

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 GEOTÉCNICA

UTILIZAÇÃO DO ÓLEO DE CANOLA PARA REDUÇÃO DAS
TEMPERATURAS DE USINAGEM E COMPACTAÇÃO DE
MISTURAS ASFÁLTICAS

Thamires Dantas Guerra

Dissertação sujeita ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como componente dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental

Campina Grande – Paraíba

28 de Fevereiro de 2019

**UTILIZAÇÃO DO ÓLEO DE CANOLA PARA REDUÇÃO DAS
TEMPERATURAS DE USINAGEM E COMPACTAÇÃO DE
MISTURAS ASFÁLTICAS**

Thamires Dantas Guerra

Dissertação sujeita ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, como componente dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental

Área de Concentração – Geotécnica

Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena
Orientador

Campina Grande – Paraíba
28 de Fevereiro de 2019

S237a

Guerra, Thamires Dantas.

Utilização do óleo de canola para redução das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas / Thamires Dantas Guerra. – Campina Grande, 2019.

86 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2019.

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

Referências.

1. Misturas asfálticas mornas. 2. Ligante asfáltico. 3. Óleo de canola. 4. Propriedades mecânicas. I. Lucena, Adriano Elísio de Figueiredo Lopes. II. Título.

CDU 625.85(043)

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autora: Thamires Dantas Guerra

**Título: UTILIZAÇÃO DO ÓLEO DE CANOLA PARA REDUÇÃO DA
TEMPERATURA DE USINAGEM E COMPACTAÇÃO DE MISTURAS
ASFÁLTICAS**

Dissertação defendida e aprovada em: 28/02/2019

Pela Banca Examinadora



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



Profa. Dsc. Leda Christiane Figueiredo de Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
(Avaliador Interno)



Prof. Dsc. Glicério Trichês
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC
(Avaliador Externo)

“O Senhor é a minha força e o meu escudo;
nele o meu coração confia, e dele recebo
ajuda. Meu coração exulta de alegria, e com o
meu cântico lhe darei graças.”

(Salmos 28:7)

DEDICATÓRIA

A Deus e a meus pais Tomé Guerra (*in memorian*)
e Sandra Lourenço, por todo incentivo, apoio e
amor.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

A meus pais Tomé Guerra (in memorian) e Sandra Lourenço meus maiores incentivadores, que dedicaram suas vidas a mim e a minha irmã nos dando muito mais que amor, carinho e educação, sendo eles nossos maiores exemplos de superação, força, honestidade e amor de Deus. Obrigada por todos os ensinamentos, sem os senhores nada disso seria possível. Faltam-me palavras para descrever o orgulho e o amor que sinto por ser filha de vocês.

A Thallyne Guerra, minha irmã, pela sua amizade, companheirismo e pelos abraços e colos nos momentos em que mais precisei. Você é essencial em minha vida, te amo.

A Igor Cartaxo, por ser muito mais que namorado, meu amigo, por sempre acreditar em mim, me fazer persistir em busca dos meus sonhos e sempre sonhá-los comigo. Amo você. Obrigada por estar sempre ao meu lado, por vibrar comigo, me consolar nos momentos difíceis, por todo o carinho e amor.

Aos meus avós Valdemar Lourenço (in memorian), Chiquinha, Maria Guerra e Renato (in memorian) por todas as oportunidades concedidas aos meus pais para que hoje eu conseguisse me tornar Mestre em Engenharia Civil, por todos os conselhos, carinho e principalmente amor que os senhores me deram.

Aos meus tios Higineto (in memorian), Valdemarks (in memorian), Louro, Suely, Valdivan, por todo amor, apoio e incentivo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Adriano Elísio, pela orientação do meu trabalho, por todo conhecimento transmitido, por sua dedicação e paciência, sem seu apoio e conhecimento o caminho teria sido muito mais árduo.

Aos Professores Izabelle Marie, Ana Maria, Leda e Kennedy pela amizade, apoio incentivo e conhecimento compartilhado. Muito Obrigada.

Aos amigos do LEP, Tássila, Daniel, Gabryelle, Chistian, Jeovanesa, Wlysses, Priscila, Valter, Jonny, Paulo, Marcela, Helton, Joseildo, Jadilson, Artur e Ladijane. Obrigada por todo apoio e incentivo e principalmente a amizade de vocês.

A minhas amigas Vanessa e Laíse pelo apoio e companheirismo.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA), pela oportunidade e disponibilidade.

Ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), por fornecer todos os meios para a realização da minha pesquisa.

Ao CNPq pela bolsa fornecida, possibilitando seguir em frente em minha vida acadêmica.

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

Obrigada!

RESUMO

Nos últimos anos diversas técnicas foram desenvolvidas com o intuito de reduzir as temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas convencionais promovendo a redução das emissões de poluentes e do consumo energético. Dentro deste contexto surgiram as Misturas Asfálticas Mornas (MAMs). Estas misturas são formadas por agregados e cimento asfáltico de petróleo (CAP) modificados por aditivos químicos, orgânicos ou asfáltico espumado, promovendo uma redução nas temperaturas e melhoramento na qualidade de vida dos trabalhadores durante a execução dos revestimentos flexíveis. Este trabalho teve como objetivo estudar as propriedades físicas e mecânicas de misturas asfálticas com ligante modificado pela adição do óleo de canola. A escolha do óleo de canola como aditivo modificador da viscosidade e consequente diminuição das temperaturas de trabalho das misturas foi devido ao seu baixo custo e grande disponibilidade no mercado. Foram testadas amostras de CAP convencional e modificado com a adição de 1,0, 2,0 e 3,0% de óleo de canola em peso do ligante. A pesquisa foi dividida em três etapas: a primeira consistiu na caracterização física dos ligantes antes e após o procedimento de Rolling Thin-Film Oven (RTFO), na segunda etapa foi realizada a dosagem das misturas pela metodologia SUPERforming asphalt PAVements (SUPERPAVE) obtendo-se teor ótimo de ligante de 5,1%. Na terceira etapa foi realizada a caracterização mecânica das misturas asfálticas com a realização dos ensaios de: Flow Number, Lottman Modificado, Módulo de Resiliência, Módulo Dinâmico, Resistência à Tração e Vida de Fadiga. De modo geral todas as amostras com óleo de canola obtiveram resultados mecânicos dentro dos parâmetros exigidos pelas normas brasileiras. A partir dos resultados obtidos verificou-se que as misturas asfálticas com óleo de canola reduzem as temperaturas de usinagem e compactação em até 6 °C. Porém esta redução não possibilita a classificação do ligante modificado em uma típica MAM. Concluiu-se que devido a diminuição da vida de fadiga e a redução de cerca de 50% do flow number em relação a mistura de referência não é possível indicar o uso do ligante asfáltico com óleo de canola. Entretanto as misturas asfálticas com óleo apresentaram aspectos positivos, aumentado a resistência a ação deletéria da água.

Palavras chaves: Misturas Asfálticas Mornas, Ligante Asfáltico, Óleo de Canola, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

In recent years, several techniques have been developed in order to reduce mixing and compacting temperatures of conventional asphalt mixtures, which cut pollutant emissions and energy consumption. In this scenario, the warm mix asphalt (WMA) has been developed, which refers to mixtures composed of aggregates and asphalt binder modified by additives either of chemical or organic nature, or foamed asphalt, leading to drops in the production temperatures and improving the workers' health safety during paving execution. This study has as objective to assess the physical and mechanical properties of asphalt mixtures composed of asphalt binder modified by the canola oil addition. The canola oil was used as a viscosity-modifier additive due to its low cost and great availability in the market. Samples of pure binder and binder modified with 1.0; 2.0 and 3.0% canola oil were tested. The research was divided into three stages: the first stage remarks the physical characterization of the asphalt binders before and after the Rolling Thin-Film Oven (RTFO) procedure; the second step concerns the design of the mixtures performed following the SUPERior PERforming Asphalt PAVements (SUPERPAVE) methodology, obtaining an optimal binder content of 5.1 %; at last, the mechanical characterization of the asphalt mixtures was carried out by performing the following tests: Flow Number, Modified Lottman, Resilience Modulus, Dynamic Modulus, Indirect Tensile Strength and Fatigue Life. In general, all samples with canola oil achieve mechanical results within the parameters established by the current requirement. The results show that the canola addition in the asphalt mixtures reduces the mixing and compacting temperatures up to 6 °C, yet this reduction does not allow the classification of the modified binder as a WMA. It is impossible to reduce the possibility of a classification of the modified binder in a typical MAM. It was concluded that due to the decrease in the fatigue life and the reduction of about 50% of the flow number in relation to the reference mixture it is not possible to indicate the use of the asphalt binder with canola oil. However, asphaltic mixtures with oil presented positive aspects, increasing the resistance to the deleterious action of water.

Keywords: warm mix asphalt, asphalt binder, canola oil, mechanical properties

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 19

1.0 INTRODUÇÃO..... 19

1.1 OBJETIVOS 20

1.1.1 OBJETIVO GERAL 20

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 20

1.2 JUSTIFICATIVA..... 21

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 21

CAPÍTULO 2..... 23

2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 23

2.1 MISTURAS ASFÁLTICAS 23

2.2 MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS..... 25

2.2.1 HISTÓRICO..... 25

2.2.4 CLASSIFICAÇÃO DAS MISTURAS MORNAS 29

2.2.4.1 Asfalto espumado..... 29

2.2.4.2 Aditivos surfactantes (aditivos químicos)..... 33

2.2.4.3 Aditivos Orgânicos..... 35

2.3 CANOLA 37

2.3.1 CANOLA NA PARAÍBA 38

2.3.2 ÓLEO DE CANOLA 39

2.3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... 40

CAPÍTULO 3..... 41

3.0 MATERIAIS E MÉTODOS..... 41

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS 42

3.1.1 LIGANTE ASFÁLTICO..... 42

3.1.2 AGREGADO GRAÚDO 43

3.1.3 AGREGADO MIÚDO 43

3.1.4 FÍLER 43

3.1.5	ÓLEO DE CANOLA.....	43
3.2	PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS MATERIAIS.....	43
3.2.1	AGREGADOS.....	44
3.2.1.1	Granulometria.....	44
3.2.1.2	Absorção e massa específica dos agregados.....	45
3.2.1.3	Equivalente areia.....	46
3.2.1.4	Abrasão Los Angeles.....	46
3.2.2	LIGANTE ASFÁLTICO.....	46
3.2.2.1	Mistura do CAP com óleo.....	47
3.2.3	ANÁLISE DO LIGANTE COM E SEM ADIÇÃO DO ÓLEO DE CANOLA POR MEIO DE FTIR....	47
3.2.4	DOSAGEM SUPERPAVE.....	48
3.2.5	PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	52
<u>CAPÍTULO 4.....</u>		<u>54</u>
4.0	<u>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</u>	<u>54</u>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO.....	54
4.1.1	RESULTADOS DO ENSAIO DE PENETRAÇÃO.....	54
4.1.2	RESULTADOS DO ENSAIO DE PONTO DE AMOLECIMENTO.....	55
4.1.3	RESULTADOS DO ENSAIO DE VISCOSIDADE ROTACIONAL.....	57
4.1.4	RESULTADOS DA PERDA DE MASSA.....	59
4.1.5	RESULTADO DA ANÁLISE QUÍMICA DE LIGANTES MODIFICADOS POR MEIO DE FTIR.....	60
4.1	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	64
4.1.1	RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RT)	64
4.1.2	RESULTADOS DO ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	65
4.1.3	RESULTADOS DO ENSAIO DE DANO POR UMIDADE INDUZIDA – LOTTMAN MODIFICADO	67
4.1.4	RESULTADOS DO ENSAIO DE VIDA DE FADIGA.....	69
4.1.5	RESULTADOS DO ENSAIO DE <i>FLOW NUMBER</i>	72
4.1.6	RESULTADOS DO ENSAIO DE MÓDULO DINÂMICO.....	73
<u>CAPÍTULO 5.....</u>		<u>77</u>
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</u>		<u>79</u>

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Histórico do uso de misturas asfálticas mornas	25
Quadro 2 -Histórico das pesquisas de misturas asfálticas mornas realizadas no LEP - UFCG	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de densidade dos diferentes óleos vegetais à temperatura ambiente (± 1 °C).	37
Tabela 2: Valores de viscosidade medidos para os diferentes óleos vegetais em função da temperatura.	37
Tabela 3 - Caracterização do CAP	42
Tabela 4 - Ensaio dos agregados e especificações	44
Tabela 5 - Quantidade passante acumulada.....	45
Tabela 6 - Resultados do ensaio de massa específica e absorção dos agregados graúdos e miúdos	45
Tabela 7 - Resultado do ensaio de equivalente de areia	46
Tabela 8 - Normas dos ensaios de caracterização física do ligante.....	46
Tabela 9 - Proporções dos agregados nas granulometrias (%).....	49
Tabela 10 - Resumo da compactação das misturas asfálticas	51
Tabela 11 - Critérios volumétricos para cada teor de ligante	51
Tabela 12 - Resumo dos parâmetros volumétricos para o teor de CAP de 5,10%.....	52
Tabela 13 - Ensaio mecânicos e suas metodologias	53
Tabela 14: Penetração retida.....	55
Tabela 15 - Aumento de temperatura após o RTFO.....	56
Tabela 16 - Resultados do ensaio de viscosidade rotacional antes do RTFOT.....	57
Tabela 17 - Resultados do ensaio de viscosidade rotacional após o RTFOT.....	57
Tabela 18 - Temperaturas de Usinagem e Compactação	59
Tabela 19 - Bandas de infravermelho características de um ligante asfáltico.....	60
Tabela 20 - Oxidação das amostras de ligante com e sem o óleo de canola antes e após o envelhecimento no RTFO.....	63
Tabela 21 - 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.....	63
Tabela 22 - Resultado do ensaio de Módulo de Resiliência (MR).....	66
Tabela 23 - Resultados do ensaio de Lottman Modificado	67
Tabela 24 - Modelo de fadiga em função da diferença	69
Tabela 25 - Variação da vida de fadiga com o nível de diferença de tensões aplicado. 70	
Tabela 26 - Modelo de fadiga em função da deformação resiliente específica.....	71

Tabela 27 - Variação da vida de fadiga com o nível de deformação resiliente.....	72
Tabela 28 - Valores mínimos de <i>Flow Number</i> para diferentes níveis de tráfegos.....	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação das misturas asfálticas em função das temperaturas de usinagem.	24
Figura 2 - Processo de formação de asfalto espuma.....	29
Figura 3 - Estrutura de uma Zeólita.....	30
Figura 4 - Zeólitas comerciais, comumente utilizadas como aditivos para ligantes asfálticos: Advera® e Aspha-Min®, respectivamente.	31
Figura 5 - Esquema de produção e aplicação WMA-Foam®	33
Figura 6 - CCBIt 13AD	35
Figura 7- Sasobit, em flocos e pastilha, respectivamente.....	36
Figura 8 - Mapa de localização do experimento. Areia, PB.....	39
Figura 9 – Etapas da pesquisa.....	41
Figura 10 - (a) Brita 19mm, (b) Brita 9,5mm.....	43
Figura 11 – Granulometria da areia e do pó de pedra	44
Figura 12 - Curva granulométrica dos agregados.....	45
Figura 13 - Fluxograma da Dosagem Superpave	48
Figura 14 - Curva de Fuller – Composição granulométrica superior, intermediária e inferior.....	49
Figura 15 - Compactador Giratório Superpave (CGS).....	50
Figura 16- Equipamento para RICE TEST	50
Figura 17 - Determinação do teor de projeto.....	52
Figura 18 – Caracterização Mecânica da Mistura Asfáltica.....	53
Figura 19 - Ensaio de penetração antes e após o RTFO.....	54
Figura 20 - Resultados do ensaio de Ponto de Amolecimento	56
Figura 21 - Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional antes o RTFOT.....	58
Figura 22 - Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional após o RTFOT	58
Figura 23 - Resultados da perda de massa após o ensaio RTFO.....	60
Figura 24 - FTIR do ligante puro e modificado com o óleo de canola (a) antes e (b) após o RTFO.....	62
Figura 25 - Resultados do ensaio de RT.....	64
Figura 26 - Resultados do ensaio de MR.....	66
Figura 27 - Resultados da Relação da Resistência Retida à Tração	68
Figura 28 - Gráfico dos modelos de fadiga em função da diferença de tensões.	70

Figura 29 - Gráfico dos modelos de fadiga em função da deformação resiliente específica.	71
Figura 30 - Resultados do ensaio de <i>Flow Number</i>	72
Figura 31 - Curvas mestras de todas as misturas asfálticas avaliadas.....	74
Figura 32 - Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (4,4°C).....	75
Figura 33 - Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (21,1°C).....	75
Figura 34 - Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (37,8°C).....	76

LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO - *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANP – Agência Nacional de Petróleo

ASTM – *American Society for Testing Materials*

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CGS – Compactador Giratório SUPERPAVE

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento

DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

FHWA – *Federal Highway Administration*

FN – *Flow Number*

FTIR- Fourier Tranformed Infra Red

G_{mm} – Densidade Máxima da Mistura

HMA - Hot mix asphalt

HWMA– Half - warm mix asphalt

LAM/UFCG – Departamento de Engenharia de Materiais Avançados da Universidade Federal de Campina Grande

LEP/UFCG – Laboratório de Engenharia de Pavimentos da Universidade Federal de Campina Grande

MAMs – Misturas Asfálticas Mornas

ME – Método de Ensaio

MR – Módulo de Resiliência

N – Vida de Fadiga

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

N_{projeto} – Número de Giros de Projeto

P_{ag} – Percentual de Agregado na Mistura

PB – Paraíba

RBV – Relação Betume x Vazios

RRT – Resistência Retida à Tração

RT – Resistência à Tração por Compressão Diametral

RTFOT – *Rolling Thin Film Oven Test*

SUPERPAVE – Superior Performing Pavements

TC – Temperatura de Compactação

TMN – Tamanho Máximo Nominal

TU – Temperatura de Usinagem

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_v – Volume de Vazios

WMA – *Warm Mix Asphalt*

1.0 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos é notória a inquietação acerca dos problemas enfrentados pelo meio ambiente, tendo em vista o elevado crescimento populacional e consequente impacto que o mesmo vem sofrendo. Em 1997 com o Protocolo de Kyoto vários países buscam atividades que minimizem as emissões de gases do efeito estufa, uma vez que se acredita que estes elementos sejam os grandes responsáveis pelo aquecimento global (FEITOSA, 2015).

Além do elevado número de veículos, o setor rodoviário também contribui para o efeito estufa por meio dos gases liberados durante os processos de usinagem e compactação das misturas asfálticas.

Os pavimentos asfálticos podem ser produzidos de duas maneiras: mistura asfáltica fria, fabricadas na temperatura ambiente e as quente, com temperatura em torno de 150-175°C. No tocante a resistência do revestimento asfáltico, as Misturas Asfálticas Quente ou Hot Mix Asphalt (HMA) são superiores e, geralmente, utilizadas como revestimento de rodovias que se espera um elevado tráfego de veículos. Enquanto as misturas a frio são utilizadas nas rodovias com menor tráfego de veículos e sua principal aplicação está em operações de recapeamento, conservação e manutenção de estradas (RUBIO *et al.*, 2013; MORAES, 2018).

Em busca do desenvolvimento sustentável, a indústria da pavimentação vem buscando novas tecnologias com intuito de contribuir com a redução da emissão de gases provenientes do aquecimento do cimento asfáltico de petróleo (CAP). A Europa desenvolveu a tecnologia de misturas asfálticas mornas (MAM), permitindo a redução da temperatura de usinagem e aplicação da massa asfáltica, entre 20° e 50°C em comparação à mistura à quente, colaborando para menor emissão de gases causadores do efeito estufa (PROWELL *et al.*, 2012; MERIGHI, 2015).

O emprego das MAMs vem crescendo nos últimos anos devido às maiores exigências em relação ao desenvolvimento sustentável e na preservação das condições de segurança, meio ambiente e saúde (SMS) (CERATTI *et. al.*, 2015). Produzidas a uma temperatura mais baixa do que as HMA, as MAMs atuam reduzindo a viscosidade do ligante asfáltico, por consequência o consumo de combustível para usinagem das misturas e possivelmente os custos de produção. As MAMs podem ser obtidas por meio de modificadores como óleos naturais ou sintéticos, parafinas e cera, possibilitando melhorias no ambiente de trabalho devido à redução de poluentes, além de atuar como agente rejuvenescedor tornando o ligante asfáltico mais flexível e resistente a trincas por fadiga (PALÁCIO E MAQUILÓN, 2013, SILVA, 2016).

O aditivo utilizado nesta pesquisa, óleo de canola, pode ser considerado um produto promissor na fabricação de MAMs, devido a demanda mundial de óleos vegetais. Mediante as diversas oleaginosas existentes, o óleo de canola está entre as três oleaginosas mais produzidas e consumidas no mundo, ficando atrás apenas do óleo de palma e de soja (USDA, 2016). Portanto, esta pesquisa propõe o uso do óleo de canola para a diminuição das temperaturas das misturas asfálticas reduzindo os danos causados ao meio ambiente além de buscar melhorias no revestimento dos pavimentos flexíveis.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar as propriedades físicas e mecânicas de misturas asfálticas modificadas pela adição do óleo de canola.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Verificar a influência das variações dos teores do óleo de canola nos tempos de envelhecimento do ligante, nas temperaturas de compactação e nos possíveis ganhos às propriedades mecânicas da mistura;
- Comparar o comportamento mecânico das misturas asfálticas com a adição do óleo de canola nos teores de 1%, 2% e 3 % com os valores de referência de mistura convencional;

- Propor a utilização de um aditivo orgânico em substituição de aditivos industrializados na fabricação das misturas asfálticas mornas, contribuindo assim para o desenvolvimento sustentável.

1.2 Justificativa

A preocupação com o desenvolvimento sustentável tem levado a busca por tecnologias que minimizem os impactos causados ao meio ambiente sem que haja comprometimento da qualidade, durabilidade, economia e segurança. No que diz respeito à pavimentação, já foi cientificamente comprovado que a adição de agentes oleicos ao ligante asfáltico é uma alternativa que reduz a viscosidade durante as operações de usinagem e compactação da mistura asfáltica, melhorando sua trabalhabilidade. Por outro lado, os óleos reduzem a consistência do ligante asfáltico, à temperatura ambiente, podendo prejudicar a qualidade e o desempenho das misturas asfálticas, dependendo da proporção utilizada (LUCENA,2016).

O cultivo de canola em escala comercial no Brasil iniciou em 1974 no Rio Grande do Sul. Esta cultura é de grande valor socioeconômico devido a sua elevada concentração de óleo nos grãos (cerca de 38%) proporcionando a produção de biodiesel e óleos vegetais no inverno, somando com a produção de soja no verão, contribuindo assim para otimizar os meios de produção disponíveis. Este óleo é um dos mais consumidos no mundo. Têm como características principais ser: insípido, inodoro, pobre em gorduras saturadas e ricos em gorduras monoinsaturadas (TOMM, 2009).

Considerando-se a elevada demanda que o Brasil possui para pavimentação de rodovias, e que o óleo de canola é um material de fácil acesso e do seu baixo custo, esta pesquisa tem como objetivo avaliar o seu potencial na fabricação de misturas asfálticas mornas.

1.3 Organização do Trabalho

Esta dissertação é composta por cinco capítulos, dispostos da seguinte maneira:

Capítulo 1 – abrange a introdução da pesquisa, objetivos (geral e específicos), e a organização da dissertação;

Capítulo 2 – aborda uma revisão de literatura na qual são pontuados os assuntos como: ligantes asfálticos convencional e modificados, misturas mornas e suas classificações, emissão de poluentes e aditivos como o óleo de canola;

Capítulo 3 – São descritos os materiais e métodos utilizados na pesquisa, bem como os procedimentos experimentais utilizados durante o desenvolvimento desta dissertação.

Capítulo 4 – expõe os resultados obtidos, bem como a análise e avaliação segundo os parâmetros normativos e da literatura atual;

Capítulo 5 – Apresenta as conclusões obtidas a partir dos resultados e análise, além de sugestões para trabalhos futuros. Dispõe ainda de sugestões para trabalhos futuros;

No final estão inseridas as referências bibliográficas.

2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Misturas asfálticas

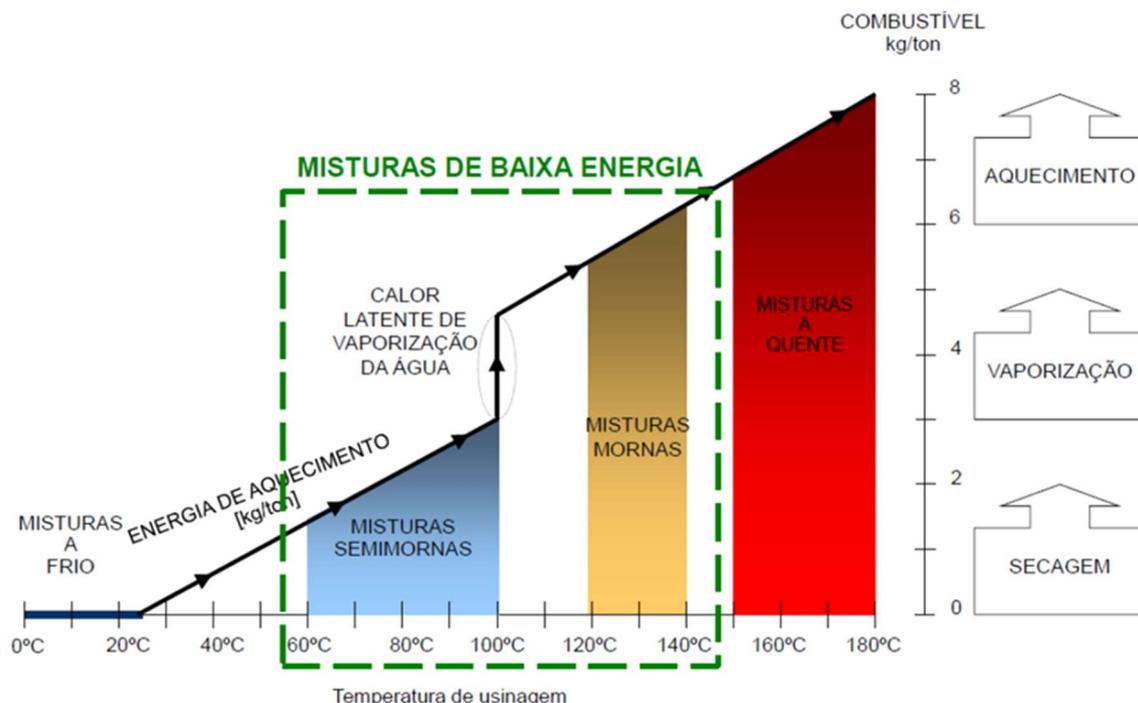
As rodovias brasileiras vêm apresentando um crescimento progressivo no seu tráfego de veículos desde 2001, e com isso a necessidade de suportar esforços mais constantes e cada vez mais intensos. O pavimento possui algumas camadas (subleito, sub-base, base e revestimento) que são projetadas para suportar os esforços oriundos do tráfego (BERNUCCI *et al.*, 2008)

A maioria dos pavimentos brasileiros tem como revestimento ou camada de rolamento misturas de agregados minerais e ligantes asfálticos com graduações e características próprias. Este quando dosada e processada corretamente, garante ao serviço impermeabilidade, estabilidade, flexibilidade, durabilidade, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previstos para o local (CERATTI *et al.*, 2015).

Atualmente as misturas asfálticas podem ser classificadas de acordo com as temperatura usinagem, subdividindo em quatro grupos: misturas frias (temperatura ambiente); semimornas (HWMA) mornas (WMA) e quentes (HMA) (Figura 1) (D'ANGELO *et al.*, 2008; RUBIO *et al.*, 2013).

Dentre os citados, o mais utilizado no Brasil é o concreto asfáltico (CA) também denominado concreto betuminoso usinado à quente (CBUQ). Durante o seu processo de fabricação, tanto os agregados quanto o ligante devem ser aquecido a temperaturas em torno de 150°C a 200°C, com intuito que o ligante possua viscosidade capaz de produzir uma mistura homogênea encobrendo todos os agregados, requerendo um alto consumo de energia (SALES, 2015).

Figura 1 - Classificação das misturas asfálticas em função das temperaturas de usinagem.



Fonte: D'angelo, 2008a – Adaptado CCR Nova Dutra

As misturas à frio são fabricadas em temperatura ambiente (entre 20 e 50°C), normalmente com o uso de emulsões e sem a necessidade de aquecer os agregados, mas usufruem de resistência e durabilidade inferiores às misturas a quente.

As misturas mornas e as semimornas são industrializadas e aplicadas com temperaturas intermediárias às das misturas à quente e à frio, diferenciando-se pelo tipo método utilizado e pela temperatura de compactação que nas semimornas é inferior a 100 °C e nas mornas superior a esta temperatura.

A energia consumida durante o processo de usinagem das misturas asfálticas varia de acordo o aquecimento das mesmas como demonstra a Figura 1. Nesta figura são expostas as misturas asfálticas em função da indicação do consumo de combustível em cada caso. Ainda de acordo com a Figura 1, para uma mistura morna com uma temperatura de mistura de 132°C o consumo de combustível seria de 6,0 Kg/ton, ao mesmo tempo que para uma mistura à quente que apresente uma temperatura de mistura de aproximadamente 155°C o consumo de combustível seria de aproximadamente 7,0 Kg/ton. Logo, a mistura morna proporcionaria uma economia de combustível de 1,0 Kg/ton (CARVALHO, 2018).

2.2 Misturas Asfálticas Mornas

As Misturas Asfálticas Mornas (MAM) ou Warm Mix Asphalts (WMA), surgiram na década de 90, impulsionada pelo protocolo Kyoto, com o intuito construir pavimentos asfálticos ambientalmente sustentáveis, reduzindo o consumo de combustível, emissões de poluentes, e assim, proporcionar melhorias na qualidade ambiental e menores custos de produção (COSTA E BENTA, 2016; D'ANGELO *et al.*, 2008)

As MAM agrupam uma série de tecnologias reduzindo a viscosidade em temperaturas de 20 a 55°C mais baixas que a temperatura das misturas convencionais. Desta forma, há melhoria na trabalhabilidade nos processos de usinagem e compactação, diminuição da permeabilidade e do endurecimento do ligante e conseqüente melhoria no desempenho em termos de resistência a formação de trincas (FEITOSA, 2015; OLIVEIRA, 2014).

Existem várias metodologias possíveis (descritas no item 2.2.4) para a produção de misturas asfálticas mornas podendo haver modificação tanto no processo produtivo como no ligante asfáltico utilizado. As principais são aquelas que usam água e as que utilizam algum tipo de aditivo orgânico ou cera para reduzir as temperaturas. Mesmo que estas tecnologias sejam bem diferentes, todas têm como alvo os mesmos objetivos, reduzir viscosidade do ligante, melhorar a trabalhabilidade, e reduzir a emissão de gases. Cada uma deve ser analisada de acordo com a viabilidade e eficácia de sua utilização.

2.2.1 Histórico

O Quadro 1 apresenta o histórico em cronologia anual de alguns acontecimentos relacionados à utilização e estudo das misturas mornas até o ano de 2015. O Quadro 2 exhibe algumas pesquisas sobre MAM realizadas no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) – UFCG.

Quadro 1 - Histórico do uso de misturas asfálticas mornas

Ano	Histórico
1956	O professor Csanvi, da Universidade do Iowa, estuda a utilização da espuma de betume em ligantes para solos (CHOWDHURY e BUTTON, 2008).
1968	A empresa Mobil Oil, na Austrália, incorpora água fria no lugar de vapor de água na produção da espuma de betume (KRISTJANSDOTTIR <i>et al.</i> , 2007).

1977	Publicação do manual <i>Bituminous Mix</i> , com informações sobre a metodologia de dimensionamento, a formulação e a produção de misturas betuminosas estabilizadas com emulsões (CHOWDHURY e BUTTON, 2008).
1979 e 1981	A <i>Federal Highway Administration</i> (FHWA) e a <i>Asphalt Emulsion Manufacturers Association</i> (AEMA) publicam manuais sobre o assunto (CHOWDHURY e BUTTON, 2008).
1994	Maccarone <i>et al.</i> (1994) estudam as misturas betuminosas (asfálticas) a frio com betume espuma como ligante, e as misturas betuminosas com elevado conteúdo de emulsão (CHOWDHURY e BUTTON, 2008).
1995	A empresa Shell patenteia uma técnica que utiliza dois componentes, a qual resultaria anos mais tarde no desenvolvimento da tecnologia <i>WAM-Foam</i> (CHOWDHURY e BUTTON, 2008).
1995	Na Alemanha, são executadas as primeiras rodovias com revestimento composto por mistura morna, através da adição de Aspha-Min®, um zeólito sintético. Posteriormente esta tecnologia é aplicada também na Noruega e na Dinamarca (PROWELL e HURLEY, 2007).
1996	A União Européia inicia estudos no sentido de buscar formas para o cumprimento das metas estabelecidas pelo Protocolo de Kyoto, e o Ministério do Trabalho e das Relações Sociais alemão determina limites de exposição para os trabalhadores expostos a fumos de asfalto (MOTTA, 2011).
1997	Tem início a comercialização do aditivo Sasobit® na Europa, pela empresa <i>Sasol Wax International AG</i> (BARTHEL et al., 2004).
1999	Jenkins <i>et al.</i> (1999) verificam os benefícios do aquecimento do agregado a temperaturas abaixo de 100°C, antes da aplicação da espuma de asfalto (CHOWDHURY e BUTTON, 2008).
2000	Em uma Conferência Internacional de Pavimentos Asfálticos em Sidney, Austrália, o processo de produção das misturas mornas é apresentado por Harrison e Christodoulaki (OTTO, 2009). Ainda neste ano, o desempenho da mistura morna é avaliado através de testes laboratoriais e em campo na Noruega, no Reino Unido e na Holanda, resultando em um artigo elaborado por Koenders <i>et al.</i> (2000);
2006	Um dos primeiros trabalhos a respeito de misturas mornas é publicado no Brasil por Souza Filho (2006), através de dissertação de Mestrado deste autor na Universidade Federal do Ceará (UFC), tendo como título “Produção de Misturas Asfálticas Mornas pela Inserção de Zeólitas”;
2007	Os Estados Unidos enviam à Europa uma equipe de especialistas para avaliação da tecnologia de Misturas Mornas já há algum tempo utilizada naquele continente. Entre estes especialistas, representantes da AASHTO e da FHWA se fizeram presentes.
2009	Otto (2009) realiza estudo para verificar a fadiga e o módulo complexo em misturas asfálticas mornas;

2010	Um estudo com diversos aditivos em misturas asfálticas, inclusive àqueles que possibilitam a redução de temperatura de produção e compactação é realizado por Cavalcanti (2010) que avaliou o efeito destes aditivos na vida de fadiga e na resistência à deformação permanente das misturas asfálticas;
2011	O relatório NCHRP 691 (2011) com o objetivo de apresentar métodos e procedimentos a serem utilizados em misturas mornas é concluído. Com base neste relatório novas pesquisas estão sendo realizadas, de modo a difundir a utilização da redução de temperaturas na produção de misturas asfálticas. Motta (2011) elabora um estudo visando avaliar a diminuição do consumo energético e da emissão de poluentes gerados pela mistura morna em comparação com as misturas produzidas a temperaturas convencionais (elevadas);
2012	Budny (2012) realiza estudo para avaliar o comportamento mecânico das misturas mornas.
2013	Filho (2013) realiza um estudo acerca da influência da redução das temperaturas de usinagem e compactação no comportamento mecânico das misturas asfálticas mornas.
2015	Merighi (2015) realiza um estudo do comportamento de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimento com adição de borracha moída de pneu.
2015	Mocelin (2015), Avalia a trabalhabilidade de misturas asfálticas mornas com emprego de aditivo surfactante.
2015	Feitosa (2015) estuda o uso de diferentes tipos de cera de carnaúba como aditivos de misturas mornas.

Fonte: Adaptado de Moraes (2018)

Quadro 2 -Histórico das pesquisas de misturas asfálticas mornas realizadas no LEP - UFCG

2015	Sales (2015) avaliar a utilização do aditivo CCBIt nas misturas asfálticas avaliando as suas características físicas e mecânicas.
2016	Silva (2016) realizou estudos reológicos de aditivos utilizados na fabricação de misturas mornas.
2016	Portugal (2016) realizou estudos reológicos de ligantes asfálticos modificados com óleo de milho e de soja
2017	Luz (2017) avaliou o comportamento mecânico de misturas asfálticas com óleo de milho novo e residual para temperaturas de 10°C e 20°C inferiores as obtidas no ensaio de viscosidade rotacional.
2018	Morares (2018) estudou a utilização da cera de carnaúba como aditivo redutor de temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas
2018	Carvalho (2018) estudou o comportamento do asfalto modificado com óleo de girassol visando à obtenção de misturas mornas
2018	Andrade (2018) estudou o comportamento de misturas asfálticas com óleo de girassol com temperaturas de 10°C e 20°C inferiores as obtidas no ensaio de viscosidade rotacional.

2.2.2 Vantagens das misturas asfálticas mornas

De forma geral as principais vantagens da utilização de misturas mornas em comparação com as misturas convencionais são as seguintes (RUBIO *et al.*2012):

- redução da emissão de agentes nocivos durante o processo de usinagem e compactação, já que a mistura não atinge as temperaturas responsáveis pela maior emissão de gases;
- redução do consumo de combustível devido ao menor consumo de energia necessária para o processo de produção das misturas asfálticas;
- melhores condições de trabalho ocasionado pela ausência de gases prejudiciais;
- habilidade de incorporar maior porcentagem de material reciclado às misturas asfáltica;
- redução do envelhecimento do ligante provocado pelas altas temperaturas.

2.2.3 Desvantagens das misturas asfálticas mornas

De acordo com Budny (2012) pode-se citar algumas desvantagens das MAMs, tais como:

- falta de normatização;
- trincamento precoce, devido as baixas temperaturas não expulsarem toda a água presente na estrutura dos agregados. Assim a umidade residual na interface ligante-agregado prejudica o potencial adesivo do ligante sobre a superfície do agregado. No entanto, esse problema pode ser solucionado com a utilização de um aditivo melhorador de adesividade, visto que a utilização de um aditivo melhorador de adesividade geralmente não sobrepõe a economia de energia proporcionada pela utilização do aditivo de MAMs;
- insuficiência de dados, já que algumas técnicas e produtos que vêm sendo testadas são muito recentes para aprovar ou rejeitar seu uso;

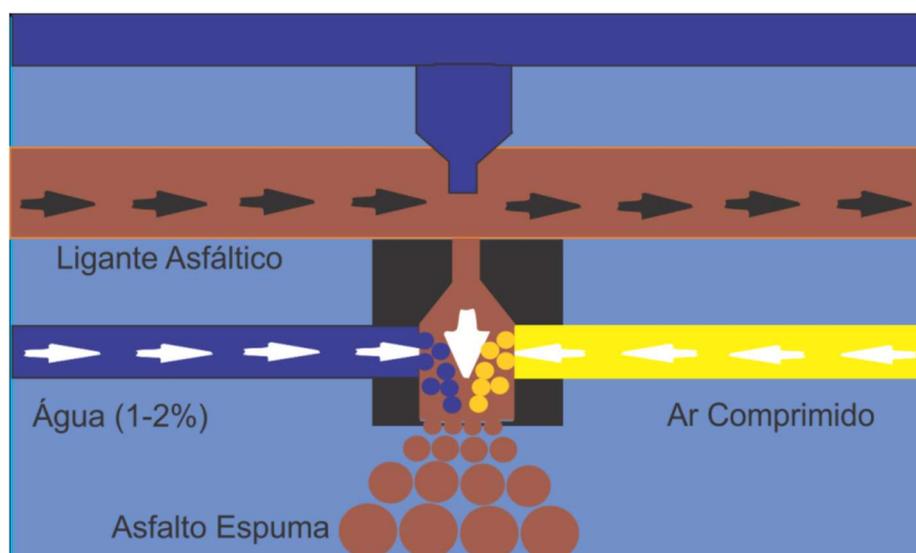
2.2.4 Classificação das misturas mornas

Atualmente, a produção de misturas asfálticas mornas é possível a partir de: (i) espumejo do asfalto, e/ou (ii) adição de aditivos orgânicos ou de aditivos surfactantes, diretamente no ligante ou durante o processo de mistura. Geralmente, de maneira combinada a estes elementos, ocorre à redução da temperatura dos agregados para que a usinagem ocorra em temperatura reduzida, já que o material pétreo compõe cerca de 95% de uma mistura asfáltica e isto já seria suficiente para baixar a temperatura de usinagem de maneira significativa. Contudo, a perda de temperatura do ligante também se faz interessante, visto que isto pode contribuir para o menor envelhecimento/enrijecimento do asfalto (MOTTA, 2011; PORTUGAL, 2016).

2.2.4.1 Asfalto espumado

A espuma asfáltica, asfalto espumado, ou ainda espuma de asfalto, é uma tecnologia resultante da mistura do ligante asfáltico com água (Figura 2), sob determinadas condições de temperatura e pressão. Com objetivo de proporcionar uma reação térmica entre a água em sua temperatura ambiente e o CAP aquecido, gerando a espuma de asfalto que por sua vez irá auxiliar no recobrimento do asfalto e na trabalhabilidade da mistura asfáltica (FEITOSA, 2015; ZUBARAN, 2014).

Figura 2 - Processo de formação de asfalto espuma.



Fonte: Feitosa (2015).

Rubio *et al.*, (2013) afirmam que ao escolher esta tecnologia deve-se ter cuidado com a quantidade de água a ser inserida no ligante, já que, esta deve ser suficiente para causar o

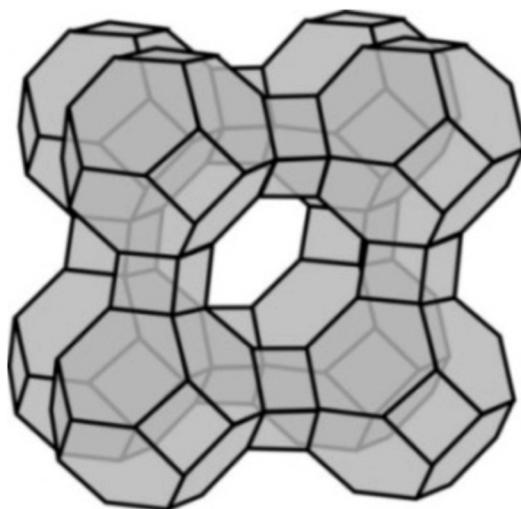
efeito espuma, e não superior, que possa acarretar problemas de falta de adesividade entre o ligante e o agregado.

Exemplos desta tecnologia as: zeólitas, WAM-Foam e Low Energy Asphalt (LEA).

a) Zeólitas

Zeólita, do grego zein + lithos, significa “pedra que ferve”. Englobam vários minerais naturais e sintéticos que apresentam características comuns. São aluminossilicatos hidratados de metais alcalinos ou alcalinos terrosos (principalmente Na, K, Ca, Mg), possuem estruturas em redes cristalinas tridimensionais (Figura 3), compostas de tetraedros do tipo TO₄ (T = Si, Al, B, Ge, Fe, P, Co...) unidos nos vértices através de átomo de oxigênio. Em virtude de sua estrutura, a zeólita apresenta: baixa densidade; alto grau de hidratação; grande volume vazios quando desidratada; alta estabilidade da estrutura cristalina, mesmo quando desidratada; canais de dimensões uniformes nos cristais desidratados; propriedades catalíticas e de troca catiônica; adsorção seletiva de gases e vapores (SILVA, 2016; SOUZA FILHO, 2006).

Figura 3 - Estrutura de uma Zeólita



Fonte: Melo (2010).

A introdução de zeólitas, na produção de misturas mornas não requer mudanças significativas na planta da usina. Além da formação de espuma, as zeólitas, podem ser utilizadas com outros aditivos, sintéticos ou naturais, com intuito de promover melhorias ao ligante asfáltico (FEITOSA, 2015).

Figura 4 - Zeólitas comerciais, comumente utilizadas como aditivos para ligantes asfálticos: Advera® e Aspha-Min®, respectivamente.



Fonte: Feitosa (2015).

Esta ainda contém em sua estrutura alta porcentagem de água em seus poros, sendo caracterizada pela sua capacidade de perder e absorver água sem danificar sua estrutura cristalina. A liberação da água é gradativa, quando o material é aquecido em temperaturas entre 90 e 180°C, sendo bastante utilizada na produção de misturas devido ao efeito de espuma que ela ocasiona. A introdução de zeólitas, na produção de misturas mornas, não exige mudanças significativas na planta da usina. Essa inserção é feita manualmente, não necessitando de equipamentos específicos, além dos já utilizados na produção (FEITOSA, 2015; MORAES, 2018).

- Aspha-Min®

Aspha-min® é um silicato sintético de alumínio e sódio, cristalizado termicamente, estando disponíveis nas formas de pó ou granulada. Este é fabricado pela Eurovia Services GmbH, com sede em Bottrop, na Alemanha, e contém aproximadamente 21 por cento de água em massa e é liberado no faixa de temperatura de 85-180 ° C. Geralmente é adicionado à mistura de asfalto a uma dosagem de 0,3% em peso da mistura. Quando incorporado à mistura asfáltica, a água é liberada provocando uma expansão de volume do asfalto, o que permite maior trabalhabilidade e revestimento agregado a temperaturas mais baixas. O fabricante da Aspha-min® afirma que a temperatura de mistura pode ser reduzida em 30°C (HURLEY e PROWELL, 2005; RUBIO *et al.*, 2012).

- Advera® WMA

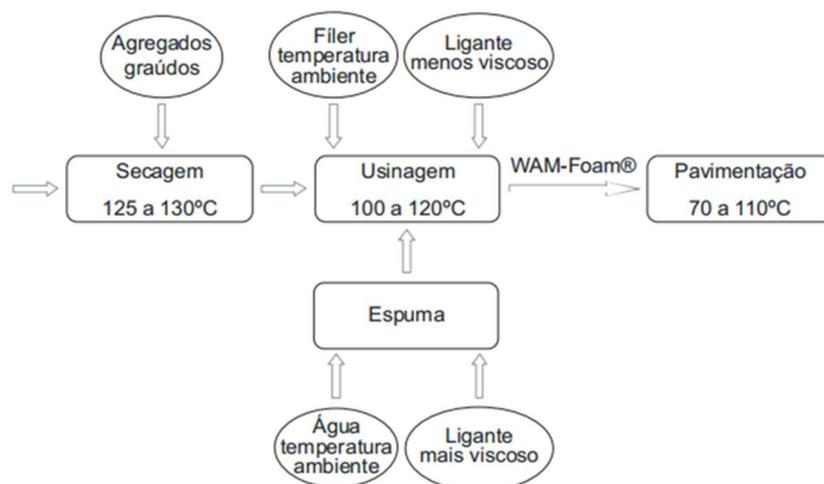
A Advera® WMA é uma zeólita sintética (Silicato de alumínio de sódio), que foi hidrelétrica termicamente cristalizado, é produzida pela empresa da Eurovia Services GmbH, Bottrop, na Alemanha. Está disponível na forma fina de pó branco em sacos de 25 ou 50 kg ou em massa para silos. Contém 18 - 21% de água contida na sua estrutura cristalina, sendo liberada com temperaturas variando 85 - 182°C (CARVALHO, 2018; MOHD HASAN et al., 2013).

De acordo com o fabricante, a Advera® WMA deve ser adicionada a uma taxa de 0,25% em peso da mistura asfáltica, ocasionando diminuição das temperaturas de produção de mistura a quente de 10-30 °C e conseqüentemente uma minimização de 30% no consumo de combustível (RUBIO *et al.*, 2012).

b) WAM Foam

WAM Foam foi desenvolvida pela Shell Bitumen e Kolo-Veidekke e utiliza dois sistemas de ligantes em sua composição, sendo um de baixa viscosidade e outro de alta viscosidade. Para sua execução (Figura 5) os agregados deverão ser aquecidos a uma temperatura média de 130°C e revestido com o ligante menos viscoso cerca de 20 a 30 % do ligante total. Posteriormente 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 (MOTTA, 2011; PROWELL et al., 2012; SALES, 2015).

Figura 5 - Esquema de produção e aplicação WMA-Foam®



Fonte: Motta (2011)

c) Low Energy Asphalt (LEA)

O LEA é uma tecnologia de MAM desenvolvida na França pela Low energy asphalt Company (LEA-CO, que atualmente é comercializada pela empresa francesa Lea-Co e pela norte-americana McConnaughay Technologies (MOHD HASAN *et al.*, 2013; SALES, 2015).

De acordo com Motta (2011), a produção desse tipo de mistura ocorre mediante ao espumejo do asfalto quente em contato com água integrada na fração miúda dos agregados. Esse processo pode ser resumido seguinte forma: primeiramente os agregados graúdos devem passar por um procedimento de secagem com temperatura em torno de 120 a 150°C, e o ligante aquecido em temperatura habitual para a mistura quente (aproximadamente 170°C, dependendo do tipo de asfalto) e então são misturados. Em seguida, os agregados miúdos, contendo de 3 a 4% de água, mantidos em temperatura ambiente, 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.

2.2.4.2 Aditivos surfactantes (aditivos químicos)

Os aditivos surfactantes não introduzem água na mistura asfáltica e nem modificam as propriedades reológicas do asfalto. Estes atuam diretamente na interface ligante/agregado reduzindo o atrito interno da mistura, possibilitando melhor poder de

recobrimento, adesividade, e trabalhabilidade do ligante asfáltico a menores temperaturas.

De acordo com Silva (2016), os aditivos surfactantes podem ser introduzidos no ligante antes ou durante o processo de usinagem, possibilitando uma redução de 30-40°C. Não necessita de alteração na planta da usina devido ser uma tecnologia com sistema de utilização simples evitando assim um aumento nos custos iniciais.

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

a) Gemul XT14

O Gemul XT14 é um produto da empresa brasileira Quimigel, que atua como agente tensoativo composto de amidas sintéticas, melhorando a adesividade além de permitir o cobrimento adequado dos agregados durante o processo a usinagem das misturas asfálticas mornas (ocorre em temperaturas mais baixas que o habitual) (SILVA, 2016).

Este pode ser utilizado nas MAM com ligantes convencionais ou modificados, permitindo que a temperatura da mistura asfáltica final seja cerca de 30°C inferior à de uma mistura em temperatura convencional.

b) Revix™

Revix™ foi desenvolvido em 2007 pelas empresas norte-americanas Mathy Technology and Engineering Services e Paragon Technical Services. Neste processo o princípio de funcionamento deixa de ser a água ou o vapor de água, e passa a ser o atrito interno entre as partículas dos agregados, devido à variedade de surfactantes, ceras, auxiliares de processamento, polímeros e outros materiais presentes na sua composição. O Revix™ garante uma redução de 15-30°C nas temperaturas de uso, não há especificação quanto a quantidade a ser utilizado com o ligante e não requer nenhum processo de modificação para adição deste, podendo ser misturado ao ligante na própria usina, sem custos adicionais (CARVALHO, 2018; MELLO, 2012; RUBIO *et al.*, 2012).

2.2.4.3 Aditivos Orgânicos

Os aditivos orgânicos e as ceras podem ser introduzidos previamente no ligante asfáltico ou juntamente com este durante a usinagem reduzindo a viscosidade do ligante asfáltico e as temperaturas de usinagem e de compactação em cerca de 30 a 40°C (CERATTI *et al.*, 2015). Entre alguns exemplos de aditivos orgânicos/ceras têm-se: CCBit 113AD, Sasobit®, óleos vegetais.

a) CCBit 113AD

O CCBit é um éster metílico de ácido graxo, de cor amarelo esbranquiçado, encontrado na forma de pó, grânulos ou flocos. Possui ponto de fulgor e liquefação de aproximadamente 279°C e 139°C, respectivamente. É um material insolúvel em água à 20°C, sua densidade varia entre 0,99 – 1,01 g/cm³ (23°C), pH é 9 (10g diluídos em 100 ml de água) e sua viscosidade dinâmica é de aproximadamente 15mPa.s (150°C) (SALES, 2015).

Figura 6 - CCBit 13AD



Fonte: Sales (2015)

b) Sasobit®

O aditivo Sasobit® é uma cera parafínica sintética, produzida pela Sasol Wax International, que permite a produção de misturas mornas com a redução temperatura entorno de 20° a 30°C, se comparado com as temperaturas das misturas quentes. Comercializado na forma de pastilhas ou em flocos, o Sasobit® pode ser incorporado diretamente no ligante (em flocos) ou na mistura asfáltica (forma de pastilha) (MELLO, 2012; RUBIO *et al.*, 2012).

Figura 7- Sasobit, em flocos e pastilha, respectivamente.



Fonte: Sales (2015)

c) Óleos Vegetais

A adição de ácidos oleicos ao ligante asfáltico é uma alternativa que reduz a viscosidade durante as operações de usinagem e compactação, melhorando sua trabalhabilidade. Por outro lado, os óleos reduzem a consistência do ligante asfáltico, à temperatura ambiente, prejudicando sua qualidade e reduzindo o desempenho das misturas asfálticas. Portanto, este deve ser adicionado em proporções adequadas, determinadas em função da concentração do óleo e da consistência do ligante asfáltico base (Lucena *et al.*, 2016).

Com base nos estudos realizados por Portugal (2016), foi observado que o uso do óleo de milho e de soja (novo e residual) nas proporções de 1% foi satisfatório, devido os mesmos manterem as características físicas e reológicas do CAP 50/70 ou do AMP 55/75, além da redução das temperaturas de compactação e usinagem.

Lucena *et al.* (2016) utilizaram o óleo de *Moringa Oleífera Lam* nos teores de 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5 e 3%, e observaram o retardamento do envelhecimento do CAP, provavelmente relacionado ao alto percentual de ácido oleico encontrado no óleo. Afirmaram ainda que o teor do óleo de *Moringa Oleífera Lam* incorporado ao ligante deve ser entre 0,5% a 1%, pois nestes teores ocorre uma diminuição das temperaturas de usinagem e compactação ($\approx 5^{\circ}\text{C}$) sem comprometer o desempenho do ligante asfáltico.

Carvalho (2018) avaliou o comportamento das misturas asfálticas com adição do óleo de girassol nos teores de 1, 2 e 3% no ligante, concluiu que o teor de 2% de óleo foi

o que proporcionou melhor desempenho quanto às propriedades mecânicas e volumétricas em relação aos critérios preconizados pelas normas adotadas.

BROCK *et al.* em 2007, estudaram alguns óleos comerciais como o de milho, soja, girassol, canola e os caracterizou, tendo os seus valores de densidades e viscosidade apresentado nas tabelas 1 e 2 respectivamente.

Tabela 1: Valores de densidade dos diferentes óleos vegetais à temperatura ambiente (25 ± 1 °C).

	Óleo						
	Soja	Milho	Arroz	Girassol	Algodão	Oliva	Canola
ρ (g/cm ³)	0,883	0,875	0,877	0,877	0,875	0,879	0,878
$\pm\sigma$	0,004	0,003	0,002	0,004	0,002	0,003	0,002

Tabela 2: Valores de viscosidade medidos para os diferentes óleos vegetais em função da temperatura.

T(°C)	Viscosidade (mPa.s)						
	Soja	Milho	Girassol	Arroz	Algodão	Oliva	Canola
20,0	59,0	67,6	58,3	73,8	67,7	79,7	73,1
30,0	41,2	47,4	41,3	50,5	47,3	55,4	50,5
40,0	29,5	32,3	29,1	34,3	33,4	37,8	35,6
50,0	22,3	24,8	21,3	24,5	24,6	26,2	25,2
60,0	16,7	18,5	16,4	19,2	18,0	21,4	19,1
70,0	12,6	14,0	12,6	14,2	14,0	14,9	14,5

2.3 Canola

Originada no Canadá a partir do melhoramento genético da colza (*B. campestris* e *B. napus*) onde houve redução significativa de glucosinolatos e ácidos erúico, que são substâncias medianamente tóxicas quando consumidas em doses altas, a canola é a terceira oleaginosa mais produzida em todo mundo superada apenas pela palma e soja. Esta variedade passou a ser denominada de CANOLA, que é uma contração de uma expressão em inglês que quer dizer “azeite canadense de baixo teor ácido”, (CANadian Oil Low Acid) (CARDOZA E STEWART, 2007).

A colza/canola é utilizada alimentação animal como forragem verde, matéria-prima para extração de óleo que tem sido consumida na alimentação humana, na adubação, para uso industrial (sabões e outros derivados) e, mais recentemente, para produção de biocombustível (DE MORI *et al.*, 2014).

Canola é uma cultura cultivada em ambiente temperado que foi desenvolvida em latitudes entre 35° a 55°. A partir de uma rede de ensaios de campo, em localizações no Brasil que vão desde o estado mais meridional (lat. 30°32'38 "S, alt. 432 m) para o estado setentrional (lat. 2°49'11" S, alt. 85 m), juntamente com observações em áreas comerciais foi observada a possibilidade de produção em áreas tropicais. (TOMM, 2012; CONAB, 2018).

A produção no Brasil foi iniciada em escala comercial na década de 70 no estado do Rio Grande do Sul. Em 2018, tem uma área plantada estimada em torno de 35,5 mil hectares, com uma produtividade média de 1394 kg/ha. Sua maioria se encontra no Paraná, com algumas lavouras no Rio Grande do Sul, e Mato Grosso do Sul, e em dezembro de 2018 a produção atingiu 49,5 mil toneladas (CONAB, 2019).

2.3.1 Canola na Paraíba

Durante os meses de julho a novembro de 2007 foi realizado um estudo na Universidade Federal da Paraíba – Campus Areia com intuito de verificar se as condições ambientais da região Nordeste, em especial a Paraíba, a qual possui uma latitude muito inferior daquelas regiões tradicionais para o cultivo de canola são satisfatórias para o cultivo. Foram avaliados nove híbridos de canola da espécie *Brassica napus* L. : Hyola 43, Hyola 60, Hyola 61, Hyola 401, Hyola 432, Hyola 411, Hyola 433, I4403 e H4815, sendo os cinco primeiros já empregados em cultivos comerciais, fora isso analisado as temperaturas médias, índices de pluviosidade, a umidade relativa, e a irrigação (Tomm *et al.*, 2008)

Tomm *et al.*, 2008 verificaram que os valores de produtividade obtidos dos fenótipos Hyola 60 e H 4815 são semelhantes aos obtidos em outras regiões do Brasil, mostrando que os resultados obtidos no município de Areia (Figura 8), estado da Paraíba, estrategicamente, estabelece um marco de grande relevância para a expansão do cultivo de canola em regiões tropicais pois demonstram a disponibilidade de genótipos que se adaptam a latitudes inferiores a 7 graus e altitude superior a 600 m. Então os resultados, de apenas um ano, indicam que o Nordeste e a Paraíba é uma região promissora para o cultivo de genótipos de canola com baixa sensibilidade a fotoperíodo, porém o autor ainda recomendou novos estudos com maior detalhamento.

Figura 8 - Mapa de localização do experimento. Areia, PB



2.3.2 Óleo de Canola

O cultivo da canola tem como principal objetivo a extração de seu óleo vegetal, agregando valor comercial a planta. Seus maiores produtores e consumidores encontram-se na União Europeia, seguido pelo Canadá e países como Índia e China. No Brasil os grãos de canola possuem em torno de 27% de proteína e 38% de óleo, enquanto os grãos de soja possuem apenas 18% de óleo (CONAB, 2017).

No Brasil, os grãos de canola possuem em média 24 a 27% de proteínas e, em torno de 38% de óleo, já os grãos de soja possuem apenas 18% de óleo. O óleo de canola tem sido apontado pelos médicos e nutricionistas como um alimento saudável devido a elevada quantidade de omega-3, vitamina E, gorduras monoinsaturadas e o menor teor de gordura saturada de todos os óleos vegetais. Na Europa o óleo de canola é o mais utilizado para produção de biodiesel e constitui padrão de referência naquele mercado (TOMM *et al.*, 2009).

Há crescente procura por óleo comestível de melhores qualidades nutricionais, demandada pela indústria e pelos consumidores. O seu óleo apresenta elevada quantidade de ômega-3, vitamina E (antioxidante, reduz radicais livres), elevada proporção (quase 60%) de gorduras monoinsaturadas e baixo conteúdo de gordura saturada de todos os óleos vegetais podendo ser indicado para o consumo humano (TOMM *et al.*, 2014).

2.3.3 Considerações finais

Com base na revisão bibliográfica foi possível observar a necessidade de novas tecnologias de misturas asfálticas para minimizar os danos causados ao meio ambiente. As MAMs surgiram como alternativa para a redução das temperaturas de usinagem e compactação, pois seus aditivos atuam como agentes antioxidantes e algumas são responsáveis ainda por melhorar as propriedades mecânicas das misturas.

Uma das formas de produzir MAMs é com adição de aditivos orgânicos, devido ao baixo custo e resultados satisfatórios. Pesquisas com os óleos de milho, soja, linhaça, girassol e moringa (PORTUGAL,2016; SILVA (2016); LUCENA *et. al*, 2016; LUZ, 2017, CARVALHO, 2018) a utilização de óleos vegetais é considerada uma alternativa viável para esse tipo de mistura. Assim, optou-se por estudar o óleo de canola nas misturas asfálticas devido ao crescimento da produção deste grão no país, elevada produção mundial, sua potencialidade de produção na Paraíba e por não possuir pesquisas utilizando-o na pavimentação. Ao final deste trabalho espera-se que seja validada a hipótese que o óleo de canola tem potencial para atuar como agente modificador do CAP reduzindo sua viscosidade e conseqüente redução das temperaturas de usinagem e compactação das misturas produzidas com esta tecnologia.

CAPÍTULO 3

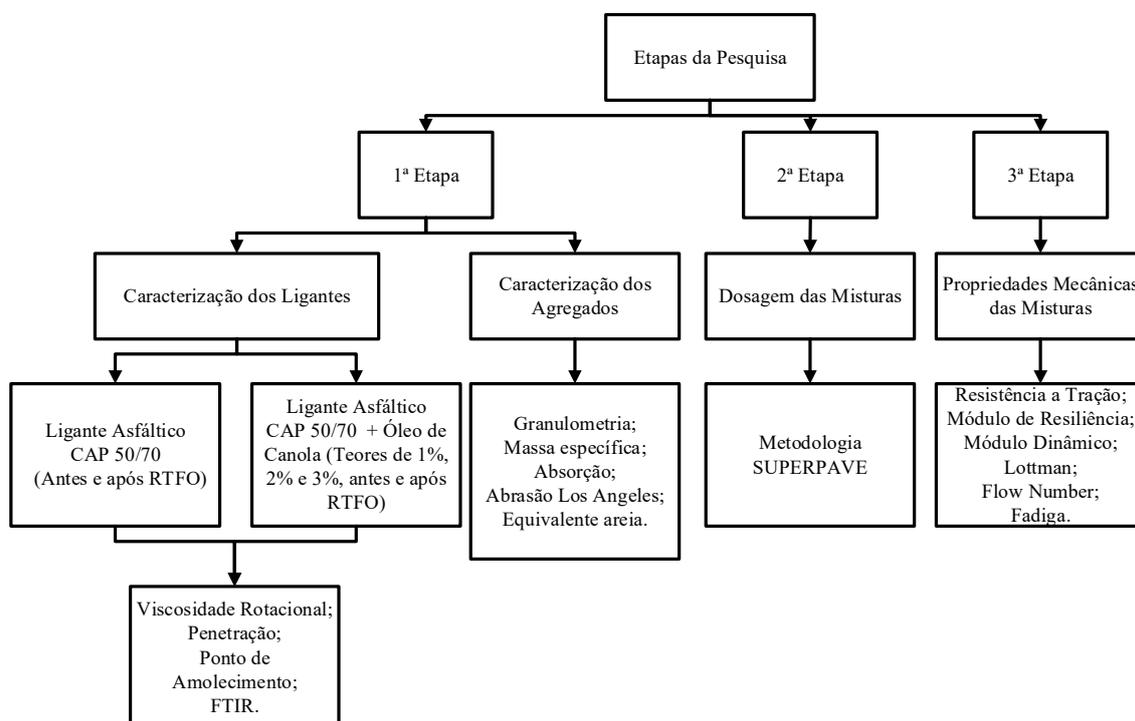
3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais empregados e as especificações das propriedades físicas dos ligantes asfáltico e dos agregados, assim como os procedimentos a serem utilizados para estudar o comportamento mecânico das misturas asfálticas.

O procedimento experimental desta pesquisa foi dividido em três etapas conforme demonstra o fluxograma da Figura 9, onde a primeira etapa tem como objetivo selecionar e caracterizar os materiais utilizados (ligante asfáltico, agregados e o óleo de canola).

Na segunda etapa foi realizada a dosagem e a etapa consistiu nas caracterizações mecânicas das misturas desenvolvidas.

Figura 9 – Etapas da pesquisa



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

3.1 Materiais Utilizados

3.1.1 Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa é o CAP 50/70, mais utilizado na região nordeste e foi fornecido por uma empresa do município de Campina Grande. A Tabela 3 apresenta a caracterização do ligante

Tabela 3 - Caracterização do CAP

Característica	CAP PURO	Limites	Norma
Penetração (0,1mm)	64,5	50-70	NBR-6576
Ponto de Amolecimento (°C)	45	46 (mín.)	NBR-6560
Viscosidade Rotacional 135°C (cp)	378,75	274 (mín.)	NBR-15184
Viscosidade Rotacional 150°C (cp)	189,50	112 (mín.)	NBR-15184
Viscosidade Rotacional 177°C (cp)	69,5	57-285	NBR-15184

Foi realizado também o cálculo do Índice de Suscetibilidade Térmica (IST) por meio da Equação 1.

$$IST = \frac{500 \cdot \text{Log}(P) + 20 \cdot PA - 1951}{120 - 50 \cdot \text{Log}(P) + PA} \quad \text{Equação (1)}$$

Em que:

IST : Índice de Suscetibilidade Térmica;

PA: ponto de amolecimento do CAP; e

P = penetração a 25°C (dmm).

O IST do ligante utilizado foi de -2,08 estando fora da especificação, visto que o intervalo recomendado pela DNIT 095/2006 – EM é de -1,5 à +0,7. Bernucci *et. al* (2010) afirma que valores de IST menores que (-2) indicam asfaltos muito sensíveis a temperatura. Entretanto decidiu-se utilizar o CAP na pesquisa já que o intuito da mesma é comparar o comportamento das misturas após a adição do óleo.

3.1.2 Agregado Graúdo

Os agregados graúdos utilizados nessa pesquisa foram a brita 19mm e brita 9,5mm (Figura 10) de origem granítica, ambas foram fornecidas pela Pedreira Rocha Cavalcante. As amostras foram selecionadas de acordo com método B da norma DNIT-PRO 199/96.

Figura 10 - (a) Brita 19mm, (b) Brita 9,5mm



3.1.3 Agregado miúdo

Os agregados utilizados nessa pesquisa foram o pó de pedra e a areia, fornecidas pela Pedreira Rocha Cavalcante e mercado local respectivamente.

3.1.4 Fíler

O fíler utilizado foi a cal hidratada obtida no mercado local.

3.1.5 Óleo de canola

O óleo de canola utilizado nesta pesquisa foi obtido no comércio local. Durante o processo de mistura em virtude de não existir referência na literatura do uso de óleo de canola, foi adotado como referência a pesquisa de Silva (2016) e Carvalho (2018). O CAP foi inicialmente aquecido a uma temperatura de 135°C e em seguida adicionou-se o óleo nos teores de 1%; 2% e 3% e a mistura foi agitada durante 20 minutos e com uma velocidade máxima de 410 rpm no misturador mecânico.

3.2 Propriedades físicas e mecânicas dos materiais

Os ensaios mencionados nesta pesquisa foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentação (LEP), na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

3.2.1 Agregados

Os ensaios utilizados para a caracterização dos agregados estão listados na Tabela 4.

Tabela 4 - Ensaios dos agregados e especificações

ENSAIOS	METODOLOGIA
Análise granulométrica dos agregados por peneiramento	DNIT - ME 083/98
Massa específica real dos e absorção do agregado gráúdo	DNIT - ME 081/98
Massa específica real dos agregados miúdos	DNIT - ME 084/95
Equivalente areia	DNIT - ME 054/97.
Abrasão “Los Angeles”	DNIT - ME 035/98

3.2.1.1 Granulometria

A Figura 11, Tabela 5, Figura 12 mostram respectivamente a granulometria da brita 9,5 mm, a quantidade passante e a curva dos agregados respectivamente.

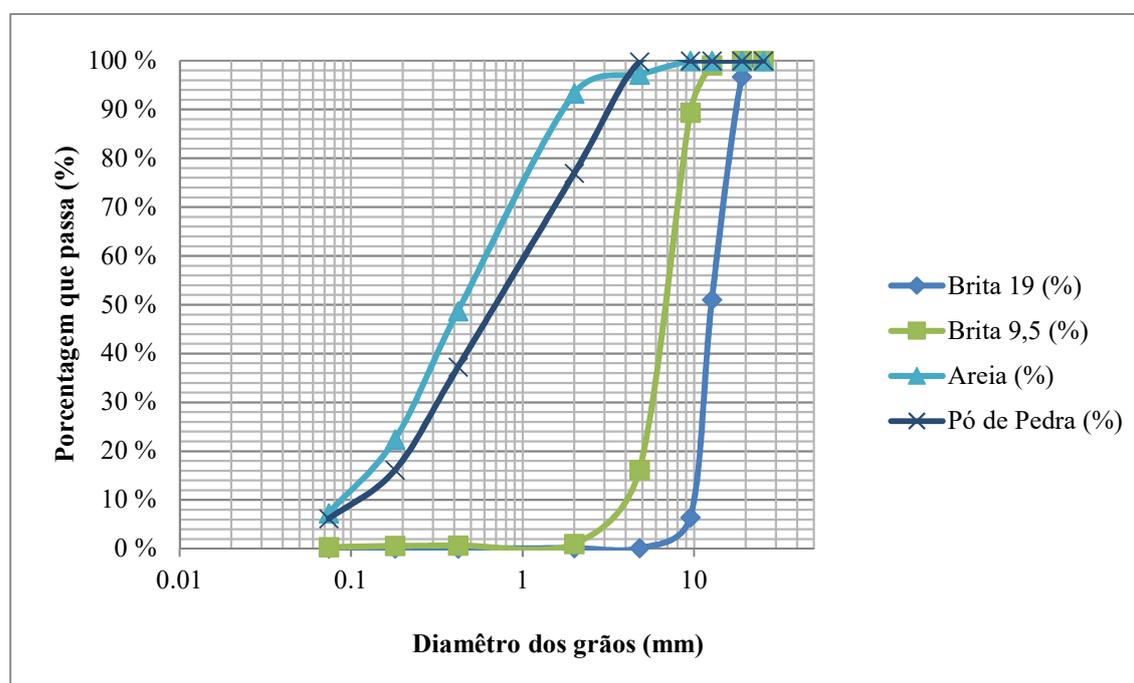
Figura 11 – Granulometria da areia e do pó de pedra



Tabela 5 - Quantidade passante acumulada

Peneira	Diâmetro (mm)	Brita 19 mm	Brita 9,5 mm	Areia	Pó de Pedra
1"	25,40	100	100	100	100
3/4"	19,00	96,69	100	100	100
1/2"	12,70	51,07	99,04	100	100
3/8"	9,50	6,47	89,40	100	100
Nº 4	4,80	0,15	16,16	97,14	99,78
Nº 10	2,00	0,13	1,02	93,30	76,93
Nº 40	0,420	0,12	0,71	48,72	37,23
Nº 80	0,180	0,10	0,59	22,42	16,11
Nº 200	0,074	0,06	0,35	7,28	6,16

Figura 12 - Curva granulométrica dos agregados



3.2.1.2 Absorção e massa específica dos agregados

Os valores da massa específica real e aparente e da absorção dos agregados graúdos e miúdos utilizados nessa pesquisa estão mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados do ensaio de massa específica e absorção dos agregados graúdos e miúdos

Agregados	Massa Específica Real (g/cm ³)	Massa Específica Aparente (g/cm ³)	Absorção (%)
Brita 19mm	2,72	2,67	0,28
Brita 9,5mm	2,75	2,68	0,51
Areia	2,52	2,47	0,16
Pó de Pedra	2,43	2,42	0,74

Os ensaios foram realizados com duas repetições e seus valores se encaixaram dentro do esperado para os agregados utilizados no Estado da Paraíba (CARVALHO, 2018; MORAES, 2018; SALES, 2015).

3.2.1.3 Equivalente areia

. O valor mínimo para o equivalente de areia dos agregados miúdos de acordo com a DNIT 031/2006 - ES é de 55%. A areia e o pó de pedra atenderam o requisito mínimo, conforme mostrado na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultado do ensaio de equivalente de areia

Ensaio	Requisito	Agregados miúdo	
Equivalente areia	Mín. 55%	Areia 82,06%	Pó de pedra 56%

3.2.1.4 Abrasão Los Angeles

A brita 19 mm e a brita 9,5 mm apresentaram um desgaste Los Angeles de 22,3% e 25,4% respectivamente, valores de acordo com a especificação do DNIT 031/2006 ES, que recomenda o desgaste menor ou igual a 50%.

3.2.2 Ligante Asfáltico

Nesta seção são apresentados o procedimento de produção do ligante modificado com óleo de canola e os ensaios de sua caracterização (ligante puro e modificado): penetração, ponto de amolecimento, viscosidade rotacional e Rolling Thin Film Oven Test (RTFO). Na Tabela 8 estão apresentadas as normas utilizadas para a realização dos ensaios.

Tabela 8 - Normas dos ensaios de caracterização física do ligante

ENSAIOS	METODOLOGIA
Viscosidade Rotacional	NBR 15184/2007
Ponto de Amolecimento	DNIT ME 131/2010
Penetração	DNIT ME 155/2010
RTFO	ASTM D 2872-04

3.2.2.1 Mistura do CAP com óleo

A mistura CAP e óleo foi realizado conforme a pesquisa de Carvalho (2018), a qual utilizou o óleo de girassol para a modificação do ligante. O ligante asfáltico foi inicialmente aquecido a uma temperatura em torno de 130 ± 5 °C, adicionado teores de 1%, 2% e 3% de óleo de canola. A mistura foi agitada a uma rotação de 410 rpm por 20 minutos, com adição lenta do aditivo durante os primeiros minutos.

3.2.3 Análise do ligante com e sem adição do óleo de canola por meio de FTIR

Após incorporação do óleo de canola nos teores de 1%, 1% e 3%, conforme procedimento de mistura, foi realizada a análise da composição química do ligante puro e das misturas por meio do ensaio de FTIR (Infra Vermelho por Transformada de Fourier, do inglês Fourier Transformed Infra Red) para verificar se houve alterações na composição química do ligante puro após a inserção do óleo na matriz asfáltica.

A espectroscopia no infravermelho é um tipo de espectroscopia de absorção. Nela a energia absorvida se encontra na região do infravermelho do espectro eletromagnético. Como as demais técnicas espectroscópicas, ela pode ser usada na identificação de um composto ou na investigação da composição de uma amostra.

Para quantificar a intensidade do envelhecimento das amostras de ligante com e sem o aditivo, as amostras foram submetidas ao procedimento de RTFO e posteriormente analisados pelo FTIR. Após os registros dos espectros de FTIR, foi efetuado o cálculo da concentração dos grupos funcionais (carbonila (C=O) e sulfóxidos (S=O)), baseado na analogia das áreas de absorção características.

Segundo Mouillet (2010), para o cálculo dos índices de oxidação Carbonilas e Sulfóxidos, devem ser aplicadas as Equações 3 e 4, retiradas do método MLPC N°69 (apud CARVALHO, 2018). Nestas equações, supõe-se que o grupo Metil (CH₃ – em torno de 1375 cm⁻¹) e o grupo Etileno (CH₂ – em torno de 1460 cm⁻¹) são pouco alterados quando o ligante é oxidado. Em compensação, os Sulfóxidos (SO – em torno de 1030 cm⁻¹) e os grupos Carbonilas (CO - em torno de 1700cm⁻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 (2)

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

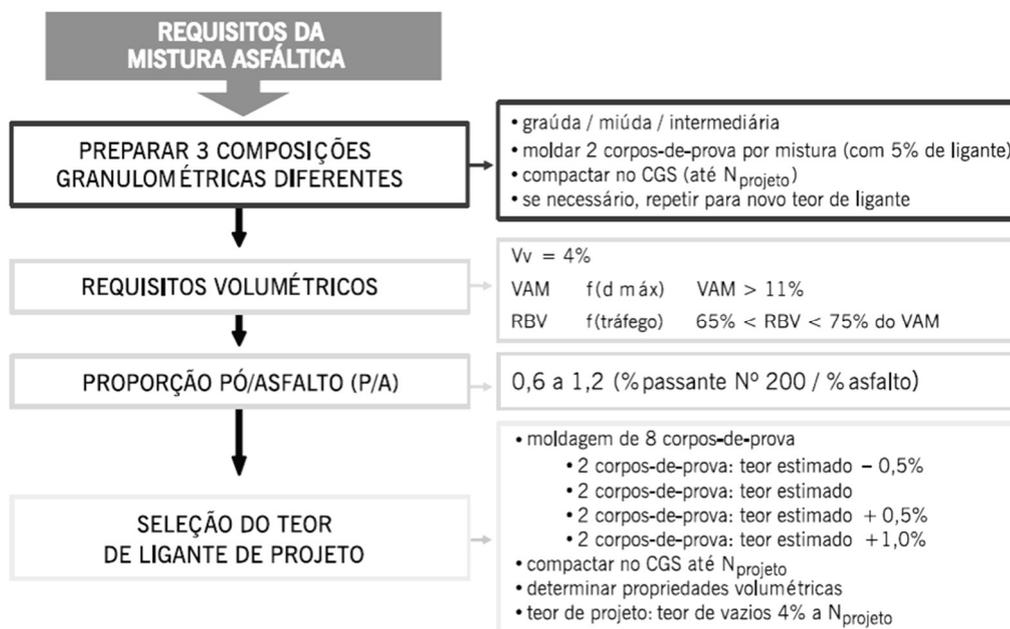
Equação (3)

O ensaio FTIR foi realizado 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 cm⁻¹. O equipamento utilizado foi um espectrômetro BRUKER, modelo FT-IR VERTEX 70.

3.2.4 Dosagem SUPERPAVE

Objetivando determinar o teor ótimo de ligante asfáltico para a mistura asfáltica estudada, realizou-se a dosagem SUPERPAVE, seguindo os passos demonstrados no Fluxograma da Figura 13 .

Figura 13 - Fluxograma da Dosagem Superpave



Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2008

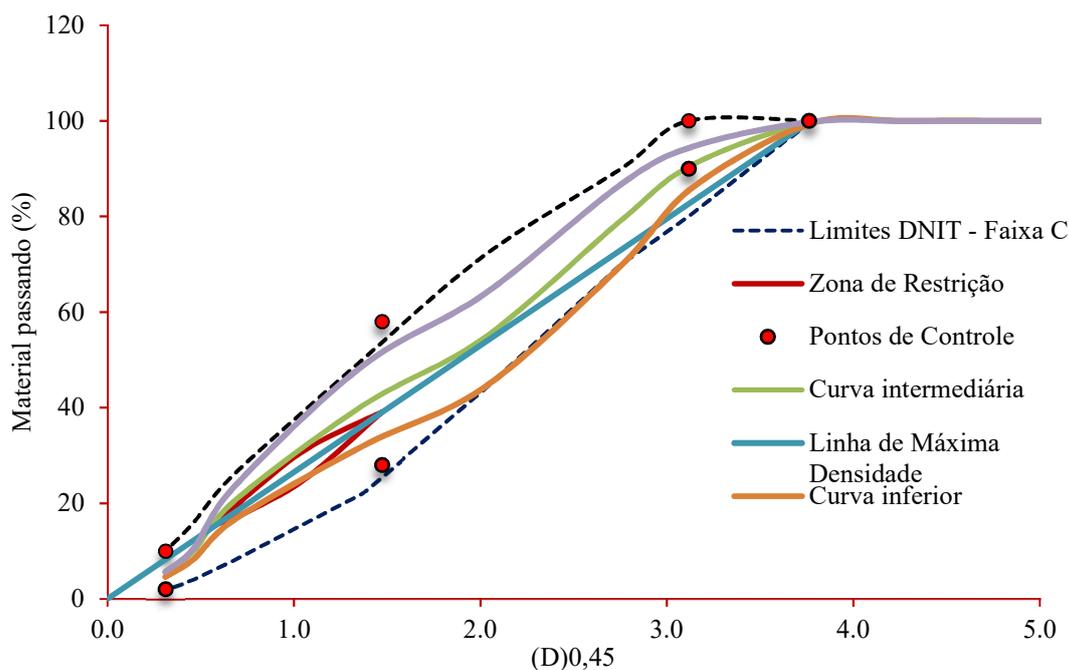
Inicialmente o procedimento constitui na escolha da composição granulométrica, que neste caso foi a 19mm, 9,5mm, pó de pedra, areia e cal enquadradas na faixa C do DNIT, incluindo os conceitos de Pontos de Controle e Zonas de Restrição. De posse da

granulometria de cada um dos materiais construiu-se, três composições granulométricas a serem testadas: uma composição superior (próxima ao limite superior da faixa) (Figura 14), uma composição intermediária (na região mediana da faixa) (Figura 14) e uma composição inferior (próxima ao limite inferior da faixa) (Figura 14). As curvas de Fuller superior, intermediária e inferior contêm as proporções de agregados mostradas na Tabela 9.

Tabela 9 - Proporções dos agregados nas granulometrias (%)

CURVA	BRITA 19	BRITA 9.5	AREIA	PÓ DE PEDRA	CAL
Superior	15,0	26,0	12,5	44,0	2,5
Intermediária	26,0	25,0	5,0	41,5	2,5
Inferior	40,0	22,0	2,0	34,0	2,0

Figura 14 - Curva de Fuller – Composição granulométrica superior, intermediária e inferior



Após a composição das curvas foi realizada a moldagem de 18 corpos de prova (com teor de ligante igual a 5%), sendo 6 corpos-de-prova para cada curva granulométrica, divididos em dois para $N_{inicial}$, dois para $N_{projeto}$ e dois para $N_{máximo}$. Conforme a norma ASTM D 6925-09, os corpos de prova devem ser compactados (Figura 15) 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, e assim, considerou-se $N_{inicial} = 8$ giros, $N_{projeto} = 100$ giros.

O $N_{inicial}$ e $N_{máximo}$ servem apenas para avaliar a compactabilidade da mistura, e o $N_{projeto}$ deve atender aos 4% de V_v e é usado para selecionar o teor de ligante da mistura.

Figura 15 - Compactador Giratório Superpave (CGS)



Outro parâmetro analisado foi densidade máxima medida (Gmm), determinada por meio do ensaio RICE TEST, segundo a norma ASTM D 2041. O equipamento utilizado para a realização do ensaio consta na Figura 16.

Figura 16- Equipamento para RICE TEST



Com os corpos de prova pesado secos e submersos e de posse dos seus diâmetros e altura média é possível determinar os valores de V_v (volume de vazios), VAM (vazios no agregado mineral) e G_{mm} (massa específica máxima) e assim escolher a curva a ser

trabalhada. A curva escolhida foi a superior em virtude dos seus volumes de vazios ser o mais próximo de 4% como demonstra a Tabela 10.

Tabela 10 - Resumo da compactação das misturas asfálticas

Misturas	%Ligante	%Gmm N _{inicial}	%Gmm N _{projeto}	%Gmm N _{máximo}	V _v (%)	VAM (%)
Inferior	5,00	93,03	97,42	98,27	2,58	13,59
Intermediária	5,00	91,44	97,08	97,66	2,96	13,80
Superior	5,00	89,31	95,39	96,07	4,61	15,45
Limites		<89,00	96,00	<98,00	4,00	13,0 (min)

Em seguida foi estimado o teor de ligante inicial igual 5,24% para a curva superior por meio da Equação 6.

$$P_{l,estimado} = P_{li} - [0,4x(4 - V_v)] \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

$P_{l,estimado}$: teor de ligante estimado, em %;

P_{li} : teor de ligante inicial (tentativa), em %;

V_v : vazios no $N_{projeto}$, em %.

Com parâmetros volumétricos dos corpos de moldados com os novos teores, foi possível determinar suas propriedades volumétricas (Tabela 11).

Tabela 11 - Critérios volumétricos para cada teor de ligante

	4,74%	5,24%	5,74%	6,24%	Valores Normalizados
V_v (%)	5,38	3,29	1,78	0,53	4,00%
VAM (%)	16,24	14,94	14,73	14,41	13,00 mín
Gmm (%)	94,62	96,71	98,22	99,47	96,00
RBV (%)	74,97	73,48	73,63	73,52	65 a 75%

Nenhuma das misturas experimentais testadas obteve volume de vazios igual a 4%, diante disto foi realizada uma nova tentativa por meio do gráfico volume de vazios x teor de ligante (Figura 17) onde observou-se que para um volume de vazios de 4% o teor de ligante de projeto é 5,10%. Portanto, uma mistura foi confeccionada com o teor de 5,1 e obtidos os resultados demonstrados na Tabela 12. Sendo assim, devido a

correspondência dos parâmetros da mistura com os parâmetros estabelecidos pela norma, o teor de ligante de projeto adotado para toda a pesquisa foi 5,10%.

Figura 17 - Determinação do teor de projeto

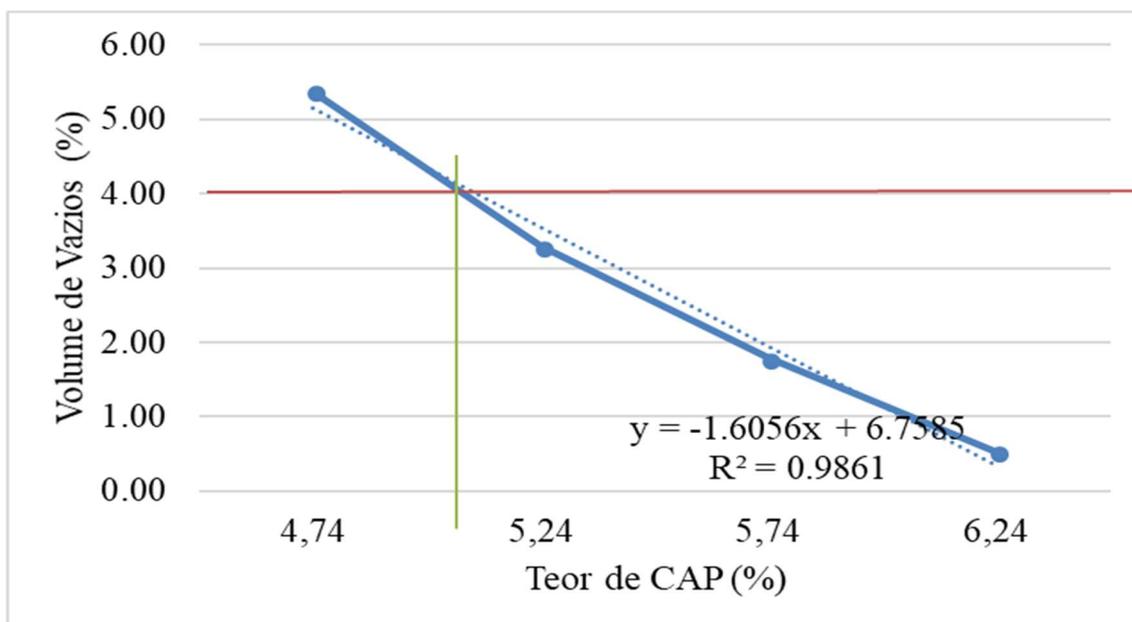


Tabela 12 - Resumo dos parâmetros volumétricos para o teor de CAP de 5,10%

%Ligante	%Gmm	VAM (%)	RBV(%)	Vv (%)
5,10	95,94	15,29	73,82	4,06
Limites	96,00	13,0 (min)	65 a 75	4,00

Para realização dos ensaios mecânicos ficou determinado que a dosagem encontrada para o ligante CAP 50/70 puro, 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 foi possível comparar as características mecânicas do ligante asfáltico com e sem a presença do aditivo.

3.2.5 Propriedades Mecânicas das Misturas Asfálticas

Nesta etapa foram moldados três corpos de prova com o mesmo teor de ligante asfáltico e a mesma composição granulométrica estabelecida na dosagem, modificando apenas o ligante utilizado (CAP puro e modificado com 1%, 2% e 3% do óleo de canola). Os ensaios mecânicos tiveram como finalidade analisar a influência da adição do óleo de

canola em comparação ao ligante puro no desempenho mecânico das misturas asfálticas. As propriedades analisadas nesta etapa estão expostas no fluxograma da Figura 18 e na Tabela 14, com suas respectivas normas de ensaio.

Figura 18 – Caracterização Mecânica da Mistura Asfáltica

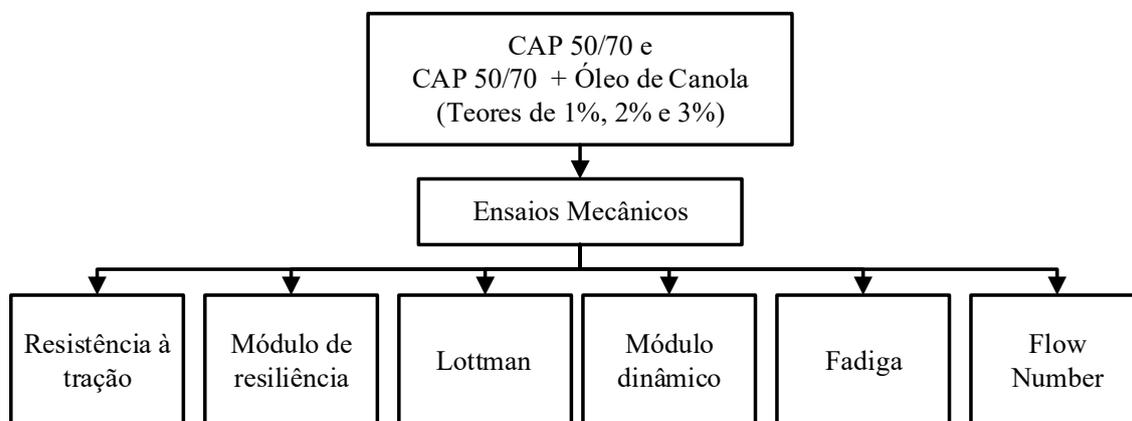


Tabela 13 - Ensaio mecânicos e suas metodologias

ENSAIOS	METODOLOGIA
Ensaio de Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral	DNIT - ME 136/10
Módulo de Resiliência	NBR 16018/2011 e ASTM D 4123-82
Dano por umidade induzida – Lottman Modificado	DNIT 180/2018 - ME
Ensaio de Fadiga por compressão diametral à tensão controlada	DNIT - ME 183/18
Flow Number	NBR 16505/2016
Módulo Dinâmico	AASHTO TP-79/2016

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

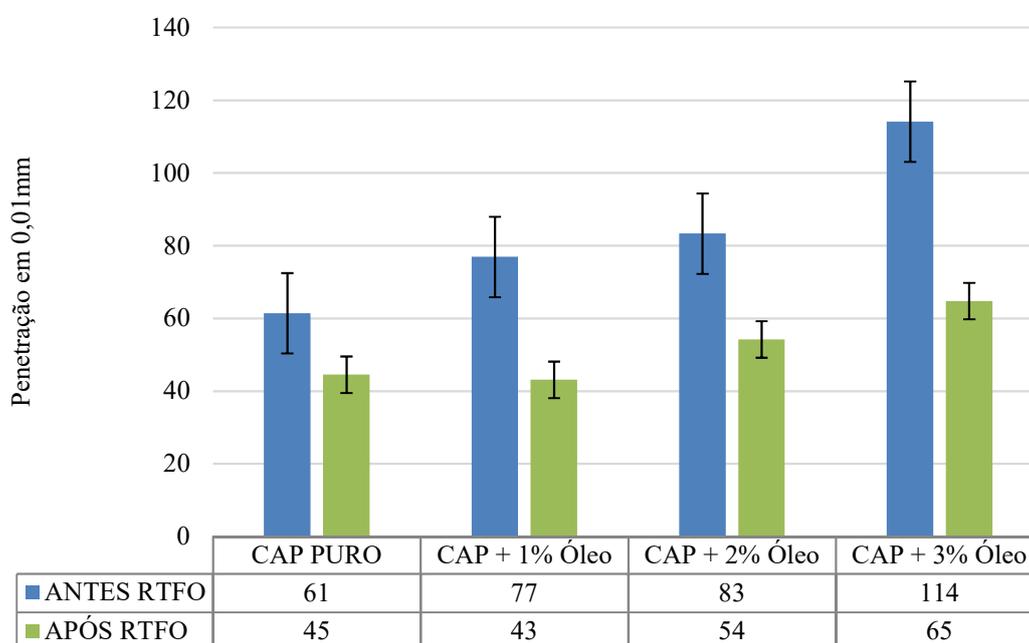
Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados provenientes da fase experimental desta pesquisa. Serão mostrados os resultados da caracterização do CAP 50/70 puro e modificado com óleo de canola, além os resultados da caracterização mecânica das misturas asfálticas.

4.1 Caracterização do ligante asfáltico

4.1.1 Resultados do ensaio de Penetração

A incorporação do óleo de canola no ligante asfáltico proporcionou um aumento da penetração tanto antes quanto após o envelhecimento a curto prazo (Figura 19). Este resultado já era esperado visto que o aditivo orgânico (óleo de canola) atua diretamente na redução da viscosidade diminuindo a consistência do ligante.

Figura 19 - Ensaio de penetração antes e após o RTFO



Lucena (2016) avaliou o efeito do óleo de moringa no ligante asfáltico nos teores de 0,5%, 1%, 1,5%, 2%, 2,5% e 3%, sobre as propriedades físicas e reológicas do ligante puro e observou que a adição do aditivo proporcionou um aumento na penetração em relação ao ligante puro, indicando uma redução na rigidez. Quando o ligante foi submetido ao

envelhecimento, a penetração diminuiu consideravelmente. Resultados semelhantes foram obtidos por Portugal (2016) com adição dos óleos de milho e de soja novo e residual e Carvalho (2018) com adição do óleo de girassol.

Ao fazer a comparação entre o ensaio antes e após o RTFO, observa-se uma variação considerável do valor da penetração. Verifica-se que para o teor de 1,0% de óleo, o valor de penetração é inferior ao valor do CAP puro após o RTFO, esse comportamento também foi observado por Lucena *et al.* (2016). Todos os ligantes modificados utilizados nesta pesquisa proporcionaram aumento na penetração, mas quando submetido ao envelhecimento, em curto prazo, a penetração diminuiu significativamente, e o teores de 1e 3% foram os que apresentaram maior sensibilidade ao envelhecimento expressa em menores valores de penetração retida (Tabela 14).

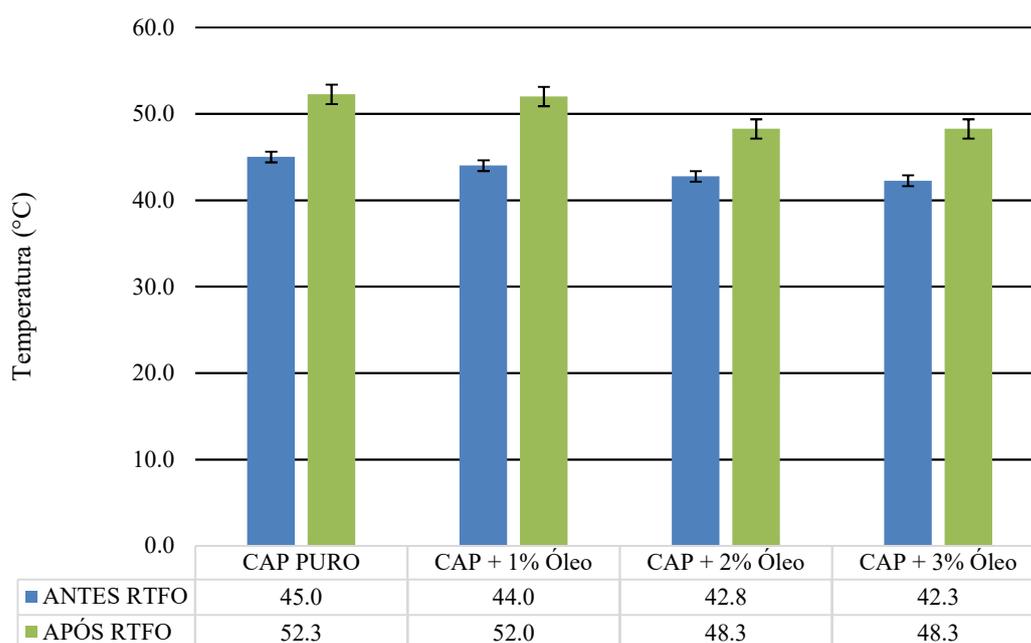
Tabela 14: Penetração retida

Característica	CAP PURO	1% de Óleo	2% de Óleo	3% de Óleo
Penetração Retida (%)	72,5	56,1	65,1	56,7

De acordo com o DNIT 095/2006 – EM, a penetração do ligante após o RTFO deve ser no mínimo 55%, sendo assim todos os ligantes estudados obtiveram resultado satisfatório.

4.1.2 Resultados do ensaio de Ponto de Amolecimento

O incremento do aditivo reduziu o ponto de amolecimento para todas as misturas estudadas (Figura 20). Porém a maior redução foi de 2,75 °C na mistura com 3% de óleo. Comportamento semelhantes ao desta pesquisa foi observado por Carvalho (2018), Lucena *et al.* (2016) e Portugal (2016).

Figura 20 - Resultados do ensaio de Ponto de Amolecimento

Na pesquisa de Portugal (2017) foi observado a redução do ponto de amolecimento com a adição do óleo de milho e soja. O autor ainda afirma que este fato pode chegar a comprometer o comportamento das misturas quando empregadas em campo, em virtude de tornar o ligante mais sensível ao aumento das temperaturas do pavimento. Silva (2016) avaliou a adição do óleo de moringa e do óleo de girassol no ligante, afirmou que a redução da temperatura acarretada pela adição do óleo na mistura implica na perda de resistência do ligante e no ganho de trabalhabilidade da mistura o que dependendo da situação pode ser a vantagem procurada.

Após o RTFO verificou-se um aumento do ponto de amolecimento para o ligante puro e modificado em todos os teores. Este aumento está dentro dos limites da DNIT 095/2006-ME, que apresenta variação máxima de 8°C de ponto de amolecimento após o RTFO. Pode-se verificar por meio dos resultados da Tabela 15, que o aumento máximo foi de 8°C para a amostra com adição de 1,0% de óleo de canola.

Tabela 15 - Aumento de temperatura após o RTFO

Amostra após RTFO	CAP PURO	1% de Óleo	2% de Óleo	3% de Óleo
Aumento de temperatura (°C)	7.25	8.00	5.50	6.00

4.1.3 Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional

Por falta de normatização brasileira para produção de misturas mornas a escolha das temperaturas de usinagem e compactação foi realizada a partir da curva de viscosidade-temperatura do ligante, onde o intervalo da viscosidade estava situado entre $0,17 \pm 0,02$ Pa.s e $0,28 \pm 0,03$ Pa. Estes padrões são referentes a produção de para misturas asfálticas quentes.

Os resultados dos ensaios de viscosidade rotacional, do CAP puro e modificado com 1%, 2% e 3% de óleo de canola estão mostrados nas Tabela 16 e Tabela 17 e nos gráficos das Figura 21 e Figura 22 antes e após o RTFOT. Todos os resultados do ensaio de viscosidade rotacional atenderam ao mínimo exigido nas especificações dos ligantes (DNIT 095/2006).

Tabela 16 - Resultados do ensaio de viscosidade rotacional antes do RTFOT

Viscosidade Rotacional (cP)	CAP Puro	1% de Óleo	2% de Óleo	3% de Óleo
135°C	378.8	345.0	317.5	295.0
150°C	189.5	176.0	163.0	151.0
177°C	69.5	65.5	62.0	58.8

Tabela 17 - Resultados do ensaio de viscosidade rotacional após o RTFOT

Viscosidade Rotacional (cP)	CAP Puro (após do RTFO)	1% de Óleo (após do RTFO)	2% de Óleo (após do RTFO)	3% % de Óleo (após do RTFO)
135°C	522.5	467.5	442.0	390.0
150°C	250.5	224.5	220.0	196.5
177°C	86.8	79.0	79.3	72.3

Figura 21 - Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional antes o RTFOT

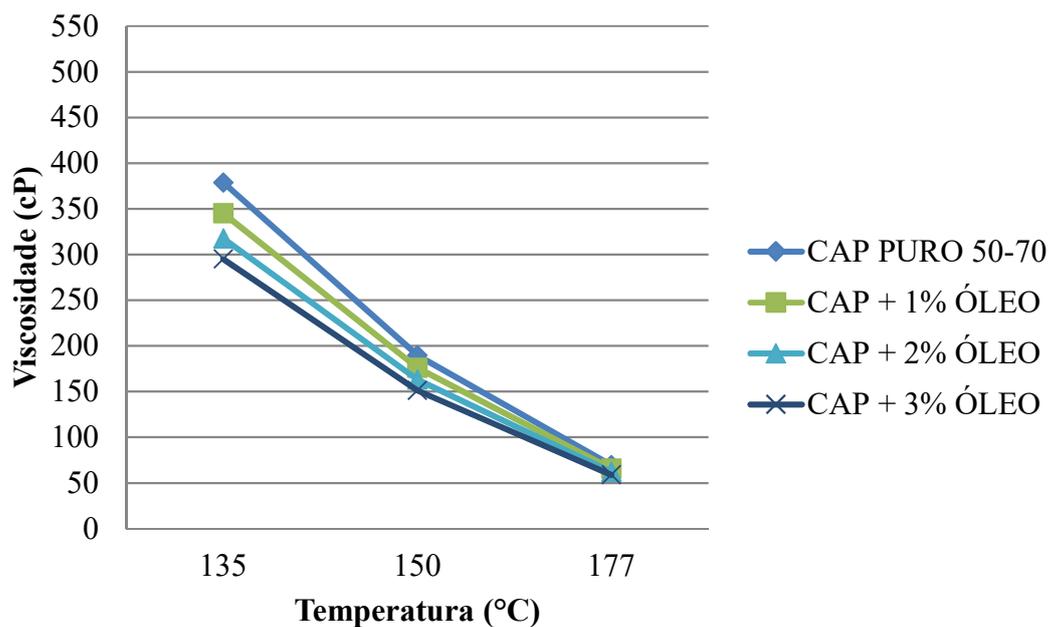
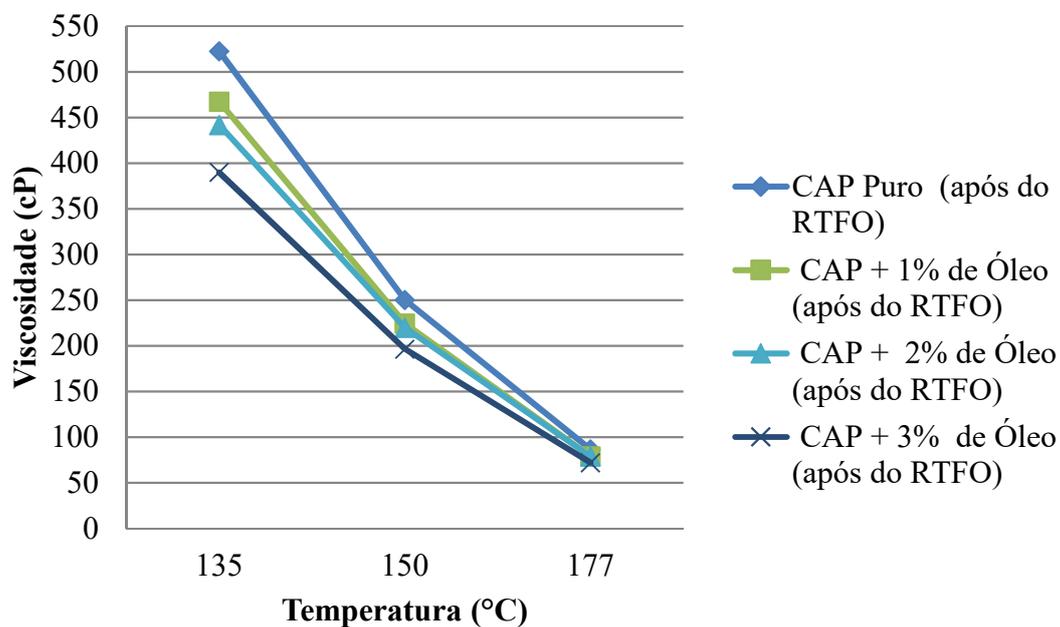


Figura 22 - Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional após o RTFOT



Os resultados indicam que o acréscimo do óleo de canola influencia na redução da viscosidade do ligante e, portanto, na diminuição das temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas estudadas. A menor viscosidade assim como a menor temperatura de trabalhabilidade foi encontrada no teor de 3% quando comparado ao ligante puro, reduzindo 5,2°C (Tabela 18). Apesar da diminuição da temperatura não

ser significativa, ainda assim permite uma redução de energia durante o processo de usinagem do asfalto.

Foi observado também um aumento da viscosidade após o procedimento de RTFO. Segundo Lucena *et al.* (2016) este resultado deve-se a perda de frações leves e oxidação do ligante quando submetido à temperaturas mais elevadas, provocando o endurecimento do material e conseguinte aumento de sua viscosidade.

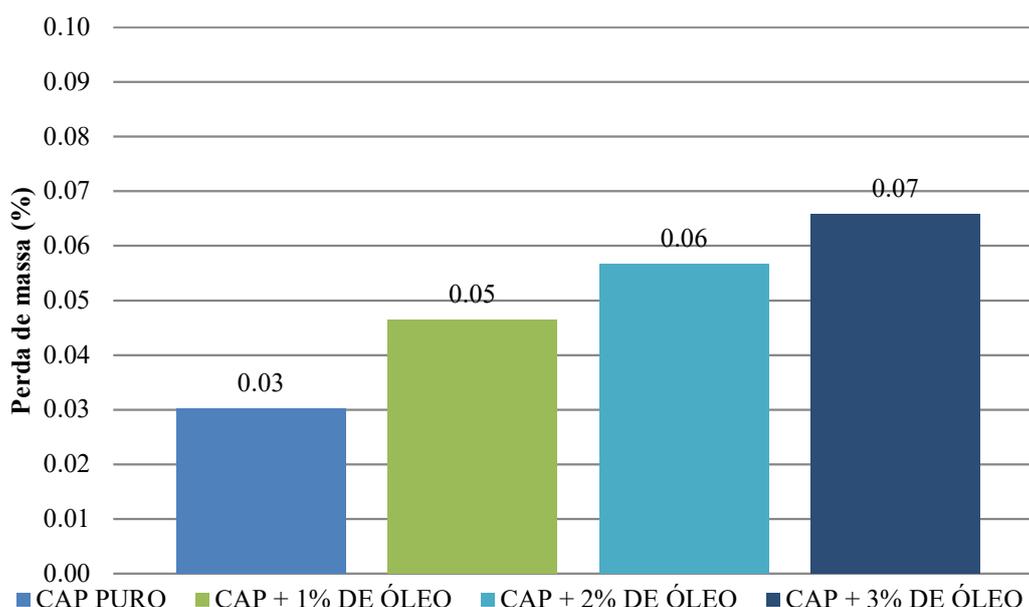
Tabela 18 - Temperaturas de Usinagem e Compactação

Temperatura (°C)	CAP PURO	1% de Óleo	2% de Óleo	3% de Óleo
Usinagem	153.0	151	149.3	147.8
Compactação	141.5	139.8	138.3	137.0

Silva (2016) estudou o comportamento de misturas asfálticas com adição do óleo de moringa nos teores de 1%, 1,5%, 2% e 2,5%, ao comparar seus resultados com o desta pesquisa é notório a maior eficiência do óleo de moringa na diminuição das temperaturas em relação ao CAP 50/70, visto que sua maior redução foi de 18,3°C para o teor de 2,5% de óleo. Já Carvalho (2018) utilizou óleo de girassol nos teores de 1%, 2% e 3%, e apresentou diminuição de 6°C para o teor de 3%, valor bem próximo ao encontrado nesta pesquisa.

4.1.4 Resultados da Perda de Massa

A Figura 23 apresenta os resultados das variações de massa dos ligantes modificados com óleo de canola após a realização do procedimento em RTFO. Os ligantes confeccionados com ligante puro e o com os teores de canola estão em conformidade com a Norma DNIT-095/2006-EM, que preconiza variações de massa inferiores a 0,5%.

Figura 23 - Resultados da perda de massa após o ensaio RTFO

4.1.5 Resultado da análise química de ligantes modificados por meio de FTIR

O ligante modificado com os teores de 1%, 2% e 3% de óleo foram submetidos ao ensaio de FTIR objetivando a identificação dos principais grupos constituintes dos ligantes puros e modificados antes e após o RTFO. Os principais grupos funcionais analisados para as amostras de ligante com e sem o aditivo são praticamente os mesmos, tanto antes como após o procedimento de envelhecimento a curto prazo.

A Figura 24 e a Tabela 19 ilustram que os espectros de FTIR, do CAP puro e com adições do óleo de canola antes do envelhecimento a curto prazo (RTFO), apresentam as seguintes bandas características: picos em 2920 e 2851 cm^{-1} indicando vibrações de estiramentos axiais de grupos CH_2 , CH_3 (alifático), e vibrações de C-H em 1456 cm^{-1} e 1375 cm^{-1} relacionados, respectivamente, a deformações assimétricas e simétricas do CH_3 , respectivamente. Banda em torno de 718 cm^{-1} indicando a rotação de CH_2 de longas cadeias alifáticas.

Tabela 19 - Bandas de infravermelho características de um ligante asfáltico

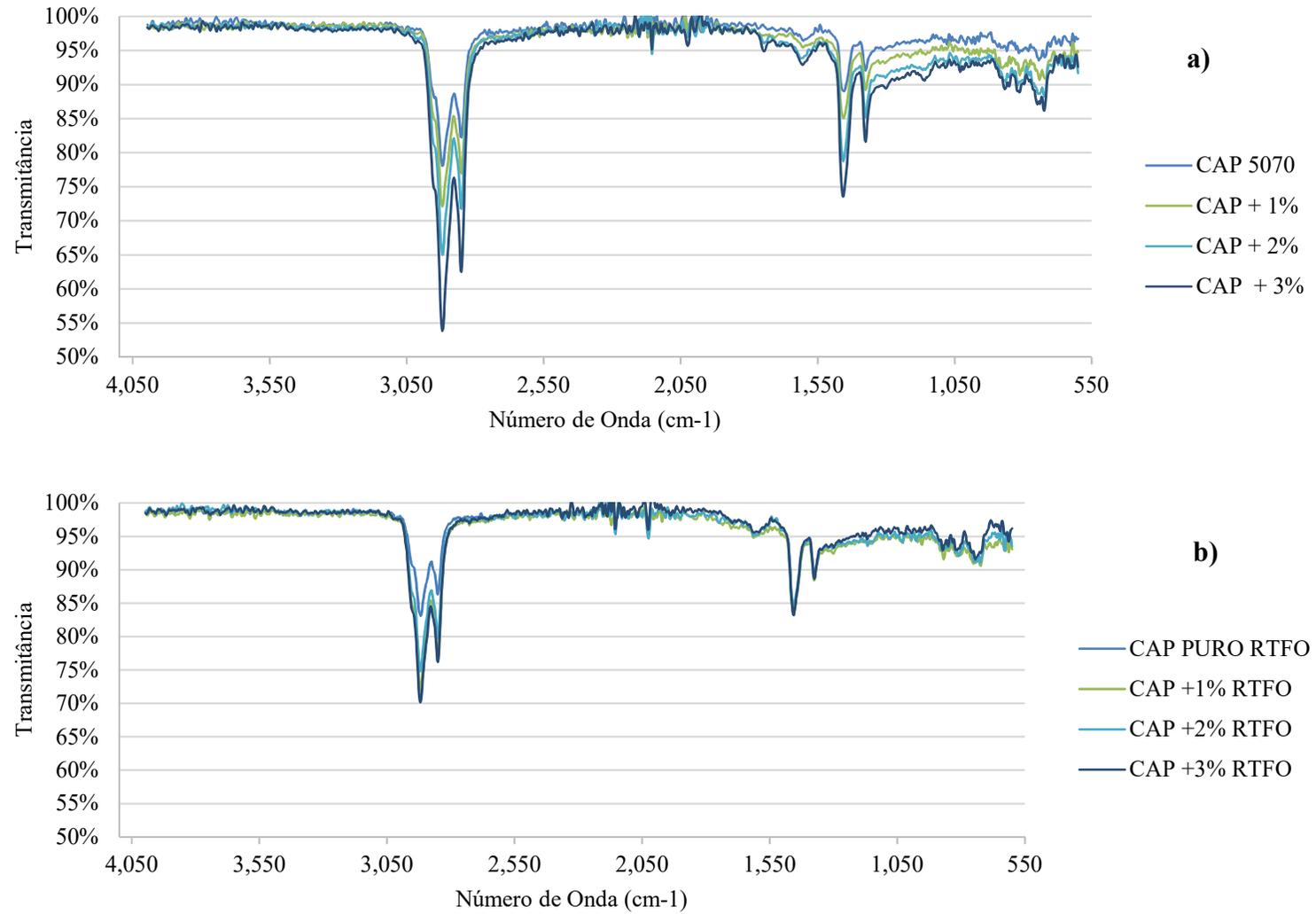
Banda (cm-1)	Grupamento	Tipo de vibração	Símbolo
2920	Alifáticos (metilas e metilenos)	Estiramento assimétrico	ν_{as} (CH_2 , CH_3)
2851	Alifáticos (metilenos)	Estiramento simétrico	ν_s (CH_2)
1610	Insaturações	Estiramento	C = C

1456	Alifáticos	Deformação no plano	δ (CH ₂ , CH ₃)
1375	Alifáticos	Deformação no plano	δ (CH ₃)
814	Aromáticos (2-3 H adjacentes)	Deformação fora do plano	γ C = CH à 2-3 H adjacentes
718	Longas cadeias alifáticas	Rotação	R (CH ₂) _n

Fonte: Adaptação de Silva (2005)

Os Picos presentes na faixa entre 1680 e 1760 cm⁻¹, referente ao estiramento da ligação C=O são indicativos de grupos carbonílicos presentes nas moléculas contidas no ligante asfáltico. Esses grupos podem pertencer a funções orgânicas como cetonas, aldeídos, ácidos carboxílicos e ésteres, podendo estar relacionados à eventos de oxidação das ligações insaturadas e/ou alifáticas nas moléculas constituintes dos ligantes, ou até mesmo podem estar presentes antes do processo nestas moléculas. O aparecimento de picos alarguecidos nesta região após o RTFO enfatiza a oxidação na matriz dos ligantes asfálticos, indicando a formação de várias carbonilas em ambientes químicos distintos ou de funções químicas diferentes (cetonas, aldeídos, etc.).

Figura 24 - FTIR do ligante puro e modificado com o óleo de canola (a) antes e (b) após o RTFO



Para avaliar o envelhecimento do ligante, Oliveira (2013) considerou a diferença das áreas dos gráficos antes e após o RTFO. Uma substância envelhece mais que a outra quando a área compreendida entre as linhas dos espectros após o envelhecimento é maior que as obtidas antes do envelhecimento representando uma maior oxidação. Assim, é possível quantificar a intensidade do envelhecimento de uma amostra em relação a outra.

A Tabela 20 apresenta as áreas de carbonila e sulfóxido calculadas conforme descreve o item 3.2.3.

Tabela 20 - Oxidação das amostras de ligante com e sem o óleo de canola antes e após o envelhecimento no RTFO

GRUPO FUNCIONAL	AMOSTRA	ÁREA DE OXIDAÇÃO	
		ANTES DO RTFO	APÓS O RTFO
Carbonila	CAP puro	1,69%	6,33%
	CAP + 1% óleo de canola	1,55%	0,80%
	CAP + 2% óleo de canola	2,46%	1,85%
	CAP + 3% óleo de canola	2,94%	2,21%
Sulfóxido	CAP puro	3,94%	1,81%
	CAP + 1% óleo de canola	1,18%	3,03%
	CAP + 2% óleo de canola	2,35%	4,02%
	CAP + 3% óleo de canola	2,94%	4,66%

Com as áreas de oxidação de cada amostra calculada é possível estabelecer uma comparação entre os processos de envelhecimentos ocorridos nos ligantes. O percentual oxidado do ligante é obtido por meio do quociente entre a diferença das áreas de oxidação antes e após o RTFO e a área de oxidação antes do envelhecimento da respectiva amostra (OLIVEIRA, 2013)

Tabela 21 - 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	2,51%	44,59%
CAP + 1% óleo de canola	1,10%	40,32%
CAP + 2% óleo de canola	1,06%	22,06%
CAP + 3% óleo de canola	0,99%	16,80%

Conforme exposto na Tabela 21 é possível observar o ligante modificado com o óleo de canola envelheceu menos do que a amostra de ligante puro. Logo, o óleo de canola atuou como um antioxidante. O teor de 3% de óleo de canola foi o que apresentou o menor percentual de oxidação seguido dos teores de 2% e 1%.

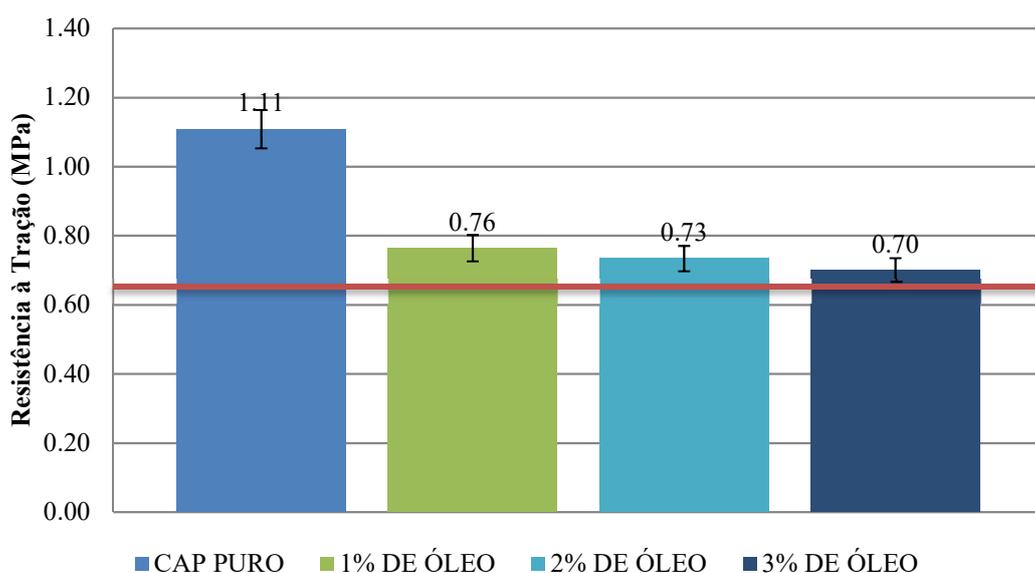
Carvalho (2018) quando avaliou o envelhecimento do ligante com óleo de girassol observou também que adição do óleo contribui para o menor envelhecimento do ligante. Ela obteve que o teor de 2% de óleo foi o que obteve melhor resultado, porém a autora ainda afirmou que esse resultado não era o esperado visto que o resultado esperado era que o percentual de oxidação para o teor de 2% se encontrasse entre os valores dos teores de 1 e 3% de aditivo.

4.1 Caracterização mecânica das misturas asfálticas

4.1.1 Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT)

A Figura 25 apresentam a média dos três resultados oriundos do ensaio de Resistência à Tração por compressão diametral para as misturas asfálticas com e sem a óleo de canola.

Figura 25 - Resultados do ensaio de RT



A partir dos dados representados na Figura 25 percebe-se que a resistência a tração diminuiu com o acréscimo do teor de óleo no ligante, porém todos os resultados de acordo com a norma do DNIT 031/2010 – ME. Esta norma determina que o valor mínimo do RT deve ser de 0,65MPa (25°C) para misturas asfálticas utilizadas em camadas de rolamento.

Pode-se observar que todas as misturas atingiram resistência à tração acima da exigida pela especificação, validando o teor de projeto selecionado e que a adição do óleo contribuiu com a diminuição do RT. A queda do RT já era esperada em virtude da redução da rigidez do material com a incorporação do óleo de canola, por serem produzidos e compactados a temperaturas menores. Pode-se observar que todas as misturas atingiram resistência à tração acima da exigida pela especificação, validando o teor de projeto selecionado. Os resultados para a mistura quente em sua maioria ficaram superiores a mistura morna, mostrando uma redução da resistência na mistura morna.

Em 2017 Barros estudou as propriedades mecânicas de misturas asfálticas quentes e mornas (com adição de aditivo surfactante) com diferentes tipos de ligante. Em seus resultados é possível observar que para todas as misturas estudadas os valores de RT foram menores para as misturas mornas quando comparada as quentes de referência.

Carvalho (2018), ao incorporar óleo de girassol ao ligante asfáltico, também observou uma diminuição da resistência à tração em relação à mistura de referência, a maior redução foi de aproximadamente 43%, para adição de 3% do óleo de girassol. Nesta pesquisa, ao comparar a mistura com CAP puro e óleo de canola, tivemos uma redução de 31,5% na amostra com 1% de óleo, 33,9% na amostra com 2% de óleo e de 36,9% na amostra com 3% de óleo de canola.

4.1.2 Resultados do ensaio de módulo de resiliência

Foi observado que a adição do óleo proporcionou uma redução do MR. Os valores de módulo de resiliência tenderam a diminuir com adição de óleo de canola no ligante, expressando perda de rigidez. A Tabela 22 e a Figura 26 mostram os resultados médios obtidos a partir de três corpos de prova.

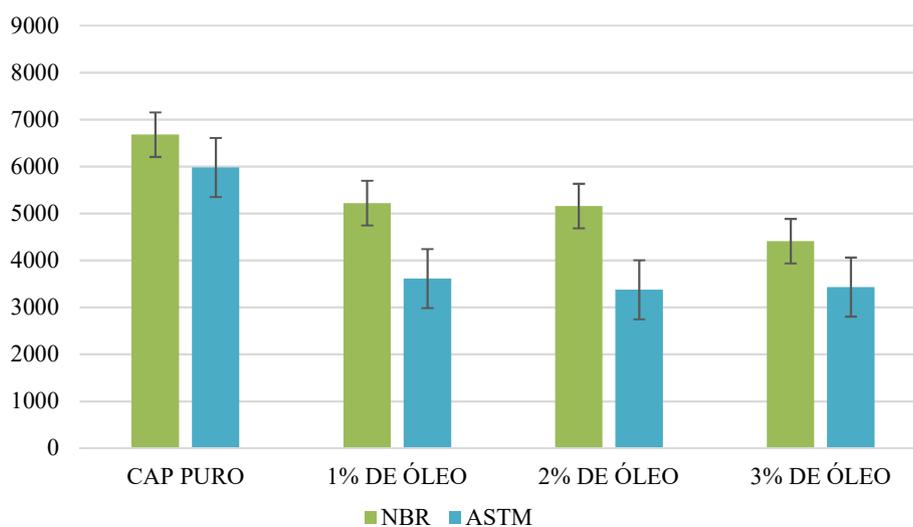
Tabela 22 - Resultado do ensaio de Módulo de Resiliência (MR)

AMOSTRA	MR ASTM (MPa)	MR NBR (MPa)
CAP PURO	5358.50	6677,50
CAP + 1% DE ÓLEO	3387.67	5220,67
CAP + 2% DE ÓLEO	3345.50	5157,00
CAP + 3% DE ÓLEO	3118.00	4410,00

Para o ensaio com os parâmetros da ASTM obteve uma redução 36,8%, 37,6% e 41,81% para os teores de 1%, 2% e 3% de óleo, enquanto a da NBR a redução foi de 21,82%, 22,77% e 34%.

Percebeu-se ainda as misturas com o óleo de canola obtiveram valores muito próximos indicando rigidez semelhante.

Figura 26 - Resultados do ensaio de MR



Carvalho (2018) obteve comportamento semelhante ao desta pesquisa, onde a maior redução do MR em relação a amostra de referência foi para a misturas com 3% do óleo de girassol.

De acordo com os dados apresentados por Carvalho (2018) é possível observar que o MR decresce com a incorporação do óleo de girassol, havendo uma redução de 3,39% do MR da mistura de referência para a mistura modificada com 1% do óleo. Da mistura modificada com 2% o decréscimo do MR foi de 12,56%, enquanto para a de 3%

essa redução foi de 44,12% para as temperaturas estabelecidas nos ensaios de viscosidade rotacional.

Luz (2017) e Andrade (2018) estudaram a influência da redução de 10°C e 20°C das temperaturas de referência de usinagem e compactação, a primeira com adição do óleo de milho e a segunda com o óleo de girassol. Foi possível observar que a redução de 10°C das temperaturas das MAMs resultou em um melhoramento do MR sobressaindo os resultados das misturas com temperaturas convencionais. Já as misturas com uma redução de 20°C promoveu uma pequena queda em relação ao MR da mistura de referência.

Vale salientar que a análise do Módulo de Resiliência não pode ser realizada de forma direta, visto que está relacionado à rigidez da mistura. Maiores ou menores valores de MR podem ser aceitos, dependendo da estrutura do pavimento, considerando a compatibilidade de deformações entre as camadas que o constituem, principalmente a camada de base (SILVA, 2011).

4.1.3 Resultados do ensaio de dano por umidade induzida – Lottman Modificado

O ensaio Lottman Modificado avaliou a propriedade de adesividade nas misturas asfálticas desta pesquisa, considerando o efeito nocivo da água. A Tabela 23 e Figura 27 apresentam os resultados do ensaio de Lottman modificado para as misturas asfálticas com e sem a adição de óleo de canola.

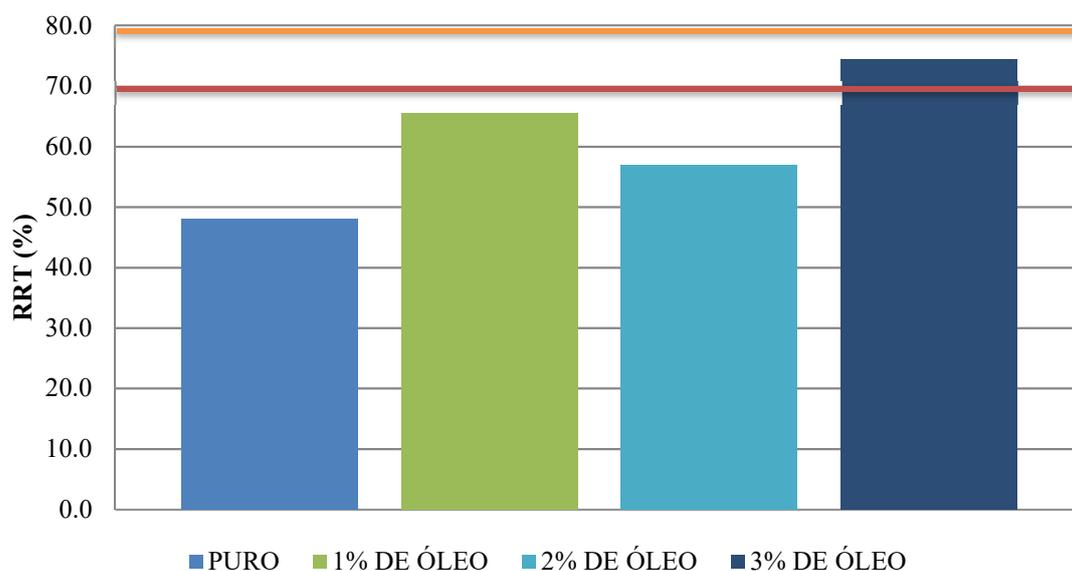
A AASHTO T283/2002 sugere que pelo método SUPERPAVE a RRT mínima deve ser de 80% e a especificação do DNIT 031/2006 preconiza que este valor deve ser superior a 70%.

A mistura de ligante puro não obteve valor mínimo estabelecido pelas normas, corroborando com a não adesividade da mistura asfáltica de referência. Avaliando os valores encontrados, é possível afirmar que existe um aumento do RRT com o incremento do óleo de canola, todavia houve uma queda no teor de 2%. Diante da inflexão encontrada no teor de 2% este ensaio o ensaio foi repetido e as características se mantiveram, mostrando que são inerentes das misturas.

Tabela 23 - Resultados do ensaio de Lottman Modificado

AMOSTRA	PURO	1% DE ÓLEO	2% DE ÓLEO	3% DE ÓLEO
RRT (%)	48.0%	65.6%	57.0%	74.4%

Figura 27 - Resultados da Relação da Resistência Retida à Tração



No que diz respeito ao valor de RRT, pode-se afirmar que a adição do óleo de canola atuou de forma benéfica nas misturas asfálticas, devido ao aumento do RRT em relação ao CAP PURO, o que poderia representar uma melhora no comportamento destas misturas em campo nas regiões de alta pluviosidade. Isso quando o ligante utilizado na mistura com óleo tiver um melhor desempenho quanto a adesividade.

Carvalho (2018) quando adicionou o óleo de girassol obteve um aumento do RRT em relação a mistura de referência de 38%, 58% e 53% para os teores de 1%, 2% e 3% do óleo nesta ordem. Enquanto nesta pesquisa o aumento foi de 37%, 19% e 55% após a adição do óleo de canola nos teores de 1%, 2% e 3% respectivamente. Mesmo não atendendo os parâmetros mínimos estabelecidos por normas, exceto para a mistura com 3% de óleo de canola, conclui-se que a adição do óleo no ligante contribuiu com o aumento da resistência da mistura asfáltica a ação deletéria da água.

Algumas pesquisas também obtiveram um aumento do RRT com a utilização de alguns aditivos de misturas mornas, indicando a possibilidade destes aditivos serem utilizados como agentes melhoradores da resistência a ação da água nas misturas asfálticas (BARROS, 2017; CAVALCANTE, 2016; MORAES, 2018; SALES, 2015).

4.1.4 Resultados do ensaio de Vida de Fadiga

A curva de fadiga nos fornece informações sobre a susceptibilidade do revestimento à aplicação de carregamentos cíclicos. Esta informação está no coeficiente angular da reta (n_1), pois, quanto maior for a inclinação, menor será a susceptibilidade do pavimento, conseqüentemente menor será o risco da mistura sofrer trincamento prematuro devido à erros construtivo ou de projeto (CAVALCANTE, 2016; OTTO, 2009).

O ensaio de fadiga foi executado com quatro níveis de tensões, variando de 30% a 50% da RT. As curvas de vida de fadiga estão nas Figura 28 e Figura 29. Para cada uma das curvas foi possível gerar equações que melhor se adequaram as possíveis linhas de tendência, estando expostas nas Tabela 24 e Tabela 25.

Com os resultados da Tabela 24 e Tabela 25 verifica-se que todas as curvas tiveram bom coeficiente de determinação (R^2), evidenciando a qualidade do ajuste dos modelos em relação aos pontos observados. As curvas com 1% de óleo de canola foram as que apresentaram menor dispersão, ou seja, valores de R^2 mais próximos de 1, enquanto que as curvas de referência apresentaram os menores coeficientes.

Tabela 24 - Modelo de fadiga em função da diferença de tensões.

AMOSTRA	MODELO	R^2	k_1	n_1
CAP Puro	$N = 787011 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{10,26}$	0,8925	787011	10,26
1% de Óleo de Canola	$N = 59538 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{7,828}$	0,9762	59538	7,828
2% de Óleo de Canola	$N = 12574 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{6,233}$	0,9575	12574	6,233
3% de Óleo de Canola	$N = 3162,3 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{5,402}$	0,9218	3162,3	5,402

O coeficiente angular da reta de fadiga da mistura (n_1) de referência é de 10,26, enquanto que este mesmo coeficiente, para as curvas com óleo são de 7,828; 6,233 e 5,402 para os teores de 1%, 2% e 3% respectivamente. Com base na Tabela 24 é possível observar que a mistura de referência apresenta maior resistência a altas tensões, devido ao elevado valor de n_1 e maior sensibilidade à diferença de tensões.

Para analisar os gráficos de diferença de tensões, Morilha Junior (2004) classificou a vida de fadiga de misturas asfálticas em laboratório de acordo com os níveis de tensão alcançados durante o ensaio. Esta metodologia classifica os resultados em três níveis de diferença de tensões: 0,5 MPa (nível baixo); 1,0 MPa (nível médio) e 2,0 MPa (nível alto);

Figura 28 - Gráfico dos modelos de fadiga em função da diferença de tensões.

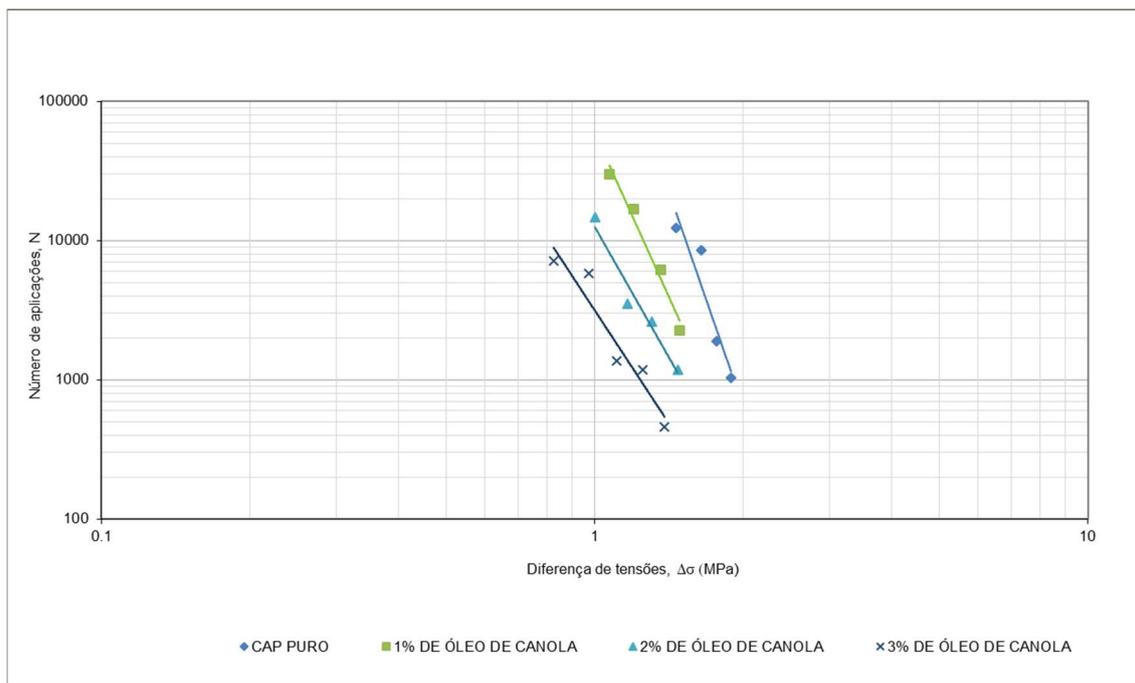


Tabela 25 - Variação da vida de fadiga com o nível de diferença de tensões aplicado.

AMOSTRA	MODELO	$\Delta\sigma = 0,5$ Mpa	$\Delta\sigma = 1,0$ MPa	$\Delta\sigma = 2,0$ MPa
CAP Puro	$N = 787011 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{10,26}$	$9,65 \cdot 10^8$	$7,87 \cdot 10^5$	$6,42 \cdot 10^2$
1% de Óleo de Canola	$N = 59538 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{7,828}$	$1,35 \cdot 10^7$	$5,95 \cdot 10^4$	$2,62 \cdot 10^2$
2% de Óleo de Canola	$N = 12574 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{6,233}$	$9,46 \cdot 10^5$	$1,26 \cdot 10^4$	$1,67 \cdot 10^2$
3% de Óleo de Canola	$N = 3162,3 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{5,402}$	$1,34 \cdot 10^5$	$3,16 \cdot 10^3$	$7,48 \cdot 10^1$

Porém, apesar da mistura de referência apresentar maior resistência a altas tensões, devido ao elevado valor de n_1 , a mesma apresenta uma maior sensibilidade à diferença de tensões para essas misturas.

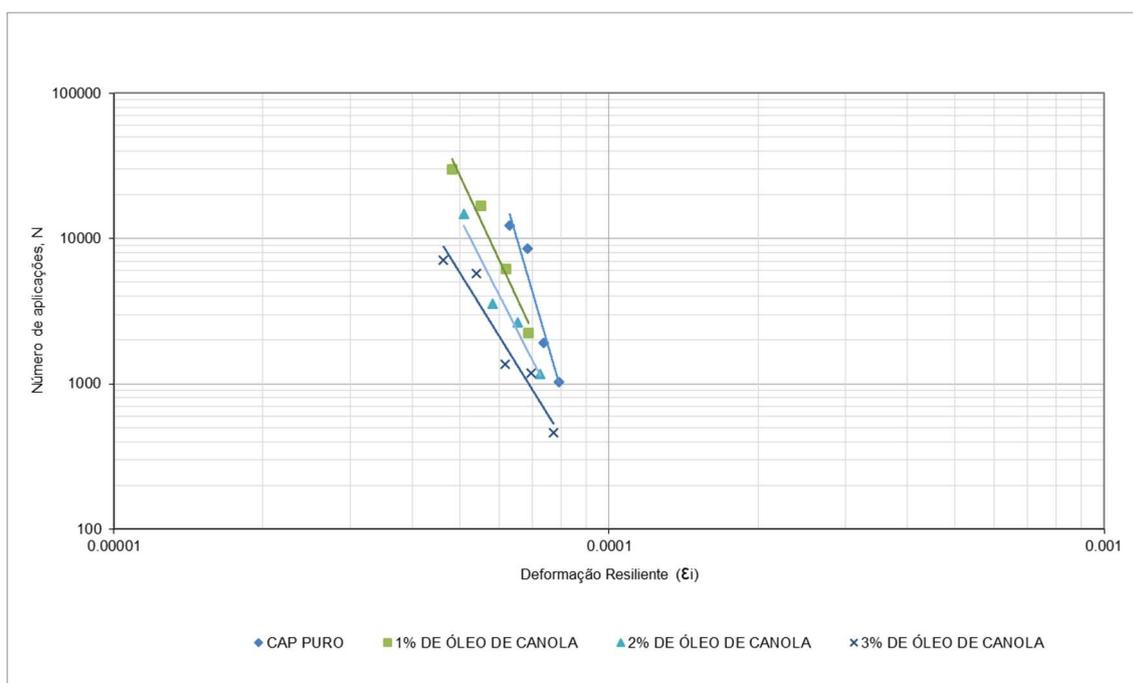
Com base nos resultados da Tabela 25 é possível observar que para todos os níveis de tensão a mistura de referência foi a de melhor vida de fadiga, seguido pelo teor de 1%,

2% e 3% de óleo de canola, porém deve-se observar a sensibilidade da mistura de referência para a variabilidade de tensões.

Tabela 26 - Modelo de fadiga em função da deformação resiliente específica.

Amostra	Modelo	R ²	K2	N2
CAP Puro	$N = 1.10^{-45} \left(\frac{1}{\Delta \varepsilon_i}\right)^{11,68}$	0,9425	1.10^{-45}	11,68
1% de Óleo de Canola	$N = 9.10^{-28} \left(\frac{1}{\Delta \varepsilon_i}\right)^{7,315}$	0,9710	9.10^{-28}	7,315
2% de Óleo de Canola	$N = 3.10^{-25} \left(\frac{1}{\Delta \varepsilon_i}\right)^{6,68}$	0,9466	3.10^{-25}	6,688
3% de Óleo de Canola	$N = 1.10^{-20} \left(\frac{1}{\Delta \varepsilon_i}\right)^{5,499}$	0,9282	1.10^{-20}	5,499

Figura 29 - Gráfico dos modelos de fadiga em função da deformação resiliente específica.



A análise para a deformação resiliente específica seguiu modelos semelhantes aos da fadiga em função da diferença de tensões, onde os parâmetros k2 e n2 representam os coeficientes do modelo e o coeficiente R² representa a qualidade de ajuste do modelo.

Com base no gráfico referente a vida de fadiga em função da deformação resiliente específica, foi realizada uma análise do n2 (coeficiente de inclinação das curvas), observou-se um comportamento semelhante aos da curva vida de fadiga × diferença de tensões. Diante disso adotou-se três níveis de deformações de resiliência:

3.10^{-5} cm/cm (nível baixo); 6.10^{-5} cm/cm (nível médio) e 1.10^{-4} cm/cm (nível alto) (CAVALCANTE,2016).

Tabela 27 - Variação da vida de fadiga com o nível de deformação resiliente.

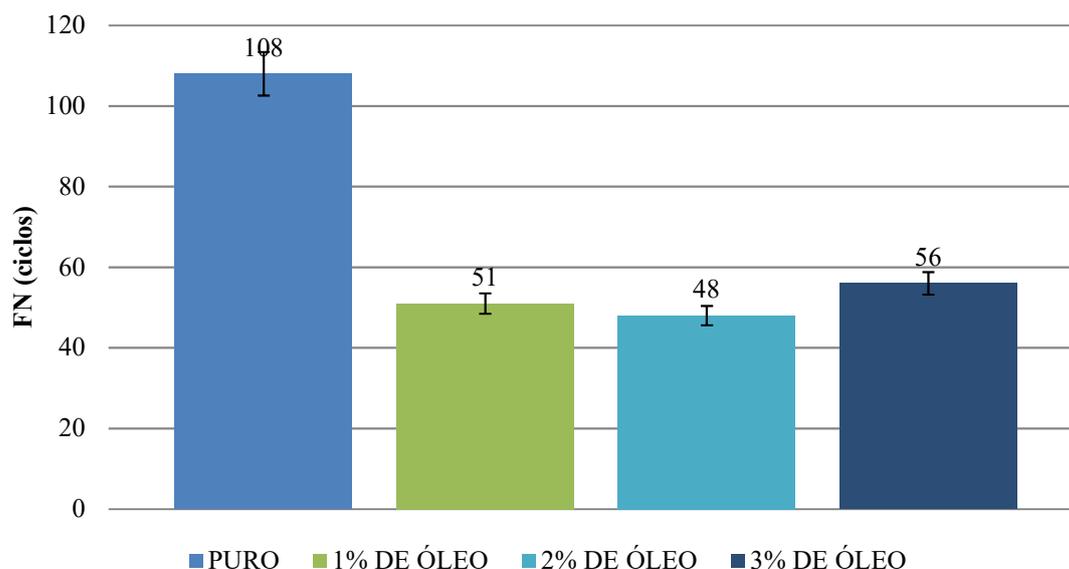
Amostra	Modelo	$\Delta\varepsilon_i = 3.10^{-5}$	$\Delta\varepsilon_i = 6.10^{-5}$	$\Delta\varepsilon_i = 1.10^{-4}$
CAP Puro	$N = 1.10^{-45} \left(\frac{1}{\Delta\varepsilon_i}\right)^{11,68}$	$6,72.10^7$	$2,05.10^4$	$5,25.10^1$
1% de Óleo de Canola	$N = 9.10^{-28} \left(\frac{1}{\Delta\varepsilon_i}\right)^{7,315}$	$1,09.10^6$	$6,87.10^3$	$1,64.10^2$
2% de Óleo de Canola	$N = 3.10^{-25} \left(\frac{1}{\Delta\varepsilon_i}\right)^{6,68}$	$5,32.10^5$	$5,16.10^3$	$1,69.10^2$
3% de Óleo de Canola	$N = 1.10^{-20} \left(\frac{1}{\Delta\varepsilon_i}\right)^{5,499}$	$7,44.10^4$	$1,64.10^3$	$9,91.10^1$

De acordo com os resultados contidos na Tabela 27, o melhor comportamento à fadiga para o nível baixo e médio de deformação foi para a mistura do ligante puro e modificado com o teor de 1% do óleo de canola, e para o nível alto a mistura do ligante com 2% de óleo de canola apresentou uma melhor desempenho, porém com valor bem próximo de 1%, este comportamento semelhante ao encontrado por Carvalho (2018).

4.1.5 Resultados do ensaio de *Flow Number*

A Figura 30 apresenta os resultados do ensaio de *Flow Number* para as misturas asfálticas com adição de óleo de canola e para as misturas com CAP puro.

Figura 30 - Resultados do ensaio de *Flow Number*



Percebe-se que as misturas contendo óleo de canola apresentaram resultados inferiores de FN (48% - 55%) quando comparados a mistura com CAP puro. A redução já era esperada, visto que trabalhos de misturas mornas com adição de óleo de girassol, moringa, linhaça e cera de carnaúba apresentam valores de FN inferiores aos das misturas utilizando apenas o CAP 50/70. Indicando assim que as misturas com adição de aditivos redutores de temperaturas possuem um maior potencial à deformação permanente (CARVALHO, 2018; CAVALCANTE, 2016; MORAES, 2018).

A resistência à deformação permanente é uma das grandes preocupações no que se refere a misturas mornas, visto que as menores temperaturas de usinagem e compactação resultam também em uma menor rigidez inicial da mistura (FILHO, 2013).

Os parâmetros de referência sugeridos por Nascimento (2008) apresentados na Tabela 24 para avaliar a susceptibilidade das misturas asfálticas à deformação permanente. É possível observar que nenhuma das misturas analisadas, inclusive as misturas de referência, não atingiram se quer os critérios para serem empregadas em pistas de tráfego médio, devido os valores de FN menores que 300 ciclos. Logo, todas as misturas estudadas são adequadas para emprego em pistas de tráfego leve.

Tabela 28 - Valores mínimos de *Flow Number* para diferentes níveis de tráfegos

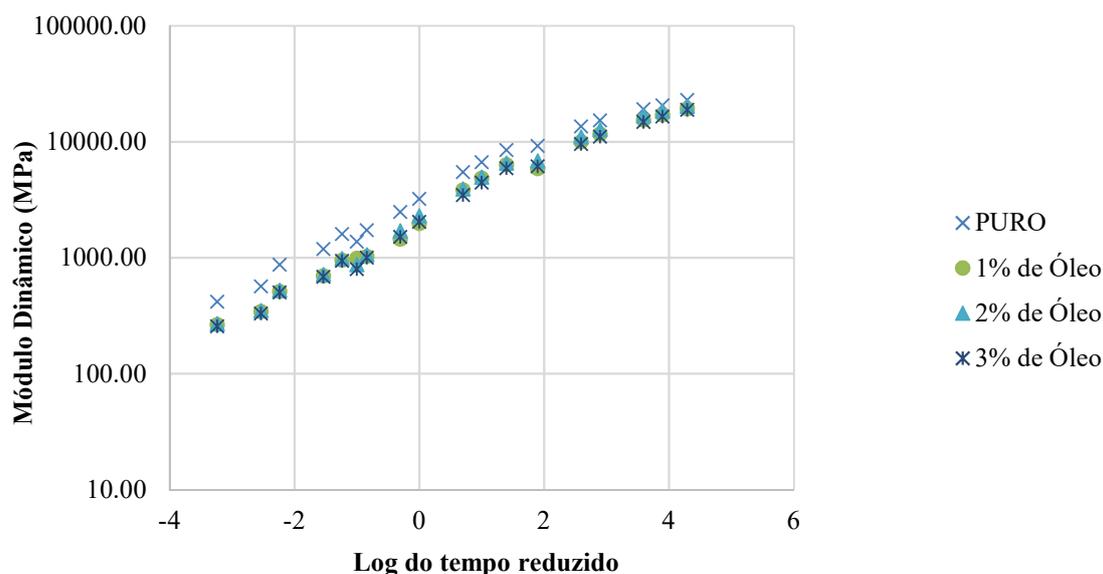
Pesquisas	Leve $< 3 \times 10^6$	Médio $< 3 \times 10^6$ 1×10^7	Pesado 1×10^7 ; 3×10^7	Extremamente pesado $> 3 \times 10^7$
Nascimento (2008)	-	300	700	-

4.1.6 Resultados do ensaio de Módulo dinâmico

Por intermédio das curvas mestras do módulo dinâmico é possível realizar a caracterização geral da rigidez da mistura asfáltica em relação a frequência de aplicação de carga e temperatura de ensaio. As curvas são obtidas por meio do procedimento de superposição tempo-temperatura, sendo a temperatura de referência 21°C.

A Figura 31 exhibe as curvas mestras das misturas asfálticas com e sem óleo de canola reunidas em um único gráfico.

Figura 31 - Curvas mestras de todas as misturas asfálticas avaliadas



Com os resultados da Figura 31 é possível observar que as misturas asfálticas com e sem adição do óleo de canola apresentaram comportamentos semelhantes para as baixas temperaturas mantendo as mesmas características de módulo dinâmico. Porém como já é esperado, as misturas adicionadas com óleo possuem maior sensibilidade a variação de temperaturas, diminuindo sua rigidez para altas temperaturas. Fato esse observado na Figura 56, onde as amostras modificadas com óleo de canola ensaiadas a 21,1°C apresentaram-se visivelmente valores menores que a amostra de referência. O mesmo observado nos ensaios a 37,8°C, onde a variação de módulo dinâmico encontram-se mais acentuada.

A propriedade viscoelástica do material é determinada pelo ângulo de fase (diferença entre o pulso de tensão e o pulso de deformação), quanto maior for este ângulo maior será a viscosidade e menor a elasticidade. Do ensaio de módulo dinâmico obteve-se também os gráficos que relacionam os ângulos de fase às frequências de ensaio para cada temperatura, conforme ilustram as Figura 32, Figura 33 e Figura 34.

Figura 32 - Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (4,4°C)

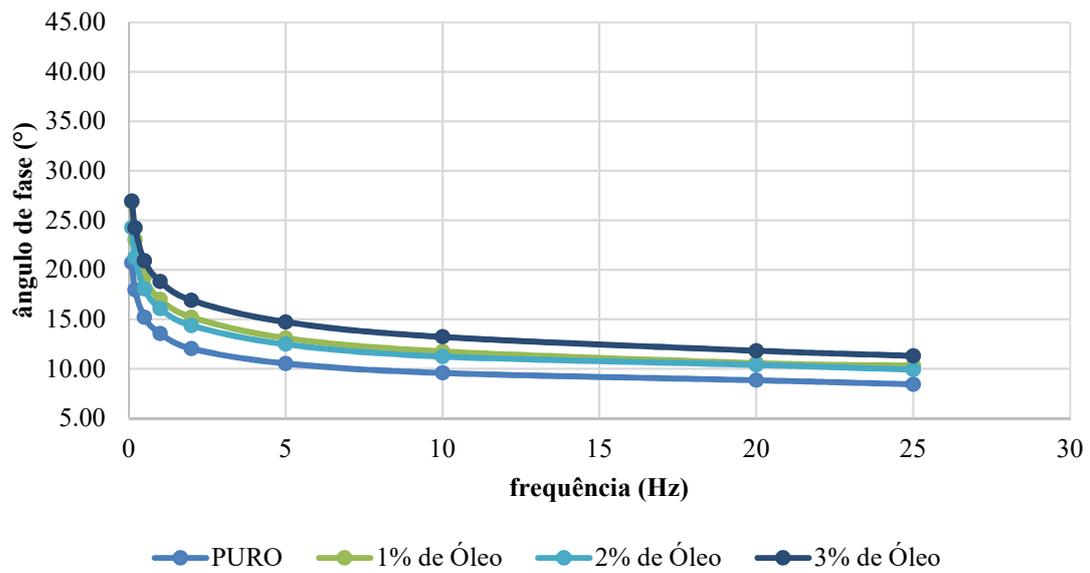


Figura 33 - Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (21,1°C)

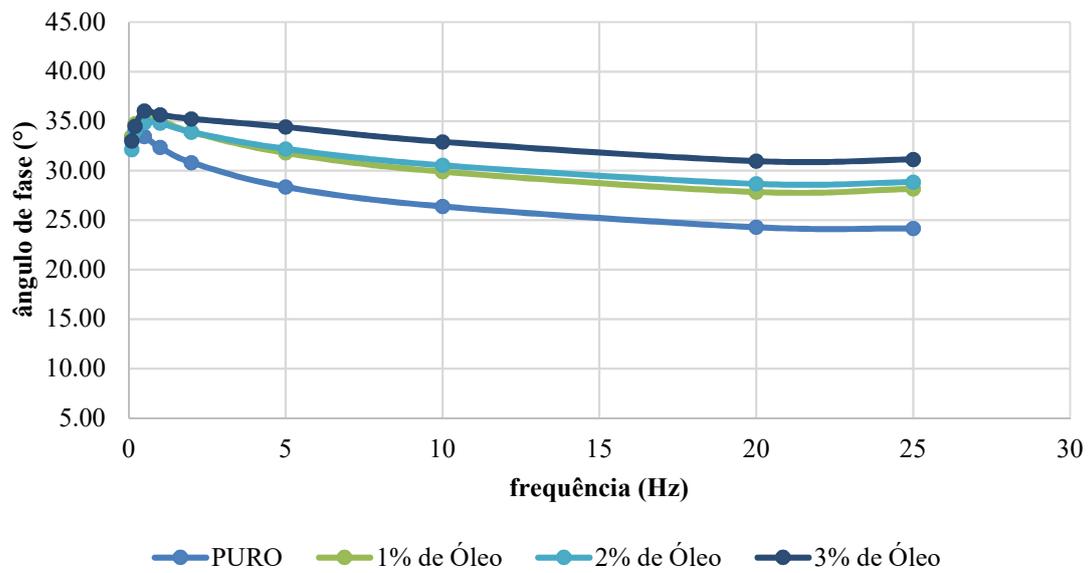
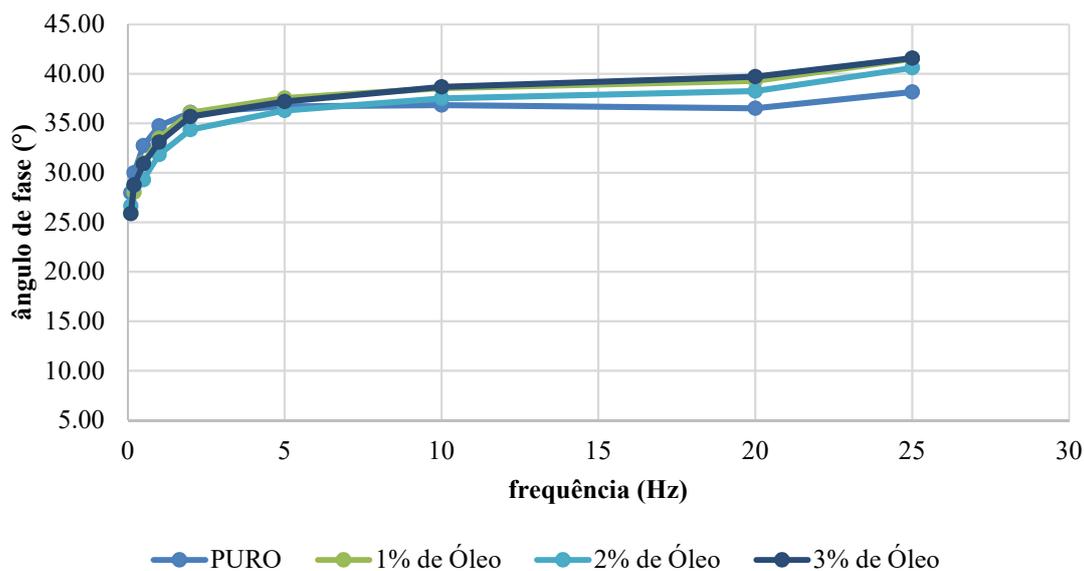


Figura 34 - Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (37,8°C)

Para todas as misturas analisadas, observou-se que o ângulo de fase aumenta com o aumento da temperatura e diminui com o aumento da frequência. Entretanto essa tendência é observada até a temperatura atingir 37° C, pois foi verificado que o ângulo de fase diminuiu em baixas frequências para essa temperatura mais elevada e aumentou com o aumento da frequência. Para menores temperaturas é observado o aumento do ângulo sugerindo que a maior parte da energia é dissipada no comportamento viscoelástico da mistura, implicando dizer que a relação entre o ângulo de fase em baixa temperatura e alta frequência é atribuída ao ligante, seguindo a tendência deste (COSTA, 2017).

5.0 CONCLUSÕES

O objetivo principal desta pesquisa foi averiguar o efeito da adição do óleo de canola nas propriedades mecânicas e na redução das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas. Foi observado que o teor de óleo influencia tanto nas propriedades mecânicas quanto na redução das temperaturas.

As temperaturas de trabalhabilidade reduziram linearmente com o aumento do teor de aditivo obtendo uma diminuição máxima de 5,2°C nas temperaturas de produção para o teor de 3% de óleo de canola. Devido a pequena redução encontrada, estas misturas não podem ser classificadas como MAMs, mas ainda assim proporcionam uma economia de energia durante o aquecimento do ligante asfáltico e dos agregados na usina de asfalto.

Quanto as análises mecânicas podem-se concluir que devido a diminuição da vida de fadiga e a redução de cerca de 50% do Flow Number em relação a mistura de referência não é possível indicar o uso do ligante asfáltico com óleo de canola. Entretanto as misturas asfálticas com óleo apresentaram aspectos positivos, aumentado a resistência a ação deletéria da água. Vale salientar também que nem a mistura de referência obteve resultado de Flow Number e Lottman satisfatórios, podendo este ter sido o problema para as baixas respostas mecânicas das misturas com óleo de canola.

Sugestões para Pesquisas Futuras

- Avaliar misturas asfálticas com óleo de canola produzidas com agregados graníticos, aditivo melhorador de adesividade e maior quantidade de filler;
- Avaliação reológica do ligante asfáltico modificado com o óleo de canola;
- Avaliar misturas asfálticas, produzidas com a adição do óleo de canola, em temperaturas inferiores as determinadas no ensaio de viscosidade rotacional;
- Avaliar misturas asfálticas, produzidas com a adição do óleo de canola na forma residual;
- Estudar outras faixas granulométricas para misturas asfálticas, para a verificação das propriedades volumétricas e mecânicas com o óleo de canola;

- Analisar o desempenho das misturas asfálticas comuns e as modificadas com o óleo de canola em trecho experimentais.
- Avaliar o óleo de canola como agente rejuvenescedor de misturas asfálticas recicladas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO TP 79/16, *Standard Method of Test For Determining The Dynamic Modulus and Flow Number for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)*. Washington, D.C., 2016.

ANDRADE, R. M., *Influência das temperaturas de usinagem e compactação na fabricação de misturas asfálticas mornas*. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM 2872: *Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)*, EUA, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 4123: *Standard Method of Indirect Tension Test For Resilient Modulus Of Bituminous Mixtures*, EUA, 1982.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16018: - *Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida..* São Paulo, 2011.

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.

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.

CARDOZA, V., e STEWART, C. N. (2007) Canola. *Biotechnology in Agriculture and Forestry*. doi:10.1007/978-3-540-71711-9_2

CARVALHO, J. R. *Estudo do comportamento do asfalto modificado com óleo de girassol visando à obtenção de misturas mornas*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2018.

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.

CERATTI, J. A. P., BERNUCCI, L. B., SOARES, J. B. (2015) *Guia Técnico - Utilização de Ligantes em Serviço de Pavimentação*. 1ª ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 166p. 2015.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. *Acompanhamento da safra brasileira: grãos. v. 2: safra 2018/2019 n. 11; Quarto levantamento*, Brasília, 2019. 126 p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. *Impactos dos Projetos de Integração Nacional do Plano CNT de Transporte e Logística 2018 na infraestrutura de transporte*. Brasília: CNT: SEST SENAT. Disponível em: <[http://cms.cnt.org.br/Imagens CNT/PDFs CNT/Transporte em Movimento/Transporte_em_Movimento_Novembro_2018.pdf](http://cms.cnt.org.br/Imagens/CNT/PDFs/CNT/Transporte/Movimento/Transporte_em_Movimento_Novembro_2018.pdf)> Acesso em: 12 fev. 2019.

COSTA, A. A., BENTA, A. *Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt*. Journal of Cleaner Production, v. 112, p. 2308–2317, 2016. doi:10.1016/j.jclepro.2015.10.077

COSTA, L. F., *Análise do uso das fibras do pseudocaule da bananeira em misturas asfálticas SMA*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

CRUZ, G. K. A. (2018) *Influência das propriedades morfológicas e dos métodos de seleção granulométrica nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

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.

DE MORI, C.; TOMM, G. O.; FERREIRA, P. E. P. Aspectos econômicos e conjunturais da cultura da canola no mundo e no Brasil. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2014. 36 p. html. (Embrapa Trigo. Documentos online, 149). Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do149.htm>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT – ME 035/98. *Agregados – Determinação da Abrasão Los Angeles*. Rio de Janeiro, 1998.

_____ DNIT – ME 083/98. *Agregados – Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro, 1998.

_____ DNIT – ME 084/95 – *Agregado miúdo - determinação da densidade real*. Rio de Janeiro, 1995.

_____ DNIT – ME 131/2010. *Materiais Asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola*. Rio de Janeiro, 2010.

_____ DNIT - ME 136/10 – *Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral* – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

_____ DNIT – ME 155/2010 - *Material asfáltico - determinação da penetração*. Rio de Janeiro, 2010.

_____ DNIT – ME 183/2018 – *Pavimentação Asfáltica – Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada* – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE.
DNIT - ME 136/10 – *Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral* – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

_____ DNER-ME 035. Agregados - Determinação da Abrasão “Los Angeles”. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1998.

_____ DNER-ME 081. Agregados - *Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado graúdo*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1998.

_____ DNER-ME 083. Agregados - – *Análise Granulométrica*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1998.

FEITOSA, J. P. M. *Avaliação do Uso de Diferentes Tipos de Cera de Carnaúba como Aditivo para Misturas Mornas*. 2015. Tese de doutorado – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.

FILHO, N.W. *Avaliação da Influência da redução das Temperaturas de Usinagem e de Compactação no Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Mornas*. 2013. Dissertação, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, Brasil.

HURLEY, G. C.; PROWELL, B. D. *Evaluation of SASOBIT® for use in warm mix asphalt*. National Asphalt Pavement Association - NAPA.

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.

PALACIO, C.H. P; MAQUILLÓN, J. E. C. *Diseño de mezcla asfáltica tibia a partir de la mezcla de asfalto y aceite crudo de palma*. Dyna, v. 80, n. 179, 2013.

PAVIANI, T. M. *Efeitos da adição de cal hidratada no comportamento mecânico de concretos asfálticos produzidos com agregado granítico*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.

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.

LUZ, P. M. S. G., *Avaliação das propriedades mecânicas de misturas asfálticas modificadas com a adição do óleo de milho*. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

MEDINA, J. de; MOTTA, L. M. G. *Mecânica dos Pavimentos*. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 574p. 2005.

MELLO, D. *Avaliação da adição de Evotherm no comportamento de misturas asfálticas em laboratório e no desempenho em campo*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

MERIGHI, C. F. *Estudo do comportamento de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos com adição de borracha moída de pneu*. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2015.

MOHD HASAN, M. R., GOH, S. W., YOU, Z. (2013) *Comparative study on the properties of WMA mixture using foamed admixture and free water system*. Construction and Building Materials, 48, 45–50. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.06.028

MORAES, T. M. R. P. de. (2018) *Utilização da cera de carnaúba como aditivo redutor de temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

MORILHA JUNIOR, A. *Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas*. Florianópolis, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, 165p.

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.

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.

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 CCBIT-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.

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., e Bob, F. (2012) *Warm-Mix Asphalt : Best Practices*. (3ª.)

RUBIO, M. C.,; MARTINEZ, G.; BAENA, L.; MORENO, F. *Warm mix asphalt: an overview*. Journal of Cleaner Production 24 – p. 76-84, 2012. doi:10.1016/j.jclepro.2011.11.053

RUBIO, M. D. C., MORENO, F., MARTÍNEZ-ECHEVARRÍA, M. J., MARTÍNEZ, G., E VÁZQUEZ, J. M. (2013) *Comparative analysis of emissions from the*

manufacture and use of hot and half-warm mix asphalt. Journal of Cleaner Production, 41, 1–6. doi:10.1016/j.jclepro.2012.09.036

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.

SILVA, J. A.A.; *Estudo das Propriedades Físicas, de Estado e Mecânicas de Misturas Asfálticas párea os revestimentos de pista de aeródromo*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2011.

STIMILLI, A., VIRGILI, A., E CANESTRARI, F. *Warm recycling of flexible pavements: Effectiveness of Warm Mix Asphalt additives on modified bitumen and mixture performance*. Journal of Cleaner Production, 156, 911–922. 2017. doi:10.1016/j.jclepro.2017.03.235

TOMM, G. O.; WIETHOLTER, S.; DALMAGO, G. A.; SANTOS, H. P. dos. *Tecnologia para produção de canola no Rio Grande do Sul*. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009. 41 p. html. (Embrapa Trigo. Documentos online, 113). Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do113.htm>. Acesso em: em: 12 nov. 2018.

TOMM, G. O.; RAPOSO, R. W. C.; SOUZA, T. A. F. de; OLIVEIRA, J. T. de L.; RAPOSO, E. H. S.; SILVA NETO, C. P. da; BRITO, A. C.; NASCIMENTO, R. de S.; RAPOSO, A. W. S.; SOUZA, C. F. de. *Desempenho de genótipos de canola (Brassica napus L.) no Nordeste do estado da Paraíba, Nordeste do Brasil*. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2008. 15 p. html (Embrapa Trigo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento Online, 65). Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/bp/p_bp65.htm>.

TOMM, G. O.; ALMEIDA, J. L. de; CARRAFA, M.; RIFFEL, C. T.; EASTON, A.; DIPAOLO, S.; ÖSTERLEIN, N. *Challenges and opportunities for canola production in Brazil and Paraguay*. In: INTERNATIONAL RAPESEED CONGRESS, 14., 2015, Saskatoon, SK, Canada. Innovation for tomorrow: abstracts. Winnipeg: Canola Council

of Canada; Saskatoon: Ag-West Bio, 2015. p. 183. Theme D - Crop production, abiotic stress, environmental impact, 182.