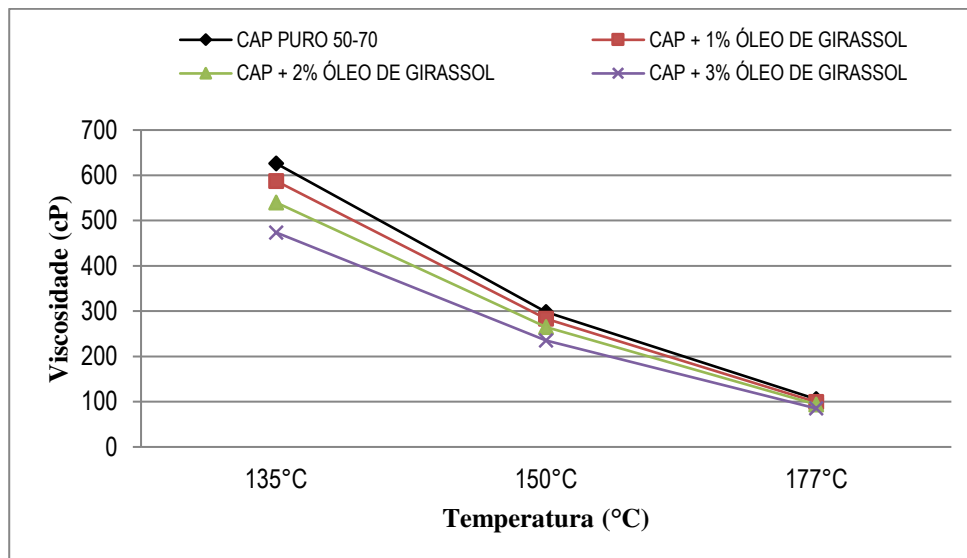


Figura 45 - Viscosidade rotacional após o RTFO



Os gráficos das Figuras 46 a 49 apresentam a determinação da temperatura de mistura para o ligante puro e com os diferentes teores de óleo de girassol.

Figura 46 - Curvas Variação da Viscosidade Rotacional em função da temperatura

[CAP PURO]

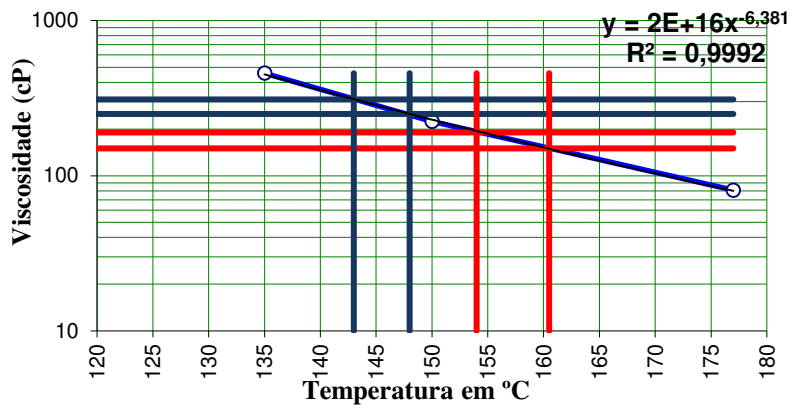


Figura 47 - Curvas Variação da Viscosidade Rotacional em função da temperatura

[CAP + 1% ÓLEO DE GIRASSOL]

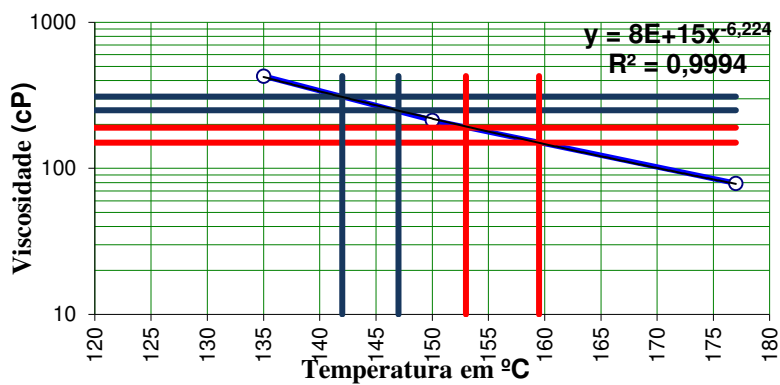


Figura 48 - Curvas Variação da Viscosidade Rotacional em função da temperatura

[CAP + 2% ÓLEO DE GIRASSOL]

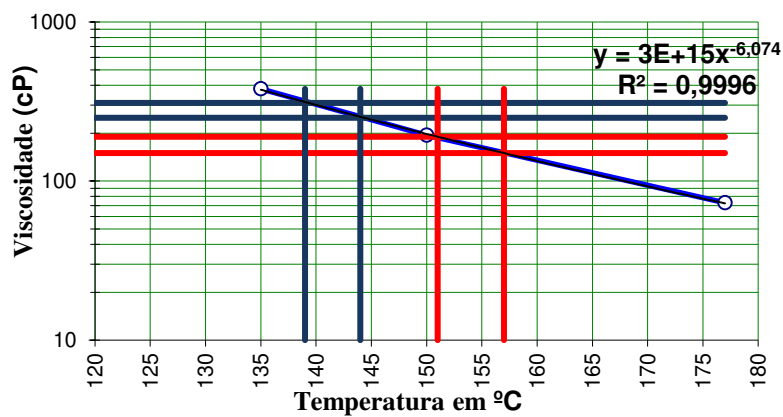
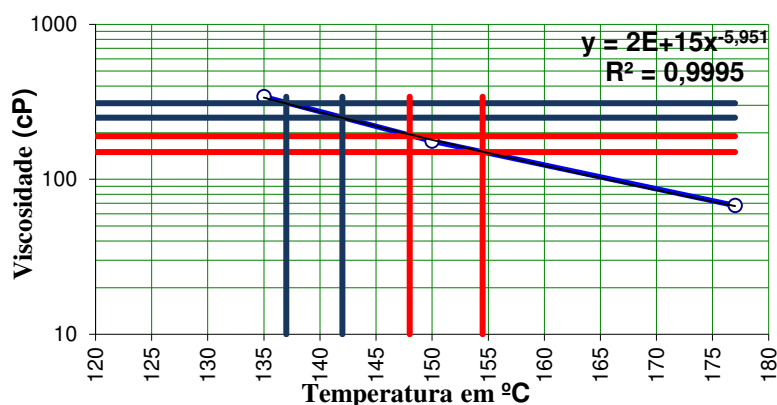


Figura 49 - Curvas Variação da Viscosidade Rotacional em função da temperatura  
[CAP + 3% ÓLEO DE GIRASSOL]



A maior variação de temperatura (Tabela 11) ocorreu entre o ligante puro e com adição de 3,0% de óleo de girassol chegando a reduzir 6°C nas temperaturas de mistura e de compactação. Mesmo não sendo uma redução significativa, ainda assim possibilita uma economia de energia durante o aquecimento do ligante asfáltico e dos agregados na usina de asfalto. Desse modo, como a viscosidade do ligante modificado não reduziu substancialmente, as misturas asfálticas estudadas não se classificam em misturas asfálticas mornas.

Tabela 11 - Temperaturas de mistura e compactação

TEMPERATURA	CAP PURO	CAP + 1% DE ÓLEO DE GIRASSOL	CAP + 2% DE ÓLEO DE GIRASSOL	CAP+ 3% DE ÓLEO DE GIRASSOL
<b>Mistura (°C)</b>	157,3	156,3	154,0	151,3
<b>Compactação (°C)</b>	145,5	144,5	141,5	139,5

Em estudo realizado por Souza (2012) a adição do óleo de mamona no teor de 5,0% a mistura reduziu a viscosidade do ligante, e consequentemente possibilitou uma redução das temperaturas de mistura e de compactação em média de oito graus centígrados (8°C).

Lima *et al.* (2009) adicionaram o LCC ao ligante e verificaram resultados semelhantes aos valores apresentados na Tabela 11, pois constataram uma redução das temperaturas de mistura e compactação em relação ao ligante convencional de 8°C para amostras de CAP + 4,5% SBS + 1% LCC se comparado ao ligante convencional.

Mesmo a presença do óleo de girassol não tendo proporcionado mudanças significativas nas viscosidades das amostras, alguns aditivos de MAMs têm apresentado outros benefícios, como o aumento da lubricidade do ligante asfáltico que apesar de não ser medida no ensaio de viscosidade, pode ser verificada a partir do aumento da trabalhabilidade do ligante em temperaturas mais baixas que as obtidas com o método tradicional de determinação das temperaturas de produção a partir da viscosidade. Esse aumento da lubricidade do aditivo de MAM também foi verificado por Ribeiro (2011). Ou seja, poderiam se realizar estudos verificando o desempenho mecânico em temperaturas inferiores e assim maximizar a redução de temperatura.

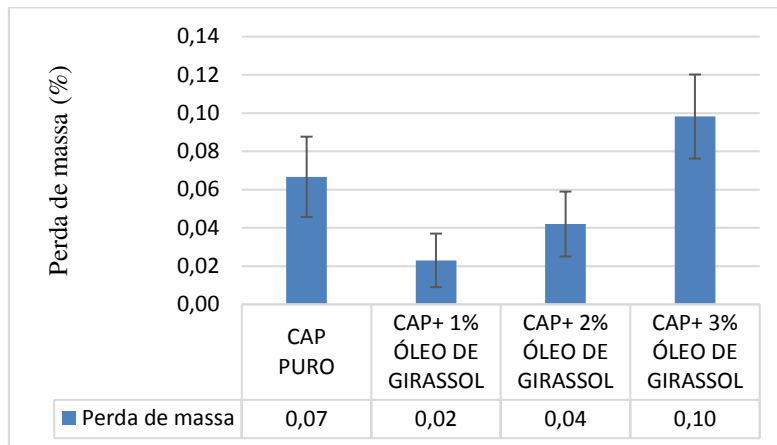
Além disso, diversos autores relataram (Mallick *et al.*, 2008; Zhao *et al.*, 2012; Genesseeux, 2015 e Li e Gibson, 2016) que alguns aditivos de MAMs contribuíram para a redução da viscosidade e ainda possibilitaram a reposição de compostos aromáticos. Essa reposição consiste em devolver ao asfalto as características originais de consistências perdidas pelo envelhecimento do ligante ao longo do tempo de serviço do pavimento.

Ainda assim, a presente pesquisa adotou o método tradicional de determinação das temperaturas de mistura e compactação que utiliza a viscosidade de referência para misturas à quente, por não existir um ensaio normatizado que determine as temperaturas de produção que considere a lubricidade, possivelmente existente em alguns aditivos de MAMs.

#### **4.1.4. Perda de massa**

A Figura 50 apresenta os resultados das variações de massa do ligante tipo CAP 50/70 puro e do ligante com adição do óleo de girassol após a realização do procedimento de RTFO. Os ligantes confeccionados com ligante puro e o com os teores de óleo de girassol estão em conformidade com a Norma DNIT-095/2006-EM, que preconiza variações de massa inferiores a 0,5%.

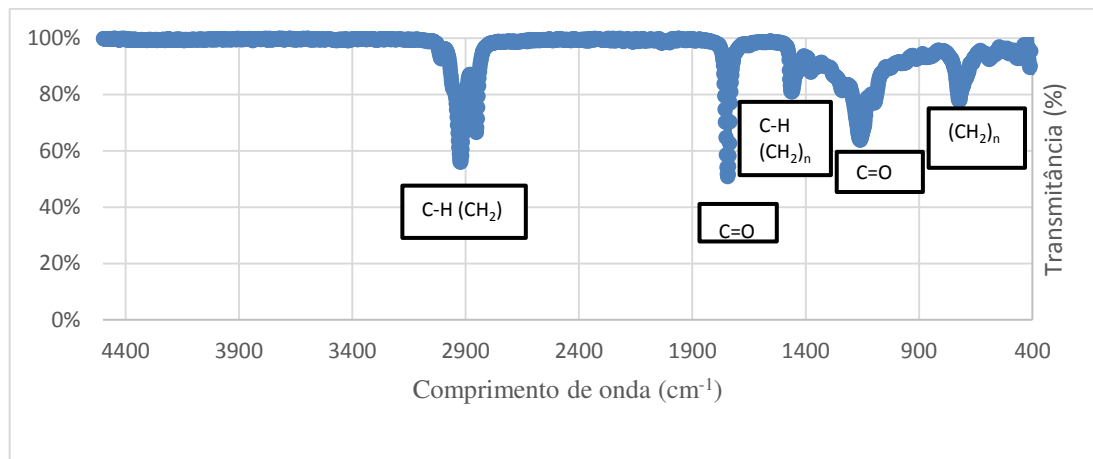
Figura 50 - Resultados da perda de massa após o ensaio RTFO



#### 4.2. Caracterização química do óleo de girassol e do ligante CAP 50/70 puro e modificado com o aditivo por meio de FTIR

A Figura 51 apresenta os eventos que ocorreram com a amostra de óleo de girassol durante a análise FTIR. No espectro de FTIR do óleo de girassol ocorreram vibrações do tipo “roking” referentes a uma banda pequena de  $729\text{ cm}^{-1}$ , para a ligação  $(\text{CH}_2)_n$ . Uma banda média de estiramento C-O ocorreu em  $1168\text{ cm}^{-1}$ , ocorreram vibrações do tipo “Scissoring” em  $1465\text{ cm}^{-1}$  correspondente a C-H  $(\text{CH}_2)_n$ . O quarto domínio espectral ocorreu em  $1745\text{ cm}^{-1}$  com modo de vibração de estiramento, e revela a existência de unidades de carbonilas ( $-\text{C}=\text{O}$ ) dentro do óleo. O último domínio espectral ocorreu o pico em  $2927\text{ cm}^{-1}$  com modo de vibração de estiramento, que correspondem a C-H  $(\text{CH}_2)$ .

Figura 51 - Espectros gerais da amostra de óleo de girassol





A Tabela 12 apresenta a caracterização do óleo de girassol através do ensaio de espectroscopia FTIR para identificar as substâncias presentes na sua formulação.

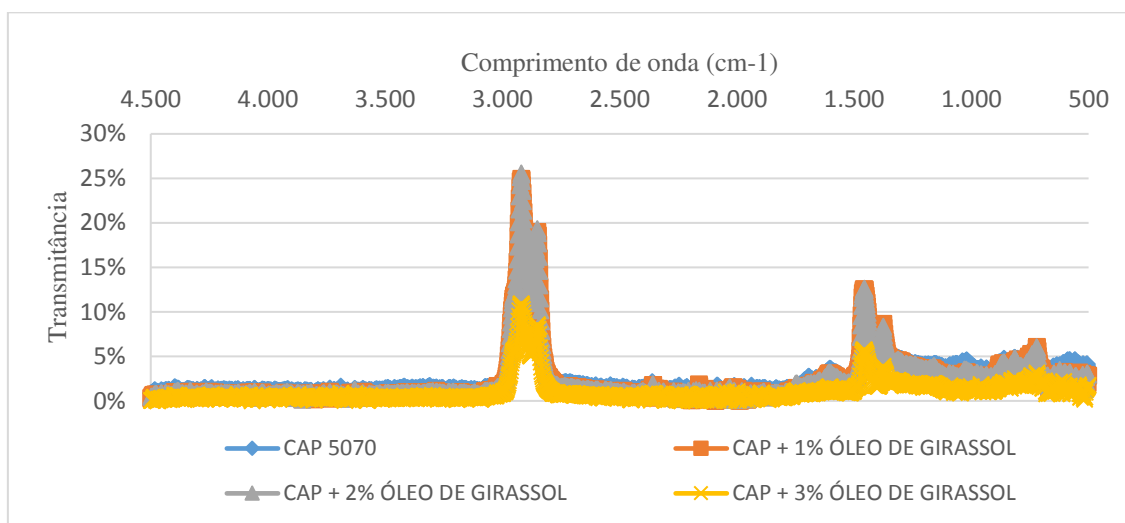
Tabela 12- Grupos de compostos orgânicos identificados por espectroscopia de infravermelho de acordo com o número de onda e modo de vibração

POSIÇÃO DAS BANDAS ( $\text{cm}^{-1}$ )	CORRESPONDENTE	MODO DE VIBRAÇÃO
729	- (CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> -	Balanço ( <i>rocking</i> )
1168	-C=O (Éster)	Estiramento
1465	-C-H (CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> -	Tesoura ( <i>Scissoring</i> )
1745	-C=O (Éster, aldeído, cetona)	Estiramento
2927	-C-H (CH <sub>2</sub> )	Estiramento ( <i>simétrico e assimétrico</i> )

Verificam-se semelhanças entre os componentes químicos presentes no óleo de girassol utilizado nessa pesquisa e estudo realizado por Portugal (2016) que submeteu o óleo de soja e de milho novo e residual ao ensaio de espectroscopia no infravermelho (FTIR), dentre eles a existência do grupo Carbonila (-C=O) e de estiramentos de C-H (CH<sub>2</sub>). De acordo com o autor, verificou-se pouca diferença entre o óleo novo e residual referente aos óleos de soja e de milho. Onde, a interpretação dos grupos são as mesmas, sendo diferenciados apenas na intensidade das bandas.

O ligante CAP 50/70 e o ligante modificado com o óleo de girassol foram submetidos ao ensaio de FTIR, antes e após o procedimento de RTFO, para que fosse possível analisar os grupamentos funcionais da estrutura dos mesmos. Os principais grupos funcionais analisados para as amostras de ligante com e sem o aditivo são praticamente os mesmos, tanto antes como após o RTFO. A Figura 52 apresenta o espectro de FTIR do ligante puro e modificado antes do procedimento de RTFO, sendo as atribuições das bandas de absorção mais importantes sintetizadas na Tabela 13. Os ligantes modificados com todos os teores de óleo de girassol apresentaram as posições das bandas praticamente sobrepostas à amostra do ligante puro indicando que o aditivo não alterou as propriedades químicas do ligante asfáltico.

Figura 52 - FTIR do ligante puro e modificado com o óleo de girassol antes do RTFO



Ribeiro (2011) apresentou comportamento semelhante aos grupos de compostos orgânicos apresentados na Tabela 13. O autor obteve bandas em  $2900\text{cm}^{-1}$  referente a vibrações de estiramentos de C-H ( $\text{CH}_3$ ) e em  $1480\text{cm}^{-1}$  referente a deformação de  $\text{CH}_2$  e  $\text{CH}_3$  de estruturas alifáticas. No entanto, tanto para o ligante convencional como para o ligante com 2% de líquido da castanha de caju, a transmitância das amostras encontradas pelo autor, é superior as encontradas nesta pesquisa.

As principais absorções dos grupos presentes no ligante puro e modificado com o óleo de girassol são semelhantes aos apresentados na pesquisa de Fernandes (2007), que fez a espectroscopia do ligante para identificação dos seus principais grupos constituintes e foram observadas as bandas representativas dos grupos alifáticos, aromáticos e a presença de heteroátomos, condizentes com a composição esperada para o ligante asfáltico.

Tabela 13 - Grupos de compostos orgânicos identificados por espectroscopia de infravermelho de acordo com o número de onda e modo de vibração para o ligante puro e modificado antes do RTFO

POSIÇÃO DAS BANDAS ( $\text{CM}^{-1}$ )	CORRESPONDENTE	MODO DE VIBRAÇÃO
721	- $(\text{CH}_2)_n$ -	Balanço ( <i>roking</i> )
1462 - 1377	Deformação de $\text{CH}_2$ e $\text{CH}_3$ de estruturas alifáticas	Deformação
2852	Presença de estiramento de C-H	Estiramento
2922	-C-H ( $\text{CH}_2$ )	Estiramento ( <i>simétrico e assimétrico</i> )

A Figura 53 apresenta o espectro de FTIR do ligante puro e modificado após o procedimento de RTFO, de acordo com os comprimentos de onda das bandas e suas respectivas transmitâncias, apresentando 5 eventos principais, sintetizadas na Tabela 14. A Figura 53 indica a mesma tendência observada para as amostras antes do RTFO, onde, as posições das bandas do ligante modificado foram praticamente sobrepostas as posições das bandas do ligante puro.

Figura 53 - FTIR do ligante puro e modificado com o óleo de girassol após o RTFO

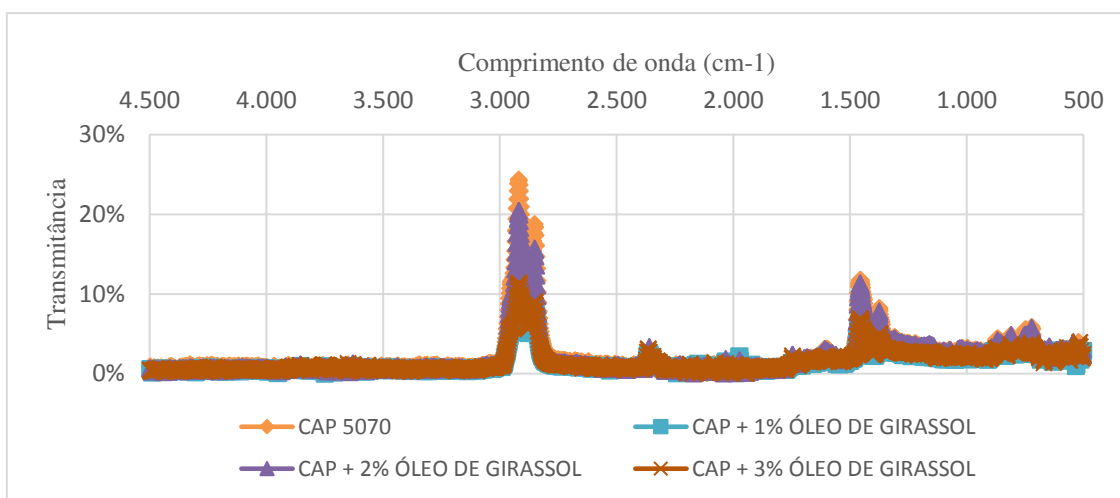


Tabela 14 - Grupos de compostos orgânicos identificados por espectroscopia de infravermelho de acordo com o número de onda e modo de vibração para o ligante puro e modificado após o RTFO.

POSIÇÃO DAS BANDAS (CM <sup>-1</sup> )	CORRESPONDENTE	MODO DE VIBRAÇÃO
729	-(CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> -	Balanço ( <i>roking</i> )
1460- 1375	Deformação de CH <sub>2</sub> e CH <sub>3</sub> de estruturas alifáticas	Deformação
2364	Presença de tripla ligação (alcino)	Ligação
2852	Presença de estiramento de C-H	Estiramento
2922	-C-H (CH <sub>2</sub> )	Estiramento ( <i>simétrico e assimétrico</i> )

Segundo Oliveira (2013) considerando como referência a área do gráfico, define-se que uma substância envelheceu mais que a outra quando a área compreendida entre as linhas dos espectros nas etapas após o envelhecimento é maior que as obtidas

antes do envelhecimento o que representa uma maior oxidação. Assim, é possível quantificar a intensidade do envelhecimento de uma amostra em relação a outra.

Para obter uma avaliação quantitativa do envelhecimento de cada amostra foi realizado o cálculo dos índices de Carbonilas e Sulfóxidos, conforme descrito no tópico 3.2.3. A Tabela 15 quantifica as oxidações nas amostras de ligante puro e modificado com o óleo de girassol antes e após o RTFO.

Tabela 15 - Oxidação das amostras de ligante com e sem o óleo de girassol antes e após o envelhecimento no RTFO

GRUPO FUNCIONAL	AMOSTRA	ÁREA DE OXIDAÇÃO	
		ANTES DO RTFO	APÓS O RTFO
Carbonila	CAP puro	4,07%	6,29%
	CAP + 1% óleo de girassol	3,83%	6,42%
	CAP + 2% óleo de girassol	4,65%	5,11%
	CAP + 3% óleo de girassol	5,26%	7,21%
Sulfóxido	CAP puro	4,53%	7,02%
	CAP + 1% óleo de girassol	4,22%	5,70%
	CAP + 2% óleo de girassol	4,64%	4,57%
	CAP + 3% óleo de girassol	3,94%	5,97%

De acordo com Oliveira (2013), sabendo dos valores das áreas de oxidação de cada amostra é possível estabelecer uma comparação entre os processos de envelhecimentos ocorridos nas amostras. A área de oxidação é dada pela diferença entre a soma das áreas de oxidação de cada amostra após o envelhecimento e a soma das áreas de oxidação das amostras antes do envelhecimento ocasionado pelo RTFO. O percentual oxidado é definido como sendo o quociente entre a diferença entre as áreas de oxidação e a área de oxidação antes do envelhecimento da respectiva amostra.

A Tabela 16 apresenta as diferenças entre as áreas oxidadas nas amostras de ligante puro e modificado com o óleo de girassol antes e após o envelhecimento, além do percentual oxidado dessas amostras.

Tabela 16 - Diferença entre as áreas oxidadas e percentual oxidado das amostras de ligante com e sem aditivo de MAM e antes e após o envelhecimento no RTFO

AMOSTRAS	DIFERENÇAS ENTRE AS ÁREAS DE OXIDAÇÃO (%)	PERCENTUAL OXIDADO (%)
CAP puro	4,71	54,77
CAP + 1% óleo de girassol	4,07	50,55
CAP + 2% óleo de girassol	0,39	4,20
CAP + 3% óleo de girassol	3,98	43,26

O percentual de oxidação do ligante puro foi de 54,77% e o do ligante com os teores de 1, 2 e 3% de óleo de girassol foram de 50,55%; 4,20% e 43,26% respectivamente, gerando assim um indicativo de que a amostra de ligante modificado com o óleo de girassol envelheceu menos do que a amostra de ligante puro. Logo, o óleo de girassol atuou como um antioxidante. O teor de 2% de óleo de girassol apresentou o menor percentual de oxidação, porém, esse não era o resultado esperado, pois o mesmo obteve um percentual de oxidação muito discrepante quando comparado com as outras amostras analisadas. O resultado esperado para o teor de 2%, seria que o percentual de oxidação se encontrasse entre os valores dos teores de 1 e 3% de aditivo. Oliveira (2013) apresentou resultados diferente aos encontrados na Tabela 16, pois o autor observou que amostra de ligante mais o aditivo de MAM Gemul XT-14® envelheceu mais do que a amostra de ligante puro.

Cavalcante (2016) realizou uma análise espectrométrica objetivando a identificação dos principais grupos constituintes dos ligantes modificados com os óleos de mamona e de linhaça antes e após o RTFO. Para caracterização do efeito oxidativo causado pelo envelhecimento a curto prazo no RTFO foram calculadas as razões entre as áreas e obtidos os índices estruturais mais comumente utilizados para análise de ligantes asfálticos, que são eles: índices de oxidação ( $I_{C=O}$ ), Aromáticos ( $I_{C=C}$ ), Alifáticos ( $I_{AF}$ ) e Sulfóxido ( $I_{S=O}$ ). As amostras contendo adição de óleo de linhaça apresentaram maiores índices de oxidação ( $I_{C=O}$ ). O óleo de mamona apresentou resultados semelhantes ao encontrado nesta pesquisa, pois para o ligante tipo CAP 50/70 e o ligante 55/75, apresentaram índices de oxidação menores que os obtidos com ligante puro e modificado com o óleo de linhaça.

Devido as características antioxidantes do óleo de girassol, observa-se que era de se esperar resultados de penetração maiores, redução das temperaturas de ponto de

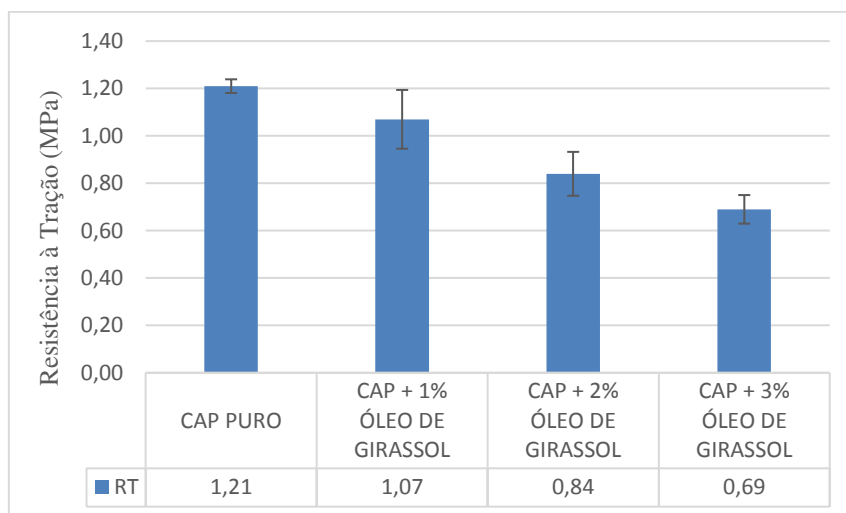
amolecimento e de viscosidade em comparação com os ligantes puros. Portanto, esses fatos foram comprovados a partir dos resultados apresentados para a caracterização do ligante asfáltico modificado com o óleo de girassol.

### 4.3. Caracterização mecânica

#### 4.3.1. Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral

A Figura 54 apresenta os resultados do ensaio de Resistência à Tração (RT) encontrados para uma média de três CPs por teor analisado. Observa-se que os valores de RT são inversamente proporcionais ao acréscimo do teor de óleo de girassol. Entretanto, os resultados indicam que todos os valores atenderam ao limite mínimo preconizado pela Norma do DNIT ES031/2006, que deve ser de, no mínimo, 0,65 MPa (a 25°C) em misturas asfálticas destinadas a camadas de rolamento.

Figura 54 - Resultados do ensaio de Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral



Pelo gráfico da Figura 54 é possível visualizar que a perda de resistência à tração dos corpos de prova está relacionada à diminuição da temperatura de moldagem. As amostras do ligante CAP 50/70 puro foram produzidas sob temperatura mais elevada demonstrando valores mais elevados de resistência à tração.

Souza (2012) encontrou resultados de resistência à tração similares ao desta pesquisa, pois a presença do aditivo também proporcionou uma diminuição da RT. O autor apresentou uma RT mínima de 0,70 MPa para a adição de 9% de óleo de mamona adicionado ao ligante. Portanto, os valores obtidos são maiores que os estabelecidos pelas especificações.

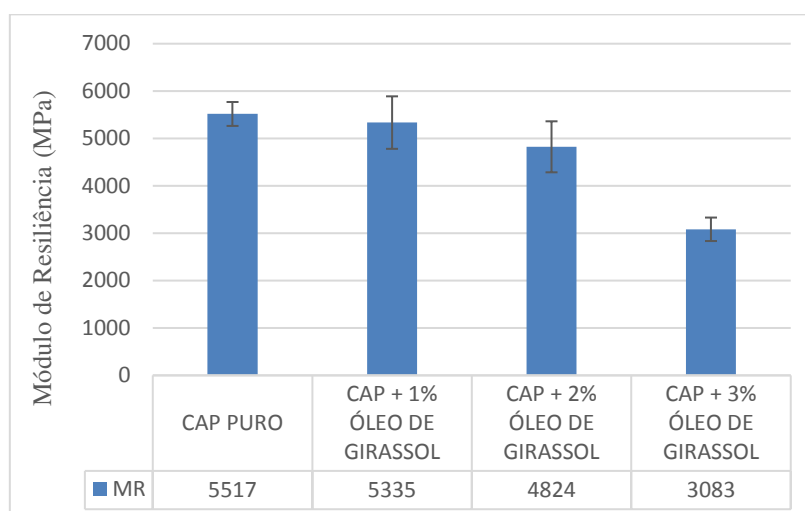
Pilati (2008) analisou os efeitos do resíduo de óleo de xisto sobre algumas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas e verificou que a tendência da adição do óleo de xisto sobre a resistência à tração é de reduzi-la linearmente. Onde, a maior redução é apresentada pela mistura com adição de 14% de óleo, nos teores de 6,0% e 6,5%, onde o valor dessa propriedade é reduzido em 57%, aproximadamente, em relação a mistura de referência.

#### **4.3.2. Módulo de Resiliência**

A Figura 55 apresenta os resultados do ensaio de Módulo de Resiliência (MR) para as misturas asfálticas com o ligante puro e modificado com o óleo de girassol, encontrados para uma média de três CPs por teor analisado. Verifica-se que os valores de MR das misturas estudadas sofrem uma influência com o acréscimo do teor de óleo de girassol utilizado.

Os resultados indicam que, com o acréscimo do teor de girassol utilizado houve uma diminuição dos valores de MR, expressando perda de rigidez. Logo, existe um teor considerado ótimo de aditivo a ser adicionado ao ligante puro, a ser estabelecido por meio de parâmetros que não proporcione aumento significativo na rigidez da mistura asfáltica e assim alcance as características desejadas. Nos resultados retratados na Figura 55, percebe-se que a adição no teor de 3% de óleo de girassol proporcionou uma maior perda de rigidez a mistura.

Figura 55 - Resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência



Pilati (2008) também observou que as misturas com adição de óleo de xisto apresentaram a tendência de redução do módulo de resiliência das misturas, com efeito, aproximadamente linear. O aumento de 7% para 14% de óleo proporcionou uma redução significativa no valor da propriedade.

De acordo com Oliveira (2014) e com os dados apresentados em sua pesquisa é possível perceber que o MR decresce com a diminuição da temperatura e compactação, pois o MR diminuiu 18% da mistura pura de referência para a mistura modificada com uma temperatura 20°C mais baixa. Da mistura modificada, cuja diferença é de 40°C para a mistura pura, esse decréscimo do MR foi de 21%. Logo, a redução dos resultados de MR da mistura produzida a uma temperatura de 20°C para as misturas produzidas a 40°C foi de apenas 3°C. Não se sabe ao certo se o decréscimo do módulo de resiliência teve a ver somente com a adição do ligante ou uma combinação deste com a diminuição da temperatura. Logo, o autor que utilizou o CCBIt 113 AD como aditivo para produção de MAM e realizou uma comparação com a utilização do mesmo aditivo e no mesmo teor a uma temperatura mais baixa, percebeu que é possível diminuir ainda mais a temperatura da mistura com ligante modificado mantendo-se assim suas características físicas praticamente inalteradas.

Em estudo realizado por Souza (2012) não foi possível observar a mesma tendência de diminuição de MR diante do aumento do teor de óleo de mamona. Segundo o mesmo autor, os valores de MR situaram-se entre 2.000 a 4.000 MPa. Porém, a presente pesquisa obteve valores de MR situados numa faixa entre 3.000 e 6.000 MPa.

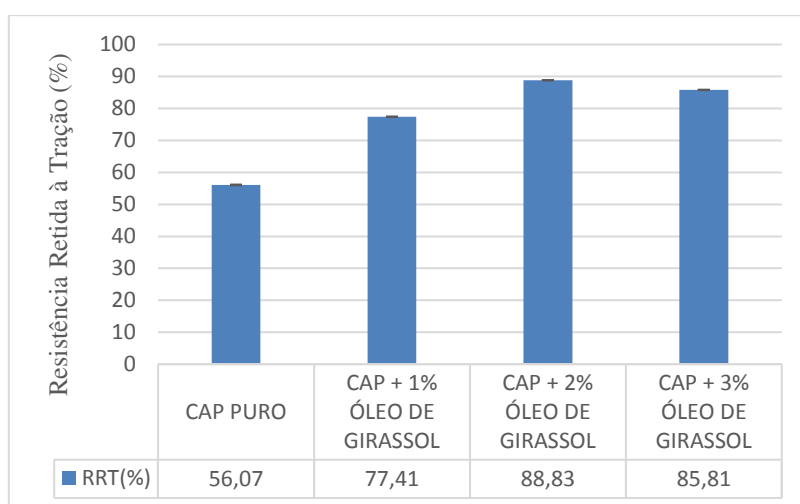


De acordo com Bernucci *et al.* (2008) os valores típicos de misturas asfálticas a 25°C estão situados na faixa de 2.000 a 8.000 MPa. Os valores encontrados nesta pesquisa para as misturas asfálticas com ligante puro e com o aditivo permaneceram dentro do intervalo citado.

### 4.3.3. Dano por umidade induzida - Lottman Modificado

Na Figura 56 é apresentado os resultados obtidos a partir dos ensaios de Resultados da Relação da Resistência Retida à Tração (RRT).

Figura 56 - Resultados da Relação da Resistência Retida à Tração



A AASHTO T283/2002 sugere que pelo método SUPERPAVE a RRT mínima deve ser de 80%. Os resultados indicam que as misturas compostas com o ligante puro e com 1% de óleo de girassol não atingiram o critério sugerido pela norma citada. Porém, pode-se verificar que apesar do teor de 1% de óleo de girassol não atender ao valor preconizado por norma, o mesmo já apresenta um aumento da RRT de 21,34% quando comparado com a mistura com ligante puro. Enquanto o ligante nos teores de 2 e 3% de óleo de girassol encontram-se acima do limite mínimo estabelecido pela AASHTO.

É possível observar que os valores de RRT das misturas estudadas sofreram um aumento diante do acréscimo de teor de óleo de girassol. Porém, existe um limite a partir do qual não ocorre mais esse aumento. Esse fato pode ser observado para o teor de 3% de óleo de girassol com um valor de 85,81%, houve uma redução da RRT de 3%, quando comparada com o teor de 2%. Sales (2015) com a incorporação de CCBIt ao

ligantes asfáltico, obteve uma redução mais expressiva da RRT, chegando a 34% de redução do teor de 2,5% para o teor de 3,0% de CCBIt.

O aumento da RRT devido a adição do óleo de girassol se apresenta como um resultado diferente do esperado, pois devido as temperaturas de mistura e compactação serem mais baixas, poderia haver redução da resistência à umidade induzida das misturas asfálticas. Diversos autores (Ribeiro, 2011; Souza, 2012; Sales, 2015 e Cavalcante, 2016) também verificaram a mesma tendência de aumento da RRT com a utilização de diferentes aditivos de MAMs, indicando que alguns destes aditivos podem ser utilizados como agentes melhoradores da adesividade de misturas asfálticas. Esse aumento da adesividade nas misturas asfálticas provavelmente estão associadas as características antioxidantes e as propriedades tensoativas do óleo de girassol, no caso de agente rejuvenescedor, observados no ensaio de espectroscopia por FTIR realizados nesta pesquisa para o ligante puro e modificado antes e após o RTFO.

A mistura com o melhor desempenho ocorreu com 2% de óleo de girassol, quando comparada com os outros teores estudados e com a amostra de ligante puro. Esse teor não apresentou perda significativa de resistência à tração após o condicionamento, apresentando uma RRT máxima de 88,83%.

Souza (2012) observou que é possível observar que os valores de RRT das misturas estudadas sofreram influência do acréscimo do teor de óleo de mamona. Os resultados indicaram que, para os teores de 3 % e 5% do óleo, as misturas apresentaram uma RRT média de 83%. No entanto, para a mistura composta com o teor de 9% do óleo, os valores de RRT diminuíram para 75%, apesar disso, todos os resultados, com exceção do teor de 9% se mostraram satisfatórios, quando comparados aos valores critérios pré-estabelecidos pela AASHTO.

Segundo Ribeiro (2011) a mistura asfáltica contendo CAP + 2% LCC apresentou maior valor de RRT se comparada às outras misturas contendo ligante convencional, inclusive aquela que utilizou a cal como fíler. A mistura contendo ligante modificado com LCC apresentou RRT aproximadamente 42% superior se comparado à mistura contendo ligante convencional e RRT aproximadamente 12% superior à mistura com CAP + 2% cal como fíler. Apresentando assim, melhoras na adesão e coesão das misturas asfálticas devido às propriedades surfactantes do LCC que proporcionaram maior compatibilidade entre ligante e agregados.

#### 4.3.4. Vida de fadiga

Nas Figuras 57 e 58 são apresentadas as curvas de vida de fadiga sob duas formas: em termos de diferença de tensões e em termos de deformação específica. Para cada uma das curvas foi possível gerar as equações que melhor se adequam as respectivas linhas de tendência, bem como mostrar o coeficiente de determinação  $R^2$  de cada linha de tendência, correspondente à qualidade do ajuste do modelo em relação aos pontos e os parâmetros  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $n_1$  e  $n_2$  das equações.

A Tabela 17 apresenta os valores dos parâmetros da equação da vida de fadiga em função da diferença de tensões e em função da deformação específica resiliente das misturas ensaiadas nesta pesquisa. Percebe-se que o modelo que apresentou menor dispersão de resultados nas duas curvas de vida de fadiga, ou seja, aquele com  $R^2$  mais próximo de 1, foi o da amostra de ligante puro. O ligante com a adição de 3% de óleo de girassol exibiu o menor  $R^2$ , no entanto todas as misturas apresentaram bons coeficientes de determinação, o que indica um bom ajuste dos modelos com os valores experimentais obtidos no laboratório.

Pode-se notar que a mistura com o ligante puro resistiu a um maior número de ciclos que as misturas com o ligante modificado com os teores de óleo de girassol. Esse resultado foi diferente do esperado, pois a mistura com o óleo de girassol tende a ficar menos rígida e apresentar maior vida de fadiga. De acordo com Merighi (2015), não se pode julgar o desempenho da mistura apenas pela dimensão do número de ciclos, pois a mistura sofre a influência de diversos fatores, entre os quais pode-se citar, o volume de vazios e a disposição da matriz de agregados que influencia diretamente no resultado de fadiga.

Morilha Junior (2004) cita uma forma de classificar o comportamento à fadiga das misturas em laboratório, também adotada no presente estudo. O método consiste basicamente, em adotar três níveis de diferença de tensões: 0,5 MPa (nível baixo); 1,0 MPa (nível médio) e 2,0 MPa (nível alto).

Com relação a inclinação da curva vida de fadiga em termos de diferença de tensões, a inclinação é indicada pelo coeficiente “n”. Tadeu Junior (2008) relata que para o caso dos modelos de representação por diferença de tensões,  $n_1$  indica a suscetibilidade ao estado de tensões. Logo, de acordo com a Figura 57 e os dados da Tabela 17, a mistura do ligante com os teores de 1%, 2% e 3% de óleo de girassol

indicam que são mais resistentes a fadiga ao nível médio de tensões. Porém, apesar da mistura com o ligante CAP 50/70 puro apresentar maior resistência a altas tensões, devido ao seu alto valor de  $n_1$ , a mesma apresenta uma maior sensibilidade à diferença de tensões para essas misturas.

Bundy (2012) encontrou valores de  $n$  variando entre 1 e 8, para as misturas produzidas com o ligante CAP 50/70 puro e com a adição dos aditivos de MAMs denominado comercialmente por AD-Warm, CCBit 113 AD e para o processo de espuma de asfalto. Na presente pesquisa foram encontrados valores entre 2,58 e 9,72, que revelam que algumas misturas possuem curva com baixa declividade e outras com alta declividade para a vida de fadiga em função da diferença de tensões. Os valores  $n$  para o ligante puro foram os mais elevados, acima de 9,6, este resultado é incomum em ensaios de vida de fadiga.

Na Figura 58 é apresentada a curva de vida de fadiga em função da deformação específica, onde a deformação resiliente pondera a interferência do módulo de resiliência inicial da mistura. Por meio do coeficiente de inclinação  $n_2$  das curvas, nota-se comportamento semelhante ao observado na análise das curvas vida de fadiga x diferença de tensões. Analogamente ao que foi feito para analisar a fadiga em função da diferença de tensões, adotou-se três níveis de deformações de resiliência:  $3 \cdot 10^{-5}$  cm/cm (nível baixo);  $6 \cdot 10^{-5}$  cm/cm (nível médio) e  $1 \cdot 10^{-4}$  cm/cm (nível alto).

O melhor comportamento à fadiga para o nível médio de deformação foi para a mistura do ligante puro e modificado com os teores de 1 e 2% do óleo de girassol, e para o nível alto, a mistura do ligante com 3% de óleo de girassol apresentou melhor desempenho.

Figura 57 - Vida de Fadiga x Diferença de Tensões

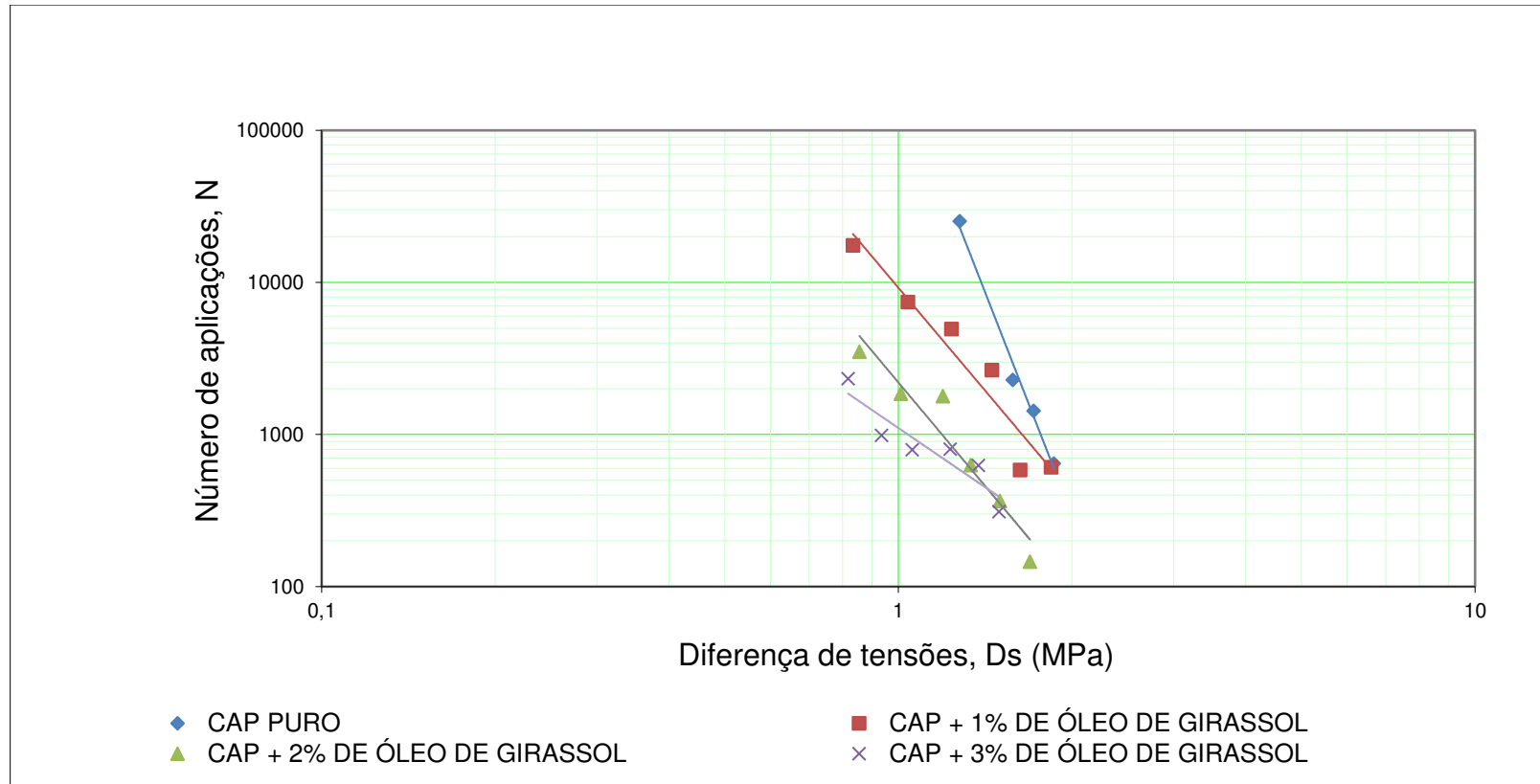


Figura 58 - Vida de Fadiga x Deformação específica resiliente

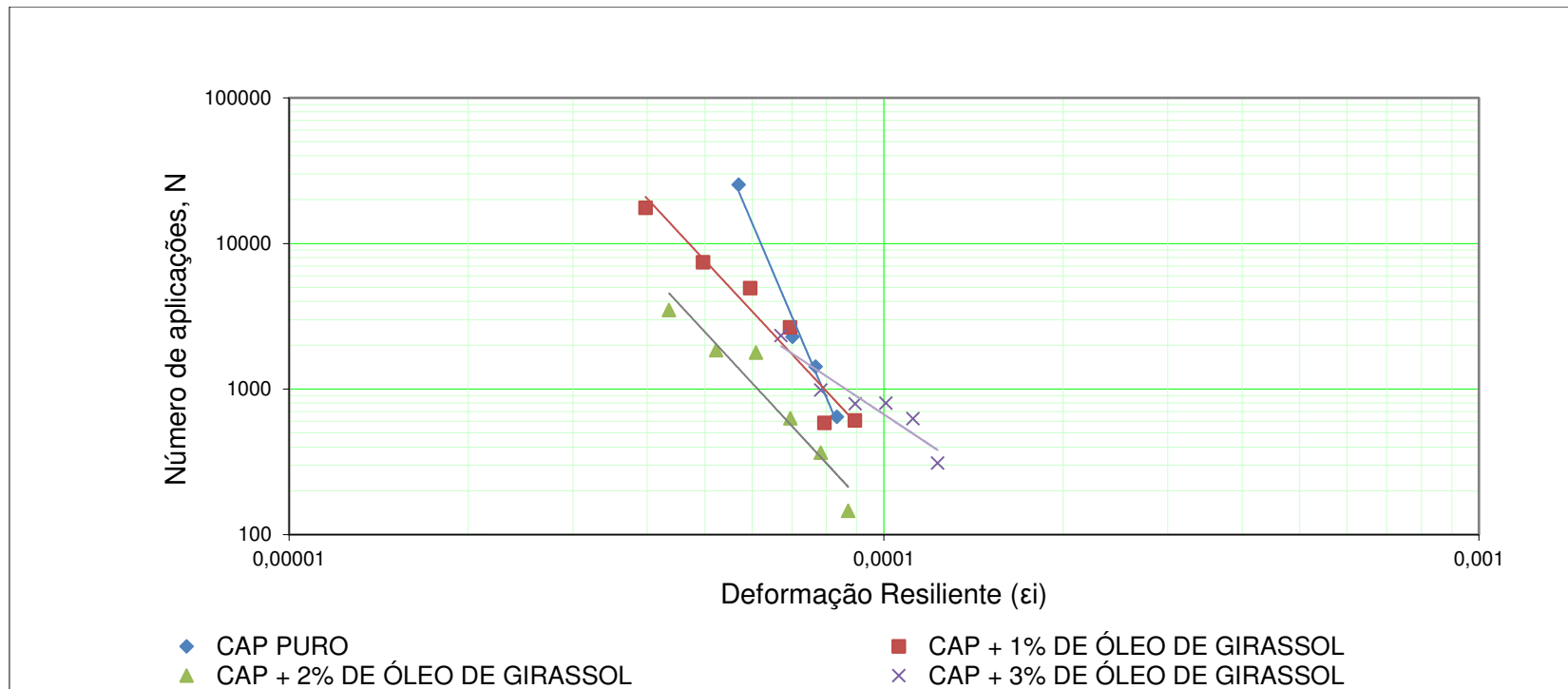


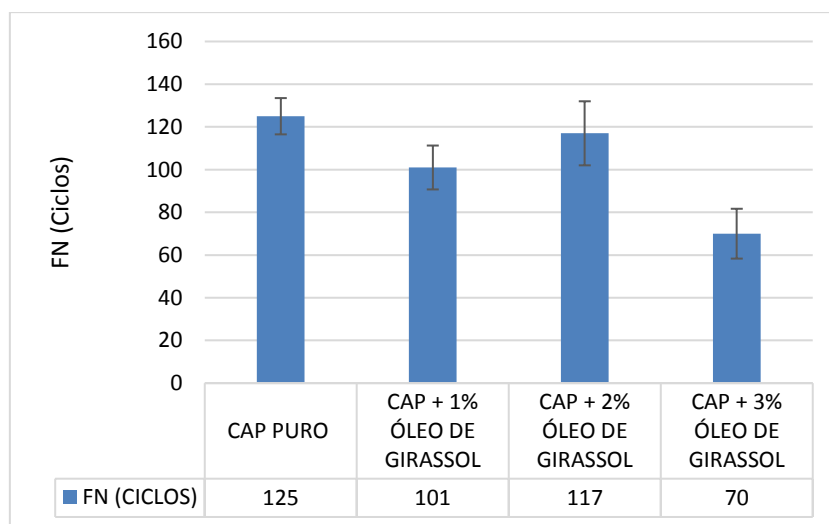
Tabela 17 - Parâmetros obtidos das curvas de fadiga desta pesquisa

MISTURA	$N = k_1 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{n_1}$ OU $N = k_2 \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{n_2}$	R <sup>2</sup>	PARÂMETROS	
CAP puro	$247740 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{9,702}$	0,9885	$K_1 = 247740$	$n_1 = 9,702$
	$4 \times 10^{-37} \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{9,603}$	0,9842	$K_2 = 4 \times 10^{-37}$	$n_2 = 9,603$
CAP + 1% de óleo de girassol	$9221,6 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{4,496}$	0,9305	$K_1 = 9221,6$	$n_1 = 4,496$
	$1 \times 10^{-15} \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{4,392}$	0,9379	$K_2 = 1 \times 10^{-15}$	$n_2 = 4,392$
CAP + 2% de óleo de girassol	$2199,2 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{4,526}$	0,9228	$K_2 = 2199,2$	$n_1 = 4,526$
	$2 \times 10^{-16} \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{4,416}$	0,9237	$K_2 = 2 \times 10^{-16}$	$n_2 = 4,416$
CAP + 3% de óleo de girassol	$1104,1 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{2,589}$	0,8441	$K_1 = 1104,1$	$n_1 = 2,589$
	$1 \times 10^{-8} \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{2,71}$	0,8798	$K_2 = 1 \times 10^{-8}$	$n_2 = 2,71$

#### 4.3.5. Flow Number (FN)

A Figura 59 apresenta os resultados do ensaio Flow Number para as misturas asfálticas com ligante puro e modificado com os teores de óleo de girassol.

Figura 59 - Resultados do ensaio de Flow Number



A mistura com o ligante puro foi a que apresentou melhor desempenho quanto a resistência à deformação permanente. Percebe-se que a adição do óleo de girassol promoveu a redução do número de ciclos, diminuindo a resistência à deformação

permanente das misturas asfálticas. Porém, os teores de 1 e 2% de óleo de girassol não demonstraram uma perda significativa da resistência à deformação permanente, pois os resultados de FN situaram-se em torno de 100. Para o ligante modificado, o teor de 2% de aditivo foi o que apresentou melhor comportamento apresentando um FN de 117 ciclos. Porém, esse resultado divergiu da tendência apresentada pelos outros teores analisados, o resultado esperado seria que o teor de 2% alcançasse um FN entre 70 e 101 ciclos, pois foram os valores encontrados para os percentuais de 1 e 3% de aditivo. O teor de 3% de óleo de girassol foi o que apresentou menor FN, chegando a 70 ciclos.

Bundy (2012) obteve valores de FN superiores aos encontrados nesta pesquisa, atingindo os valores mais altos para a mistura com o ligante CAP 30/45 puro com 647 ciclos e para o ligante modificado com 2% de CCBIt, o número foi de 577 ciclos. Portanto, percebeu-se que diante da diminuição das temperaturas de compactação também foi verificado a mesma tendência de redução dos valores de FN.

De acordo com os parâmetros de referência sugeridos por Nascimento (2008) apresentados na Tabela 18 para avaliação da susceptibilidade à deformação permanente das misturas asfálticas é possível notar que nenhuma das misturas analisadas, inclusive as misturas com o ligante CAP 50/70, não atingiram se quer os critérios para serem empregadas em pistas de tráfego médio, pois apresentaram valores de FN menores que 300 ciclos. Portanto, todas as misturas estudadas são adequadas para emprego em pistas de tráfego leve. Observa-se que estes parâmetros sugeridos pelo autor são conservadores.

Tabela 18 - Valores mínimos de Flow Number para diferentes níveis de tráfego

PESQUISA	TENSÃO AXIAL (KPA)	TEMP. (°C)	VV (%)	TRÁFEGO			
				Leve < 3x10 <sup>6</sup>	Médio < 3x10 <sup>6</sup> ; 1x10 <sup>7</sup>	Pesado 1x10 <sup>7</sup> ; 3x10 <sup>7</sup>	Extremamente Pesado > 3x10 <sup>7</sup>
Nascimento (2008)	204	60	7 ± 0,5	-	300	750	-

(Fonte: NASCIMENTO, 2008)

Comparando os resultados obtidos nesta pesquisa com os dados de Barros (2017) que incorporou um aditivo surfactante ao ligante asfáltico CAP 30/45 para a produção de misturas asfálticas mornas. Os valores de FN encontrados pela autora também não puderam ser enquadrados nem ao menos no tráfego de intensidade média,



pois os valores de FN foram menores que 300 ciclos. Segundo a autora, foi possível perceber uma redução do FN de 207 ciclos da mistura com ligante tipo CAP 30/45 de referência para 157 ciclos, referente ao ligante modificado com o aditivo de MAM.

Segundo Nascimento (2008) existe grande influência do ligante asfáltico no comportamento à deformação permanente de misturas asfálticas. De acordo com os dados da Tabela 19, o autor obteve para a mistura com o asfalto 12 um FN de 102 ciclos, para a mistura com o asfalto 10 que apresentou menor temperatura de ponto de amolecimento obteve um FN de 68 ciclos. Logo, a redução da resistência à deformação permanente está associada com a redução da temperatura do ponto de amolecimento. A presente pesquisa apresentou esta mesma influência da consistência do ligante asfáltico no comportamento à deformação permanente de misturas. Onde, para o ligante puro com um ponto de amolecimento de 47,5°C obteve um FN de 125 ciclos e para a maior redução do ponto de amolecimento que ocorreu para o teor de 3% de óleo de girassol, com uma temperatura de 43,8°C, os valores de FN também reduziram para 70 ciclos.

Tabela 19 - Resultados do ensaio de FN em misturas asfálticas contendo os mesmos agregados de origem granítica com graduação fina e com diferentes ligantes

MISTURA	CARACTERÍSTICAS DO LIGANTE			TMN	FN, CICLOS
	Ligante	Penetração a 25°C, 100g e 5s, dmm	Ponto de amolecimento (°C)		
J	Asfalto 9	41	63,9	19 mm	451
L	Asfalto 10	73	49,9	19 mm	68
M	Asfalto 11	41	68,6	19 mm	128
N	Asfalto 12	64	58,2	19 mm	102
O	Asfalto 13	43	57,5	19 mm	119

(Fonte: NASCIMENTO, 2008)

Silva (2016) realizou o ensaio de fluência e recuperação sob tensões múltiplas (MSCR) para o óleo de girassol e classificou as amostras de ligante puro e modificado quanto ao critério de tráfego do Federal Highway Administration (FHWA). Os resultados encontrados pelo autor indicaram que para as amostras com o ligante puro e para os teores de 1,5; 2,0 e 2,5% de aditivo, se enquadraram no nível de tráfego padrão. Porém, o teor de 1,0% de aditivo se mostrou apto a ser submetido a um nível de tráfego pesado. Sabendo que os resultados reológicos dos ligantes (MSCR) podem ser utilizados para ajudar na seleção de ligantes com melhor desempenho à deformação

permanente. Pode-se verificar os resultados de deformações permanentes, a partir do critério de FN encontrados nesta pesquisa, se mostraram discordantes dos resultados de MSCR encontrados por Silva (2016), os quais apontaram que as misturas asfálticas se enquadraram no tráfego de intensidade média a pesado.

### 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas por meio dessa pesquisa, bem como sugestões para pesquisas futuras envolvendo o mesmo objeto de estudo.

#### 5.1. Conclusões

O principal objetivo deste estudo foi verificar o efeito do óleo de girassol nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas que visa a obtenção de MAMs. A partir dos resultados apresentados e como a viscosidade do ligante modificado não reduziu substancialmente, as misturas asfálticas estudadas não se classificam em misturas asfálticas mornas.

As temperaturas de mistura e de compactação reduziram linearmente de acordo com o aumento do teor de aditivo estudado, a maior redução de temperatura ocorreu para o teor de 3% de óleo de girassol com uma diminuição de 6°C nas temperaturas de produção, propiciando uma economia de energia durante o aquecimento do ligante asfáltico e dos agregados na usina de asfalto.

As análises dos dados dos ensaios mecânicos obtidos permitiram extrair as seguintes conclusões:

- as misturas asfálticas modificadas com o óleo de girassol obtiveram menor resistência à tração indireta, comparando à mistura de referência, bem como o módulo de resiliência também foi inferior;
- nos ensaios realizados, a resistência ao dano por umidade induzida (Lottman Modificado) apresentou valores maiores do que a mistura de referência, indicando um aumento da adesividade do ligante asfáltico;
- os resultados de fadiga das misturas asfálticas modificadas com o aditivo apresentaram um maior limite de resistência à fadiga, quando comparadas com à mistura a quente de referência.

- os resultados de Flow Number para as misturas contendo os teores de óleo de girassol foram inferiores quando comparadas com a mistura com o ligante puro.

De um modo geral, o óleo de girassol pode ser uma alternativa viável para utilização como aditivo redutor das temperaturas de produção. O teor de 2% de óleo de girassol foi o que proporcionou melhor desempenho quanto as propriedades mecânicas e volumétricas em relação aos critérios preconizados pelas normas adotadas. Além disso, o óleo de girassol pode ser utilizado como aditivo melhorador da adesividade de misturas asfálticas mornas, por ter proporcionado a mistura um aumento significativo da resistência ao dano por umidade. Este aditivo pode ser utilizado também como agente rejuvenescedor de misturas asfálticas que contêm material fresado, pois a incorporação do aditivo ao ligante asfáltico contribui para a redução da viscosidade e pode realizar a reposição de compostos aromáticos que devolvem ao asfalto a característica original de consistências perdidas pelo envelhecimento do ligante ao longo do tempo de serviço do pavimento.

## **5.2. Sugestões para pesquisas futuras**

Como principais sugestões para trabalhos futuros, propõe-se:

- Utilização da metodologia Bailey para a escolha da granulometria mais adequada no que diz respeito à resistência a deformação permanente das misturas asfálticas;
- Realizar estudos a partir do teor ótimo do óleo de girassol encontrado nesta pesquisa e verificar o desempenho mecânico em temperaturas de mistura e compactação inferiores, até o ponto que suas características físicas seriam preservadas ou totalmente perdidas com a diminuição de temperatura, possibilitando maximizar a redução de temperatura;
- Execução de outros ensaios de caracterização mecânica para as misturas asfálticas avaliadas na fase de laboratório, quais sejam:

módulo dinâmico e avaliação da resistência a deformação permanente com o uso de simulador de pequeno porte;

- Realizar análises de desempenho em campo de misturas aplicadas com os teores de óleo de girassol utilizado nesta pesquisa;
- Avaliar o efeito do óleo de girassol como agente rejuvenescedor de misturas asfálticas contendo percentuais de materiais fresados mais elevados.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15184: *Materiais Betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando viscosímetro rotacional*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16505: *Misturas asfálticas – resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida*. Rio de Janeiro, 2016.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T 283: *Resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage*. Washington, D. C. 2002.

ANDERSON, R., G. BAUMGARDNER, R. MAY, AND G. REINKE. Unpublished Phase I Interim Report for NCHRP Project 9-47: *Engineering Properties, Emissions, and Field Performance of Warm Mix Asphalt Technologies*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC. Available on request to NCHRP. 2008.

ASLI, E. AHMADINIA, M. ZARGAR, M. R. KARIM. *Investigation on physical properties of waste cooking oil – Rejuvenated bitumen binder*, Constr. Build. Mater., vol. 37, pp. 398-405, 2012.

ASTM D6925 - *Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor*. 2009.

AUSTROADS. *Review of overseas trials of warm mix asphalt pavements and current usage by Austroads members*, AP-T215-12, Austroads, Sydney, 2012.

BARROS, L. M. *Deformação permanente de misturas asfálticas: avaliação do desempenho pelo critério de Flow Number de misturas quentes e mornas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 2017.

BERNUCCI L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI J. A. P., SOARES J. B. *Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros*. 1ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 501p. 2008.

BONAQUIST, R. *Evaluation of Flow Number (FN) as a discriminating HMA mixture property*. Wisconsin Highway Research Program. Projeto Número 0092-09-01. 2012.

BROSSEAUD, Y. *Método francês para dosagem de misturas asfálticas: abordagem, métodos de ensaio, confiabilidade e validade*. In: ENCONTRO DO ASFALTO, 16. Rio de Janeiro. IBP, 2002 a. 1 CD-ROM.

BUDNY, J. *Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas morna*. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. COPPE-Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2010.

BUTTON, J. W.; ESTAKHRI, C.; WIMSATT, A., *A Synthesis of Warm-Mix Asphalt*, Texas A&M University System, EUA, 2007.

CASTRO, C. de; CASTIGLIONI, V.B.R.; BALLA, A.; LEITE, R.M.V.B. de C.; KARAM, D.; MELLO, H.C.; GUEDES, L.C.A.; FARIAS, J.R.B. *A cultura do girassol*. Londrina: Embrapa- CNPSo. 36p. (Embrapa-CNPSo. Circular Técnica, 13). 1997.

CAVALCANTE, Fabiano Pereira. *Efeito da adição dos óleos de ricinus communis e linus usitatissimum nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo puro e modificado*. Tese de Doutorado - Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

CAVALCANTI, L. S. *Efeito de alguns modificadores de ligantes na vida de fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas*. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. COPPE-Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2010.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. *Anuário CNT do Transporte 2017*. Brasília: CNT: SEST SENAT. Disponível em: <<http://anuariodotransporte.cnt.org.br/2017/Rodoviario/1-3-1-1-1-/Malha-rodovi%C3%A1ria-total.>> Acesso em: 28 fev. 2018.

CONCEPA E LAPAV. *Estudo Laboratorial de Comportamento à Fadiga e Deformação Permanente de Misturas Asfálticas Mornas*. Projeto de pesquisa Concepa-Lapav, Porto Alegre, RS, 56p, 2008.

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

CHOWDHURY, A., BUTTON, J. W. *A review of warm mix asphalt*. Technical Report. Texas Transportation Institute. 2008.

CONAB. (Companhia Nacional de Abastecimento). *Acompanhamento de Safra Brasileira: Grãos, Sexto Levantamento*, março 2017. Brasília: CONAB, 2017.

COSTA, H. M. da.; RAMOS, V. D.; ABRANTES, T. A. S. A.; CASTRO, L. L. Y.; VISCONTE, L. L. Y.; NUNES, R. C. R.; FURTADO, C. R. G. *Efeito do óleo de mamona em composições de borracha natural contendo sílica*. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, Rio de Janeiro, v. 14, n.1, p. 46-50, 2004.

D'ALVA, O. A., *O Extrativismo da Cera de Carnaúba no Ceará*, 193p. Tese de Mestrado – Universidade Federal do Ceará, CE, Brasil. 2004.

D'ANGELO, J., HARM, E., BARTOSZEK, J., BAUMGARDNER, G., CORRIGAN, M., COWSERT, J., HARMAN, T., JAMSHIDI, M., JONES, W., NEWCOMB, D., PROWELL, B., SINES, R. AND YEATON, B. *Warm-Mix Asphalt: European Practice*. 2008.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 035/98. *Agregados – Determinação da Abrasão Los Angeles*. Rio de Janeiro, 1998.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 081/98. *Agregados – Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo*. Rio de Janeiro, 1998.



EDWARDS, Y., Y. TASDEMIR, AND U. ISACSSON, *Influence of Commercial Waxes and Polyphosphoric Acid on Bitumen and Asphalt Concrete Performance at Low and Medium Temperatures*, Journal of Materials and Structures, Volume 39, No. 7, Springer, The Netherlands, pp. 723-735. August 2006.

FERNANDES, P. R. N. *Caracterização de Ligante Asfáltico Brasileiro e Avaliação da Presença de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs)*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2007.

FERREIRA, C. I. G., *Avaliação do desempenho de misturas betuminosas temperadas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade do Minho, Portugal 140p. 2009.

FREITAS, George Alberto de. *Análise econômica da cultura do girassol no nordeste. Informe rural ETENE*. Ano VI - Novembro de 2012. Disponível em: <[https://www.bnb.gov.br/documents/88765/89729/ire\\_ano6\\_n2.pdf/730c7cfa-80c4-48ff-bf21-43ae7bcb02c2](https://www.bnb.gov.br/documents/88765/89729/ire_ano6_n2.pdf/730c7cfa-80c4-48ff-bf21-43ae7bcb02c2)>. Acesso em : 23 de ago. 2017.

FRITZEN, M. A.; MOTTA, L. M. G.; NASCIMENTO, L. A. H.; et al. *Comportamento de misturas asfálticas mornas submetidas a ensaios acelerados por simulador de tráfego móvel*. IV Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço, Fortaleza-CE, Brasil, 07 a 09 de outubro, 2009.

GENNESSEAUX, M. M. L. *Avaliação da Durabilidade de Misturas Asfálticas a Quente e Mornas Contendo Material Asfáltico Fresado*. Tese de doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2015.

HANZ, A. J.; Faheem, A.; Mahmoud, E.; Bahia, H. U. *Measuring effects of warm-mix additives use of newly developed asphalt binder lubricity test for the dynamic shear rheometer*. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, N°. 2180, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C, 2010.

HURLEY, G. C.; PROWELL, B. D. *Evaluation of Aspha-min zeolite for use in warm mix asphalt*. NCAT Report 05-04. National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Auburn, jun. 2005.

HURLEY, G. C.; PROWELL, B. D. *Evaluation of Evotherm® for use in warm mix asphalt*. NCAT Report 06-02. Auburn, 2006.

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.

JI, H. YAO; Z. SUO; Z. YOU; H. LI; S. XU; L. SUN. *Effectiveness of Vegetable Oils as Rejuvenators for Aged Asphalt Binders*. Journal of Materials in Civil Engineering, D4016003, 2016.

JUNOR TADEU, C. *Estudo das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas Convencionais e Modificadas*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul Escola de Engenharia/UFRGS. 2008.

KAVANASK, A., WEST, R., HURLEY G., PROWELL, B., JONES, D., KREICH T., OSBORN, L., PEREGRINE, K., FRANK B. NCHRP 09-47A: *Engineering properties, emissions, and field performace of warm mix asphalt technologies*. Interim report appendix literature review. Volume I. Auburn, 2009.

KENNEDY, T. W.; HUBER, G. A.; HARRIGAN, E.; HUGHES, C. S.; QUINTUS, H, V.; MOULTHROP, J. S. *Superior Performing Asphalt Pavements (SUPERPAVE) - The Product of the SHRP Asphalt Research Program*. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, DC. 1994.

KOENDERS, B. G.; STOKER, D. A.; BOWEN, C., *Innovative processes in asphalt production and application to obtain lower operating temperatures*. 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona, Spain, September. 2000.

KRISTJANDTTIR, Ó.; MUENCH, S.; MICHAEL, L.; BURKE, G.; *Assessing the potencial for warm mix asphalt technology adoption*. In: Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, D.C., 2007.

KVASNAK, A., TAYLOR, A., SIGNORE, J.M., AND BUKHARI, S.A. *Evaluation of Gencor Green Machine Ultrafoam GX*. NCAT Report 10-03, July 2010.

LARSEN, O.R., O. MOEN, C. ROBERTUS, AND B.G., KOENDERS, *WAM-Foam Asphalt Production at Lower Operating Temperatures as an Environmental Friendly Alternative to HMA*, Proceedings, 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Vienna, Austria. 2004.

LI, X., & GIBSON, N. *Comparison of asphalt mixture performance tester fatigue characteristics with full scale pavement cracking for recycled and warm mix asphalts*. Washington, DC: Transportation Research Board Compendium. 2016.

LIMA, A. P. D.; RODRIGUES, F. O.; AMONI, B.; BRINGEL, R. M.; SOARES, J. B.; SOARES, S. A.; RICARDO, N. M. P. S. *Efeito da Adição de Organovermiculita e Líquido da Castanha de Caju (LCC) na Estabilidade a Estocagem de Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado por SBS*. In: X Congresso Brasileiro de Polímeros (CBPOL), Foz do Iguaçu, PR. 2009.

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, Brasil, v. 21, n. 01, p. 72-82, 2016.

MALLICK, R. B.; KANDHAL, P.S.; BRADBURY, R. L., *Using Warm-Mix Asphalt Technology to Incorporate High Percentage of Reclaimed Asphalt Pavement Material in Asphalt Mixtures* - Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2008.

MALLICK, R. B.; BERGENDAHL, J.; PAKULA, M. *A laboratory study on CO<sub>2</sub> emission reductions through the use of warm mix asphalt*. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 88., 2009, Washington. Anais... Washington: TRB, 2009.

MENDES, L. O. *Utilização do método Bailey para a seleção de agregados em dosagem de misturas asfálticas*. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora - MG, 2011.

MERIGHI, C. F. *Estudo do comportamento de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimento com adição de borracha moída de pneu*. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, Brasil. 2015.

MORILHA JUNIOR, A. *Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas*. Dissertação de mestrado, Programa de Engenharia Civil, UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 165f, 2004.

MOTTA, R. S. *Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissões de poluentes e de consumo energético*. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, Brasil, 2011.

MOTTA, L. M. G.; MANSO G. A.; FRITZEN, M. A.; VIANNA, A. A. D.; BUNDY, J.; MANNARINO, M. C. B.; GUIMARÃES, S. *Avaliação do comportamento de dois tipos de revestimentos asfálticos, dosados pelo método SUPERPAVE, sob ação de tráfego real na Rodovia BR040 – trecho da concessionária CONCERT*. Rio de Janeiro, 24 de agosto de 2012. Disponível em: <[www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/relatorio\\_final\\_pesquisa\\_rdt\\_2010\\_2012.pdf](http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/relatorio_final_pesquisa_rdt_2010_2012.pdf)>. Acesso em: fev. 2018.

MUTHEN, K. M. *Foamed Asphalt Mixes: Mix Design Procedures*. Sabita, África, dez. 1998. Disponível em: <<http://asphalt.csir.co.za/foamasph/foamasph.pdf>>. Acesso em: fev. 2017.

NASCIMENTO, L. A. H. *Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente*. Dissertação de mestrado, Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

NAYAK, U.; C. SAHOO. *A rheological study on aged binder rejuvenated with Pongamia oil and Composite castor oil*. Int. J. Pavement Eng., pp. 1-13, 2015.

NYNAS. *Asfalto Templado, Semi-Templado y Frio: El Caso a Favor de la Sostenibilidad*. Revista Performance. Nynas Bitumen Magazine, Edición 01, España, otoño, pp. 8-9, 2009.

OLIVEIRA, M. F.; VIEIRA, O. V. *Extração de óleo de girassol utilizando miniprensas*. Documentos EMBRAPA, 2004.

OLIVEIRA, J. A. *Avaliação do Desempenho de Misturas Asfálticas Recicladas Mornas em Laboratório e em Campo*. Dissertação de Mestrado, Petran / UFC – Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia de Transportes, Fortaleza – CE, 2013.

OLIVEIRA, R. B. *Estudo sobre o efeito do ccbt-113ad no comportamento mecânico de misturas asfálticas*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil, 2014.

OTTO, G. G. *Misturas asfálticas mornas: verificação da fadiga e do módulo complexo*. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 19f, 2009.

PCA AMERICA'S CEMENT MANUFACTURERS (Org.). *Paving Cost Comparisons: Warm-Mix Asphalt Versus Concrete*. 2014. Disponível em: <[http://www.cement.org/docs/default-source/market-economicspdfs/issuestrends/paving\\_cost\\_comparisons\\_flash.pdf?sfvrsn=13c40ebf\\_4](http://www.cement.org/docs/default-source/market-economicspdfs/issuestrends/paving_cost_comparisons_flash.pdf?sfvrsn=13c40ebf_4)>. Acesso em: 28 ago. 2017.

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*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, 2008.

PORTUGAL, A. C. X. *Avaliação Reológica de Cimentos Asfálticos de Petróleo Modificados com Óleo de Soja e de Milho*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil, 2016.

PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C. *Warm-mix asphalt: best practices*. National Asphalt Pavement Association - NAPA. Quality Improvement Publication 125. Lanham, 2007.

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.

ROBINETTE, C.; WILLIAMS, R. C. *The effects of testing history and preparation method on the Superpave Simple Performance Test*. In: Journal of the association of asphalt paving technologists, Vol. 75, pp. 297-320, Savannah, Georgia, EUA. Março, 2006.

ROMIER, A., M. AUDEON, D. JAC, Y. MARTINEAU, AND F. OLARD *Low-Energy Asphalt with Performance of Hot-Mix Asphalt*, Transportation Research Record 1962, Journal of the Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 2006.

RUBIO, M. C.; MARTINEZ, G.; BAENA, L.; MORENO, F. *Warm mix asphalt: an overview*. Journal of Cleaner Production 24 – p. 76-84, 2012. Disponível em: <file:///C:/Users/micro/Downloads/wma%20overview%20jclp%20(2).pdf>. Acesso em: fev. 2017.

SKOLNIK, J.; BROOKS, M.; OMAN, J. Report 744 for NCHRP Project 10-81: *Fuel Usage Factors in Highway and Bridge Construction*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC. Available on request to NCHRP, 2013.

SHETH, N. M. *Evaluation of selected warm mix asphalt additives* dissertação (mestrado em engenharia) University of Iowa, Iowa city, Iowa, 121f, 2010.

SALES, P. de M. *Avaliação das Características Físicas e Mecânicas de Misturas Asfálticas Modificadas com Adição do CCBIT*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil, 2015.

SILVA, G. G. da. *Estudos Reológicos de Aditivos Utilizados na Fabricação de Misturas Mornas*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil, 2016.

TELLES, MICHELE MARCON; BLOCK, JANE MARA. *Caracterización físico química de los granos, la torta y el aceite de tres variedades de girasol (Helianthus annuus L.) cultivadas en sistemas orgánicos*. Aceites & Grasas, Florianópolis, v. 2, n. 20, p.216- 222, 2010.

USDA – *United States Department of Agriculture. Economics, Statistics and Market Information System*, 2016. Disponível em: <<http://usda.mannlib.cornell.edu/MannUsda/viewDocumentInfo.do?documentID=1490>> Acesso em: 06 jan. 2018.

VIEIRA, R. de M.; LIMA, E.F.; AZEVEDO, D.M.P. de ; BATISTA, F.A.S.; SANTOS, J.W. dos; DOURADOS, R. M.F. *Competição de cultivares e linhagens de mamoneira no Nordeste do Brasil- 1993/96*. Campina Grande: EMBRAPA-CNPQ, b. 4p, 1998.

WITCZAK, M. W; KALOUSH, K.; PELLINEN, T.; EL-BASYOUNY, M.; QUINTUS, V. H. *Simple performance test for Superpave mix design*. Washington, D. C., United States. National Cooperative Highway Research Program. NCHRP Report 465, 2002.

YU, M. ZAUMANIS, S. DOS SANTOS, L. D. *Poulikakos. Rheological, microscopic, and chemical characterization of the rejuvenating effect on asphalt binders*. Fuel, vol. 135, pp. 162-171, 2014.

ZHAO, S., HUANG, B., SHU,X., JIA, X., & WOODS ,M. *Laboratory performance evaluation of warm-mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2294, 98–105. 2012.

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. Malaysia. p. 254-258, 2012.

ZAUMANIS, M., *Warm mix asphalt investigation*. Dissertação (mestrado em engenharia), Technical University of, Department of civil engineering, Kgs.Lyngby, Denmark, 111f, 2010.

## **ANEXOS**

### **Curvas de fadiga das misturas asfálticas desta pesquisa**



## ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Amostra: CAP PURO 50/70

Temperatura de ensaio: 25 °C

Operador(es): Jeovanesa Régis Carvalho

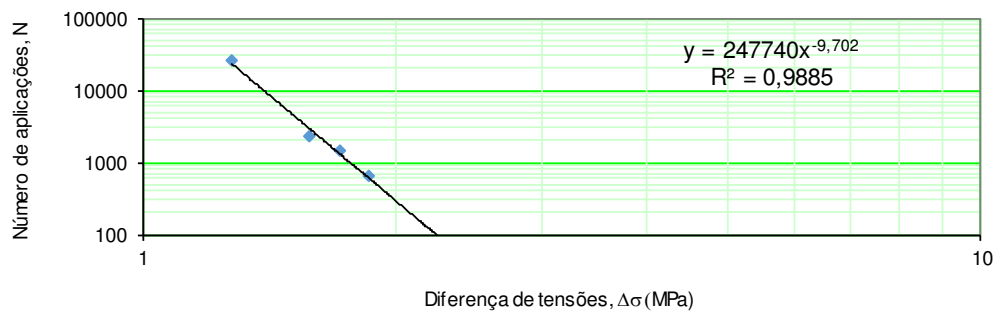
Módulo resiliente da amostra: 5517,0 MPa

Tensão de tração estática máxima,  $\sigma_{Tmax}$ : 1,21 MPa

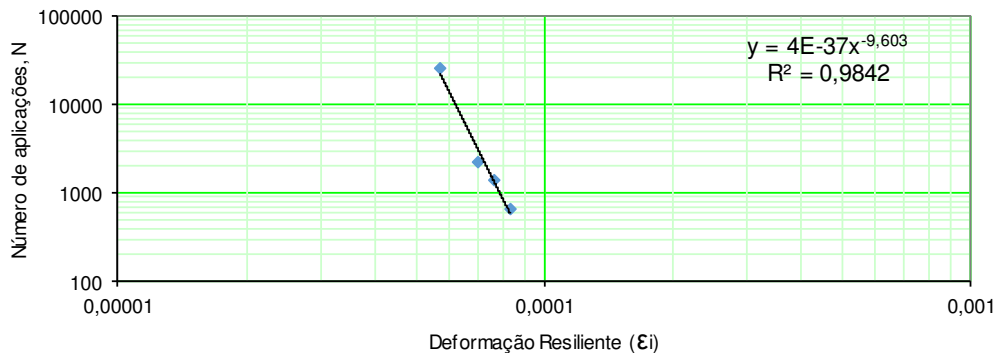
Carga máxima de ruptura,  $F_{Tmax}$ : 12633,08 N

Número do corpo de prova	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensão (%)	Carga aplicada (N)	Diferença de tensões (MPa)	Def. específica resiliente ( $\epsilon_i$ )	Número de aplicações
I	6,57	10,00	38%	4800,57	1,8606624	8,33424E-05	646
II	6,56	10,00	35%	4421,58	1,7163805	7,67627E-05	1431
III	6,52	10,00	32%	4042,59	1,5788895	7,01831E-05	2286
IV	6,55	10,00	26%	3284,6	1,2769721	5,70237E-05	25346

VIDA DE FADIGA x DIFERENÇA DE TENSÕES



VIDA DE FADIGA x DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA RESILIENTE



## ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Amostra: CAP + 1% ÓLEO DE GIRASSOL

Temperatura de ensaio: 25 °C

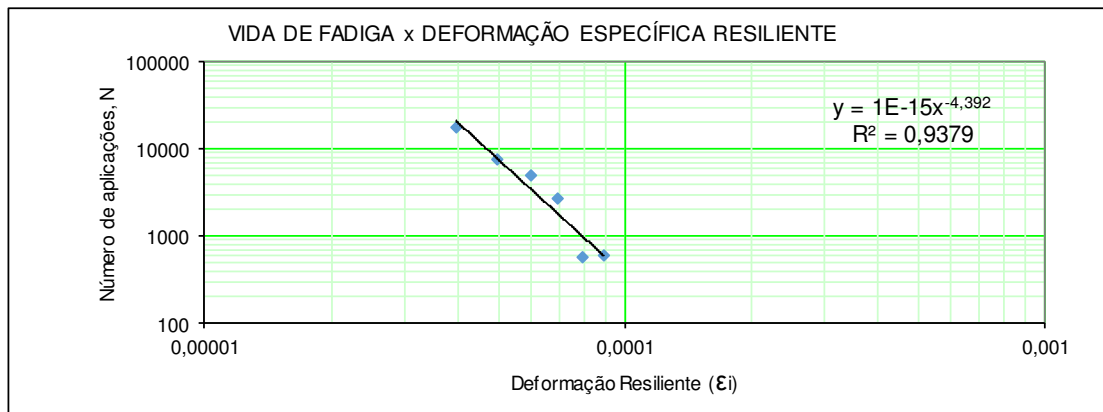
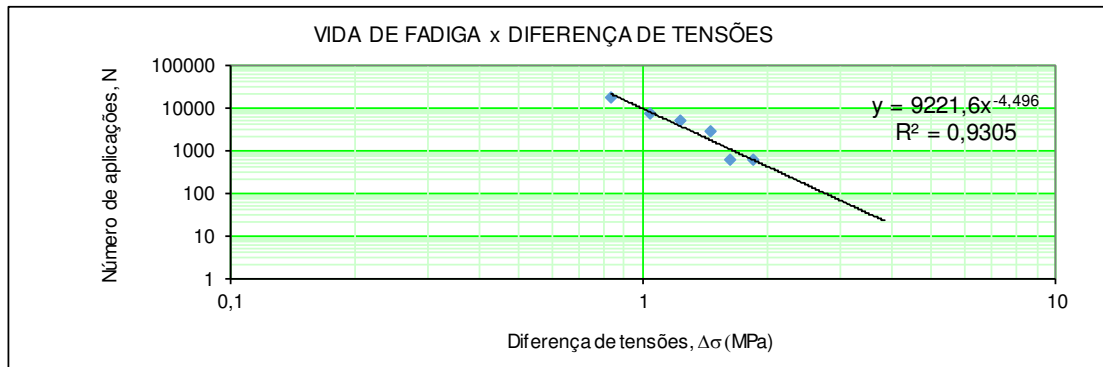
Operador(es): Jeovanesa Régis Carvalho

Módulo resiliente da amostra: 5335 MPa

Tensão de tração estática máxima,  $\sigma_{Tmax}$ : 1,06 MPa

Carga máxima de ruptura,  $F_{Tmax}$ : 10645,86 N

Número do corpo de prova	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensão (%)	Carga aplicada (N)	Diferença de tensões (MPa)	Def. específica resiliente ( $\epsilon_i$ )	Número de aplicações
I	6,63	10,00	45%	4790,64	1,8400086	8,94096E-05	611
II	6,67	10,00	40%	4258,34	1,6257547	7,94752E-05	586
III	6,53	10,00	35%	3726,05	1,4530338	6,95408E-05	2651
IV	6,58	10,00	30%	3193,76	1,2359936	5,96064E-05	4941
V	6,53	10,00	25%	2661,47	1,0378813	4,9672E-05	7441
VI	6,50	10,00	20%	2129,17	0,8341372	3,97376E-05	17566



## ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Amostra: CAP + 2% ÓLEO DE GIRASSOL

Temperatura de ensaio: 25 °C

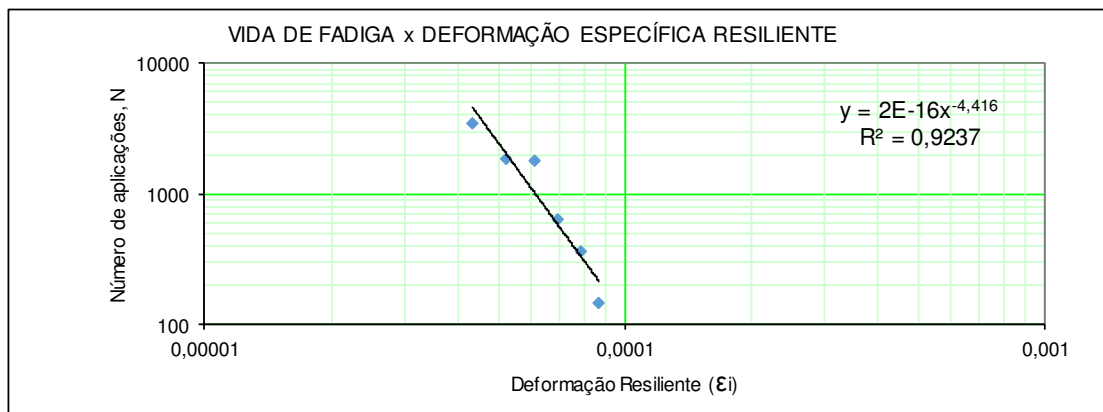
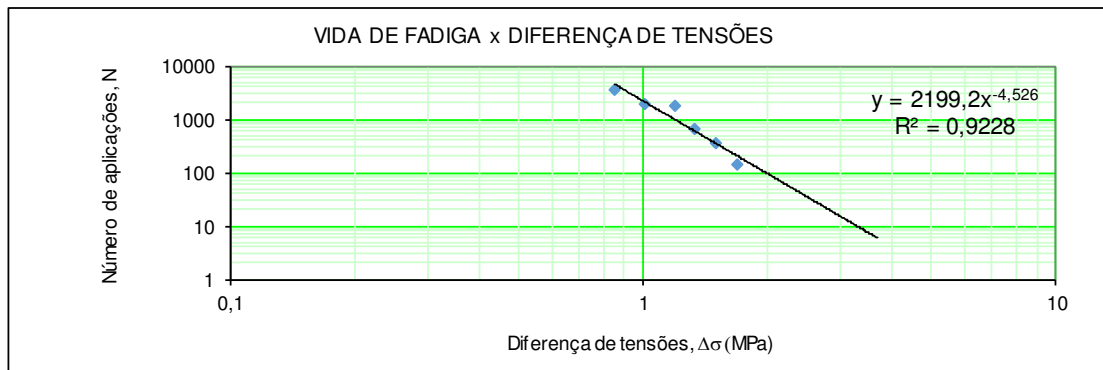
Operador(es): Jeovanesa Régis Carvalho

Módulo resiliente da amostra: 4824 MPa

Tensão de tração estática máxima,  $\sigma_{Tmax}$ : 0,84 MPa

Carga máxima de ruptura,  $F_{Tmax}$ : 8807,03 N

Número do corpo de prova	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensão (%)	Carga aplicada (N)	Diferença de tensões (MPa)	Def. específica resiliente ( $\epsilon_i$ )	Número de aplicações
I	6,63	10,00	50%	4403,52	1,6913211	8,70647E-05	146
II	6,73	10,00	45%	3963,16	1,499571	7,83582E-05	366
III	6,72	10,00	40%	3522,81	1,3349356	6,96517E-05	631
IV	6,57	10,00	35%	3082,46	1,1947369	6,09453E-05	1786
V	6,66	10,00	30%	2642,11	1,0102215	5,22388E-05	1856
VI	6,55	10,00	25%	2201,76	0,8559892	4,35323E-05	3501



## ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Amostra: CAP + 3% ÓLEO DE GIRASSOL

Temperatura de ensaio: 25 °C

Operador(es): Jeovanesa Régis Carvalho

Módulo resiliente da amostra: 3083,0 MPa

Tensão de tração estática máxima,  $\sigma_{Tmax}$ : 0,69 MPa

Carga máxima de ruptura,  $F_{Tmax}$ : 7064,98 N

Número do corpo de prova	Espessura (cm)	Diâmetro (cm)	Nível de tensão (%)	Carga aplicada (N)	Diferença de tensões (MPa)	Def. específica resiliente ( $\epsilon_i$ )	Número de aplicações
I	6,62	10,00	55%	3885,74	1,4947059	0,000123094	311
II	6,55	9,98	50%	3532,49	1,3760975	0,000111904	626
III	6,55	10,05	45%	3179,24	1,2298615	0,000100714	801
IV	6,81	10,00	40%	2825,99	1,0567297	8,95232E-05	796
V	6,72	10,03	35%	2472,74	0,9342194	7,83328E-05	986
VI	6,60	10,00	30%	2119,49	0,8177647	6,71424E-05	2331

