



---

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

**ESTUDO DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS MODIFICADAS COM ADIÇÃO  
DA CERA DE ABELHA**

TALITA MIRANDA DE SOUSA

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

CAMPINA GRANDE - PB

FEVEREIRO DE 2020

**ESTUDO DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS MODIFICADAS  
COM ADIÇÃO DA CERA DE ABELHA**

TALITA MIRANDA DE SOUSA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Área de Concentração – Geotécnica

Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena

Orientador

CAMPINA GRANDE – PARAÍBA

FEVEREIRO DE 2020

S725e      Sousa, Talita Miranda de.  
Estudos de misturas asfálticas mornas modificadas com adição da  
cera de abelha / Talita Miranda de Sousa. – Campina Grande, 2020.  
108 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) –  
Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e  
Recursos Naturais, 2020.  
"Orientação: Prof. Dr. Adriano Elisio de Figueiredo Lopes Lucena".  
Referências.

1. Misturas Asfálticas. 2. Cera de Abelha – Misturas Asfálticas  
Mornas. 3. Aditivo Natural – Cera de Abelha. I. Lucena, Adriano Elisio  
de Figueiredo Lopes. II. Título.

CDU 625.85(043)

## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Autora: Talita Miranda de Sousa**

**Título: ESTUDO DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS MODIFICADAS COM  
ADIÇÃO DA CERA DE ABELHA**

Dissertação defendida e aprovada em: 28/02/2020

Banca Examinadora

(Assinatura): Adriano Elísio de F. L. Lucena

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

(Assinatura): Verônica Teixeira Franco Castelo Branco

**Profa. Ph.D. (Examinadora Externa) Verônica Teixeira Franco Castelo Branco  
Universidade Federal do Ceará – UFC**

(Assinatura): John Kennedy Guedes Rodrigues

**Prof. D.Sc. (Examinador Interno) John Kennedy Guedes Rodrigues  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG**

## DEDICATÓRIA

*Aos que me cuidam e me guiam lá do céu, Cláudio (in memoriam) e Joaquim (in memoriam), pai e avô, amados. Meu eterno orgulho por vocês, meus exemplos de seres humanos.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por Sua mão em todos os detalhes da minha vida.

Aos meus pais, Elcirene e Cláudio (*in memoriam*), por toda amor, exemplo, cuidado, dedicação e esforço. Tudo por vocês e para vocês.

Aos meus irmãos, Túlio e Júlio, pelo companheirismo e parceria de sempre.

Aos meus avós maternos, Odelita (*in memoriam*) e Joaquim (*in memoriam*), por me inspirarem a ser uma pessoa melhor. São meus exemplos de bondade, fé e compaixão.

Ao meu orientador, Professor Adriano, por todos ensinamentos e confiança depositada todos esses anos, muito obrigada.

Aos técnicos e colegas do Laboratório de Engenharia de Pavimentos, Arthur, Jadilson, Joseildo e Ladjane, pela ajuda na execução das várias etapas deste trabalho.

Aos amigos do LEP, Ablenya, Alexandre, Christian, Conrado, Daniel, Mateus, Natalia, Paulo, Priscila, Thamires, por toda paciência e colaboração.

Aoss alunos, Edilza Rakel e Vinícius, pela ajuda e disposição, espero que possa ter contribuído para a formação de cada um.

Aos amigos, Amanda, Anna Katarina, Luana e Samir, pela amizade e apoio durante a jornada. Ao meu amigo Gutemberg, pelo incentivo a seguir na área acadêmica.

Aos meus familiares, pela torcida e confiança.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, pela oportunidade de aprendizado.

À todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho...

Gratidão!

## RESUMO

Na indústria da pavimentação, o emprego de misturas asfálticas a quente contribui para a emissão de gases causadores do efeito estufa, já que esse tipo de mistura demanda o uso de elevadas temperaturas de usinagem e compactação, alcançadas por meio da queima de combustíveis fósseis, a fim de garantir trabalhabilidade à mistura e estabilidade e durabilidade ao pavimento. Isto posto, surgiu a técnica de misturas asfálticas mornas, as quais são produzidas e compactadas à temperaturas inferiores àquelas empregadas nas misturas quentes. Esta é considerada uma alternativa menos impactante ao ambiente, na produção de revestimentos asfálticos. A fim de produzir misturas mornas, existe uma variedade de aditivos à base de cera, disponíveis no mercado, no entanto, nenhum utiliza a cera natural, como principal componente. O objetivo deste estudo foi avaliar o potencial do uso da cera de abelha como um aditivo na produção de mistura mornas, partindo da hipótese de que a cera de abelha é um aditivo natural capaz de reduzir a viscosidade do ligante, e conseqüentemente, as temperaturas de usinagem e compactação. Foram realizados ensaios reológicos e mecânicos, a partir de três teores de cera de abelha: 1%, 3% e 5%, em massa de ligante asfáltico. Com o propósito de avaliar os efeitos da redução das temperaturas de produção e compactação e a influência da incorporação do aditivo na mistura asfáltica, foram realizados os seguintes ensaios mecânicos: Resistência à Tração, Módulo de Resiliência, Dano por Umidade (Lottman), *Flow Number*, Módulo Dinâmico e Vida de Fadiga. O ligante modificado com 5% de cera de abelha apresentou uma considerável diminuição da temperatura de usinagem de 9°C, e 12°C na de compactação, o que possibilita a redução das emissões de gases poluentes e o gasto energético. Porém, ainda existem algumas lacunas que necessitam ser preenchidas para o emprego deste tipo de aditivo na produção de misturas asfálticas mornas, como ausência de uma normativa nacional que aborde entre outros itens, uma metodologia específica para determinação das temperaturas de usinagem e compactação para esse tipo de mistura.

**Palavras chave:** Cera de Abelha, Aditivo Natural, Misturas Asfálticas Mornas, Ligante Asfáltico Modificado.

## ABSTRACT

In paving industry, the use of hot asphaltic mixtures contributes to emit greenhouse gases, as this type of mixture requires the use of high machining and compaction temperatures, achieved by burning chemical fuels, in order to guarantee workability to the mixture, stability and durability to the pavement. Therefore, emerged the technique of warm asphalt mixtures, as they are produced and compacted to lower temperatures used by hot mixtures. This is considered a less impactful alternative for environment, in the production of asphalt coatings. In order to produce warm mixtures, there are a variety of wax-based additives available in the Market, however, none use a natural wax as the main component. The aim of this study was to evaluate the potential for use of beeswax as an additive in the production of warm mixtures, based on the hypothesis that beeswax is a natural additive capable of reducing the viscosity of the binder and, consequently, the machining and compaction temperatures. Rheological and mechanical tests were carried out, based on three levels of beeswax: 1%, 3% and 5%, by mass of asphalt binder. In order to evaluate the effects of reducing the temperature of production and compaction and the influence of the incorporation of additives in the asphalt mixture, the following mechanical tests were performed: Tensile Strength, Resilience Module, Moisture Damage (Lottman), Flow Number, Dynamic Module and Fatigue Life. The binder modified with 5% beeswax shows a decrease in the machining temperature of 9°C, and 12°C in the compaction, which allows the reduction of the polluting gases and energy expenditure. However, there are still some gaps that need to be filled for the use of this type of additive in production of asphalt mixtures, such as the absence of a national standard that aborts, among other items, a specific methodology for determining temperatures of use and compaction for this type of mixture.

**Keywords:** Beeswax, Natural Additive, Warm Asphalt Mixtures, Modified Asphalt Binder.

## SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 Objetivos.....	20
1.1.1 Objetivo Geral.....	20
1.1.2 Objetivos Específicos.....	21
1.2 Justificativa.....	21
1.3 Organização do Trabalho.....	22
2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.1 Misturas Asfálticas.....	23
2.2 Misturas Mornas.....	25
2.2.1 Benefícios das Misturas Mornas.....	26
2.2.2 Histórico.....	28
2.3 Técnicas para Produção de Misturas Mornas.....	31
2.3.1 Asfalto Espumado.....	32
2.3.2 Aditivos Químicos (Surfactantes).....	33
2.3.3 Aditivos Orgânicos e Ceras.....	34
2.3.3.1 Ceras.....	35
2.4 Cera de Abelha.....	37
2.4.1 Cera de Abelha como Aditivo para MAM.....	39
3.0 MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1 Materiais.....	47
3.1.1 Ligante Asfáltico.....	47
3.1.2 Agregados.....	47
3.1.3 Cera de Abelha.....	48
3.2 Métodos.....	48
3.2.1 Caracterização Físicas dos Agregados.....	48
3.2.1.1 Granulometria dos Agregados.....	49
3.2.1.2 Caracterização Físicas dos Agregados Graúdos.....	50
3.2.1.3 Caracterização Físicas dos Agregados Miúdos.....	50
3.2.2 Caracterização Reológica do Ligante.....	51
3.2.2.1 Mistura do Ligante com a Cera de Abelha.....	51
3.2.2.2 Propriedades Reológicas Empíricas.....	53

3.2.2.3	Propriedades Reológicas Fundamentais.....	53
3.2.3	Caracterização Química dos Materiais.....	54
3.2.4	Dosagem SUPERPAVE.....	55
3.2.5	Caracterização Mecânica das Misturas.....	59
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	60
4.1	Caracterização Química – FTIR.....	60
4.2	Caracterização Reológica do Ligante.....	64
4.2.1	Penetração.....	64
4.2.2	Ponto de Amolecimento.....	65
4.2.3	Índice de Susceptibilidade Térmica – IST.....	67
4.2.4	Perda de Massa.....	67
4.2.5	Viscosidade Rotacional.....	68
4.2.6	Grau de Desempenho – PG.....	71
4.2.7	Fluência e Recuperação sob Tensões Múltiplas – MSCR.....	76
4.2.8	Curva Mestra.....	80
4.2.9	Varredura Linear de Amplitude de Deformação – LAS.....	82
4.3	Caracterização Mecânica das Misturas Asfálticas.....	86
4.3.1	Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral – RT....	86
4.3.2	Módulo de Resiliência – MR.....	88
4.3.3	Lottman Modificado.....	89
4.3.4	Módulo Dinâmico – MD.....	90
4.3.5	Flow Number – FN.....	93
4.3.6	Vida de Fadiga.....	95
5.0	CONCLUSÕES.....	98
5.1	Sugestões para Pesquisas Futuras.....	99
6.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Estimativa da economia de energia e de custos no processo de mistura morna, comparada com o de uma mistura a quente convencional.....	28
Tabela 02 – Asfalto espumado.....	32
Tabela 03 – Aditivos surfactantes.....	33
Tabela 04 – Aditivos orgânicos.....	35
Tabela 05 – Resultados da caracterização do ligante BNA + Aditivo com cera de abelha.....	40
Tabela 06 – Caracterização reológica das amostras por meio do DSR.....	41
Tabela 07 – Teor ótimo de ligante para as amostras de BNA + Aditivo com cera de abelha.....	43
Tabela 08 – Caracterização do ligante.....	47
Tabela 09 – Ensaio e normas utilizadas para caracterização dos agregados.....	48
Tabela 10 – Quantidade passante acumulada (%).....	49
Tabela 11 – Caracterização física dos agregados graúdos.....	50
Tabela 12 – Caracterização física dos agregados miúdos.....	50
Tabela 13 – Viscosidades rotacionais obtidas nos ensaios pilotos.....	52
Tabela 14 – Ensaio e normas utilizadas para caracterização empírica do ligante.....	53
Tabela 15 – Ensaio e normas utilizadas para caracterização fundamental do ligante.....	53
Tabela 16 – Porcentagem de agregado das misturas de projeto.....	56
Tabela 17 – Porcentagem passando das misturas de projeto.....	57
Tabela 18 – Parâmetros volumétricos das misturas.....	58
Tabela 19 – Ensaio e normas utilizadas para caracterização mecânica das misturas.....	59

Tabela 20 – Oxidação das amostras de ligantes, puro e modificados, 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 – Penetração retida.....	65
Tabela 23 – Aumento da temperatura do ponto de amolecimento, após RTFO.....	66
Tabela 24 – Resultados de IST.....	67
Tabela 25 – Temperaturas de usinagem e compactação.....	70
Tabela 26 – Classificação de volume de tráfego baseado no valor de Jnr à 3200Pa.....	78
Tabela 27 – Valores estimados para vida de fadiga dos ligantes, puro e modificados...	85
Tabela 28 – Resumo das características de vida de fadiga das misturas.....	96

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Esquema de classificação das misturas asfálticas.....	24
Figura 02 – Emissão de fumos na aplicação de uma mistura quente.....	26
Figura 03 – Emissão de fumos na aplicação de uma mistura morna.....	27
Figura 04 – Variação de viscosidade das ceras.....	36
Figura 05 – Curvas Viscosidade-Temperatura para ligantes 70/100 modificados com Sasobit.....	37
Figura 06 – Fórmula química da cera de abelha.....	38
Figura 07 – Cera amarela <i>versus</i> Cera branca.....	38
Figura 08 – Comparação do índice de envelhecimento das amostras e de um ligante convencional.....	42
Figura 09 – Módulo de resiliência nas temperaturas de 25°C, 35°C e 45°C.....	43
Figura 10 – Resistência à fadiga das misturas, quente e morna.....	44
Figura 11 – Fluxograma das atividades desenvolvidas.....	46
Figura 12 – Cera de abelha utilizada na pesquisa.....	48
Figura 13 – Distribuição granulométrica dos agregados.....	49
Figura 14 – Cera de abelha trabalhada na peneira de malha 2,36mm.....	52
Figura 15 – Procedimento executado no DSR.....	55
Figura 16 – Etapas para dosagem, pela metodologia SUPERPAVE.....	56
Figura 17 – Curvas de Fuller.....	58
Figura 18 – Espectros de FTIR para as amostras de ligante asfáltico.....	60
Figura 19 – Espectro com faixa reduzida para as amostras de ligante puro e modificado com cera de abelha, antes e após tratamento em RTFO.....	62

Figura 20 – Resultados de penetração para os ligantes, puro e modificados.....	64
Figura 21 – Temperaturas de ponto de amolecimento para os ligantes, puro e modificados.....	66
Figura 22 – Resultados de perda de massa.....	68
Figura 23 – Resultado da viscosidade rotacional, antes do RTFO.....	69
Figura 24 – Resultado da viscosidade rotacional, após o RTFO.....	69
Figura 25 – Temperaturas superiores de PG.....	71
Figura 26 – Estimativa das temperaturas de falha.....	72
Figura 27 – Índice de Envelhecimento.....	73
Figura 28 – Módulo de Cisalhamento Dinâmico <i>versus</i> Temperatura, antes do RTFO.	74
Figura 29 – Módulo de Cisalhamento Dinâmico <i>versus</i> Temperatura, após o RTFO....	74
Figura 30 – Ângulo de Fase <i>versus</i> Temperatura, antes do RTFO.....	75
Figura 31 – Ângulo de Fase <i>versus</i> Temperatura, após o RTFO.....	76
Figura 32 – Compilância não recuperáveis, à 100 e 3.200 Pa.....	77
Figura 33 – Diferença percentual - Jnr, diff.....	79
Figura 34 – Porcentagem de recuperação à 100 e 3.200 Pa.....	80
Figura 35 – Curvas Mestre dos ligantes, antes e após envelhecimento.....	81
Figura 36 – Parâmetros "A" e "B" obtidos no ensaio.....	83
Figura 37 – Curvas de tensão <i>versus</i> deformação dos ligantes em estudo.....	84
Figura 38 – Estimativa da vida de fadiga dos ligantes em estudo.....	85
Figura 39 – Resultados do ensaio de RT.....	87
Figura 40 – Resultados do ensaio de MR.....	88
Figura 41 – Resultados do ensaio de Lottman Modificado.....	89

Figura 42 – Curvas Mestras das misturas estudadas.....	91
Figura 43 – Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (4,4°C).....	92
Figura 44 – Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (21,1°C).....	92
Figura 45 – Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (37,8°C).....	93
Figura 46 – Resultados do ensaio de Flow Number.....	94
Figura 47 – Número de ciclos até a ruptura <i>versus</i> diferença de tensões no centro do CP.....	95
Figura 48 – Número de ciclos até a ruptura <i>versus</i> deformação resiliente inicial.....	96

## LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AI	Aging Index
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	American Society for Testing Materials
BR	Batalhão Rodoviário
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CGS	Compactador Giratório Superpave
CP	Corpo de Prova
cP	Centipoise
DHR	Discovery Hybrid Rheometer
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EUA	Estados Unidos da América
FHWA	Federal Highway Administration
FN	Flow Number
FTIR	Fourier Transformed Infra Red
Gmm	Massa Específica Máxima Medida da Mistura
HMA	Hot Mix Asphalt
IST	Índice de Suscetibilidade Térmica
LAMMEN	Laboratório de Materiais Multifuncionais e Experimentação Numérica
LAS	Varredura de Amplitude Linear
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
MAM	Mistura Asfáltica Morna
ME	Método de Ensaio
Mm	Milímetros
MR	Módulo de Resiliência
MSCR	Fluência e recuperação sob tensões múltiplas
N°	Número
NBR	Norma Brasileira Registrada

NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
PG	Grau de Performance
PB	Paraíba
RBV	Relação Betume <i>versus</i> Vazios
RRT	Resistência Retida à Tração
RT	Resistência à Tração
RTFO	Rolling Thin-Film Oven
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavements
UAEC	Unidade Acadêmica de Engenharia Civil
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
VAM	Vazios do Agregado Mineral
VECD	Princípio de Dano Viscoelástico
Vv	Volume de vazios

## **1.0 INTRODUÇÃO**

A Engenharia Civil, nas suas diversas áreas, desenvolve atividades causadoras de grandes mudanças ambientais e sociais, como é o caso da produção de misturas asfálticas à quente, que traz à tona problemas relacionados à grande gasto energético, emissão de gases poluidores à atmosfera e a exacerbada exposição dos trabalhadores à fumos e odores. O avanço da engenharia rodoviária aliado ao desenvolvimento tecnológico dos materiais empregados na pavimentação promove um maior leque de possibilidades e alternativas para construção de pavimentos mais duráveis e seguros.

Com o objetivo de promover melhorias dos revestimentos asfálticos, proporcionando mais conforto, maior segurança, suportar as solicitações e aumento do tráfego e ainda resistir às variações climáticas, há algumas décadas iniciaram se estudos acerca de tecnologias alternativas às misturas asfálticas quentes, como a publicação do manual *Bituminous Mix*, em 1977, com informações sobre a produção de misturas asfálticas estabilizadas com emulsões. Já em 1997, na busca do cumprimento das metas estabelecidas pelo protocolo de Kyoto, diversos países da Europa começaram a utilizar as misturas asfálticas mornas – MAMs e no início dos anos 2000 os norte-americanos, por meio da Federal Highway Administration – FHWA, em conjunto com a American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO, e a National Cooperative Highway Research Program – NCHRP.

A produção de misturas asfálticas ocorre geralmente com temperaturas entre 140°C e 180°C para garantir estabilidade e durabilidade, o que demanda a queima de combustíveis durante sua usinagem. Por outro lado, as MAMs são produzidas e compactadas à temperaturas inferiores, e é considerada uma alternativa menos impactante ao ambiente, na produção de revestimentos asfálticos. Um dos primeiros estudos a respeito de misturas mornas no Brasil foi realizado por Souza Filho (2006), com objetivo de produzir MAM pela inserção de zeólitas na mistura.

A mistura asfáltica morna pode ser empregada como camada de rolamento, camada de ligação (binder), base e reperfilagem. Além dos benefícios ambientais e à saúde, provenientes da redução de temperatura, as misturas mornas ainda promovem

menor consumo de combustíveis, reduzem o envelhecimento do ligante asfáltico e possibilitam maiores distâncias de transporte da mistura, bem como a compactação a menores temperaturas que as misturas tradicionalmente utilizadas (D'ANGELO et al., 2008; VAITKUS et al., 2016).

Diversas metodologias podem ser empregadas na produção de misturas asfálticas mornas, sendo as principais aquelas que utilizam água, aditivos surfactantes ou algum tipo de aditivo orgânico ou cera para reduzir as temperaturas. São tecnologias bastantes distintas, no entanto, possuem o mesmo objetivo, sendo eles: reduzir a emissão de gases, reduzir viscosidade do ligante e/ou melhorar a trabalhabilidade. A escolha pelo emprego de uma ou outra técnica deve ser analisada a fim de se optar por a mais adequada, de acordo com a viabilidade e eficácia.

A fim de produzir misturas mornas, existem uma variedade de aditivos à base de cera, disponíveis no mercado, no entanto, nenhum utiliza a cera natural, como ingrediente principal. Um tipo de cera natural é a cera de abelha, que é impermeável à água, e o seu ponto de fusão está entre 61 a 65 °C, temperatura abaixo das que são empregadas na usinagem e compactação de misturas asfálticas, o que permite a diminuição da viscosidade do ligante. É formada por ácidos graxos, principalmente os cerótico e palmítico, possuindo assim, potencial para utilização na produção de misturas mornas.

O objetivo das misturas asfálticas mornas é ser equivalente ou melhor do que as misturas usinadas a quente. Logo, a escolha da cera de abelha como aditivo se deu com base em estudos anteriores, como os de Feitosa (2015), Silva (2016) e Moraes (2018), que mostraram um bom desempenho das ceras na função de redutor de viscosidade, como é o caso da cera de carnaúba. Além do desempenho, visou-se a redução das emissões de gases, bem como o gasto de energia e temperatura, além de proporcionar um ambiente de trabalho mais propício ao operário.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Estudar o efeito e influência, nas propriedades reológicas (empíricas e fundamentais) dos ligantes e nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas modificadas com a adição da cera de abelha.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram os seguintes:

- Avaliar as propriedades reológicas do ligante asfáltico modificado com adição de cera de abelha nos teores de 1%, 3% e 5%, em massa de ligante asfáltico;
- Verificar a influência das variações dos teores da cera de abelha no envelhecimento do ligante e na redução das temperaturas de usinagem e compactação;
- Comparar o comportamento mecânico das misturas mornas com a adição da cera de abelha com os valores de referência das misturas quentes;
- Propor a utilização de um aditivo orgânico em substituição de aditivos industrializados na fabricação das misturas asfálticas mornas, contribuindo assim para o desenvolvimento sustentável e saúde dos operários.

## 1.2 Justificativa

O emprego das misturas asfálticas mornas vem crescendo nos últimos anos devido às maiores exigências em relação ao desenvolvimento sustentável e à preservação das condições de segurança, meio ambiente e saúde. Algumas técnicas inovadoras estão sendo desenvolvidas para reduzir as temperaturas de fabricação e aplicação de misturas asfálticas, assegurando sua qualidade e desempenho adequado. Sobretudo, em possibilitar a redução do consumo de energia, bem como, a emissão de gases poluentes na atmosfera, contribuindo assim, sobremaneira na produção das misturas asfálticas nas usinas com menor energia e propiciando a liberação ao tráfego mais rapidamente (CAVALCANTE, 2016).

Em esfera nacional, apesar de existir uma minuta de norma do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte – DNIT, para misturas asfálticas mornas com o uso de aditivo surfactante, datada de agosto de 2016, não há uma norma específica vigente. Logo, essa realidade não contribui para o incentivo do emprego desta metodologia, e engenheiros e construtoras acabam optando por utilizar misturas asfálticas convencionais, mesmo diante das vantagens advindas do uso de misturas mornas.

Este trabalho, por sua vez, visa contribuir com o conhecimento acerca do potencial do uso da cera de abelha na redução das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas.

### **1.3 Organização do Trabalho**

Esta dissertação encontra-se escrita e organizada nos seguintes capítulos:

#### **Capítulo 1 - Introdução**

Este capítulo apresenta um breve histórico do tema, os objetivos e justificativa para o desenvolvimento do trabalho.

#### **Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica**

Neste capítulo são apresentados aspectos relacionados às misturas asfálticas, características das misturas mornas e do aditivo utilizado na pesquisa, além dos processos para obtenção de misturas mornas.

#### **Capítulo 3 - Materiais e Métodos**

Este capítulo trata dos materiais e planejamento dos ensaios laboratoriais para o ligante, a cera e as misturas, referenciando as normas regulamentadoras dos mesmos.

#### **Capítulo 4 - Resultados e Discussões**

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios realizados. Os resultados são analisados e comparados com as normas empregadas e outros trabalhos da literatura.

#### **Capítulo 5 - Conclusões e Sugestões**

Neste capítulo são apresentadas as conclusões das análises e comparações dos resultados e apresentadas sugestões para pesquisas futuras.

#### **Capítulo 6 - Referências**

Neste capítulo são apresentadas as referências literária consultadas para o desenvolvimento deste trabalho.

## **2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste capítulo estão apresentados os dados bibliográficos relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa, tais como misturas asfálticas convencionais e misturas mornas, contemplando suas definições, as principais características, e diversas técnicas utilizadas para produção das misturas mornas, além de um tópico dedicado ao modificador empregado neste estudo, a cera de abelha.

### **2.1 Misturas Asfálticas**

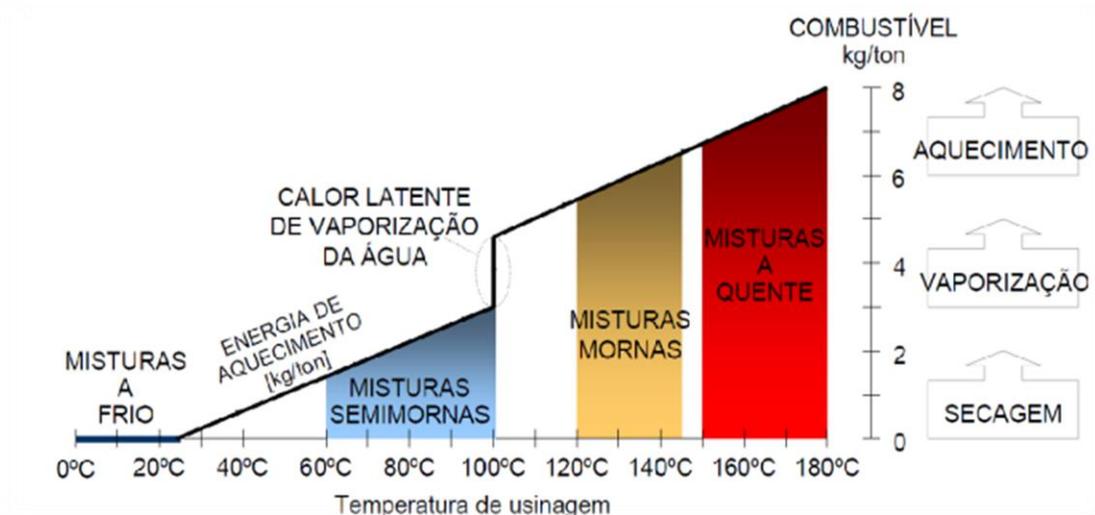
O Manual de Pavimentação do DNIT (2006) define os pavimentos flexíveis como aqueles compostos por uma superfície asfáltica – revestimento, apoiadas em camadas de base, sub-base e de reforço do subleito, fundadas por materiais granulares, solos ou combinações de solos, sem adição de agentes cimentantes, e que sob carregamento sofre deformação elástica em todas as camadas.

Entre os materiais empregados nos pavimentos flexíveis, os agregados correspondem entre 90% e 95% do revestimento, tendo função de suportar e transmitir as cargas aplicadas pelos veículos e resistir ao desgaste sofrido pelas solicitações. A parcela restante é complementada pelo ligante, sendo responsável pela ação aglutinante e impermeabilizante. Dentre os tipos de revestimento dos pavimentos flexíveis, existem as misturas usinadas, as quais essa combinação de agregados e ligante é feita em uma usina estacionária, e posteriormente transportada para o local de utilização (BERNUCCI et al., 2010).

As misturas asfálticas podem ser classificadas de acordo com a temperatura empregada em sua produção, podendo ser divididas basicamente em quatro grupos: misturas a quente, misturas mornas, misturas semimornas e misturas a frio. As misturas a quente são aquelas em que a temperatura de usinagem varia entre 150°C e 180°C, dependendo especialmente do tipo de ligante usado. As misturas a frio são produzidas à temperatura ambiente onde a emulsão utilizada e os agregados não passam pelo processo de aquecimento. Entre a temperatura de produção de misturas a quente e a temperatura

utilizada nas misturas a frio são produzidas as misturas mornas e semimornas. A diferença entre estas duas misturas é que esta última é produzida a temperatura menor ou igual a 100°C (PROWELL & HURLEY, 2007). Na Figura 1 está ilustrado o esquema de classificação das misturas de acordo com a temperatura de produção.

Figura 1 – Esquema de classificação das misturas asfálticas



Fonte: D'Angelo et al., (2008)

A energia consumida durante o processo de usinagem das misturas asfálticas varia de acordo o aquecimento das mesmas. 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 165°C o consumo de combustível seria de aproximadamente 7,5 Kg/ton. Logo, a mistura morna proporcionaria uma economia de combustível de 1,5 Kg/ton (CARVALHO, 2018).

O emprego de elevadas temperaturas na usinagem e compactação de misturas asfálticas a quente tem dois objetivos: i) retirar a água contida nos agregados antes da usinagem, uma vez que a água remanescente nos agregados pode ficar “aprisionada” quando o ligante os recobre e, assim, criar uma área com potencial para haver descolamento entre o filme asfáltico e o material pétreo (efeito stripping), podendo causar desagregação do pavimento; ii) reduzir a viscosidade do ligante para sua melhor trabalhabilidade, devendo a viscosidade do asfalto ser tal que este possa ser bombeado em usina e possa recobrir os agregados de maneira adequada (MOTTA et al., 2012).

## 2.2 Misturas Mornas

De acordo com a NCHRP (2011), o objetivo das misturas mornas consiste em produzir misturas com resistência, durabilidade e desempenho similares às misturas convencionais, utilizando menores temperaturas.

A produção de misturas asfálticas mornas é possível a partir de várias tecnologias, entre estas, a formação de espuma no ligante asfáltico, introdução de aditivos orgânicos e surfactantes, de forma direta, no ligante, ou durante o processo de mistura. De maneira geral, a redução de temperatura na usinagem de misturas mornas é realizada através da diminuição da temperatura dos agregados, mantendo-se a temperatura usual do ligante asfáltico, 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 et al., 2012; PORTUGAL, 2016).

Jalali (2016) trabalhou com misturas mornas e seus resultados mostram que a compactação a temperaturas mais baixas não tem um efeito considerável no desempenho das misturas asfálticas, contendo aditivos ou não, a menos que ocorra abaixo de 100 ° C. Nesse caso, apesar de algumas influências negativas no desempenho, o comportamento geral ainda permanece em faixas aceitáveis. Já Schuster (2018) pressupõe que o desempenho da mistura asfáltica morna seja superior, isso porque o impacto da perda de calor sofrida pela mistura asfáltica morna em maiores distâncias de transporte é inferior ao ocasionado no caso de uma mistura convencional, pois a presença do aditivo impele uma redução do efeito da queda da temperatura nas propriedades da mistura asfáltica.

Em relação a emissões de gases, nesse tipo de mistura essas são significativamente reduzidas. Tais emissões podem ser provenientes não só da menor queima de combustível em usina, mas também da decomposição térmica do asfalto, sendo compostas de elementos orgânicos em fase gasosa e particulada (MOTTA et al., 2013). Segundo D'Angelo et al. (2008), as MAMs podem reduzir de 30% a 40% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), 50% para os compostos orgânicos voláteis, 10% a 30% de monóxido de carbono (CO), 60% a 70% para óxidos nitrosos (NO<sub>x</sub>) e 20% a 25% para poeiras.

### 2.2.1 Benefícios das Misturas Mornas

Motta et al. (2012) elencam os principais benefícios que tal redução de temperatura pode trazer:

- Menor emissão de poluentes atmosféricos: as temperaturas mais baixas geram menores quantidades de poluentes lançados ao ar, não só porque são emitidos menos vapores e fumos de asfalto durante a mistura em usina e a aplicação em campo, mas também porque parte do combustível que seria utilizado na usinagem deixa de ser queimado (PROWELL E HURLEY, 2007). Dentro deste contexto, a iniciativa de se diminuir as emissões de poluentes poderia então ser inserida em projetos para a obtenção de créditos de carbono, o qual se tornaria mais um atrativo competitivo para as misturas mornas (OLARD, 2008);
- Melhoria do ambiente de trabalho na pavimentação: com o uso de misturas mornas os operários de pavimentação ficam menos expostos às emissões asfálticas, sendo este um fator positivo para a sua saúde. Nota-se nas Figuras 2 e 3, o comparativo da redução de emissão de fumos, entre uma mistura convencional e uma mistura morna. Diante disso, os trabalhadores passam a ter um ambiente de trabalho com temperatura mais amena e com redução de odores (NEWCOMB, 2006; PROWELL E HURLEY, 2007);

Figura 2 - Emissão de fumos na aplicação de uma mistura quente



Fonte: Motta et al. (2012)

Figura 3 – Emissão de fumos na aplicação de uma mistura morna



Fonte: Motta et al. (2012)

- Diminuição do consumo energético: como a temperatura de produção das misturas mornas é mais baixa que as misturas a quente, há uma redução da quantidade de combustível necessário no processo usinagem (NEWCOMB, 2006; PROWELL E HURLEY, 2007);
- Menor envelhecimento do asfalto: a usinagem é uma fase onde ocorre grande parte do envelhecimento do ligante (BERNUCCI et al., 2010) e, deste modo, a diminuição da temperatura nesta etapa pode levar a uma menor oxidação do asfalto, reduzindo o endurecimento da mistura, aumentando a resistência à fadiga e elevando a durabilidade do pavimento em longo prazo (NEWCOMB, 2006; PROWELL E HURLEY, 2007);
- Uso de maiores quantidades de material fresado: como a quantidade de material fresado em uma mistura reciclada normalmente é limitado (até cerca de 25%) devido à questão da temperatura, o emprego de misturas mornas pode favorecer a adição de maiores percentuais. Isso acontece, pois, a incorporação de aditivos redutores de viscosidade à mistura favoreceria também a diminuição de consistência do ligante envelhecido que faz parte do material fresado (OLARD, 2008; PROWELL E HURLEY, 2007).
- Menor dificuldade de aplicação em épocas ou locais de clima muito frio e aumento das distâncias de transporte: o emprego de misturas mornas pode ser favorável nas situações em que há grande preocupação com a queda significativa de temperatura da mistura, que acarretam em dificuldades de compactação e em perda de material, uma vez que a taxa de resfriamento é dada pela diferença de temperatura entre a mistura asfáltica e o meio ambiente. Neste caso, a mistura produzida em

temperatura mais baixa esfria sob uma taxa menor (NEWCOMB, 2006; PROWELL E HURLEY, 2007).

Motta et al. (2012) fizeram uma estimativa simples da economia de energia e de custos no processo de mistura morna, comparando-a com o de uma mistura a quente convencional. Para isso, foi tomada como base a massa asfáltica necessária para revestimento de um trecho experimental, cerca de 160 toneladas, com temperaturas de usinagem e compactação para a mistura quente de 160°C e 150°C, respectivamente, e para a mistura morna essas temperaturas foram de 135°C e 125°C. O resultado encontrado pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Estimativa da economia de energia e de custos no processo de mistura morna, comparada com o de uma mistura a quente convencional

	<b>Mistura morna</b>	<b>Mistura a quente</b>	
Aquecimento dos agregados	15.438.720	19.941.680	MJ
Aquecimento da água	16	20	MJ
Vaporização da água	70	70	MJ
Aquecimento do vapor	2	4	MJ
Total gasto de energia na secagem/aquecimento dos agregados	15.438.807	19.941.774	MJ
<b>Economia de energia na secagem/aquecimento dos agregados</b>	<b>22,6</b>		<b>%</b>

Fonte: Motta et al. (2012)

Como a secagem e aquecimento dos agregados em usina é uma etapa que demanda grande consumo energético, procedeu-se a uma estimativa da economia de energia obtida com a redução da temperatura de usinagem dos agregados. Concluiu-se que há uma redução significativa do consumo de combustível quando se diminui a temperatura de secagem dos agregados para a produção da mistura de baixa energia.

### 2.2.2 Histórico

O Quadro 1 apresenta uma cronologia de acontecimentos relacionados à utilização e estudo das misturas mornas até o ano de 2017. O Quadro 2 exhibe algumas pesquisas sobre MAM realizadas no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) – UFCG.

Quadro 1 - Histórico do estudo/uso de misturas asfálticas mornas

Ano	Histórico
1956	O professor Csanvi, da Universidade do Iowa, estudou 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 et al., 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 Christodulaki (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 et al. (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	Wargha 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.
2016	Jalali (2016) investigou os efeitos e implicações do declínio da temperatura no desempenho mecânico das misturas mornas, modificadas com cera parafínica e aditivo surfactante.

2017	Sofyan et al. (2017) objetivaram conhecer o uso potencial da cera de abelha como aditivo na produção de misturas mornas.
------	--

Fonte: Adaptado de Guerra (2019)

Quadro 2 - Histórico de pesquisas com MAMs realizadas no LEP/UFCG

Ano	Histórico
2015	Sales (2015) avaliou 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 e 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	Moraes (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.
2019	Guerra (2019) analisou as propriedades físicas e mecânicas de misturas asfálticas modificadas pela adição do óleo de canola.
2019	Sousa et al. (2019) avaliaram o comportamento mecânico de misturas asfálticas com CCBit para temperaturas de 10°C e 20°C inferiores as obtidas no ensaio de viscosidade rotacional.

Fonte: Adaptado de Guerra (2019)

### 2.3 Técnicas para produção de Misturas Mornas

Nesta seção, as principais tecnologias para a obtenção das MAMs serão descritas, sendo elas:

- Asfalto Espumado;

- Aditivos Químicos (Surfactantes); e,
- Aditivos Orgânicos e Ceras.

Para a obtenção das MAMs, utiliza-se pelo menos um dos métodos citados, podendo haver também, combinações deles. Segundo D'Angelo et al. (2008), os primeiros processos desenvolvidos na Europa foram baseados no uso de ceras ou asfalto espumado.

### 2.3.1 Asfalto Espumado

Existem diversas tecnologias a fim de se espumar o asfalto, que são utilizadas para fornecer trabalhabilidade suficiente e permitir que se produza um revestimento em temperaturas mais baixas. O processo consiste basicamente em aumentar temporariamente o volume do ligante e diminuir sua viscosidade, por meio da injeção de pequenas quantidades de água, agregado úmido ou material hidrofílico. Nesse processo a água vaporiza e o vapor é encapsulado no ligante, expandindo-o. A Tabela 2 exhibe algumas técnicas disponíveis para a produção de MAMs por meio do asfalto espumado, sendo sub-categorizadas em dois grupos, por meio de aditivos e à base de água.

Tabela 2 - Asfalto espumado

TECNOLOGIA	EMPRESA RESPONSÁVEL DA PATENTE	TEMPERATURAS DE USINAGEM
<b>ESPUMA DE BETUME COM MINERAIS SINTÉTICOS OU NATURAIS</b>		
Aspha-Min (Zeólito sintético)	MHI Group e Eurovia Services GmbH, Alemanha	Depende da gama de penetração do ligante, mas habitualmente entre 130 e os 170 °C
Advera (Zeólito sintético)	PQ Corporation, EUA	
Zeólito Natural	Vários	
<b>ESPUMA DE BETUME POR INJEÇÃO DE ÁGUA</b>		
WAM Foam	Shell, UK, e Kolo-Veidekke, Noruega	110-120 °C
Terex WMA System	Terex, EUA	130 °C
Double-Barrel Green	Astec Industries, EUA	121-135 °C
LEA - Low Energy Asphalt	LEA-CO (Joint-Adventure Eiffage/Fairco para divulgar a LEA). Nos EUA os direitos de utilização são da McConnaughay	<100 °C
LT Asphalt (LEA)	Nynas, Suécia	
LEAB	Royal BAM Group, Holanda	
Ultrafoam GX	Gencor Industries, EUA	110-115 °C

Fonte: Sales (2015)

D'Angelo et al. (2008), definem o primeiro grupo, com base nas propriedades dos aditivos denominados zeólitas, as quais são adicionados à mistura ao mesmo tempo que o ligante, em seguida a água é liberada como uma névoa fina, formando a espuma de ligante. Já as técnicas de espuma à base de água, ocorre por meio da injeção de água diretamente no ligante quente no tambor de mistura, com uso de equipamento especial. A água evapora-se rapidamente, produzindo um grande volume de espuma, que diminui lentamente.

Conforme Jalali (2016), é recomendado que nos processos de formação de espuma, a água adicionada seja suficiente para não causar problemas de aderência, sendo aconselhável a utilização de aditivos melhoradores de adesividade, para minimizar a susceptibilidade dessas misturas à umidade.

### 2.3.2 Aditivos Químicos (Surfactantes)

Os aditivos químicos geralmente incluem uma combinação de agentes de emulsificação, surfactantes, polímeros e aditivos para melhorar a trabalhabilidade da mistura e compactação, bem como melhoradores de adesividade. Esses atuam diretamente na interface ligante/agregado reduzindo o atrito interno da mistura, possibilitando melhor poder de recobrimento do ligante asfáltico, a menores temperaturas. A Tabela 3 apresenta alguns aditivos surfactantes, utilizados para a produção de MAMs.

Tabela 3 - Aditivos surfactantes

TECNOLOGIA	EMPRESA RESPONSÁVEL DA PATENTE	TEMPERATURAS DE USINAGEM
<b>ADITIVOS QUÍMICOS (SURFACTANTES)</b>		
Rediset	Akzo Nobel, Holanda	Reduções de cerca de 15 °C da temperatura de referência das MBQ
Cecabase RT	CECA, França	120-140 °C
Interlow T	Interchimica, Itália	120-140 °C
Evotherm	MeadWestvaco, EUA	85-115 °C
Revix ou Evotherm 3G	MeadWestvacoMathy-Ergon, EUA	130-140 °C

Fonte: Sales (2015)

Silva (2016) enfatiza que os aditivos surfactantes podem ser introduzidos ao ligante antes ou durante o processo de usinagem, possibilitando uma redução de 30-40°C, a depender do tipo de produto. Não necessita alteração na planta da usina, já que consiste numa tecnologia com sistema de utilização simples, o que evita um aumento nos custos iniciais. Em relação a dosagem aditiva, ela é característica de cada material, que pode ser introduzido previamente ao ligante ou somente na etapa de usinagem da mistura.

Os aditivos surfactantes geralmente não alteram as propriedades de consistência do ligante, viscosidade, penetração e ponto de amolecimento (MOTTA, 2011). Devido a essa ausência de variações, acredita-se que as reduções de temperatura provocadas por esse tipo de aditivo são oriundas de outra natureza. Os fabricantes e proprietários de licenças de tais produtos não tendem a divulgar informações específicas sobre os produtos, o que torna o estudo do comportamento das MAMs que utilizam esse tipo de aditivo bastante difícil, tomando como base as especificações ou a estrutura dos materiais (JALALI, 2016).

O ensaio de lubricidade, que consiste no deslizamento de um corpo de prova esférico sobre uma superfície plana, sem rolamento, é realizado em lubrificantes, a fim de descrever a habilidade de um fluido para oferecer atrito e desgaste das superfícies em movimento relativo sob carga. Esse procedimento foi adaptado para análise de ligantes e os resultados mostraram diferenças expressivas na propriedade de lubricidade dos ligantes com e sem o aditivo para misturas mornas nas temperaturas abaixo de 100°C. Essas alterações deram indícios de que esse teste deva ser levado em consideração na investigação do mecanismo de redução das temperaturas, das misturas asfálticas, por meio desse tipo de material (HANZ et al., 2010).

### **2.3.3 Aditivos Orgânicos e Ceras**

Os aditivos orgânicos e as ceras podem ser introduzidos previamente ao ligante asfáltico ou juntamente com este durante a usinagem, reduzindo a viscosidade do ligante asfáltico e, conseqüentemente, as temperaturas de usinagem e de compactação em cerca de 30 a 40°C. Isso ocorre porque o aditivo é submetido a temperaturas superiores ao seu ponto de amolecimento (CERATTI et al., 2015; SALES, 2015). A Tabela 4 apresenta alguns produtos, do tipo orgânico, utilizados para a produção de MAMs, encontrados no mercado.

Tabela 4 – Aditivos orgânicos

TECNOLOGIA	EMPRESA RESPONSÁVEL DA PATENTE	TEMPERATURAS DE USINAGEM
<b>ADITIVOS ORGÂNICOS</b>		
CCBit 113AD	Dr. Hutschenreuther, Alemanha	Depende da gama de penetração do ligante, mas habitualmente entre 130 °C e os 170 °C
Sasobit (Fischer-Tropschwax)	Sasol WaxGmbH, Alemanha	
Asphaltan B (Cera de Montana, estéril de baixo peso molecular)	RomontaGmbH, Alemanha	
Licomont BS 100	Clariant, Suíça	
Ultrafoam GX	Gencor Industries, EUA	
Óleos	Diversos	

Fonte: Sales (2015)

O tipo e quantidade de aditivo utilizado nas misturas devem ser analisados, antevendo também a temperatura que o pavimento será submetido na vida de serviço. Sales (2015) ressalta que isto deve ser feito a fim de se evitar problemas com deformação permanente e trincamento por baixas temperaturas, pois a baixa viscosidade e o excesso de aditivo podem enrijecer a mistura.

### 2.3.3.1 Ceras

As ceras são materiais que podem ser de origem natural (animal ou vegetal), mineral ou sintético. No estudo de Jalali (2016), é elucidado ainda, que são uma classe de compostos químicos que são plásticos (maleáveis) à temperatura ambiente e que derretem acima de 45 ° C, possuindo assim uma baixa viscosidade, quando líquida. São insolúveis em água, mas, solúveis em solventes orgânicos não polares. Elas podem ser classificadas ainda em ceras derivadas do petróleo e ceras derivadas da decomposição ou fossilização de matéria orgânica. Em relação ao primeiro grupo, Polacco et al. (2012) dividem em:

- Ceras de parafina;
- Ceras microcristalinas;
- Aromáticas e outras moléculas com grupos funcionais polares, que podem cristalizar em resfriamento.

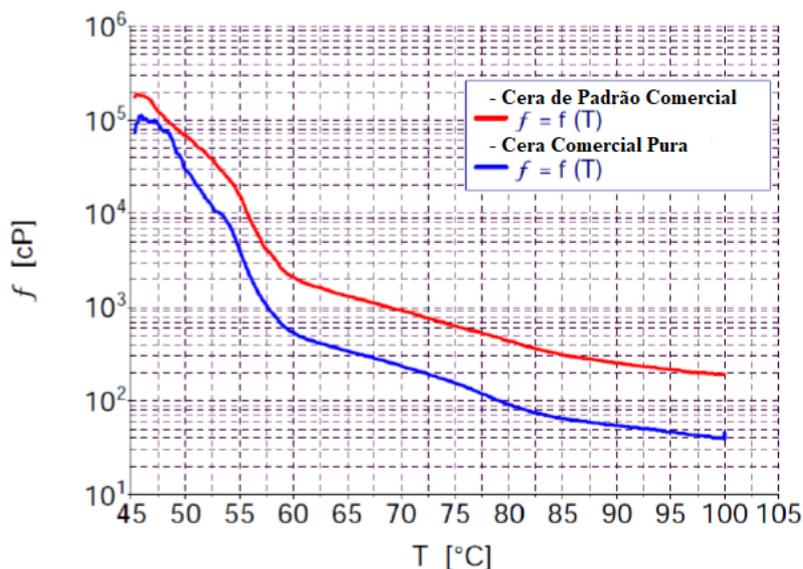
Enquanto as ceras derivadas da decomposição, são tipicamente classificadas como (Polacco et al., 2012):

- Ceras sintéticas derivadas do processo Fischer-Tropsch;

- Ceras Montana e ceras Montana modificadas;
- Ceras funcionalizadas.

A Figura 4 mostra a alteração da viscosidade de duas ceras frente as mudanças de temperaturas. Quando se compara as viscosidades das duas ceras, nota-se a diferença entre elas, que está relacionada com a pureza de cada uma.

Figura 4 – Variação de viscosidade das ceras



Fonte: Adaptado de Fielder et al. (2005)

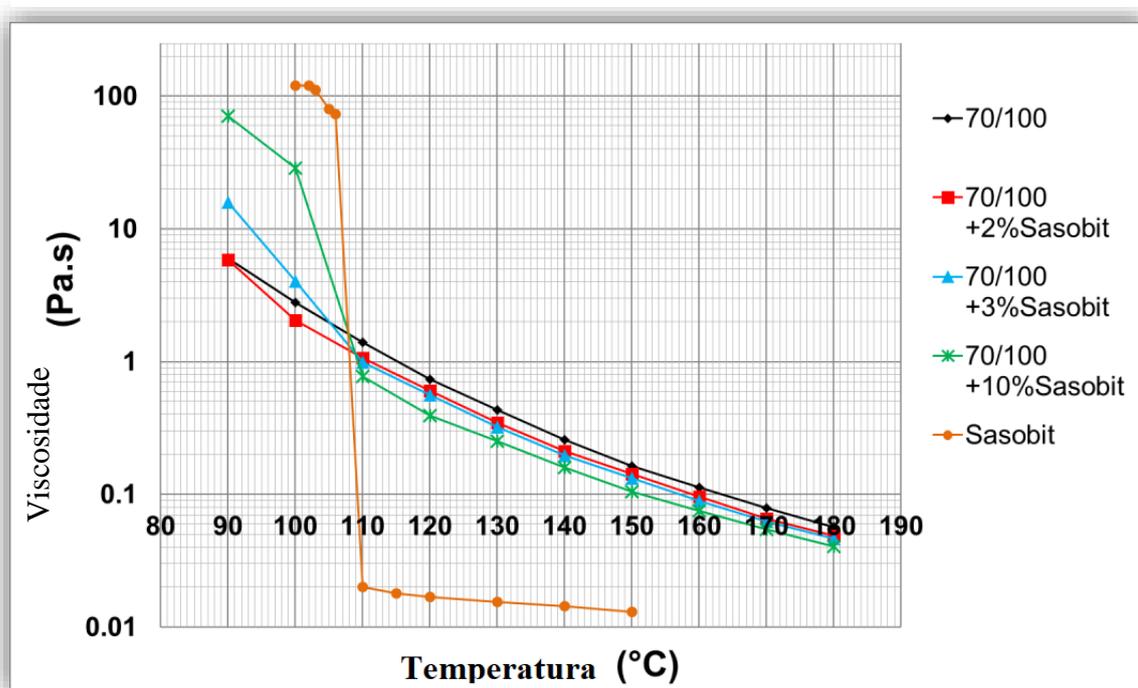
A súbita redução da viscosidade refere-se à temperatura de fusão da cera em que começa a derreter e sua viscosidade diminui, conseqüentemente, cria também, uma queda na curva viscosidade-temperatura. Esse comportamento das ceras é o que permite a diminuição da viscosidade do ligante, e conseqüentemente, uma melhor trabalhabilidade, além de admitir a compactação das misturas em temperaturas mais baixas.

Jalali (2016) enfatiza que as ceras tipicamente têm temperaturas de fusão abaixo das temperaturas normais de produção de misturas asfálticas à quente. Acima da temperatura de fusão, esses materiais reduzem a viscosidade do ligante. No entanto, abaixo de seu ponto de fusão, devido à cristalização, eles tendem a aumentar a rigidez do ligante e a resistência à deformação.

Jalali et al. (2014) adicionaram ao ligante a cera Sasobit, e nota-se, pela Figura 5, a mudança da curva de viscosidade-temperatura. A não linearidade da curva refere-se à

faixa de temperatura de fusão do Sasobit (85-115 °C), em que começa a derreter e a diminuir a viscosidade.

Figura 5 – Curvas Viscosidade-Temperatura para ligantes 70/100 modificados com Sasobit



Fonte: Adaptado de Jalali et al. (2014)

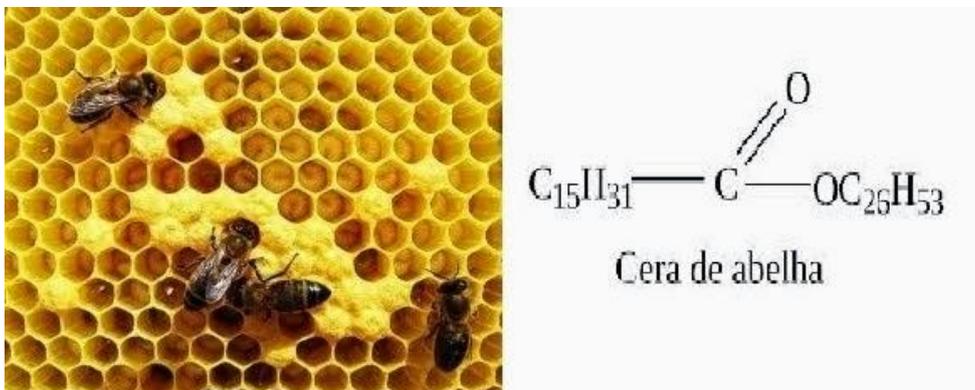
Ceras naturais de origem vegetal ou animal também podem ser utilizadas na produção de misturas mornas. Um dos requisitos para esse fim é possuir ponto de fusão maior que 60 °C. Ceras de abelha e de carnaúba são exemplos de ceras estudadas para a produção de misturas asfálticas mornas (MICHON et al., 1999; AREGA et al., 2011; LEITE et al., 2011).

#### 2.4 Cera de Abelha

A cera de abelha é uma substância sólida, maciça, de consistência escorregadia, e é o resultado de um processo metabólico das abelhas, a qual é excretada através dos segmentos abdominais das mesmas. Segundo Amin et al. (2016), a cera de abelha consiste em ésteres de ácidos graxos e álcoois de cadeia longa e é categorizada como um material de mudança de fase orgânico, não-parafínico. Constituída de palmitato, palmitoleato,

hydroxypalmitate, e ésteres de oleato, e a sua fórmula empírica é  $C_{15}H_{31}COOC_{26}H_{53}$  de cadeia longa de álcoois alifáticos, como pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 – Fórmula química da cera de abelha



Fonte: lipidiosfometro.blogspot.com (2013)

A cera de abelha é um material de alta capacidade térmica, é impermeável a água, composta por diversas substâncias, com o ponto de fusão entre 61 a 65°C, ponto de solidificação de 61,5 a 63°C e evaporação a 250 °C. Em baixas temperaturas pode se tornar dura e quebradiça. Além disso, é insolúvel em água e álcool frio, parcialmente solúvel em álcool quente e éter, solúvel em graxas quentes, azeite etéricos, benzeno quente, clorofórmio e terebintina (NUNES et al., 2012).

Para produzir um quilo de cera, as abelhas demandam por volta de seis a sete quilos de mel, e a média de produção de cera corresponde a 2% da produção normal de mel. Existem dois tipos de cera de abelha, a amarela e a branca, como ilustrado na Figura 7. A cera amarela tem um perfume de mel e é frágil na fase sólida, diferente da cera branca que é mais flexível.

Figura 7 – Cera amarela *versus* cera branca



Fonte: Engenharia das Essências

Nunes et al. (2012) ainda ressaltam que a cera de abelhas possui uma série de aplicações, já que ainda não foi descoberto outro material que possua propriedades tão emolientes, amaciantes, moldantes e impermeabilizantes como as apresentadas por ela. Dentre os maiores consumidores da cera estão as indústrias de cosméticos, de velas e a indústria apícola, na qual é considerada um subproduto. Ainda é utilizada em materiais de impermeabilização, na indústria de armamento e farmacêutica, na fabricação de graxas, e encáustica (técnica de pintura que utiliza cera), na composição de fita adesiva, de tintas e vernizes, sendo um excelente isolante elétrico.

A adição de ceras aos ligantes asfálticos tem por objetivo a redução de temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas. Existem poucas referências acerca da adição da cera de abelha as misturas asfálticas, considerado um estudo bastante recente em relação as misturas asfálticas mornas, sendo o trabalho Sofyan et al. (2017) o único identificado.

#### **2.4.1 Cera de abelha como aditivo para MAM**

O estudo de Sofyan et al. (2017) teve como objetivo conhecer o uso potencial da cera de abelha como aditivo na produção de MAMs, em que se utilizou um ligante natural específico da Indonésia, o Asbuton - BNA, o qual demanda temperaturas de usinagem e compactação maiores do que de uma mistura a quente convencional. A pesquisa deu-se por meio da investigação de cinco amostras de modificadores, todos à base de cera natural (66% de cera de abelha + outros materiais), distinguindo-se somente pelas quantidades dos outros componentes. Os resultados dos ensaios de caracterização reológica dessas amostras são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados da caracterização do ligante BNA + Aditivo com cera de abelha

Ensaio	Norma	Amostras							Limite	Unidade	
		BNA	BNA + 1% Aditivo 1	BNA + 1% Aditivo 2	BNA + 1% Aditivo 3	BNA + 1% Aditivo 4	BNA + 1% Aditivo 5	BNA + 0,5% Aditivo 4			
<b>Penetração à 25°C</b>	SNI 2456:2011	56	62	60	60	62	65	62	Mín. 50	Dmm	
<b>Ponto de Amolecimento</b>	SNI 2434:2011	53,4	52,25	53,25	53,55	54,05		53,45	≥ 50	°C	
<b>Ductilidade à 25°C, 5 cm/min</b>	SNI 2432:2011	>140	54	49	92	>140	>140	>140	≥ 100	Cm	
<b>Solubilidade (C<sub>2</sub>HCl<sub>3</sub>)</b>	SNI 06-2438-1991	95,352	94	95	-	99,821	99,827	99,936	≥ 90	%	
<b>Densidade Relativa</b>	SNI 2441:2011	1,0208	1,0413	1,0437	-	1,0211	1,0206	1,0248	≥ 1	-	
<b>Ponto de Fulgor</b>	SNI 2433:2011	270	280	280	-	278	274	282	≥ 232	°C	
<b>Perda de Aquecimento (RTFOT)</b>	SNI 06-2440-1991	0,289	0,495	0,405	-	0,509	0,477	0,541	≤ 0,8	%	
<b>Penetração (RTFOT)</b>	SNI 2456:2011	39,3	41	40	-	44	45	45	≥ 54%	Dmm	
<b>Ponto de Amolecimento (RTFOT)</b>	SNI 2434:2011	56,2	58,45	59,1	-	55,9	55,5	56,05	-	°C	
<b>Ductilidade (RTFOT)</b>	SNI 2432:2011	94	19	18	-	50	46	50	≥ 50	Cm	
<b>Estabilidade à Estocagem</b>	-	<b>Ponto de amolecimento superior</b>		51,8	52,6	-	54,5	53,8	54,8	-	°C
		<b>Ponto de amolecimento inferior</b>		53,1	53,5	-	56,1	55,7	56,4	-	
		<b>Diferença</b>		1,3	0,9	-	1,6	1,9	1,6	≤ 2,2	
<b>Temperatura de Usinagem</b>	AASHTO-72-1997	154-159	151-158	152-159	-	150-156	150-156	149-155	-	°C	
<b>Temperatura de Compactação</b>	AASHTO-72-1997	142-148	137-144	139-145	-	138-144	138-143	137-142	-	°C	

Fonte: Adaptado de Sofyan el al. (2017)

De acordo com a Tabela 5, Sofyan et al. (2017) mostram que apenas os aditivos 4 e 5 se encontram dentro dos limites requeridos por Bina Marga (2010). A diferença entre esses dois teores não foi muito significativa, mas, ao analisar isoladamente o ponto de amolecimento e a estabilidade à estocagem, o aditivo 4 apresentou um resultado superior. Os autores concluíram que a mistura dos aditivos ao ligante pode ser feita diretamente na usina, já que o aditivo se dissolve à temperatura de 62-64 °C.

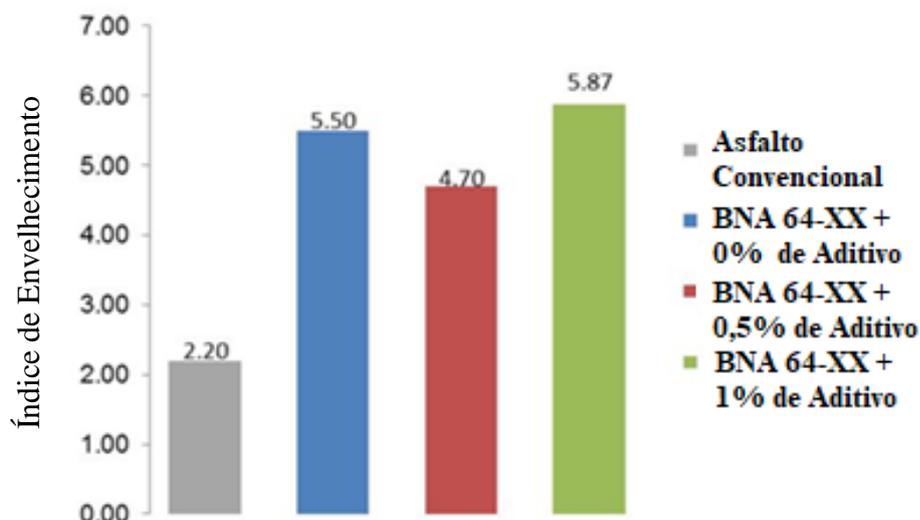
As reduções das temperaturas de usinagem e compactação baseadas no ensaio de viscosidade são pouco expressivas, entre 4°C e 5°C. No entanto, essas temperaturas não foram usadas como referência, e sim a densidade da mistura. O valor da queda de temperatura foi obtido a partir da temperatura que pode produzir-se uma mistura morna com a mesma densidade que a mistura quente. As amostras também foram submetidas ao DSR, a fim de se determinar as propriedades reológicas fundamentais, os resultados são mostrados na Tabela 6 e Figura 8.

Tabela 6 – Caracterização reológica das amostras por meio do DSR

Amostra	Temperatura (°C)	$G^*/\sin\delta$ (kPa)	A	Temperatura de falha (°C)
<b>DSR<sub>ORI</sub> (<math>G^*/\sin\delta = 1</math> kPa)</b>				
<b>BNA + 0% de aditivo</b>	64	1.585	-0.0503	67.97
	70	0.791		
<b>BNA + 0,5% de aditivo</b>	64	1.877	-0.0529	69.17
	70	0.904		
<b>BNA + 1,0% de aditivo</b>	64	1.174	-0.0483	65.44
	70	0.602		
<b>DSR<sub>RTFOT</sub> (<math>G^*/\sin\delta = 2.2</math> kPa)</b>				
<b>BNA + 0% de aditivo</b>	70	4.133	-0.0517	75.30
	76	2.023		
<b>BNA + 0,5% de aditivo</b>	70	4.260	-0.0517	75.66
	76	2.116		
<b>BNA + 1,0% de aditivo</b>	70	3.338	-0.0501	73.61
	76	1.671		
<b>DSR<sub>PAV</sub> (<math>G^*/\sin\delta = 5000</math> kPa)</b>				
<b>BNA + 0% de aditivo</b>	25	4467	-0.0436	23.88
	22	6036		
<b>BNA + 0,5% de aditivo</b>	25	3649	-0.0387	21.47
	22	4768		
<b>BNA + 1,0% de aditivo</b>	25	4330	-0.0394	26.41
	22	5685		

Fonte: Adaptado de Sofyan et al. (2017)

Figura 8 – Comparação do índice de envelhecimento das amostras e de um ligante convencional



Fonte: Adaptado de Sofyan et al. (2017)

Com base na Tabela 6, Sofyan et al. (2017) classificaram todas as amostras na categoria de desempenho 64-XX, então a relação de  $G^*/\sin\delta$  é visto à temperatura de 64°C. A adição de 0,5% de modificador ofereceu o melhor resultado, visto que essa amostra apresentou as mais altas temperaturas críticas para DSR Original e DSR RTFOT e o valor mais baixo de temperatura crítica para DSR PAV. As temperaturas críticas mais elevadas de DSR Original e DSR RTFOT significam maior resistência a deformação e maior rigidez, enquanto que a temperatura inferior do DSR PAV significa elevada resistência à fadiga. Assim, concluiu-se que a utilização de 0,5% de aditivo acarreta num maior módulo de rigidez e maior resistência à fadiga e deformação.

O índice de envelhecimento dos ligantes modificados, apresentado na Figura 9, foi então comparado com o índice de envelhecimento do asfalto convencional, as quais apresentaram um valor duas vezes superior. A causa desses altos níveis de envelhecimento é provavelmente devido ao processo de produção do ligante BNA, que é realizado por aquecimento repetido.

Sofyan et al. (2017) realizaram a dosagem Marshall, e as temperaturas de usinagem e compactação foram reduzidas em 10°C, 20°C e 30°C a partir da sua temperatura de *Hot Mix Asphalt* – HMA, ou seja, da temperatura da mistura convencional. Essa redução permitiu que a densidade das misturas mornas fossem bastante próximas da densidade da mistura quente. Quanto aos teores de aditivos, foram

de 0%, 0,5%, 1,0% e 1,5%. Os resultados do teor ótimo de ligante para cada mistura são apresentados na Tabela 7.

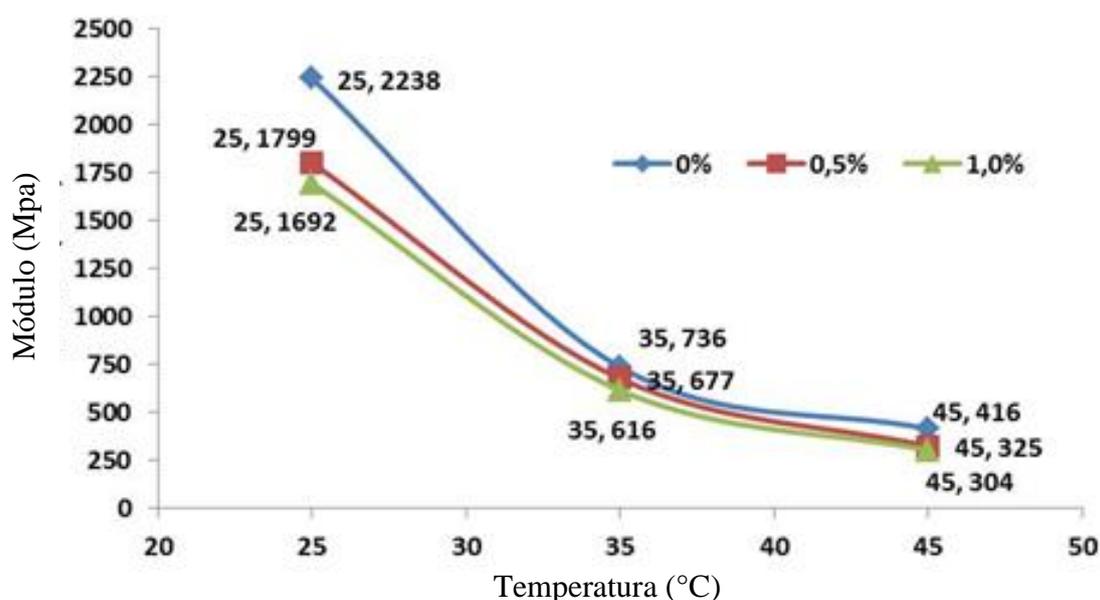
Tabela 7 – Teor ótimo de ligante e densidade das amostras de BNA + Aditivo com cera de abelha

TEOR DE ADITIVO	TEMPERATURA DE USINAGEM/COMPACTAÇÃO	TEOR DE LIGANTE (%)	DENSIDADE
0% de aditivo	HMA (164/150)	5,75	2,375
	MAM (154/140)	5,9	2,357
0,5% de aditivo	MAM (144/130)	6,2	2,385
	MAM (134/120)	5,9	2,367
	MAM (154/140)	5,9	2,372
1,0% de aditivo	MAM (144/130)	5,8	2,347
	MAM (134/120)	6,1	2,369
	MAM (154/140)	5,8	2,355
1,5% de aditivo	MAM (144/130)	6,2	2,330
	MAM (134/120)	6,1	2,346

Fonte: Adaptado de Sofyan et al. (2017)

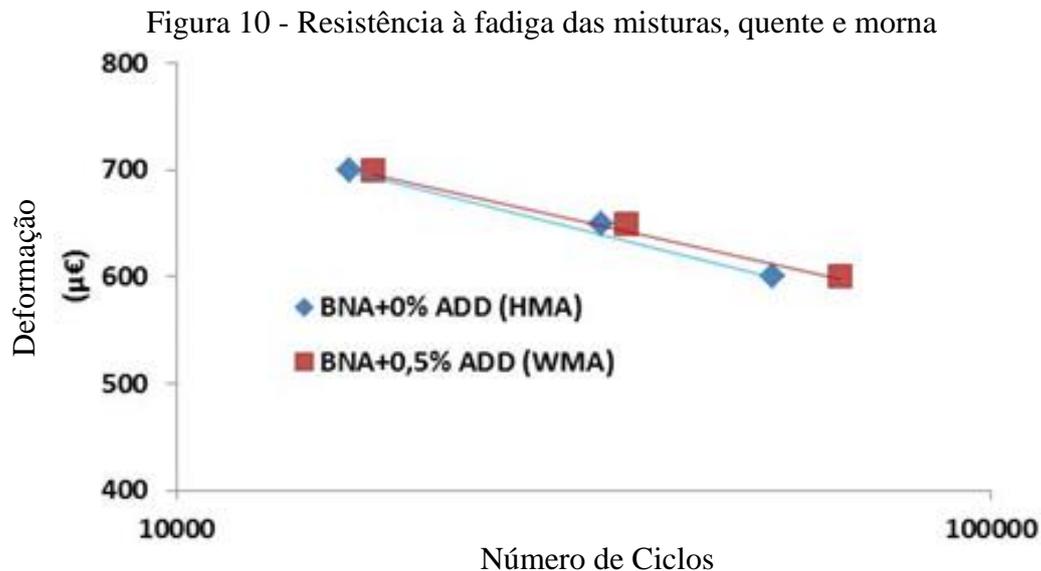
Os ensaios de Módulo de Resiliência foram realizados por Sofyan et al. (2017) nas temperaturas de 25°C, 35°C e 45°C, em amostras de HMA e MAMs com teores de 0,5% e 1,0% aditivo. As temperaturas de usinagem e compactação para HMA foi 164°C e 150°C, enquanto para as MAMs foram 134°C e 120°C. Os resultados são apresentados na Figura 9.

Figura 9 - Módulo de resiliência nas temperaturas de 25°C, 35°C e 45°C



Fonte: Adaptado de Sofyan et al. (2017)

Com base no resultado do ensaio nota-se que a adição do modificador diminuiu o valor do módulo de resiliência, e quanto maior o teor de aditivo, menor o valor do módulo de resiliência. O ensaio de resistência à fadiga também foi realizado por Sofyan et al. (2017), de acordo com as especificações da AASHTO T321, à temperatura de 20°C. Os resultados são apresentados na Figura 10.



Fonte: Adaptado de Sofyan et al. (2017)

Sofyan et al. (2017) ao comparar a curva de fadiga da mistura a quente com a curva de fadiga da mistura morna, evidenciaram que a primeira tem menor resistência à carga repetidas, frente a mistura morna. Isto pode significar que a MAM com 0,5% de aditivo tem maior resistência à fadiga do que a mistura convencional.

Em posse desses resultados, Sofyan et al. (2017) concluíram que:

- A cera de abelha pode ser utilizada como base para um aditivo alternativo para produção de mistura asfálticas mornas;
- O teor de 0,5% de aditivo não altera significativamente as propriedades do ligante BNA, mas ainda assim, pode diminuir as temperaturas de usinagem e compactação, em até 30°C, apresentando qualidade equivalente à mistura quente;
- O BNA + 0,5% de aditivo tem mais resistência à fissuração por fadiga quando em comparação ao BNA puro, e também pode diminuir a taxa de envelhecimento desse tipo de ligante;
- Esse tipo de aditivo além de proporcionar uma qualidade equivalente a mistura convencional, gera uma economia de combustível na matriz da usina;

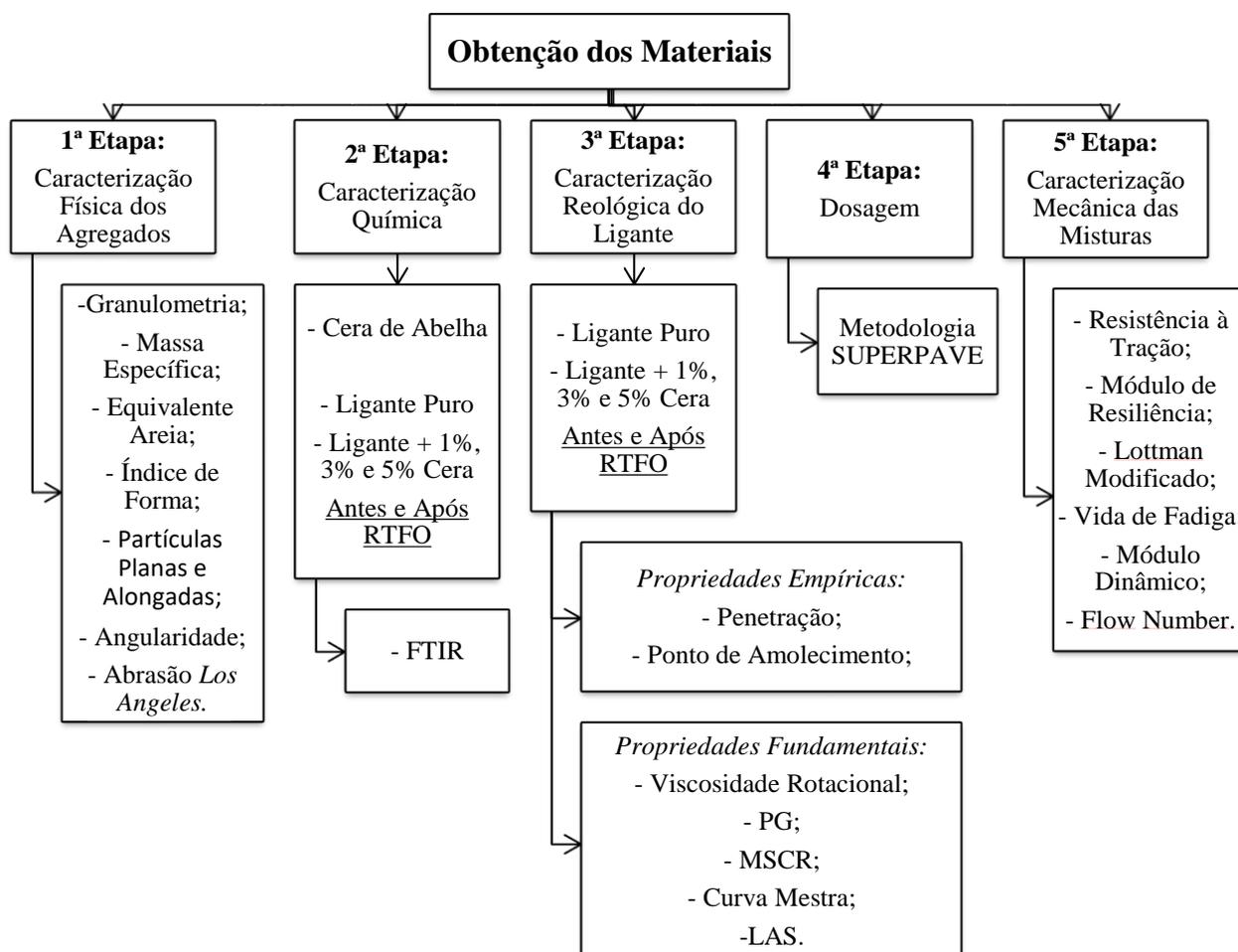
- À medida que se aumenta o teor de aditivo ao BNA pode-se diminuir o módulo de rigidez, a estabilidade Marshall, entre outros parâmetros. Portanto, o teor de aditivo para o ligante tipo BNA é limitado a 0,5%. O teor ótimo de aditivo deve ser analisado para cada novo material utilizado.

### 3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir será descrito o programa experimental desenvolvido durante a pesquisa, onde serão apresentados os aspectos referentes aos materiais selecionados e aos métodos e especificações empregados para a realização dos ensaios de caracterização física dos agregados, reológica e química dos ligantes e mecânica das misturas asfálticas.

A metodologia adotada nesta pesquisa foi dividida em cinco etapas conforme demonstra o fluxograma da Figura 11. As duas primeiras etapas tiveram como objetivo selecionar e caracterizar, física e quimicamente, os materiais utilizados (ligante asfáltico, agregados e cera de abelha). Na terceira etapa, foi realizada a caracterização reológica do ligante puro e modificado com a cera. Em seguida, foi realizada a dosagem e por fim, a caracterização mecânica das misturas.

Figura 11 – Fluxograma das atividades desenvolvidas



Os métodos de ensaios utilizados foram baseados em normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, da American Society for Testing Materials – ASTM, do DNIT e da AASHTO. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia dos Pavimentos (LEP) – UAEC/UFCG, com exceção das espectroscopias na região do infravermelho médio por transformada de Fourier – FTIR, que foram realizadas pelo Laboratório de Materiais Multifuncionais e Experimentação Numérica (LAMMEN) – ECT/UFRN.

### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa foi o CAP 50/70, proveniente da construtora Andrade Guedes e utilizado no trecho executado na BR 101 – Igarassu-PE. A Tabela 8 apresenta a caracterização física do ligante, bem como as normas referentes a cada ensaio e seus limites.

Tabela 8 - Caracterização do ligante

CARACTERÍSTICA	LIGANTE PURO	LIMITES	MÉTODOS
<b>Penetração (0,1mm)</b>	57	50 -70	NBR-6576
<b>Ponto De Amolecimento (°C)</b>	48,5	46 (mín.)	NBR-6560
<b>PG (°C)</b>	64	-	AASHTO M 320
<b>Viscosidade Rotacional 135°C (cP)</b>	371,3	274 (mín.)	NBR-15184
<b>Viscosidade Rotacional 150°C (cP)</b>	185,0	112 (mín.)	NBR-15184
<b>Viscosidade Rotacional 177°C (cP)</b>	69,3	57 – 285	NBR-15184
<b>Índice de Suscetibilidade Térmica (IST)</b>	-1,3	-1,5 – 0,7	DNIT 095/2006

Nota-se que todos os valores encontrados, estão dentro dos limites estabelecidos por suas respectivas normas viabilizando assim, o uso do ligante nesta pesquisa.

#### 3.1.2 Agregados

Os agregados utilizados nesta pesquisa foram fornecidos pela empresa Rocha Cavalcante, oriundos de pedra própria com sede em Campina Grande – PB. As amostras fornecidas foram brita 19mm, brita 9,5mm e pó de pedra.

A areia é proveniente do Rio Paraíba e o filer utilizado foi a cal hidratada, ambos obtidos no comércio local.

### 3.1.3 Cera de Abelha

A cera de abelha, mostrada na Figura 12, foi fornecida pelo apiário Nutrimel, que cria abelhas da espécie *Apis Mellifera Ligustica*, com sede em São João do Rio do Peixe – PB.

Figura 12 – Cera de abelha utilizada na pesquisa



## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Caracterização Físicas dos Agregados

Os ensaios realizados para caracterização dos agregados estão listados na Tabela 9. Os resultados foram utilizados na determinação do teor de projeto de ligante na dosagem Superpave.

Tabela 9 - Ensaios e normas utilizadas para caracterização dos agregados

ENSAIOS	MÉTODOS
Distribuição dos tamanhos das partículas dos agregados	DNIT ME 083/98
Determinação da massa específica dos agregados graúdos	DNIT ME 195/97
Determinação da massa específica dos agregados miúdos	DNIT ME 084/95
Abrasão <i>Los Angeles</i>	DNIT ME 035/98
Equivalente areia	DNIT ME 054/97
Índice de forma	DNIT ME 086/94
Partículas planas e alongadas	ASTM D 4791/10
Angularidade	ASTM C 1252/17

### 3.2.1.1 Granulometria dos Agregados

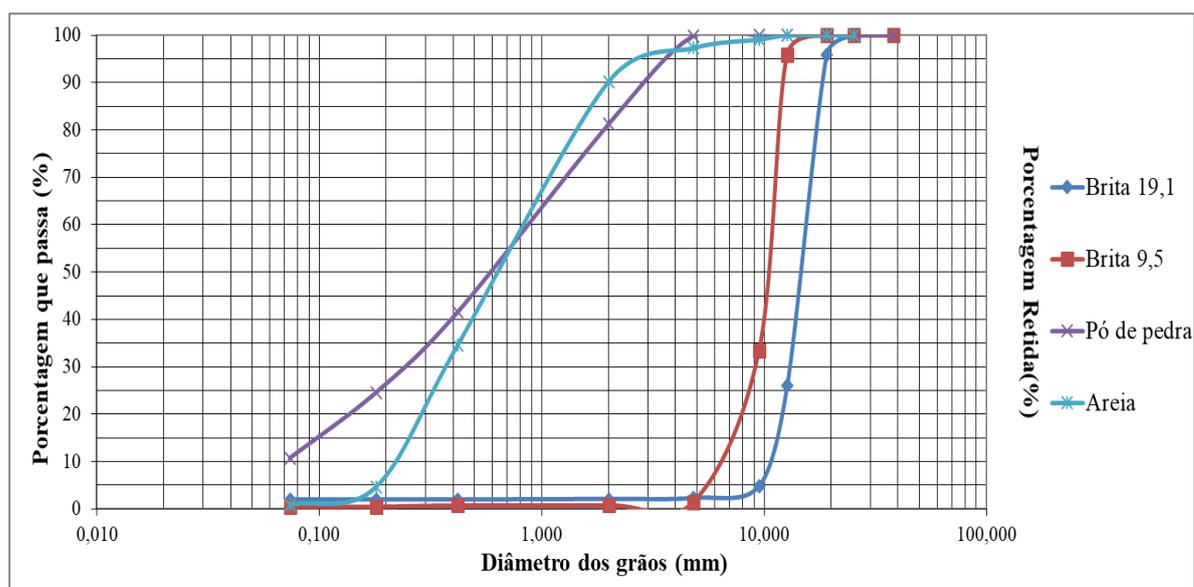
O ensaio de granulometria dos agregados utilizados nesta pesquisa foi realizado segundo a norma DNIT-ME 083/98, com peneiras de malhas de abertura 0,075mm, 0,18mm, 0,42mm, 2,0mm, 4,8mm, 9,5mm, 12,7mm, 19,1mm e 25,4mm. O material utilizado foi colocado em estufa a 110°C por 4 horas para a retirada da umidade e o peneiramento foi realizado manualmente.

A Tabela 10 e a Figura 13 mostram, a quantidade passante e as curvas granulométricas de cada agregado, respectivamente.

Tabela 10 - Quantidade passante acumulada (%)

PENEIRA	DIÂMETRO (MM)	BRITA 19 MM	BRITA 9,5 MM	AREIA	PÓ DE PEDRA
1"	25,40	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,10	95,90	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,70	26,03	95,82	100,00	100,00
3/8"	9,50	4,78	33,35	99,13	100,00
Nº 4	4,80	2,25	1,44	97,30	99,85
Nº 10	2,00	2,04	0,82	90,23	81,18
Nº 40	0,420	1,93	0,77	34,58	41,52
Nº 80	0,180	1,93	0,52	4,57	24,48
Nº 200	0,074	1,92	0,52	0,85	10,69

Figura 13 – Distribuição granulométrica dos agregados



Observa-se que os agregados graúdos apresentaram uma graduação uniforme e o pó de pedra uma graduação densa.

### 3.2.1.2 Caracterização Física dos Agregados Graúdos

A Tabela 11 apresenta os resultados da caracterização dos agregados graúdos utilizados na pesquisa.

Tabela 11 - Caracterização física dos agregados graúdos

ENSAIOS	LIMITES	BRITA 19MM	BRITA 9,5MM
<b>Massa Específica Real (g/cm<sup>3</sup>)</b>	-	2,775	2,722
<b>Massa Específica Aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	-	2,799	2,757
<b>Absorção (%)</b>	≤ 2	0,47	0,47
<b>Abrasão Los Angeles (%)</b>	≤ 55	18,57	24,7
<b>Partículas Planas e Alongadas (%)</b>	5:1 ≤ 5	1,14	6,00
<b>Partículas Fraturadas - Duas Faces (%)</b>	≥ 90	99,6	100
<b>Índice de Forma</b>	≥ 0,5	0,87	0,71

Conforme a Tabela 11, os agregados graúdos foram considerados adequados para uso em misturas asfálticas de acordo com os requisitos vigentes, exceto pela porcentagem de partículas planas, da brita 9,5mm, que excedeu o limite máximo da norma. Em relação aos valores de massa específica, os resultados encontrados se enquadram dentro do esperado para os agregados utilizados no Estado da Paraíba (GUERRA, 2019; CARVALHO, 2018; MORAES, 2018).

### 3.2.1.3 Caracterização Física dos Agregados Miúdos

Na Tabela 12, encontram-se os resultados dos ensaios realizados para os agregados miúdos.

Tabela 12 - Caracterização física dos agregados miúdos

ENSAIOS	LIMITES	AREIA	PÓ DE PEDRA
<b>Massa Específica Real (g/cm<sup>3</sup>)</b>	-	2,576	2,540
<b>Massa Específica Aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	-	2,555	2,426
<b>Absorção (%)</b>	≤ 2	0,32	0,48
<b>Equivalente Areia (%)</b>	≥ 55	72,32	55,20
<b>Angularidade (%)</b>	-	-	39,41

Comparando os resultados obtidos nos ensaios, para os agregados miúdos, com os limites estabelecidos por norma, nota-se que também são adequados para o uso em misturas asfálticas, além dos valores de massas específicas estarem em conformidade com os descritos em literatura, para a região (GUERRA, 2019; CARVALHO, 2018; MORAES, 2018).

### **3.2.2 Caracterização Reológica do Ligante**

Antecedendo os procedimentos para a caracterização reológica dos ligantes modificados, foram realizadas as misturas do ligante com os diversos teores da cera de abelha.

#### **3.2.2.1 Mistura do Ligante com a Cera de Abelha**

O procedimento de mistura, bem como os teores escolhidos de 1%, 3% e 5%, em massa de ligante asfáltico, foram definidos com base nos estudos de Feitosa (2015), Silva (2016) e Moraes (2018), que utilizaram em suas pesquisas um outro tipo de cera, a cera de carnaúba.

Para a realização das misturas, utilizou-se as recomendações de Silva (2016), nas quais a cera deveria ser moída com auxílio da mão de gral, passando posteriormente, na peneira de número 40 (0,42mm), com o objetivo de facilitar a fusão do cimento asfáltico de petróleo com a cera. Posteriormente, devendo ser empregada uma temperatura de 130°C durante 40 minutos a uma velocidade de 1015rpm, na mistura. A adição do material deve ser lenta, durante os primeiros sete minutos.

No entanto, durante o manuseio e preparação da cera para ser incorporada ao ligante, notaram-se diferenças de consistência entre a cera de abelha e a cera de carnaúba, sendo a primeira semelhante a parafina e a segunda mais seca e quebradiça. Essa diferença impossibilitou a realização da moagem e peneiramento, descritos acima.

Optou-se então pela realização de ensaios pilotos, para a definição de uma metodologia apropriada para o manuseio da cera de abelha. Foram produzidas misturas com 1% de cera, em três formas distintas: ligante + cera no estado líquido, ligante + cera no estado sólido e com grãos grossos e ligante + cera no estado sólido e com grãos passantes na peneira de número 8 (2,36mm), sendo essa a menor malha na qual

conseguiu-se manusear a cera, com resultado apresentado na Figura 14. A etapa posterior, foi realizada de forma semelhante ao recomendado por Silva (2016), utilizando-se um agitador mecânico FISATOM, Modelo 72. Os componentes foram misturados com agitação frequente, tomando-se cuidado para não exceder a temperatura e o tempo de reação.

Figura 14 – Cera de abelha passante na peneira de malha 2,36mm



Após a produção das misturas, foram feitos ensaios de viscosidade rotacional com cada uma das amostras testadas, para comparação com os valores encontrados de viscosidade para o ligante puro. Esses resultados estão listados na Tabela 13.

Tabela 13 – Viscosidades rotacionais obtidas nos ensaios pilotos

AMOSTRA	135 °C	150 °C	177 °C
Ligante Puro (cP)	371,0	185,0	69,0
Ligante + 1% de Cera Líquida (cP)	390,0	194,0	71,0
Ligante + 1% de Cera em Grãos Grosseiros (cP)	372,5	186,0	68,0
Ligante + 1% de Cera em Grãos Passantes na Peneira N° 8 (cP)	343,7	173,5	65,0

Em posse dos resultados das viscosidades dos ensaios pilotos, pôde-se definir a melhor forma de preparar a cera para mistura. Pela Tabela 13, nota-se que a mistura com a cera em grãos grosseiros manteve praticamente a mesma viscosidade do ligante puro, logo o aditivo não se comportou como redutor de viscosidade. Em relação a cera líquida, o comportamento foi inverso ao esperado, provocando um aumento de viscosidade do ligante. Para a amostra com a cera em grãos passantes na peneira de número 8, houve uma significativa redução na viscosidade do ligante, definindo assim, que essa seria a metodologia de preparo da mistura ligante + cera de abelha.

### 3.2.2.2 Propriedades Reológicas Empíricas

Para o conhecimento das propriedades reológicas empíricas do ligante, foram realizados os ensaios listados na Tabela 14, na qual se encontram também, suas respectivas normas. Os ensaios foram realizados tanto para o ligante puro, como para o ligante modificado com os diversos teores de cera.

Tabela 14 – Ensaio e normas utilizadas para caracterização empírica do ligante

<b>ENSAIOS</b>	<b>MÉTODOS</b>
<b>Penetração</b>	NBR-6576
<b>Ponto de amolecimento</b>	NBR-6560
<b>RTFO</b>	ASTM D 2872/97

Todos os ensaios foram repetidos após o envelhecimento, por oxidação e evaporação pelo efeito de calor e ar sobre uma película de material asfáltico de cada mistura, em movimento, por meio do Rolling Thin Film Oven Test (RTFO). O procedimento serve para identificar mudanças nas propriedades do ligante que podem ocorrer durante a usinagem a 150°C, verificadas por variações nas propriedades de constância.

### 3.2.2.3 Propriedade Reológicas Fundamentais

O Reômetro de Cisalhamento Dinâmico, é utilizado na determinação de parâmetros viscoelásticos do ligante a temperaturas elevadas e intermediárias. Os parâmetros reológicos fundamentais que foram encontrados estão listados na Tabela 15, bem como suas respectivas normas. Os ensaios foram realizados para os ligantes asfálticos, puro e modificados, antes e após o procedimento de envelhecimento.

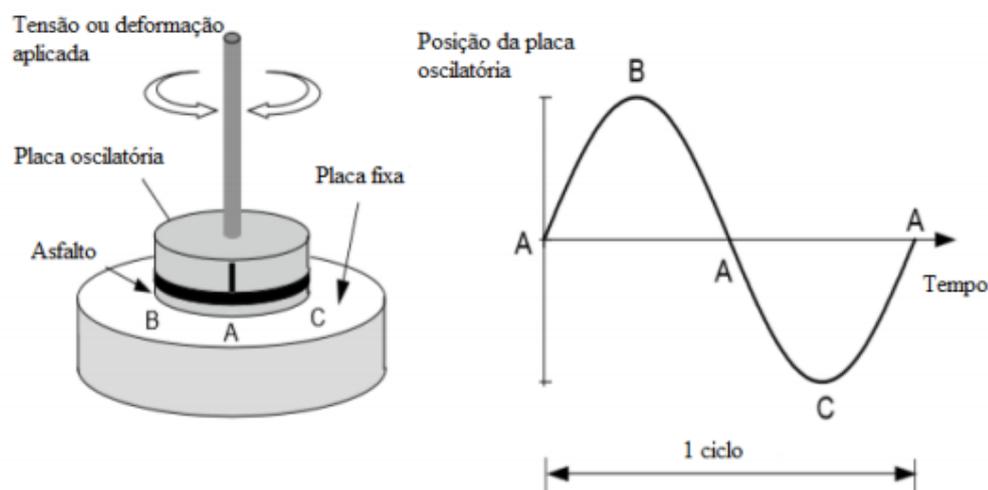
Tabela 15 – Ensaio e normas utilizadas para caracterização fundamental do ligante

<b>ENSAIOS</b>	<b>MÉTODOS</b>
<b>Viscosidade rotacional</b>	NBR-15184
<b>Grau de desempenho – PG</b>	ASTM D 6373/16
<b>Fluência e recuperação sob tensões múltiplas – MSCR</b>	ASTM D 7405/15
<b>Curva mestra</b>	-
<b>Varredura de amplitude linear - LAS</b>	AASHTO TP 101/14
<b>RTFO</b>	ASTM D 2872/97

O equipamento utilizado foi o DSR, da série Discovery Hybrid Rheometer (DHR-1), que mede o módulo complexo de cisalhamento ( $G^*$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ) a temperaturas e frequências de carregamentos desejados. O parâmetro  $G^*$  possui uma componente elástica recuperável ( $G'$ ) e uma componente viscosa não recuperável ( $G''$ ). Em síntese, o módulo  $G^*$  pode ser relacionado com a resistência do material em diferentes velocidades de cisalhamento e o ângulo  $\delta$  fornece informação sobre a razão entre a resposta elástica e viscosa durante o processo de cisalhamento. (MOTTA et al., 1996, LIMA, 2003.)

O procedimento exemplificado na Figura 15, baseia-se na compressão de uma amostra de ligante entre uma placa fixa e outra giratória. Aplica-se um torque girando a placa de um ponto A para um ponto B, em seguida para um ponto C, retornando em fim para o ponto A (BERNUCCI et al., 2010).

Figura 15 – Esquema de aplicação da tensão de cisalhamento na amostra de ligante asfáltico



Fonte: Javid (2010)

### 3.2.3 Caracterização Química dos Materiais

Após a incorporação da cera de abelha nos teores de 1%, 3% e 5%, ao ligante, foi realizada a análise da composição química das misturas, bem como do ligante puro e da cera de abelha, por meio do ensaio de FTIR (Espectroscopia na região do infravermelho médio por transformada de Fourier, do inglês Fourier Tranformed Infra Red).

Procedimento esse que possibilitou verificar se houve alterações na composição química do ligante puro após a inserção da cera na matriz asfáltica.

As amostras envelhecidas por meio do RTFO, de ligante com e sem o aditivo, foram também submetidas aos registros dos espectros de FTIR, afim de quantificar a intensidade do envelhecimento. Em seguida, foi realizado o cálculo da concentração dos grupos funcionais, baseado na comparação das áreas de absorção características.

Nos estudos de Mouillet (2010 apud GUERRA, 2019), para o cálculo dos índices de oxidação Carbonilas e Sulfóxidos, devem ser aplicadas as Equações 1 e 2, retiradas do método MLPC N°69. Nestas equações, supõe-se que o grupo Metil (CH<sub>3</sub> – em torno de 1375cm<sup>-1</sup>) e o grupo Etileno (CH<sub>2</sub> – em torno de 1460cm<sup>-1</sup>) são pouco alterados quando o ligante é oxidado. Em compensação, os Sulfóxidos (SO – em torno de 1030cm<sup>-1</sup>) e os grupos Carbonilas (CO - em torno de 1700cm<sup>-1</sup>) 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 (1)

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

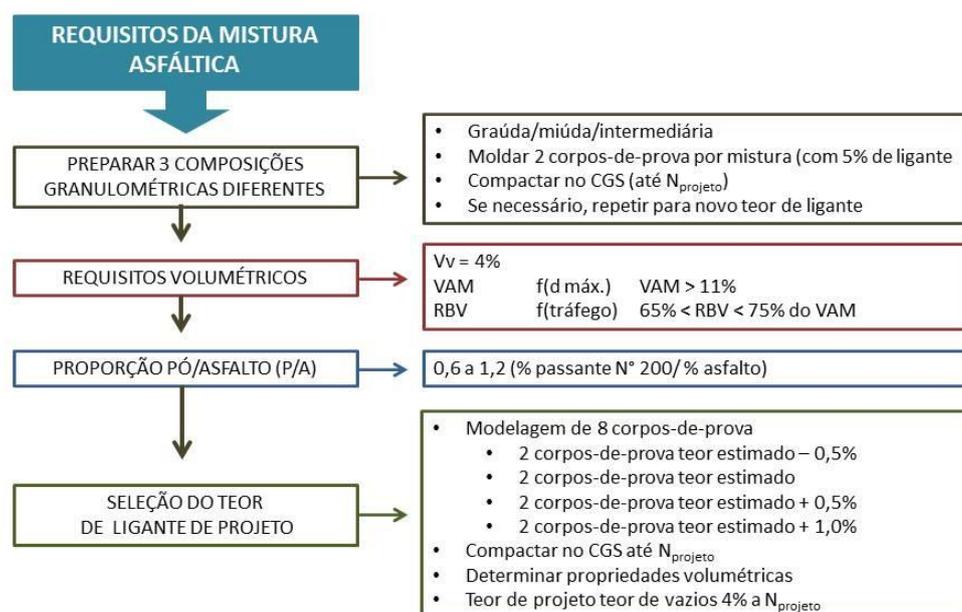
Equação (2)

O equipamento utilizado foi o Espectrômetro Bruker Vertex 70, como sonda ATR. A técnica foi executada na faixa 4000 a 400 cm<sup>-1</sup>, por processo de absorbância.

### 3.2.4 Dosagem SUPERPAVE

A fim de se determinar o teor ótimo de ligante asfáltico para a mistura asfáltica estudada, realizou-se a dosagem pela metodologia SUPERPAVE. A sequência de atividades está descrita no fluxograma da Figura 16.

Figura 16 - Etapas para dosagem, pela metodologia SUPERPAVE



Fonte: BERNUCCI et al., (2010)

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

O passo inicial da dosagem SUPERPAVE consistiu na escolha de três composições granulométricas com os agregados que seriam utilizados (brita 19mm, brita 9,5mm, areia, pó de pedra e filer), sendo uma superior, uma intermediária e uma inferior. Estas são chamadas de curvas de Fuller e encontram-se dentro da Faixa C de granulometria do DNIT, incluindo os conceitos de Pontos de Controle e Zonas de Restrição.

Conhecendo a granulometria de cada agregado, foram montadas as composições que são apresentadas nas Tabelas 16 e 17 e na Figura 17.

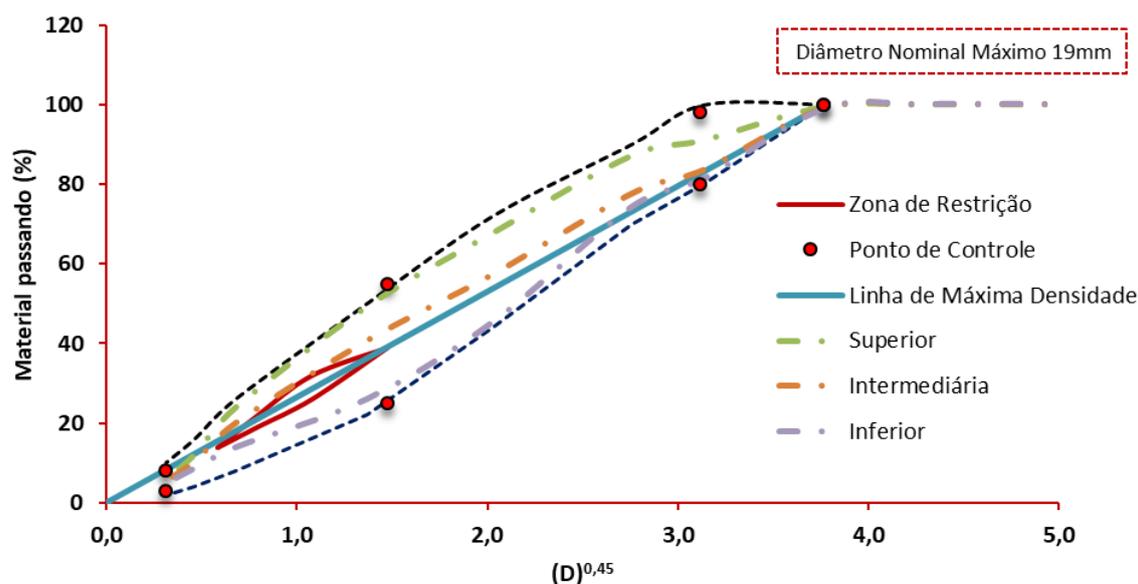
Tabela 16 – Porcentagem de agregado das misturas de projeto

CURVA	BRITA 19MM	BRITA 9,5MM	AREIA	PÓ DE PEDRA	FILER
<b>Superior</b>	12%	30%	15%	42%	1%
<b>Intermediária</b>	22%	31%	15%	30%	2%
<b>Inferior</b>	25%	45%	3%	25%	2%

Tabela 17 – Porcentagem passando das misturas de projeto

PENEIRA	ESPECIFICAÇÃO		CURVAS		
	DNIT – FAIXA C		Superior (%)	Intermediária (%)	Inferior (%)
	% Mín.	% Máx.			
1"	100	100	100,00	100,00	100,00
3/4"	100	100	99,51	99,10	98,98
1/2"	80	100	91,12	83,71	81,49
3/8"	70	90	87,18	77,61	74,27
Nº 4	44	72	67,80	57,36	45,43
Nº 10	22	50	49,30	40,76	26,14
Nº 40	8	26	23,99	20,11	14,03
Nº 80	4	16	12,30	10,45	8,81
Nº 200	2	10	5,79	5,53	4,98

Figura 17 – Curvas de Fuller



Pela Tabela 17 e Figura 17, verificam-se que os valores encontrados das composições granulométricas, estão dentro dos limites pré-estabelecidos pela Faixa C do DNIT.

Conforme a metodologia, os corpos de prova devem ser compactados em diferentes números de giros de acordo o volume de tráfego considerado (BERNUCCI et al., 2010). Logo, a etapa seguinte consistiu em moldar 18 corpos de prova (com teor de ligante igual a 5%), sendo 6 corpos de prova para cada curva granulométrica, entre esses, foram dois para cada número de giros. Neste caso, foi considerado o tráfego Médio a

Alto, sendo  $N_{inicial} = 8$  giros,  $N_{projeto} = 100$  giros e  $N_{máximo} = 160$  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.

A mistura, ainda não compactada, permaneceu em estufa por um período de 2 horas antes da compactação de modo a simular o envelhecimento a curto prazo durante a usinagem em campo. A compactação foi realizada no compactador giratório com pressão aplicada de 600kPa e o ângulo de rotação de  $1,25^\circ$ , conforme a metodologia SUPERPAVE. (BERNUCCI et al., 2010).

Com esses corpos de provas moldados, foi possível calcular os valores de  $V_v$  (volume de vazios), VAM (vazios no agregado mineral), que foram obtidos por meio dos diâmetros, alturas, pesos secos e submersos, dos mesmos. Outro parâmetro obtido foi a densidade máxima medida obtida pelo método Rice, também denominada de Gmm, preconizado pela norma americana ASTM D2041. Tendo em posse esses valores explanados na Tabela 18, foi determinada a curva a ser trabalhada.

Tabela 18 – Parâmetros volumétricos das misturas

CURVA	% LIGANTE	% Gmm			VAM (%)	Vv (%)
		$N_{inicial}$	$N_{projeto}$	$N_{máximo}$		
<b>Superior</b>	5,0	87,69	94,51	95,32	12,15	5,49
<b>Intermediária</b>	5,0	90,80	96,48	97,13	11,52	3,52
<b>Inferior</b>	5,0	93,07	95,95	97,18	12,85	4,05
<b>Limites</b>		< 89,00	96,00	< 98,00	13 (mín)	4,00

A curva escolhida foi a inferior em virtude do seu volume de vazios ser de 4%, como demonstra a Tabela 18. Por esse mesmo motivo, fez-se desnecessário a próxima etapa da dosagem, que seria a compactação de novos corpos de prova com a granulometria da curva inferior, porém, variando os teores de ligante, para a definição do teor ótimo. Como o resultado do volume de vazios, para o teor de 5% de ligante, foi exatamente os 4% que define a metodologia, o teor de 5% de ligante é o teor ótimo.

Para a caracterização mecânica, definiu-se que o teor ótimo de ligante puro, obtido a partir da dosagem, seria o mesmo utilizado para a moldagem dos corpos de prova com os diferentes teores de aditivo nos ligantes. Permitindo assim, comparar as características

mecânicas das misturas puras e com a presença do aditivo, para a mesma porcentagem de ligante.

### 3.2.5 Caracterização Mecânica das Misturas

Nesta pesquisa, os ensaios mecânicos permitiram analisar a influência da adição da cera de abelha em comparação ao ligante puro no desempenho mecânico 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 (ligante puro e modificado com 1%, 3% e 5% da cera de abelha). As propriedades analisadas estão expostas na Tabela 19, com suas respectivas normas de ensaio.

Tabela 19 – Ensaios e normas utilizadas para caracterização mecânica das misturas

ENSAIOS	MÉTODOS
<b>Resistência à tração indireta por compressão diametral</b>	DNIT ME 136/10
<b>Módulo de resiliência</b>	NBR 16018
<b>Módulo dinâmico</b>	AASHTO TP-79/2016
<b>Dano por umidade induzida – Lottman modificado</b>	DNIT ME 180/2018
<b>Flow Number</b>	NBR 16505/2016
<b>Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada</b>	DNIT ME 183/18

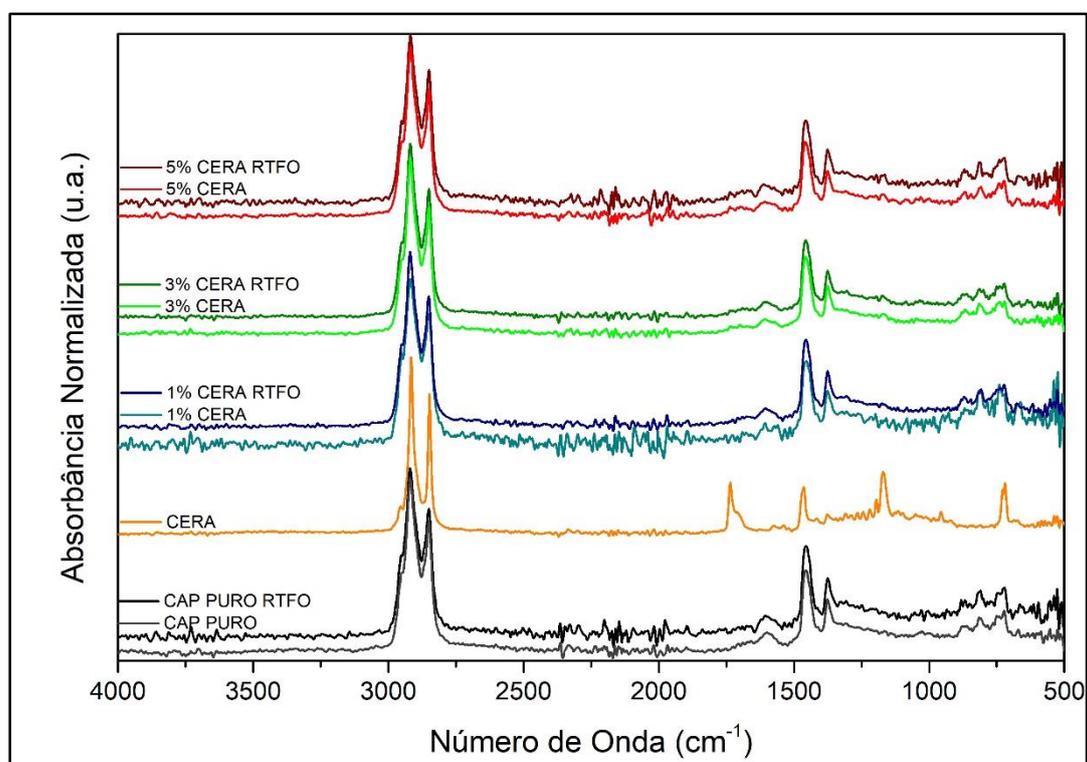
## 4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na fase experimental desta pesquisa. Nestes encontram-se os resultados da análise química, da cera de abelha e dos ligantes, puro e modificado com a cera de abelha, por meio de FTIR, da caracterização reológica dos ligantes, além dos resultados da caracterização mecânica das misturas com o ligante, puro e modificado, em diferentes porcentagens de aditivo.

### 4.1 Caracterização Química - FTIR

Os ensaios de FTIR foram realizados para as amostras de ligante puro e contendo cera de abelha nas proporções de 1%, 3% e 5%, antes e após RTFO. Os espectros obtidos para estas amostras estão contidos na Figura 18.

Figura 18 - Espectros de FTIR para as amostras de ligante asfáltico



Os espectros obtidos revelam informações importantes quanto a composição do ligante puro e com adição da cera. Para os espectros dos ligantes (antes e após RTFO),

foi obtido um perfil semelhante para as amostras. Não foi encontrado algum pico com intensidade relevante para indicar um alto grau de oxidação pós procedimento RTFO, como em regiões entre 1.760 e 1.700  $\text{cm}^{-1}$ , para estiramentos de carbonilas (C=O) ou entre 1.250 e 1.050  $\text{cm}^{-1}$ , para estiramentos de grupos C-O. Outra região em que não foi encontrado algum sinal indicativo de funções oxigenadas foi entre 3.100 e 3.600  $\text{cm}^{-1}$ , relativo à vibração em grupos OH.

Quanto a caracterização do ligante, os principais sinais indicativos da sua composição estão presentes em regiões comuns a compostos hidrocarbonetos, sendo estas caracterizadas por picos de alta intensidade, referentes a estiramentos (ou deformações axiais) para grupos alifáticos saturados entre 3.000 e 2.800  $\text{cm}^{-1}$ . Nesta faixa foram encontrados picos em 2.951  $\text{cm}^{-1}$  e 2.867  $\text{cm}^{-1}$ , para estiramentos assimétrico e simétrico em grupos metila ( $-\text{CH}_3$ ) e picos em 2.919  $\text{cm}^{-1}$  e 2.850  $\text{cm}^{-1}$ , para estiramentos assimétrico e simétrico em grupos metileno ( $-\text{CH}_2-$ ), além de um pico em 2.890  $\text{cm}^{-1}$  para estiramento de grupos metina ( $-\text{CH}-$ ), parcialmente obscurecido pelo 2.919  $\text{cm}^{-1}$ .

Picos com baixa intensidade foram encontrados entre 2.000 e 1.700  $\text{cm}^{-1}$ , indicando bandas harmônicas para aromáticos substituídos, bem como pequenos picos para grupos carbonilas (C=O) em pequena quantidade entre 1.760 e 1.700  $\text{cm}^{-1}$ . A presença de um pico em torno de 1.600  $\text{cm}^{-1}$  é indicativo de insaturações (C=C) em anéis, juntamente com picos em torno de 1.475  $\text{cm}^{-1}$ , sendo este último geralmente obscurecido pelo pico de deformação angular de grupos metileno ( $-\text{CH}_2-$ ) em 1.455  $\text{cm}^{-1}$ . O aparecimento deste último está em conformidade com os picos deste grupo para deformação axial (2.919 e 2.850  $\text{cm}^{-1}$ ), enquanto que o pico em 1.375  $\text{cm}^{-1}$ , referente a deformação angular em grupos metila ( $-\text{CH}_3$ ), está em conformidade com picos de deformação axial em 2.951 e 2.867  $\text{cm}^{-1}$ . Por fim, o pico em torno de 720  $\text{cm}^{-1}$  é referente a vibração do tipo “*rocking*” para cadeias saturadas acima de 4 carbonos,  $-(\text{CH}_2)_n-$ , com  $n \geq 4$ , confirmando a característica orgânica do ligante com presença de grupos saturados, insaturados e aromáticos.

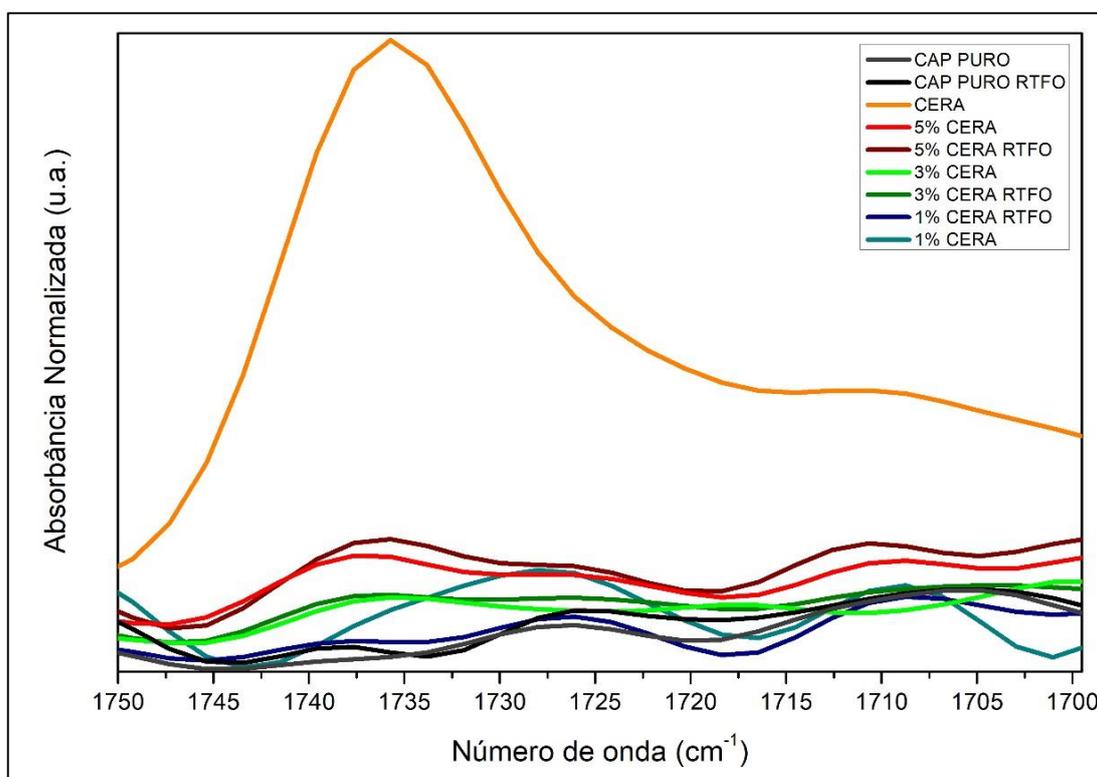
O espectro para a cera de abelha apresentou alguns picos semelhantes ao do ligante em relação a ligações entre carbono e hidrogênio, que são espécies em comum entre as estruturas orgânicas. Neste espectro foi observada a presença de picos entre 2.950 e 2.870  $\text{cm}^{-1}$ , relacionados a grupos metila e metileno (estiramentos assimétricos e simétricos) e em 1.460 e 1.375  $\text{cm}^{-1}$ , para deformação angular destes mesmos grupos metileno e metila. Os picos em 1.735 e 1.720  $\text{cm}^{-1}$ , indicam estiramento de grupos carbonila, e junto ao pico

em  $1.170\text{ cm}^{-1}$  para estiramento da ligação C-O, são o indicativo da presença de grupos ésteres na amostra.

O não aparecimento de uma banda entre  $3.100$  e  $3.600\text{ cm}^{-1}$  é indicativo de que a cera possui baixo (ou desprezível) teor de ácidos graxos, que é comum em alguns tipos de cera. Por fim, o pico em  $721\text{ cm}^{-1}$ , para estiramentos do tipo *rocking*, indica que há cadeias alifáticas longas nas moléculas contidas na cera.

Na Figura 19 está contida uma ampliação da área dos espectros, próximos ao pico em  $1.735\text{ cm}^{-1}$ .

Figura 19 - Espectro com faixa reduzida para as amostras de ligante puro e modificado com cera de abelha, antes e após tratamento em RTFO



A observação deste pico é o maior indicativo da presença de cera no ligante e o aumento da intensidade deste é proporcional a quantidade de cera. Observa-se que para os diferentes teores, as amostras submetidas ao RTFO obtiveram baixa diferença nas intensidades dos picos, o que indica que a cera ainda permanece nas mesmas proporções. Também não aparecendo picos correlacionados com oxidação nesta faixa de análise, indicando que a cera e a mistura cera-ligante sofreram baixa (ou quase nula) oxidação.

Para quantificar a intensidade do envelhecimento de uma amostra em relação a outra, Oliveira (2013) propôs considerar a diferença das áreas dos gráficos antes e após o

RTFO. A Tabela 20 apresenta as áreas de oxidação dos grupos funcionais, carbonila e sulfóxido.

Tabela 20 – Oxidação das amostras de ligantes, puro e modificados, antes e após o envelhecimento no RTFO

GRUPO FUNCIONAL	AMOSTRA	ÁREA DE OXIDAÇÃO	
		Antes do RTFO	Após RTFO
CARBONILA	Ligante Puro	16,7	18,2
	Ligante + 1% de Cera	21,2	16,7
	Ligante + 3% de Cera	30,6	32,9
	Ligante + 5% de Cera	44,6	40,8
SULFÓXIDO	Ligante Puro	16,2	17,5
	Ligante + 1% de Cera	15,0	9,7
	Ligante + 3% de Cera	6,05	12,6
	Ligante + 5% de Cera	16,6	16,9

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. Em relação ao percentual oxidado do ligante, esse é calculado 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). Essas diferenças e percentuais oxidados calculados, estão expostos na Tabela 21.

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

AMOSTRA	DIFERENÇAS ENTRE AS ÁREAS DE OXIDAÇÃO (%)	PERCENTUAL OXIDADO (%)
LIGANTE PURO	32,2	97,7
LIGANTE + 1% DE CERA	29,1	80,5
LIGANTE + 3% DE CERA	16,3	44,6
LIGANTE + 5% DE CERA	37,3	61,0

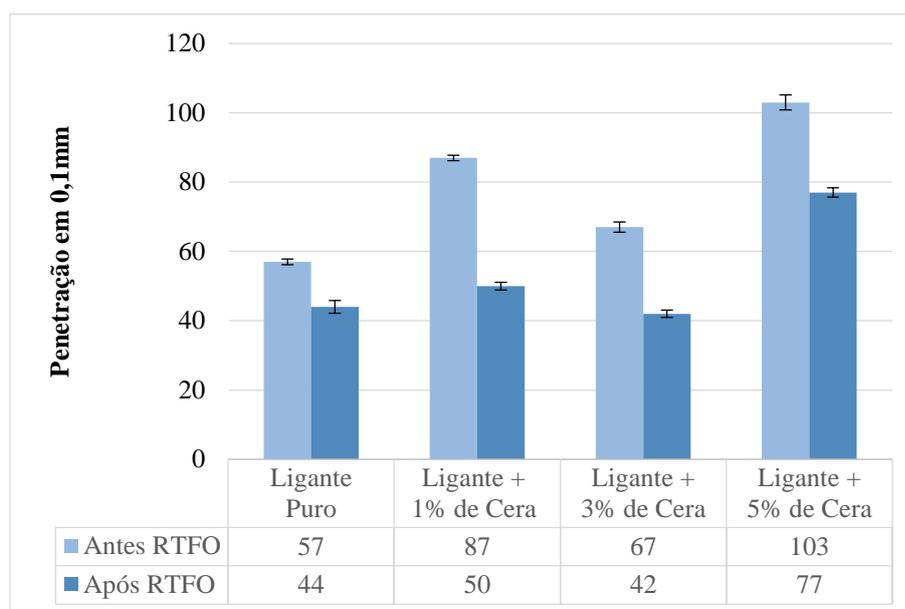
Conforme apresentado na Tabela 21 é possível observar que os ligantes modificados com a cera de abelha envelheceu menos do que a amostra de ligante puro. Logo, o aditivo atuou como um antioxidante, sendo o teor de 3% o que apresentou o menor percentual de oxidação seguido dos teores de 5% e 1%.

## 4.2 Caracterização Reológica do Ligante

### 4.2.1 Penetração

A penetração a 25°C é empregada, no Brasil e em diversos países, para a classificação dos ligantes asfálticos. Os resultados obtidos para todas as amostras, antes e após o envelhecimento, são apresentados na Figura 20.

Figura 20 – Resultados de penetração para os ligantes, puro e modificados



Com a incorporação da cera de abelha ao ligante asfáltico ocorreu um considerável aumento da penetração, tal comportamento era previsto, já que o aditivo tem a capacidade de reduzir a viscosidade do ligante asfáltico, tornando-o menos consistente. Sofyan et al. (2017) ao utilizar 1% de aditivo a base de cera de abelha observaram a mesma tendência, a qual apresentou um ligeiro aumento no valor de penetração.

Vale destacar que não houve um comportamento linear no aumento observado nesta pesquisa, visto que o teor de 3% apresentou a menor penetração dentre os três teores

de cera. Tal comportamento pode ser atribuído a uma possível heterogeneidade específica desta amostra.

Após o procedimento de envelhecimento à curto prazo houve um menor aumento nos valores de penetração para todos os teores, indicando uma elevação da dureza do material incitada pela oxidação que ocorreu com as amostras no decorrer do processo. Segundo Bulatovic et al. (2014), o aumento de dureza do ligante asfáltico após a técnica é derivado do aumento de asfaltenos do ligante envelhecido, o que modifica a sua composição química. Sob esse aspecto foram determinadas penetrações retidas, que quantificam a sensibilidade do ligante ao envelhecimento, e os resultados são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Penetração Retida

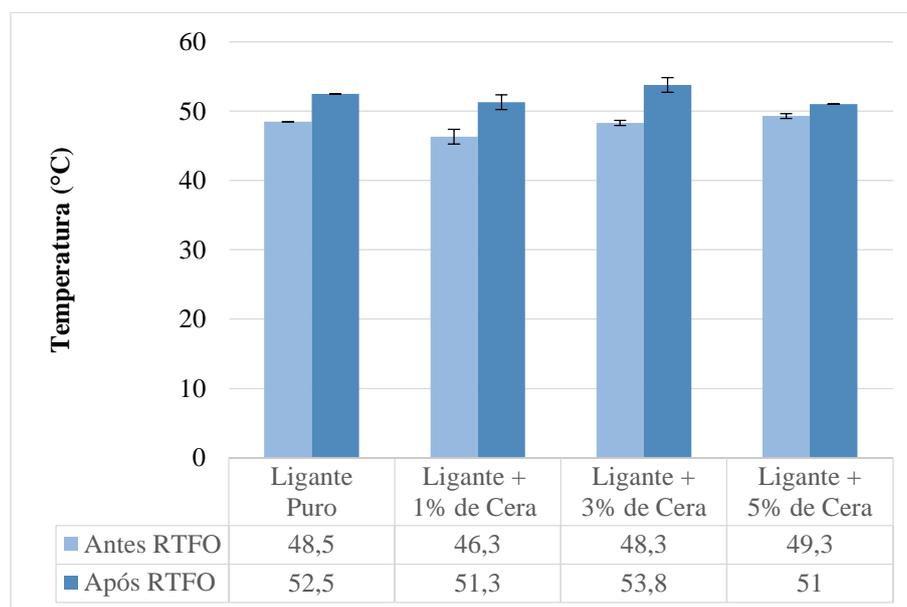
AMOSTRA	LIGANTE PURO	LIGANTE + 1% DE CERA	LIGANTE + 3% DE CERA	LIGANTE + 5% DE CERA
<b>PENETRAÇÃO RETIDA MÍNIMA (%)</b>	77,5	57,5	62,7	74,7

A norma DNIT 095/2006 – EM determina a penetração retida mínima de 55%, ou seja, quanto mais próximo de 100% maior a capacidade do ligante manter sua característica de penetração após o procedimento de envelhecimento e, portanto, maior será a sua resistência a oxidação. Todas as amostras apresentaram resultados superiores ao limite mínimo da norma, sendo o teor de 5% o que apresentou um resultado mais próximo do ligante puro, além de ser entre as misturas cera-ligante, o que apresentou um melhor resultado referente a sensibilidade ao envelhecimento.

#### 4.2.2 Ponto de Amolecimento

A temperatura de ponto de amolecimento está relacionada com a constância das propriedades do ligante a altas temperaturas e ao aumento da resistência à deformação permanente. A Figura 21 apresenta o efeito dos teores de cera de abelha no ponto de amolecimento do ligante asfáltico.

Figura 21 – Temperaturas de ponto de amolecimento para os ligantes, puro e modificados



A resolução da ANP nº 19 /2005 especifica uma temperatura mínima de 46°C para os valores de ponto de amolecimento para o referido ligante, sem modificação. Nota-se que todas as amostras, mesmo aquelas modificadas, apresentaram temperaturas superiores ao mínimo estabelecido pela ANP.

Para o teor de 1% de adição de cera de abelha, houve uma redução nessa temperatura de 2,2°C, em relação ao ligante puro. Já o teor de 3% manteve praticamente a mesma temperatura do ligante sem modificação. No geral, houve um aumento gradativo no ponto de amolecimento ao se adicionar os diferentes teores de cera ao ligante, tornando as propriedades dos ligantes menos sensíveis à temperaturas mais elevadas.

A Tabela 23 apresenta a variação desse parâmetro após o envelhecimento das amostras.

Tabela 23 – Aumento da temperatura do ponto de amolecimento, após RTFO

AMOSTRA	LIGANTE PURO	LIGANTE + 1% DE CERA	LIGANTE + 3% DE CERA	LIGANTE + 5% DE CERA
AUMENTO DE TEMPERATURA (°C)	4,0	5,0	5,5	1,7

A norma DNIT 095/2006 – EM estabelece que após o procedimento de envelhecimento a variação do ponto de amolecimento não deve ultrapassar um máximo de 8°C quando comparado ao ligante antes do envelhecimento à curto prazo. Logo, nota-se que todas as amostras apresentaram resultados satisfatórios. Dentre os resultados encontrados, verificou-se que a variação obtida para o ligante modificado com 5% de cera de abelha foi inferior ao obtido para o ligante puro, o que reforça a influência desse teor de aditivo na resistência ao envelhecimento.

### 4.2.3 Índice de Suscetibilidade Térmica - IST

O índice de suscetibilidade térmica (IST) é obtido por meio dos resultados dos ensaios de penetração e ponto de amolecimento e dá um indicativo da sensibilidade do ligante à mudança de temperatura. A Tabela 24 apresenta os resultados desse parâmetro.

Tabela 24 – Resultados de IST

AMOSTRA	LIGANTE PURO	LIGANTE + 1% DE CERA	LIGANTE + 3% DE CERA	LIGANTE + 5% DE CERA
IST	- 1,3	- 0,8	- 0,9	0,6

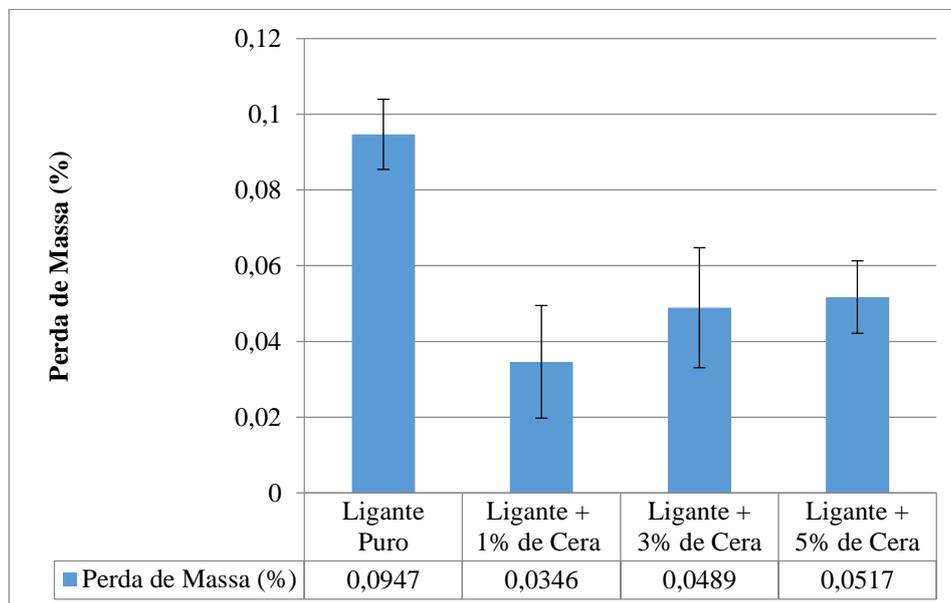
A resolução da ANP (2005) define uma faixa para o enquadramento dos valores de IST, que varia de -1,5 a +0,7 para ligantes sem modificações. Segundo Bernucci et al. (2010) valores maiores que +1 representam ligantes oxidados, pouco sensíveis a elevadas temperaturas e quebradiços em temperaturas menores, enquanto que valores menores que -2 indicam ligantes muito suscetíveis a variação de temperatura. Nota-se, pelos resultados, que todas as amostras estão dentro do limite estabelecido pela resolução, além de indicar que os ligantes modificados com a cera de abelha são menos sensíveis à variação de temperatura quando comparados ao ligante puro, fato que pode garantir um melhor desempenho do pavimento em campo.

### 4.2.4 Perda de Massa

O ensaio de RTFO é necessário para realizar a caracterização física em ligantes, submetidos a algum tipo de condicionamento, que simula o nível de agressividade ao qual estarão sujeitos durante a vida útil. O procedimento também pode ser usado para se determinar a variação de massa indicando assim a volatilidade do ligante. A perda de

massa indica a capacidade de envelhecimento do ligante, e os resultados podem ser observados na Figura 22.

Figura 22 – Resultados de perda de massa



A norma 095/2006 do DNIT especifica o limite da perda de massa em 0,5%. Isto posto, conclui-se que todas as amostras se encontram dentro da tolerância de envelhecimento sem interferir na qualidade do pavimento. Destacam-se os ligantes modificados com a cera de abelha, visto que apresentaram menores perdas de massa quando comparados ao ligante puro.

#### 4.2.5 Viscosidade Rotacional

A viscosidade do ligante está ligada à sua capacidade de envolver os agregados e melhorar a trabalhabilidade das misturas asfálticas em campo, além de permitir a determinação das temperaturas de usinagem e compactação. As Figuras 23 e 24 apresentam os resultados do ensaio de viscosidade rotacional, antes e após o envelhecimento, respectivamente.

Figura 23 – Resultado da viscosidade rotacional, antes do RTFO

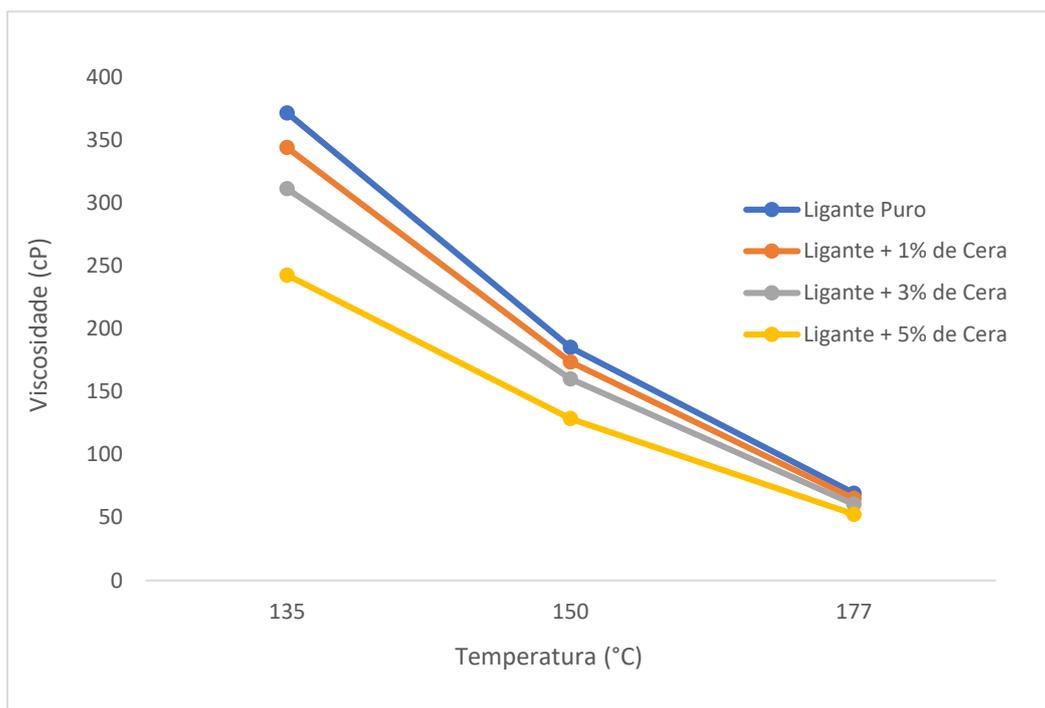
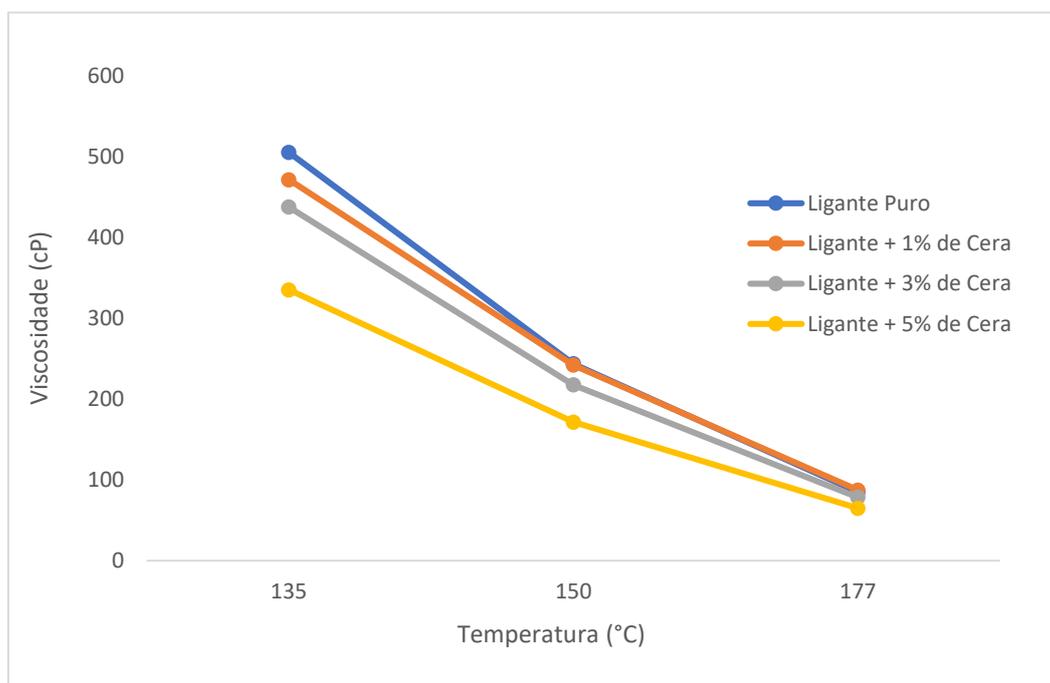


Figura 24 – Resultado da viscosidade rotacional, após o RTFO



As temperaturas utilizadas no ensaio de viscosidade foram acima do ponto de fusão da cera, que é de cerca de 60°C, resultando assim em uma redução da viscosidade do ligante modificado, como já era previsto. Dessa forma, para temperaturas abaixo do

ponto de fusão da cera, o ligante asfáltico modificado apresentou maior consistência, corroborando com o resultado de ponto de amolecimento.

De acordo com os resultados, observa-se a redução da viscosidade do ligante diante do aumento do teor de cera de abelha. A menor viscosidade apresentada pelo ligante modificado ocorre com o maior teor de aditivo, sendo esse de 5%. O comportamento é semelhante nas condições anterior e posterior ao envelhecimento das amostras. Comparando os ligantes antes e após o processo de envelhecimento à curto prazo, observou-se que o envelhecimento causou o aumento da viscosidade, como já era previsto.

As temperaturas de usinagem e compactação foram determinadas graficamente na qual para a primeira, o ligante deve ter uma viscosidade rotacional de  $0,17 \pm 0,02$  Pa.s, já para se determinar a segunda, o ligante deve apresentar viscosidade rotacional de  $0,28 \pm 0,03$  Pa.s. A Tabela 25 apresenta os resultados das temperatura de usinagem e compactação das amostras estudadas.

Tabela 25 – Temperaturas de usinagem e compactação

<b>TEMPERATURAS</b>	<b>LIGANTE PURO</b>	<b>LIGANTE + 1% DE CERA</b>	<b>LIGANTE + 3% DE CERA</b>	<b>LIGANTE + 5% DE CERA</b>
<b>USINAGEM (°C)</b>	154	152	150	145
<b>COMPACTAÇÃO (°C)</b>	142	141	138	130

A maior variação de temperatura ocorreu entre o ligante puro e o ligante modificado com 5% de cera, comportamento já previsto pelo fato dessa porcentagem de cera apresentar uma maior redução de viscosidade. A redução apresentada foi de 9°C na temperatura de usinagem e 12°C na temperatura de compactação. Resultados similares foram encontrados por Feitosa (2015), com redução de 10°C na temperatura de usinagem ao adicionar 5% de cera de carnaúba, e por Muñoz (2010), que reduziu 9°C ao adicionar 5% de cera de cana de açúcar.

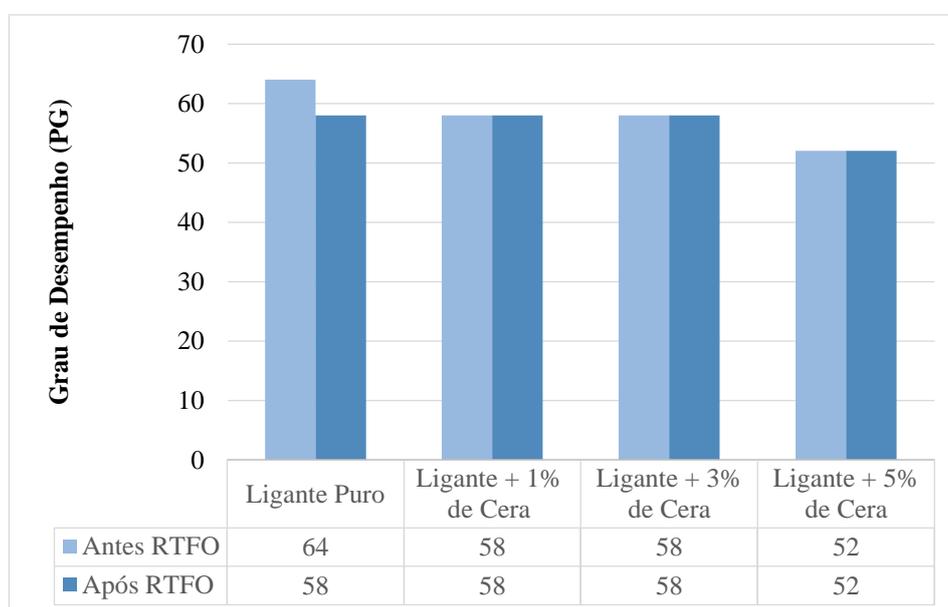
Destaca-se que essas temperaturas foram determinadas a partir das viscosidades obtidas por meio de procedimento especificado para misturas à quente. Esse fato pode indicar que a redução máxima permitida de temperatura poderia ser ainda maior, caso existisse uma norma nacional específica para misturas mornas que abordasse esse item.

Sofyan et al. (2017) já tinham indicado o potencial do uso da cera de abelha como base para um aditivo alternativo para produção de mistura asfálticas mornas. No entanto, frisou que as reduções das temperaturas de usinagem e compactação baseadas no ensaio de viscosidade são muito pequenas, entre 4°C-5°C. Logo, o ideal seria o uso da densidade da mistura convencional como referência para produzir a mistura morna. Feitosa (2015) também determinou a redução de temperatura baseado na densidade da mistura à quente, e dessa vez, as temperaturas foram ainda menores. O ligante modificado com cera de carnaúba mostrou uma redução de 25-35°C na temperatura de usinagem e 35°C na temperatura de compactação.

#### 4.2.6 Grau de Desempenho – PG

O ensaio de PG foi realizado, tanto antes como após o envelhecimento das amostras, e a partir do qual obtiveram-se informações de parâmetros de deformabilidade, de rigidez e, podendo ainda, delimitar a faixa de temperatura de utilização do ligante. Na Figura 25, tem-se a representação das temperaturas de PG.

Figura 25 – Temperaturas superiores de PG



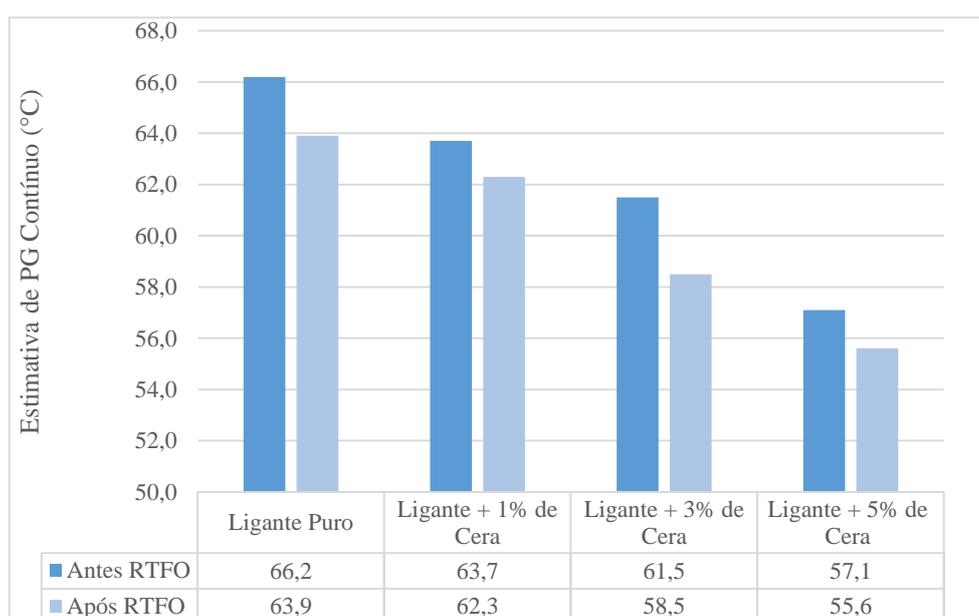
Nota-se que com a incorporação da cera ao ligante, houve uma queda nas temperaturas de PG das amostras não envelhecidas. Já em relação as amostras que foram submetidas ao RTFO, para os teores de 1% e 3% de cera, essas mantiveram o PG do ligante puro, havendo uma redução apenas para o teor de 5%. Apesar da possibilidade da delimitação da temperatura mínima de uso do ligante, essa não foi analisada, visto que, o

território brasileiro caracteriza-se predominantemente pelo clima tropical, não sendo comum a ocorrência de temperaturas negativas.

O fato de todas as misturas apresentarem a capacidade de manutenção de temperatura de PG após o envelhecimento, o que não aconteceu com a amostra de ligante puro, dá um indicativo de que a cera de abelha agiu impedindo o efeito degenerativo do ligante. Para o teor de 5%, a redução nas temperaturas de PG é justificada pela perda de viscosidade devido ao incremento da temperatura, resultando em um aumento de deformabilidade e esta redução poderia ser considerada positiva, uma vez que, quanto menor a rigidez, menor será o estresse térmico do ligante quando há mudança da temperatura, o que pode reduzir o risco de fissuração do pavimento. Por outro lado, a temperatura de 52°C torna o uso da mistura mais indicado para regiões que possuam clima ameno, visto que, regiões quentes, como o nordeste brasileiro, está temperatura é facilmente alcançada no pavimento asfáltico, em dias mais quentes.

O ensaio de PG também fornece a temperatura de falha dos ligantes, definida como a temperatura na qual o parâmetro  $G^*/\sin\delta$  atinge um valor menor que 1,0 kPa antes do processo de envelhecimento a curto prazo e um valor de 2,2 kPa após esse processo, segundo a especificação SUPERPAVE. De acordo com esta metodologia, tais valores garantem uma resistência adequada ao acúmulo de deformações permanentes. Os valores obtidos na estimativa de temperatura de falha são apresentados na Figura 26.

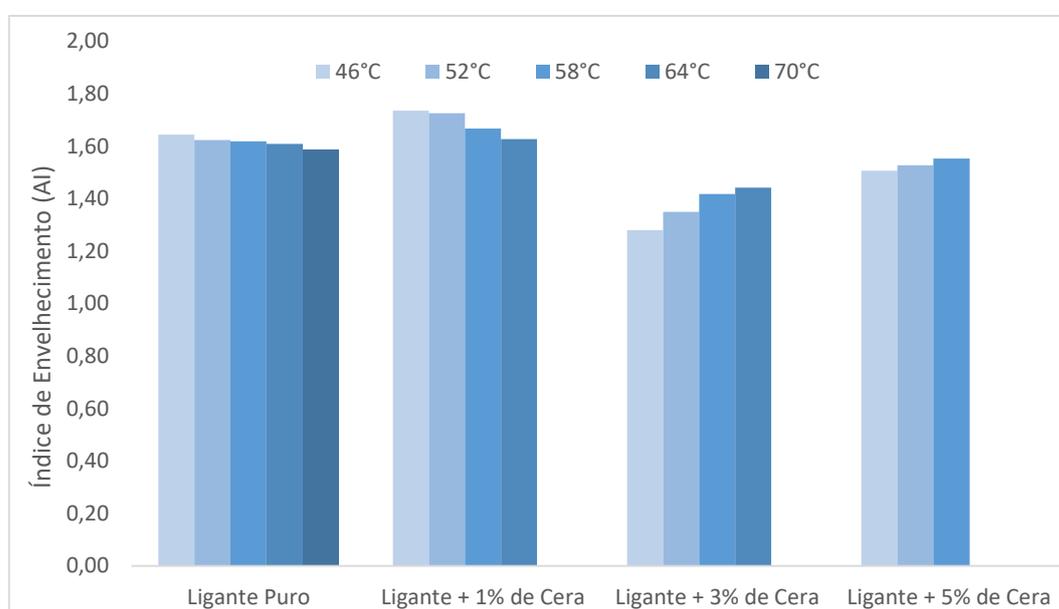
Figura 26 – Estimativa das temperaturas de falha



Os resultados de todas as amostras mostraram que, de maneira geral, ocorreu uma redução das temperaturas de falha, após o procedimento de envelhecimento à curto prazo, indicando que o acréscimo do aditivo pode ter interferido na resistência do material ao envelhecimento, fato que não fica explícito nas temperaturas de PG. Nota-se também, uma contradição ao resultado encontrado para a perda de massa, que demonstrou um menor envelhecimento das amostras modificadas.

A Figura 27 apresenta os valores do índice de envelhecimento, “aging index” (AI) obtidos por meio da relação entre os parâmetros  $G^*/\sin\delta$  dos ligantes, antes e após o procedimento de envelhecimento.

Figura 27 – Índice de Envelhecimento



Os ligantes modificados com os teores de 3% e 5% de cera de abelha, apresentaram menores valores de AI quando comparados com o respectivo ligante de referência, mostrando que para essas porcentagens, o aditivo foi benéfico com relação à oxidação ou volatilização dos componentes químicos do ligante. Esse resultado corrobora o que foi observado nos resultados de perda de massa, penetração retida, variação no ponto de amolecimento e IST, os quais indicaram que a cera de abelha atua como antioxidante, oxidando preferencialmente no lugar do ligante, refletindo em menores custos de manutenção e maior vida útil da mistura asfáltica final.

As Figuras 28 e 29 ilustram o comportamento do módulo de cisalhamento dinâmico, antes e após o procedimento em estufa RTFO, que além de ser um indicador da temperatura do grau de desempenho propriamente dito, representa a resistência à deformação em termos de elasticidade do ligante.

Figura 28 – Módulo de Cisalhamento Dinâmico *versus* Temperatura, antes do RTFO

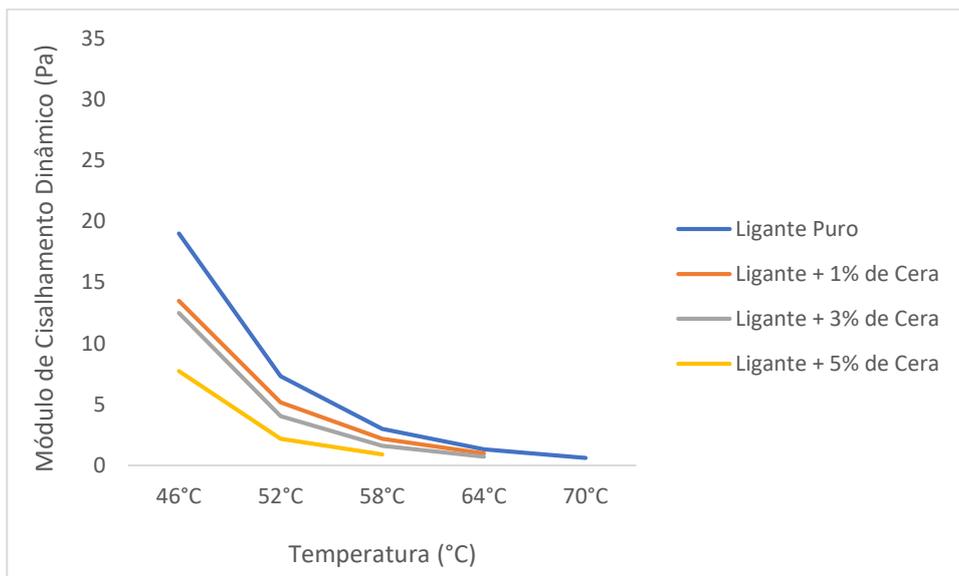
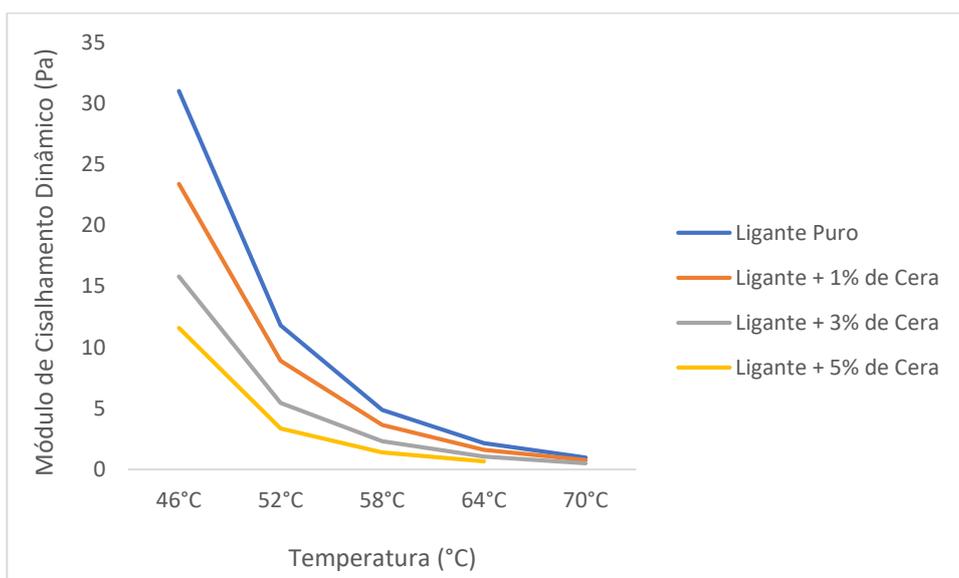


Figura 29 – Módulo de Cisalhamento Dinâmico *versus* Temperatura, após o RTFO



Foi possível relacionar diretamente o módulo de cisalhamento dinâmico com o parâmetro  $G^*/\text{sen}\delta$ , tanto antes como após o envelhecimento. Esses valores são muito

semelhantes, devido ao  $\text{sen}\delta$  ser bem próximo de 1, o que não provoca mudanças significativas nos parâmetros.

Pelos resultados, nota-se que nas duas condições, o ligante puro apresenta uma maior rigidez, do que aqueles modificados com a cera, além dessa rigidez diminuir conforme o incremento do teor de cera. Essa maior rigidez do ligante puro leva a crer que a mistura asfáltica com o ligante nessa condição, apresentaria uma maior resistência à deformação. Todavia, essa rigidez mais elevada não necessariamente está relacionada a melhoria do desempenho do ligante em altas temperaturas.

Em conceitos de PG, verifica-se que a modificação não foi eficaz pois o acréscimo no  $\text{sen}\delta$  foi maior que no módulo de cisalhamento dinâmico, ou seja, houve uma redução da rigidez do ligante. Esse fato, pode ser justificado devido à redução de viscosidade causada pela adição da cera de abelha ao ligante puro.

Em relação ao comportamento do Módulo de Cisalhamento Dinâmico *versus* Temperatura, observa-se que os ligantes apresentaram uma redução no parâmetro à medida que houve o incremento da temperatura, tornando o material menos rígido.

As Figuras 30 e 31 ilustram os resultados para os ângulos de fase dos ligantes antes e após o envelhecimento, respectivamente.

Figura 30 – Ângulo de Fase *versus* Temperatura, antes do RTFO

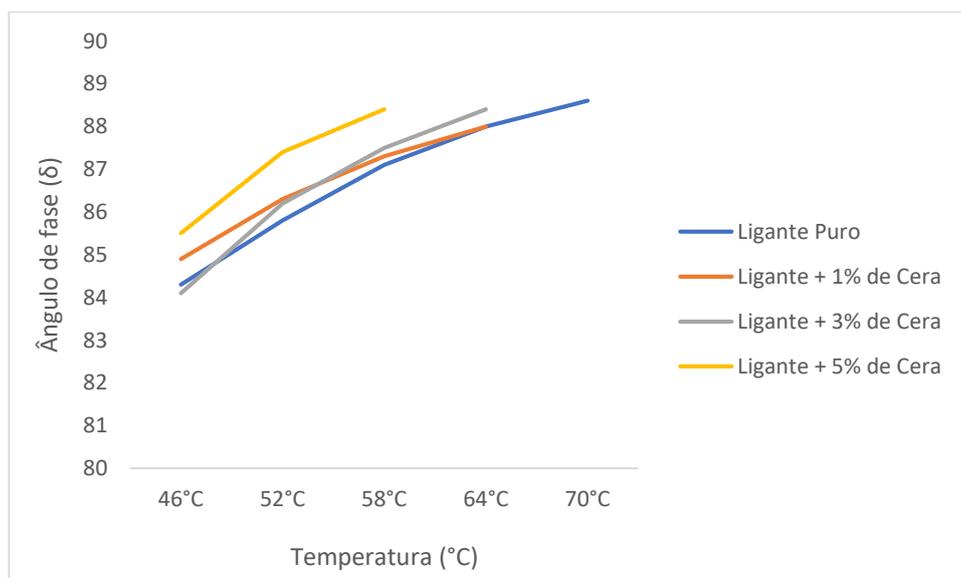
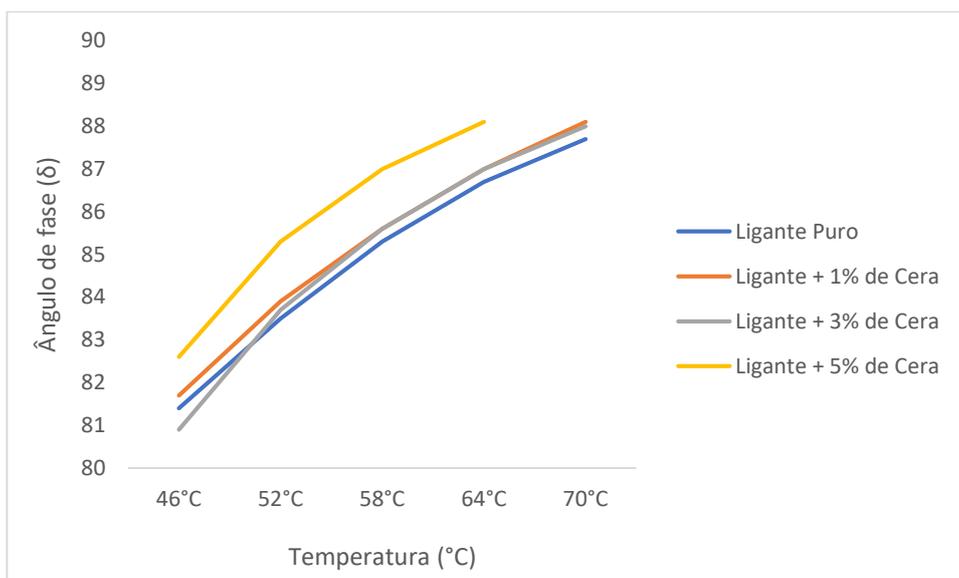


Figura 31 – Ângulo de Fase *versus* Temperatura, após o RTFO

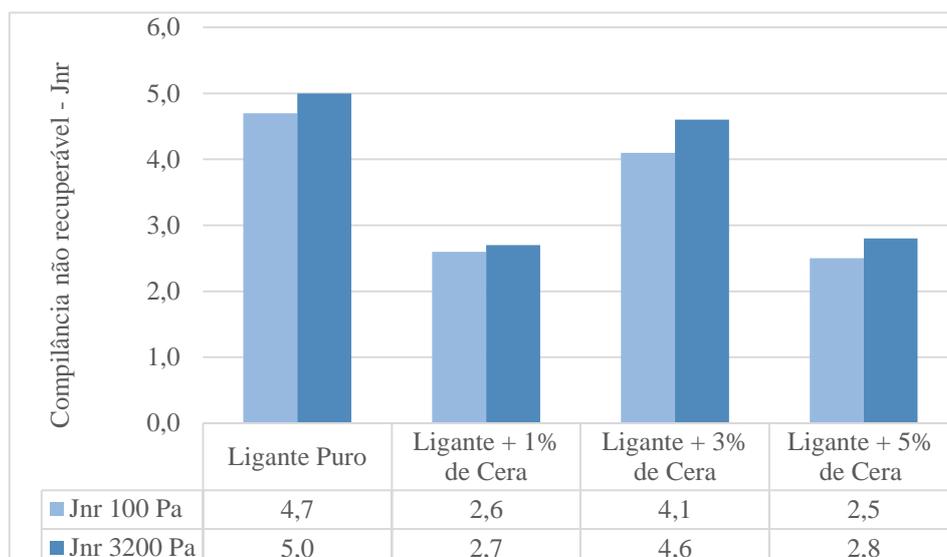


O ângulo de fase  $\delta$  é responsável pela avaliação da razão entre a resposta elástica e a viscosa durante o cisalhamento. Os ângulos de fase dos ligantes modificados pela cera, expressaram valores maiores em relação ao do ligante puro, tanto quanto maior for o teor de cera. Ao analisar ainda o comportamento do Ângulo de Fase *versus* Temperatura, observou-se que para valores elevados de temperatura, os ligantes apresentaram altos ângulos de fase, isto faz indicar uma perda gradativa da viscosidade do material, fato já constatado no ensaio de viscosidade.

#### 4.2.7 Fluência e Recuperação sob Tensões Múltiplas – MSCR

Os resultados do ensaio de MSCR podem ser utilizados para ajudar na seleção de ligantes com melhor desempenho à deformação permanente. Os resultados para o parâmetro de compilância não recuperável ( $J_{nr}$ ) estão representados na Figura 32.

Figura 32 – Compilância não recuperáveis, à 100 e 3.200 Pa



Estudos de D'angelo et al. (2007) sugerem que o Jnr é usado na análise das propriedades reológicas de ligantes modificados submetidos à altas temperaturas, relacionando este parâmetro à deformação permanente do ligante. Valores elevados de Jnr indicam alta suscetibilidade do ligante à deformação permanente, enquanto menores valores sugerem maior resistência do ligante a este defeito, conforme os critérios propostos pela AASTHO M320 (2016), e expostos na Tabela 26.

De acordo com os resultados encontrados, verificou-se que os ligantes modificados apresentaram uma redução para compliância não recuperável quando comparados ao ligante puro, com destaque para os teores de 1% e 5% de cera, nos quais essa redução foi mais expressiva e pode ser considerado um indicador positivo para a modificação com adição da cera de abelha. Em relação ao teor de 3%, nota-se valores mais elevados e bastante próximos daqueles encontrados para o ligante puro, tal desempenho pode ser atribuído ao fato do material apresentar uma maior rigidez, comportamento verificado no ensaio de penetração.

A fim de se avaliar o volume de tráfego que o pavimento suporta a AASTHO M320 (2016) implementou uma classificação baseada no valor do Jnr à 3200 Pa. Os valores podem ser conferidos na Tabela 26.

Tabela 26 – Classificação de volume de tráfego baseado no valor de Jnr à 3200Pa

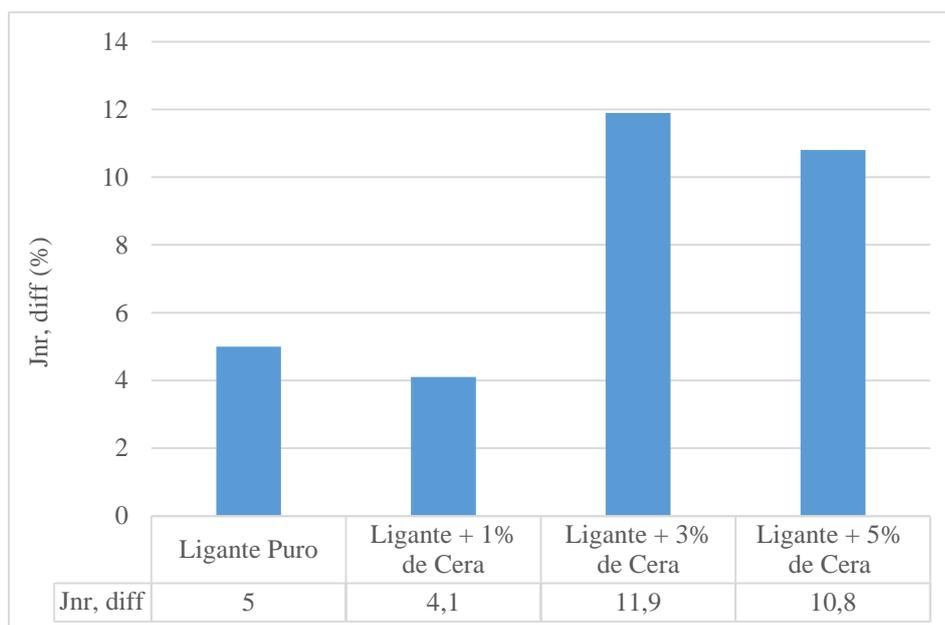
<b>PROPRIEDADE</b>	<b>MÁX.</b>	<b>TIPO DE TRÁFEGO</b>	<b>NÚMERO DE PASSADAS DE UM EIXO PADRÃO</b>
<b>JNR À 3200 PA</b>	4,0	Padrão (S)	< 10 milhões
	2,0	Pesado (H)	> 10 milhões
	1,0	Muito Pesado (V)	> 30 milhões
	0,5	Extremamente Pesado (E)	> 100 milhões

Fonte: AASHTO M320 (2016)

Os resultados encontrados para as amostras de ligante puro e modificado com 3% de cera, não possuem classificação estabelecida pela AASTHO. No entanto, para as amostras modificadas com 1% e 5% de cera, é observado nitidamente o efeito benéfico e eficaz do agente modificador, uma vez que a classificação passou a ser de um tráfego padrão (S). Vale ressaltar que, em relação as amostras envelhecidas, a temperatura de PG encontrada para a amostra modificada com 5% de cera de abelha, foi de 52°C, valor divergente das demais, que obtiveram um PG de 58°C. Esse fato poderia levar a um resultado inferior ao encontrado, ao considerar a temperatura máxima do PG, sendo a situação mais desfavorável que leva o material a um estado mais difícil de detectar o retorno elástico devido a característica fluida que o ligante apresenta nessa condição (SANTOS, 2017).

Sobreiro (2014) aborda à diferença percentual entre as compilâncias não-recuperáveis à 100 Pa e à 3200 Pa (Jnr, diff) e cujo limite não deve ultrapassar 75%, pois dessa maneira é garantido que o material não seja altamente sensível a alterações nos níveis de tensão e propensos ao surgimento de deformações permanentes. Assim, os percentuais encontrados estão ilustrados na Figura 33 para o ensaio realizado na temperatura de PG das amostras.

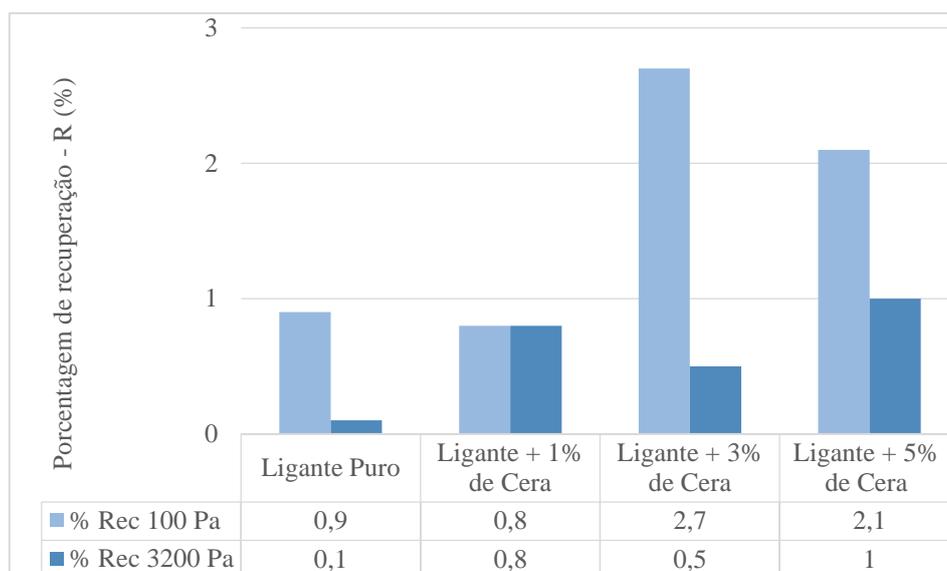
Figura 33 – Diferença percentual - Jnr, diff



Os resultados mostraram valores muito inferiores ao limite de 75%. O teor que apresentou um melhor desempenho, foi o de 1% de modificação com a cera de abelha, sendo esse valor ainda melhor do que o encontrado para o ligante puro. Em relação aos ligante modificados com os teores de 3% e 5% de cera, esses apresentaram uma sensibilidade maior as alterações nos níveis de tensão.

Por meio do ensaio de MSCR, outro parâmetro determinado é a percentagem de recuperação da amostra durante o tempo de 9 segundos após a aplicação de carga, para os ciclos de tensão de 100 Pa e 3200 Pa. Na Figura 34 têm-se os resultados que indicam capacidade de retorno elástico que a amostra após submetida a esses períodos de tensão e relaxamento.

Figura 34 – Porcentagem de recuperação à 100 e 3.200 Pa

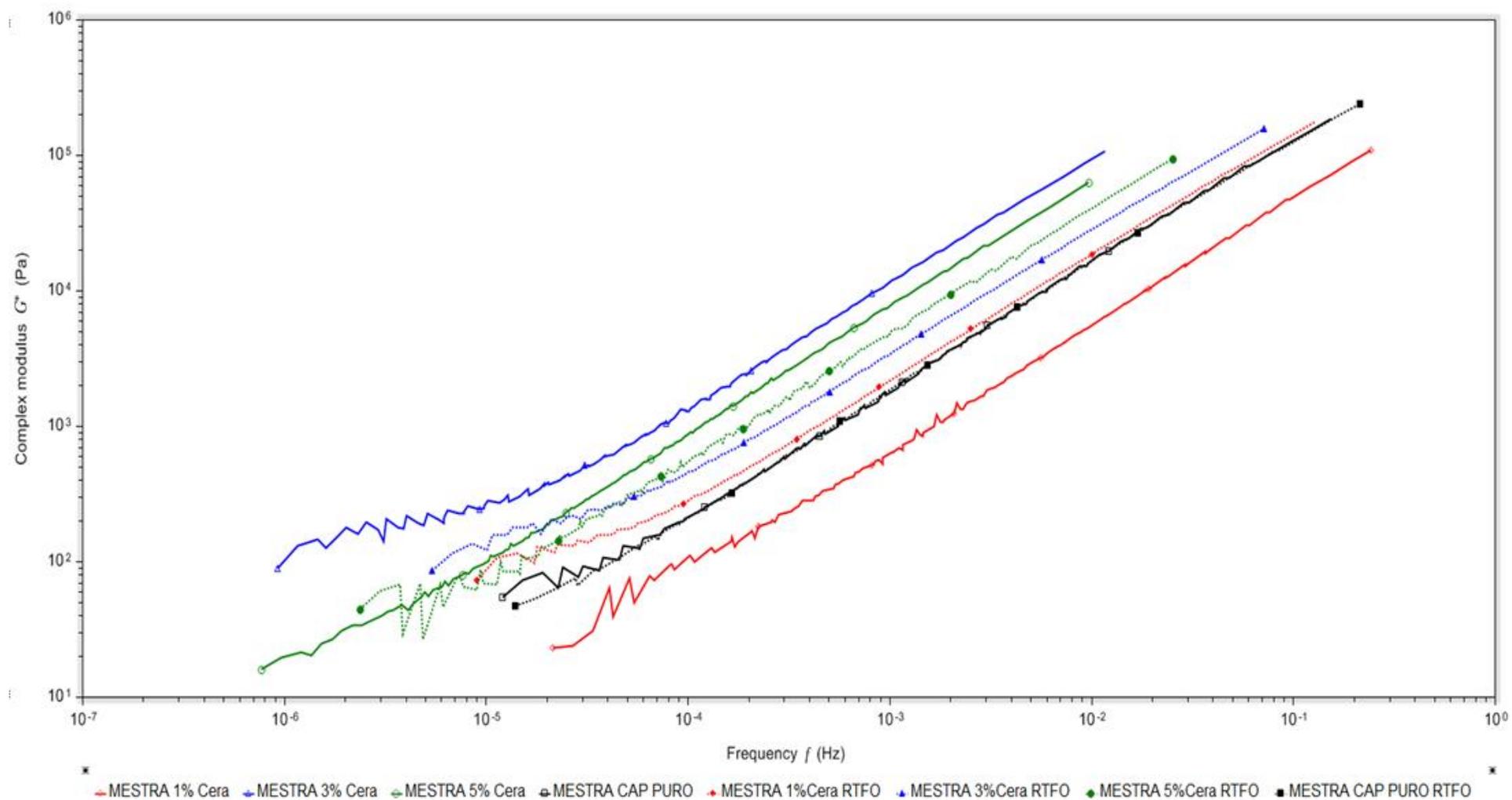


Domingos e Faxina (2015) afirmam que maiores porcentagens de recuperação indicam que o ligante asfáltico pode recuperar uma parcela maior de sua deformação total ao final de cada ciclo de carga-descarga, o que favorece a resistência do material a deformação permanente. A partir dos resultados, constatou-se que os ligantes modificados com os teores de 3% e 5% de cera, além de terem reduzido o Jnr, também obtiveram recuperações elásticas ligeiramente superiores ao ligante puro.

#### 4.2.8 Curva Mestre

Na Figura 35 são lançadas em gráficos as “Curvas Mestre” obtidas para os ligantes puro e modificados, utilizando frequências de 0,1 a 100 rad/s e temperaturas variando de 46 a 76°C, nas quais os valores de Módulo Complexo ( $G^*$ ) são relacionados em função da frequência utilizada com relação aos teores de cera de abelha utilizados nesta pesquisa. Como este ensaio é realizado em diversas temperaturas e um mesmo intervalo de frequência, para obtenção da curva opta-se por uma temperatura de referência, comumente 25 °C, partindo do princípio da superposição tempo-temperatura (SOUSA NETO, 2019).

Figura 35 – Curvas Mestre dos ligantes, antes e após envelhecimento



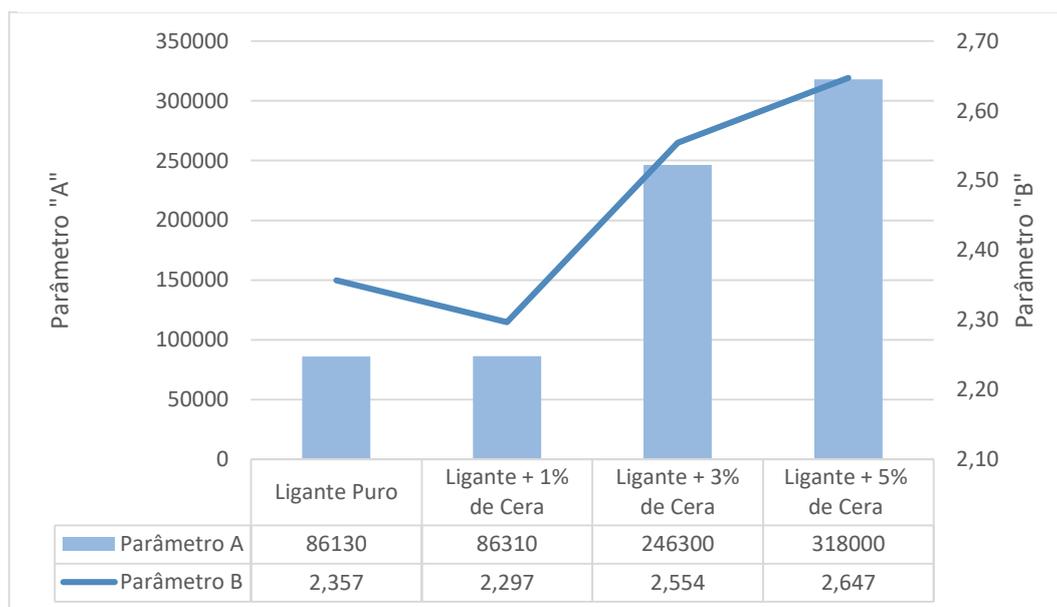
De acordo com o traçado das curvas mestra, o ligante modificado com o teor de 1% de cera de abelha não foi eficaz com relação a alteração do comportamento do ligante asfáltico pois não demonstra aumento do Módulo Complexo quando se comparado ao ligante puro, ao contrário, apresentando uma retração nesse parâmetro. Entretanto, os teores de 3% e 5% apresentam um crescimento do Módulo Complexo com o aumento da frequência, ou seja, a alteração proporcionada no ligante se mostra eficiente no incremento de resistência, com destaque para o teor de 3% de cera, que apresentou valores mais elevados.

Em relação as amostras envelhecidas, nota-se um aumento gradativo nos valores de Módulo Complexo à medida que se adiciona a cera de abelha ao ligante, todos esses sendo superiores ao ligante puro. Quando se compara os teores isoladamente, tanto antes como após o envelhecimento, para o ligante puro não há uma diferença significativa nos valores, já para o teor de 1% ocorre o aumento do Módulo Complexo, o que já era previsto, tal fato pode ser explicado pelo aumento da viscosidade e conseqüente temperatura de trabalhabilidade. No entanto, para as amostras modificadas com 3% e 5% de cera, ocorre um comportamento inverso, após o envelhecimento, as amostras apresentaram-se menos resistentes, provavelmente a maior concentração de aditivo tenha favorecido a ocorrência de reações químicas na interação ligante-cera.

#### **4.2.9 Varredura Linear de Amplitude de Deformação – LAS**

Na Figura 36 estão apresentados os resultados dos parâmetros “A” e “B” obtidos para cada amostra ensaiada.

Figura 36 – Parâmetros "A" e "B" obtidos no ensaio



Visto que o parâmetro “A” se relaciona à mudança da integridade do material provocada pelo dano acumulado, valores maiores significam que a amostra manteve sua integridade inicial. Logo, pode-se aferir que os ligantes modificados com teores de 3% e 5% de cera de abelha apresentaram integridades das amostras muito superiores quando se comparado ao ligante puro e ao teor de 1%, que apresentaram valores praticamente constantes.

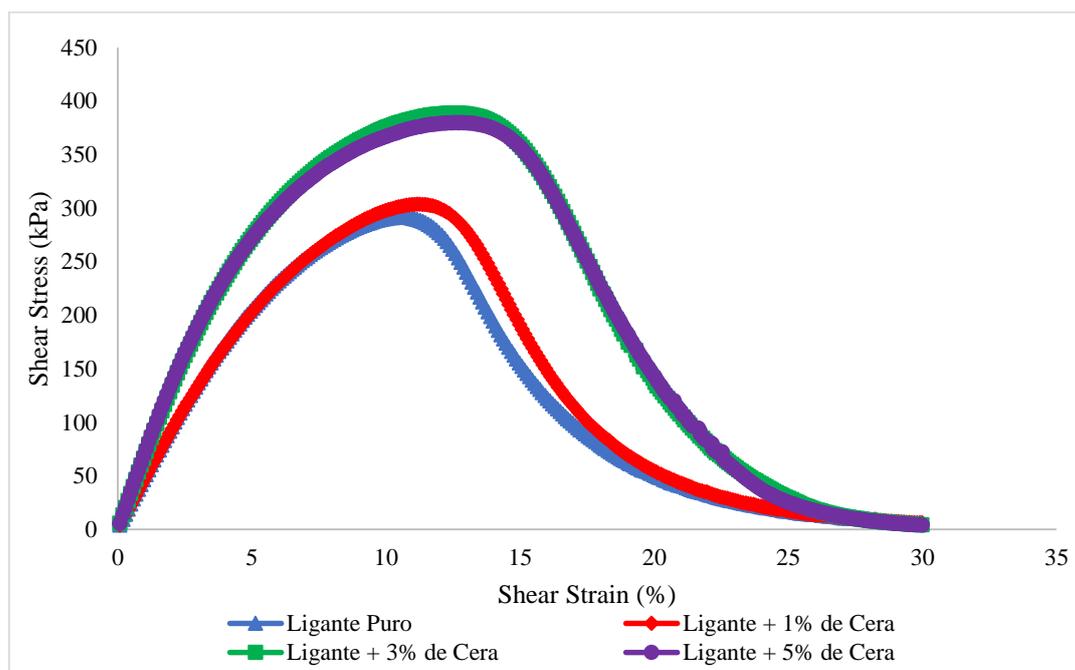
Em relação ao parâmetro “B”, para Kodrat et al. (2007) maiores valores absolutos desse parâmetro indicam que a vida de fadiga do material decresce a uma taxa maior quando a amplitude de deformação aumenta, do mesmo modo, menores valores absolutos de “B” indicam que a vida de fadiga do ligante decresce a uma taxa menor quando a amplitude de deformação aumenta. A análise do parâmetro se relaciona com a inclinação da reta da frequência *versus* módulo de armazenamento ( $G'$ ), na qual notou-se que a modificação do ligante asfáltico com a cera de abelha manteve o valor de “B” para o teor de 1% e aumentou os valores para os teores de 3% e 5%, indicando aumento da sensibilidade à variação do nível de deformações no ligante asfáltico apesar de ter garantido maior resistência ao dano, o que não é positivo para os ligantes asfálticos já que indica maior suscetibilidade a deformações sob variações de temperaturas.

A correlação entre a variabilidade dos dois parâmetros leva aos estudos de Luz (2019) que concluiu que o aumento desses componentes induz positivamente na melhora da integridade do ligante diante do acúmulo de danos, no entanto, influenciam

negativamente na melhoria da sensibilidade do ligante ao aumento da amplitude de deformações.

A Figura 37 apresenta o gráfico de tensão *versus* deformação obtida no ensaio LAS sob deformação controlada para os ligantes em estudo.

Figura 37 – Curvas de tensão *versus* deformação dos ligantes em estudo



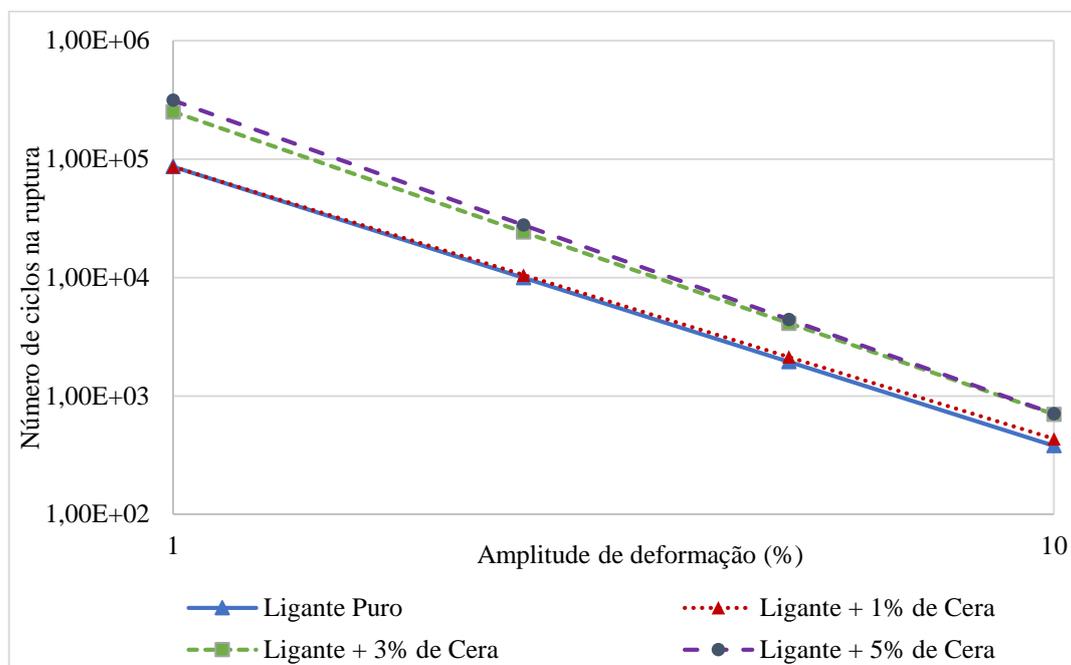
As curvas da Figura 37 demonstraram que, de uma maneira geral, a adição da cera provoca um incremento na tensão cisalhante suportada pelas amostras. O ligante puro e o ligante com teor de modificação de 1% apresentaram resultados semelhantes, onde as maiores tensões de cisalhamento são alcançadas para um nível de deformação de aproximadamente 12%. Entretanto, a curva do ligante puro, a partir de 12% de deformação, é inferior à do ligante modificado com 1% de cera de abelha, evidenciando um ganho considerável para deformações acima desta amplitude, da amostra modificada.

As amostras com teores de 3% e 5% de cera de abelha convergiram para um padrão semelhante de tensão/deformação, nas quais, as maiores tensões cisalhantes são encontradas próximo ao nível de deformação de 15%, suportando assim maiores tensões de cisalhamento em relação aos demais.

Teymourpour e Bahia (2014) sugeriram calcular o número de ciclos até a falha (Nf) em diferentes níveis de deformação, como forma de estabelecer uma relação da vida de fadiga do ligante com parâmetros de campo. Por meio do princípio de dano

viscoelástico (VECD) foi possível determinar um modelo de fadiga para cada ligante asfáltico, apresentados no gráfico da Figura 38. O modelo é derivado da relação entre a carga aplicada e a vida de fadiga do material, obtidos das análises do LAS a temperatura de 25°C.

Figura 38 – Estimativa da vida de fadiga dos ligantes em estudo



Conforme Nascimento (2015), níveis baixos de deformação em torno de 3% representam pavimentos com baixos níveis deflectométricos, cujo comportamento se assemelha ao de um pavimento rígido, enquanto que altos níveis de deformação, representam pavimentos com altos níveis deflectométricos, cujo comportamento se assemelha ao de um pavimento flexível. A Tabela 27 apresenta um resumo destes resultados, na qual é possível analisar melhor a estimativa de fadiga dos ligantes nos níveis de deformação: 1, 2,5, 5 e 10%.

Tabela 27 – Valores estimados para vida de fadiga dos ligantes, puro e modificados

AMPLITUDE DE DEFORMAÇÃO	NÚMERO DE CICLOS ATÉ A FALHA (NF)			
	Ligante Puro	Ligante + 1% de Cera	Ligante + 3% de Cera	Ligante + 5% de Cera
1,0 %	86.462	86.241	250.969	314.215
2,5 %	9.977	10.511	24.177	27.784
5,0 %	1.948	2.139	4.118	4.435
10,0 %	380	435	701	708

O número de ciclos até a falha (Nf) representa as condições que o material pode ser submetido, e está relacionado ao volume de tráfego suportado em função das deformações aplicadas, que são um indicador da estrutura do pavimento, ou das deformações admissíveis no pavimento (NUÑEZ et al., 2014). Para 1% de nível de deformação o ligante com 5% de cera de abelha apresentou maior valor, seguido pelo ligante com 3% aditivo. Como este nível de deformação coincide com os valores encontrados do parâmetro A, este padrão de comportamento já era esperado.

Pamplona (2013) ressaltou que a resistência à fadiga dos ligantes asfálticos é dependente do nível de tensão, para níveis de tensão mais baixos, quanto mais rígido o ligante for, maior será sua vida de fadiga. No entanto, esse comportamento não foi verificado com a adição da cera de abelha, visto que o aumento do teor de cera provoca a diminuição da rigidez do material, e ainda assim, nota-se um aumento da vida de fadiga do material. O mesmo comportamento é observado para os níveis mais altos de tensões.

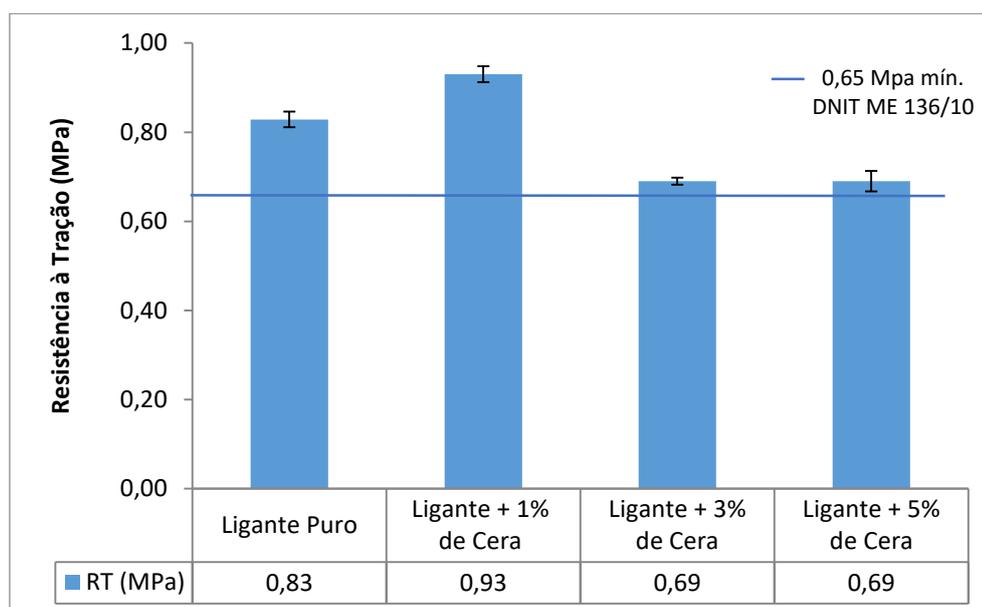
Nota-se que o aditivo foi capaz de elevar a vida de fadiga do ligante asfáltico modificado com 5% de cera, já que além de apresentar a menor rigidez, como já constatado no ensaio de penetração, apresentou o maior Nf para 10% de nível de deformação, como pode ser visto na Tabela 27. Logo, é possível afirmar que a adição da cera de abelha é positiva tanto quando o pavimento flexível for sujeito apenas a pequenas deformações (cujo comportamento se assemelha a de um pavimento rígido), como para pavimentos flexíveis sujeitos a grandes deformações.

### **4.3 Caracterização Mecânica das Misturas Asfálticas**

#### **4.3.1 Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral – RT**

Os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral estão apresentados no gráfico da Figura 39, e os valores são uma média dos resultados de três corpos de prova, por teor analisado.

Figura 39 – Resultados do ensaio de RT



O efeito da compactação por amassamento faz com que o valor médio da RT atenda ao limite mínimo preconizado pela norma do DNIT ME 136/10, que deve ser de 0,65 MPa (a 25°C) em misturas asfálticas destinadas a camadas de rolamento. Esses resultados superiores ao limite mínimo valida ainda o teor de projeto utilizado.

Pelos resultados é possível notar que há um acréscimo de resistência à tração para as amostras modificadas com 1% de cera de abelha, quando comparado ao valor de RT da mistura com ligante puro. No entanto, para os teores de 3% e 5%, ocorre uma queda na resistência à tração que está relacionada à diminuição da temperatura de moldagem. De acordo com Sales (2016), os corpos de prova que foram moldados com o ligante puro foram produzidos sob temperatura mais elevada demonstrando valores mais elevados de resistência à tração que pode ser atribuído à maior interação ligante/agregado. Diante disso, o incremento de resistência relativo ao teor de 1% não é um comportamento previsto, já que além da temperatura inferior, a cera de abelha possui a capacidade de diminuir a consistência do ligante, o que resultaria numa resistência inferior ao ligante puro.

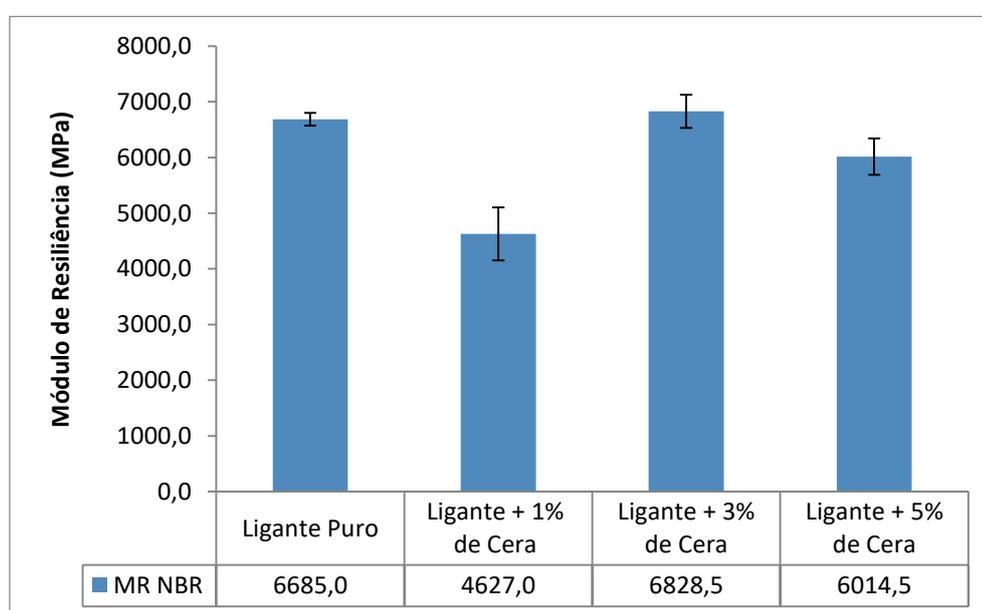
No estudo realizado por Wargha Filho (2013), ao incorporar 3% e 5% de cera de carnaúba ao ligante asfáltico, foi possível observar uma diminuição da resistência à tração em relação à mistura com ligante puro, esta redução foi de aproximadamente 4%. Já o trabalho que Moraes (2018) realizou também com a cera de carnaúba, para o teor de 1%, a redução na resistência à tração foi de 15% e para o de teor de 3%, a diminuição foi de

aproximadamente 27%. Em relação aos resultados encontrados nesta pesquisa, a modificação com 1% de cera de abelha provocou um incremento de 12% na resistência à tração, já para os teores de 3% e 5%, a redução foi de 17% dessa propriedade.

### 4.3.2 Módulo de Resiliência - MR

Na Figura 40 são apresentados os resultados dos módulos de resiliência médios de três corpos de prova, para cada mistura analisada. Os valores foram obtidos por meio da Norma Brasileira NBR 1601.

Figura 40 – Resultados do ensaio de MR



Segundo Bernucci (2010), os valores típicos de MR estão situados na faixa de 2.000 a 8.000 MPa para misturas asfálticas à 25°C. Os valores encontrados para as misturas asfálticas com ligante puro e modificado com a cera de abelha permaneceram dentro do intervalo citado.

Os valores de módulo de resiliência da mistura modificada com 1% de cera de abelha sofreu uma redução significativa quando comparado ao resultado obtido para a mistura com o ligante puro, comportamento esse que deve ser atribuído ao fato do MR ser inversamente proporcional ao valor de RT, já que para a realização do ensaio de módulo de resiliência é aplicada uma carga equivalente à 10% da resistência à tração. Como o teor de 1% apresentou um valor superior de RT, já era esperado que o valor de

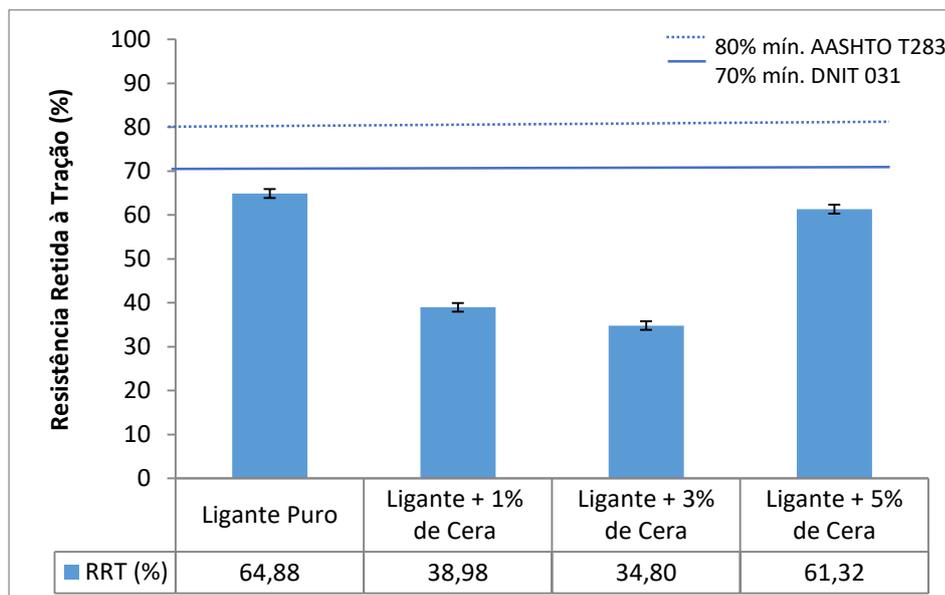
MR seria menor que os demais. Sofyan et al. (2017) ao utilizar 1% de aditivo a base de cera de abelha pode observar que o modificador diminuiu o valor do módulo de resiliência da mistura asfáltica, de 2238Mpa para 1692Mpa, comportamento análogo ao desta pesquisa. Em relação aos demais teores de modificação, não houveram alterações significativas nos valores.

Vale salientar que o módulo de resiliência está associado à rigidez da mistura, portanto sua análise não pode ser feita de forma direta, permitindo, assim, valores menores ou maiores, mas que sejam compatíveis com a estrutura do pavimento e as deformações entre suas camadas (GAMA, 2013). Ao se comparar os resultados relativos aos três teores de cera, nota-se uma dispersão considerável entre eles, além do ponto de inflexão no teor de 3%, comportamento já observado no ensaio de penetração. Sabe-se que o ensaio de penetração dá um indicativo da rigidez do ligante, parâmetro que também está associado ao módulo de resiliência, tal fato explicaria o comportamento superior e não linear neste resultado, já que no primeiro ensaio foi constatado que esta amostra apresentava uma maior consistência que as demais.

#### 4.3.3 Lottman Modificado

A Figura 41 apresenta o comportamento relacionado à resistência por umidade das amostras, por meio dos valores de resistência retida à tração.

Figura 41 – Resultados do ensaio de Lottman Modificado



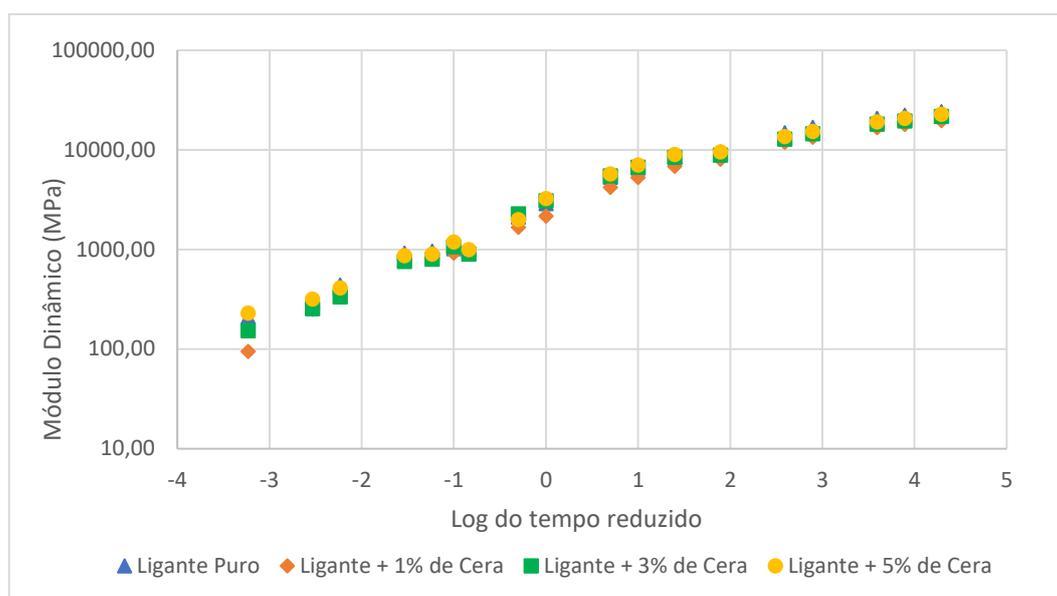
O ensaio avaliou a propriedade de adesividade das misturas asfálticas desta pesquisa, considerando o efeito nocivo da água. A AASHTO T283/2007 sugere que o critério de definição da suscetibilidade de uma mistura é de 80% de RRT, já a especificação do DNIT 031/2006 preconiza que este valor deve ser superior a 70%, ou seja, a perda máxima de resistência deve ser de 30% após o condicionamento, em relação ao valor de referência. Logo, nenhuma das misturas apresenta RRT que atenda as normas, corroborando com o fato de que o ligante utilizado nessa pesquisa não possuía aditivo melhorador de adesividade. A fim de majorar esses valores de RRT algumas soluções poderiam ser empregadas, como o aumento da quantidade de cal na mistura, elevando assim a resistência da mesma, além da adição de dope ao ligante, que tem por objetivo melhorar a adesividade entre agregado e ligante.

Os valores de RRT encontrados para as misturas com ligante puro e modificado com 5% de cera, foram 64,88% e 61,32%, respectivamente, valores próximos e que mais se aproximaram dos limites estabelecidos pelas especificações. Já para as misturas modificadas com 1% e 3% de cera de abelha, os valores de RRT reduziram em torno de 40% em relação à RRT da mistura com ligante puro, portanto, tais misturas possuem maior facilidade de apresentar dano por umidade, podendo causar problemas de desagregação dos agregados.

#### **4.3.4 Módulo Dinâmico - MD**

A caracterização geral da rigidez da mistura asfáltica pode ser realizada por meio das curvas mestras do módulo dinâmico, em relação a frequência de aplicação de carga e temperatura de ensaio. As curvas são obtidas pela superposição tempo-temperatura, sendo a temperatura de referência 21°C. A Figura 42 exhibe as curvas mestras das misturas asfálticas com e sem cera de abelha.

Figura 42 – Curvas Mestras das misturas estudadas



Teoricamente maiores valores de MD caracterizam misturas mais resistentes à deformação permanente. Observa-se que as misturas asfálticas com e sem adição da cera de abelha apresentaram comportamentos análogos, pois as diferenças entre as inclinações foram similares.

Segundo Costa (2018), para temperaturas baixas são desejáveis módulos baixos, esses correspondendo a uma melhor resistência ao trincamento térmico. Quanto a temperaturas altas são desejáveis módulos altos, pois representam uma melhor resistência à deformação permanente. Todas as amostras analisadas apresentaram, à baixas temperaturas, resultados similares, logo os valores de resistência ao trincamento térmico são também próximos. Já nos ensaios à 37,8°C, como pode se observar no gráfico da Figura 25, ocorre uma variação de módulo dinâmico mais acentuada, nos quais o incremento da cera acarreta numa maior resistência à deformação permanente.

De acordo com Guerra (2019), a propriedade viscoelástica do material é verificada 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. As Figuras 43, 44 e 45 ilustram esse parâmetro, obtidos também por meio do ensaio de módulo dinâmico, o qual é relacionado à frequências de ensaio para cada temperatura.

Figura 43 – Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (4,4°C)

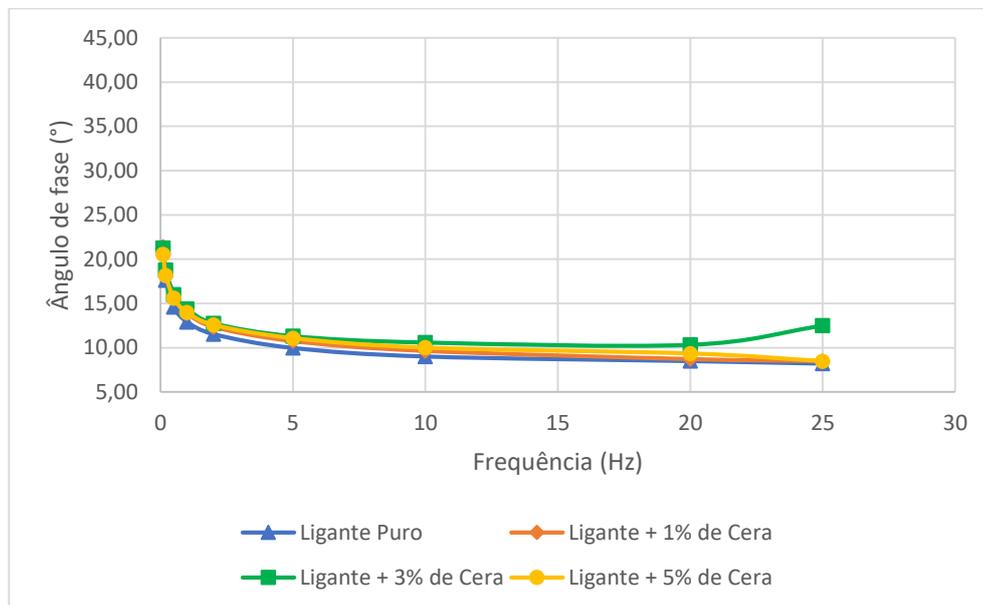


Figura 44 – Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (21,1°C)

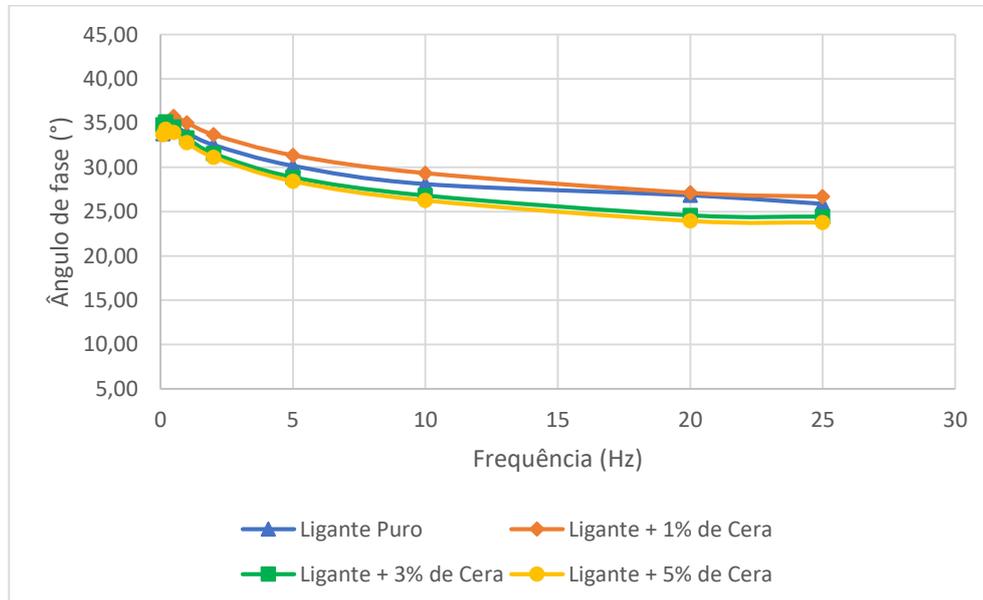
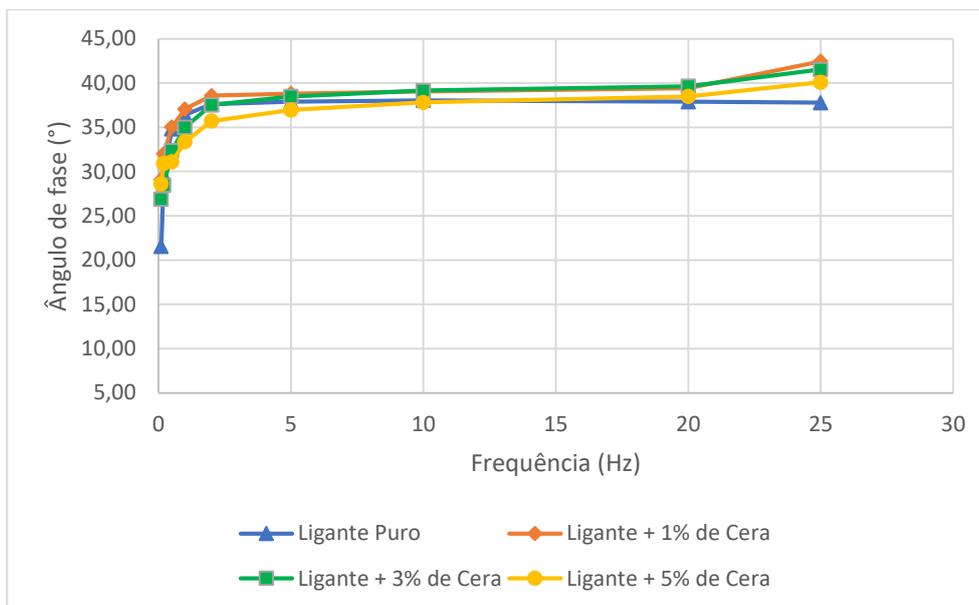


Figura 45 – Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (37,8°C)

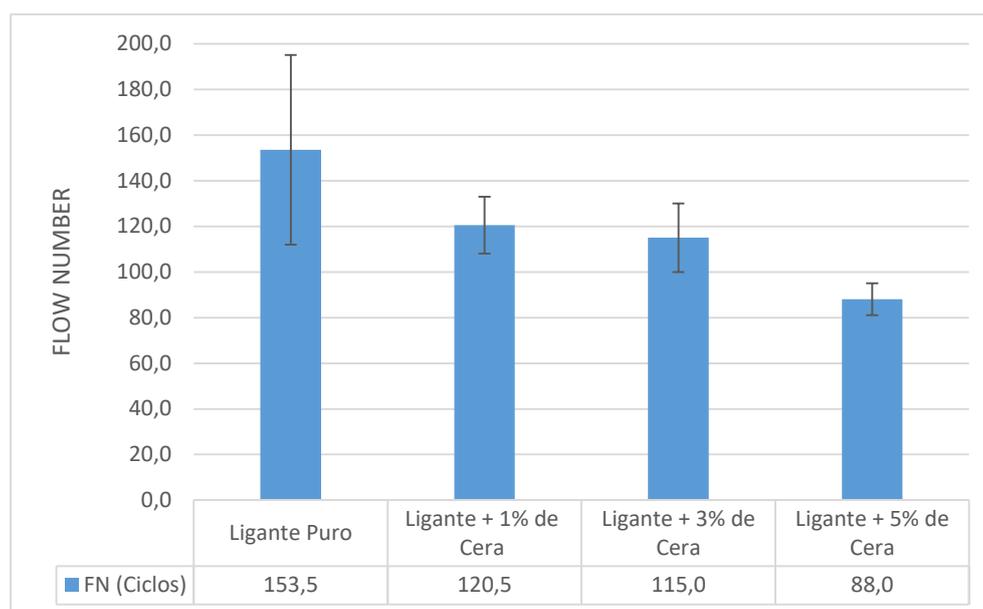


Costa (2018) aferiu que para menores temperaturas e frequências mais baixas é observado o aumento do ângulo, indicando que a maior parte da energia é dissipada no comportamento viscoelástico da mistura, o que sugere que a relação entre o ângulo de fase em baixa temperatura e alta frequência é atribuída ao ligante, seguindo a tendência deste. Esse mesmo comportamento foi observado nessa pesquisa, na qual nota-se que o ângulo de fase aumenta com o aumento da temperatura e diminui com o aumento da frequência, no entanto, a partir de 37,8° C, verifica-se que o ângulo de fase diminui em baixas frequências e aumenta com a elevação desta.

#### 4.3.5 Flow Number – FN

Na Figura 46, estão dispostos os resultados de Flow Number encontrados para as misturas analisadas.

Figura 46 – Resultados do ensaio de Flow Number



De acordo com Wargha Filho (2013), a resistência à deformação permanente é uma das grandes inquietações no que se refere a misturas mornas, porquanto as menores temperaturas de usinagem e compactação resultam também em uma menor rigidez inicial da mistura. Nos estudos de Nascimento (2008) a fim de avaliar a susceptibilidade das misturas asfálticas à deformação permanente, é indicado um valor de 300 ciclos para tráfego médio, logo observa-se que nenhuma das misturas atingiu esse valor, inclusive a mistura com o ligante puro.

Barros (2017) buscou analisar o comportamento à deformação permanente, através do ensaio uniaxial de carga repetida, de dez misturas asfálticas quentes e mornas. Pelos resultados dos ensaios da norma brasileira e seguindo os critérios estabelecidos por Nascimento (2008), 25% das misturas quentes atingiram o critério para utilização em pista de tráfego médio. Já quando os ensaios foram realizados pela AASTHO TP 79-15 75% das misturas atingiram o critério para utilização em pista de tráfego médio. Logo, ela concluiu que os parâmetros sugeridos por Nascimento (2008) são conservadores e haveria a necessidade de novos balizadores de referência. Diante disso, acredita-se que os resultados desta pesquisa poderiam ser superiores caso os critérios de avaliação fossem outros, como os estabelecidos pela norma americana.

Os resultados reológicos dos ligantes deram um indicativo que a modificação com a cera de abelha acarretaria num melhor desempenho à deformação permanente, contudo

houve uma discordância com os resultados encontrados para o ensaio de FN. Ocorreu um decréscimo no número de ciclos à medida que se adiciona a cera de abelha ao ligante, comportamento similar ao observado por Moraes (2018), na qual as misturas com cera de carnaúba apresentaram uma diminuição no número de ciclos, para o teor de 1% o FN também foi de 120, e para o teor de 3% o FN foi de 40, resultado inferior ao desta pesquisa.

#### 4.3.6 Vida de Fadiga

O ensaio de fadiga foi executado com quatro níveis de tensões, variando de 32,5% a 40% da RT. As curvas de vida de fadiga estão nas Figura 47 e Figura 48.

Figura 47 – Número de ciclos até a ruptura *versus* diferença de tensões no centro do CP

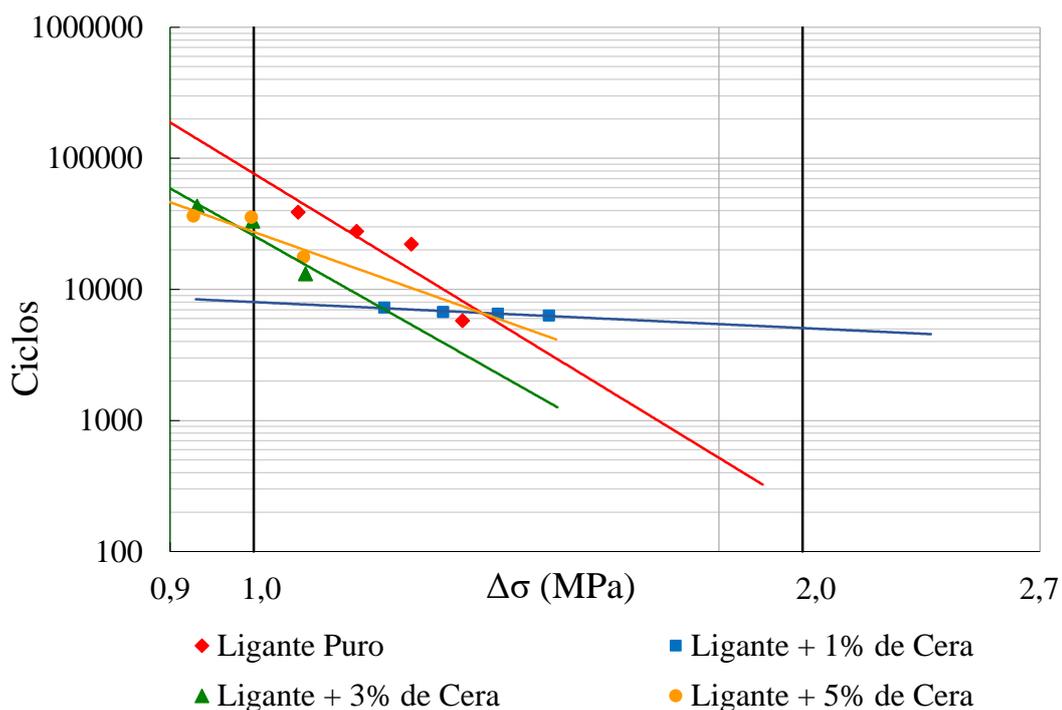
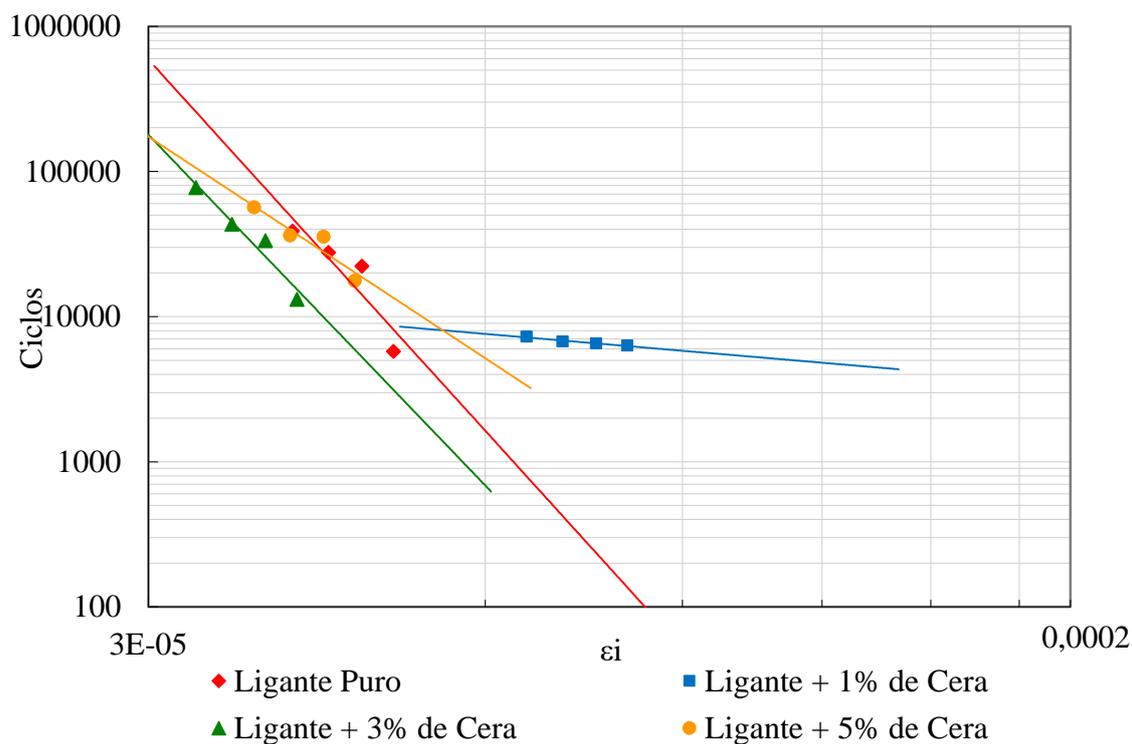


Figura 48 - Número de ciclos até a ruptura *versus* deformação resiliente inicial

Para cada uma das curvas foi possível gerar equações que melhor se adequaram as possíveis linhas de tendência, expostas na Tabela 28.

Tabela 28 – Resumo das características de vida de fadiga das misturas

AMOSTRA	MODELO	R <sup>2</sup>	COEFICIENTES	
<b>Ligante Puro</b>	$N = 76671 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{8,498}$	0,82	<b>K<sub>2</sub></b>	<b>n<sub>2</sub></b>
			76671	8,498
	$N = 2x10^{-33} \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{8,496}$		<b>K<sub>3</sub></b>	<b>n<sub>3</sub></b>
			$2x10^{-33}$	8,496
<b>Ligante + 1% de Cera</b>	$N = 8010,9 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{0,658}$	0,96	<b>K<sub>2</sub></b>	<b>n<sub>2</sub></b>
			8010,9	0,658
	$N = 12,5 \varepsilon_i^{0,659}$		<b>K<sub>3</sub></b>	<b>n<sub>3</sub></b>
			12,5	0,659
<b>Ligante + 3% de Cera</b>	$N = 25748 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{7,86}$	0,94	<b>K<sub>2</sub></b>	<b>n<sub>2</sub></b>
			25748	7,86
	$N = 9x10^{-32} \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{8,027}$		<b>K<sub>3</sub></b>	<b>n<sub>3</sub></b>
			$9x10^{-32}$	8,027
<b>Ligante + 5% de Cera</b>	$N = 27465 \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{4,943}$	0,88	<b>K<sub>2</sub></b>	<b>n<sub>2</sub></b>
			27465	4,943
	$N = 2x10^{-18} \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{5,072}$		<b>K<sub>3</sub></b>	<b>n<sub>3</sub></b>
			$2x10^{-18}$	5,072

De acordo com Cavalcante (2016), a curva de fadiga fornece informações sobre a susceptibilidade do revestimento à aplicação de carregamentos cíclicos. Esta informação está no coeficiente angular da reta ( $n_2$ ), 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. Com base nos resultados da Tabela 19, nota-se que a mistura de referência apresenta maior resistência a altas tensões, devido ao elevado valor de  $n_2$  e maior sensibilidade à diferença de tensões. Já a amostra contendo 1% de cera de abelha apresentou um valor de  $n_2$  muito baixo, sendo o pior resultado entre todas as amostras, esse comportamento pode estar atrelado ao fato da amostra ter sido submetida aos maiores níveis de tensões, já que a escolha destas está vinculada ao valor de RT, o qual o teor de 1% foi o que apresentou o maior resultado.

A análise para a deformação resiliente específica seguiu modelos semelhantes aos da fadiga em função da diferença de tensões, na qual os parâmetros  $K_3$  e  $n_3$  representam os coeficientes do modelo. Ao observar o valor de  $n_3$  (coeficiente de inclinação das curvas), notou-se um comportamento semelhante aos da curva vida de fadiga *versus* diferença de tensões.

Verificou-se que todas as curvas apresentaram um bom coeficiente de determinação ( $R^2$ ), evidenciando a qualidade do ajuste dos modelos em relação aos pontos observados. As curvas com 1% e 3% de cera de abelha foram as que apresentaram menores dispersões, ou seja, valores de  $R^2$  mais próximos de 1, enquanto que as curvas de referência apresentaram os menores coeficientes.

## 5.0 CONCLUSÕES

De maneira geral, os resultados dos ensaios reológicos indicaram que os ligantes modificados com os três teores de cera de abelha apresentaram maior penetração, maior ponto de amolecimento e menor susceptibilidade ao envelhecimento à curto prazo, mostrando suportar maiores temperaturas em campo e contribuindo de maneira positiva na resistência a deformação.

Em relação aos resultados observados nos ensaios de MSCR e LAS, nota-se que a adição da cera de abelha ao ligante foi benéfica pois além de retardar o envelhecimento, torna o material menos rígido, potencializando sua resistência quanto à deformação permanente e à fadiga. Quanto a redução de viscosidade, somente o teor de 5% de cera de abelha proporcionou ao ligante uma redução expressiva. Logo, com as temperaturas de usinagem e compactação determinadas para as misturas com os teores de 1% e 3% não foi possível enquadrá-las na classificação de misturas mornas. No entanto, destaca-se a ausência de uma normativa específica para misturas mornas que aborde a determinação dessas temperaturas, o que incita o uso de procedimentos específicos para misturas a quente, isso leva a crer que as reduções dessas temperaturas poderiam ser mais significativas.

Sobre o desempenho mecânico, conclui-se que devido ao decréscimo dos parâmetros de vida de fadiga, Flow Number e resistência a ação deletéria da água, em relação a mistura de referência, as misturas asfálticas modificadas com adição da cera de abelha não apresentaram um bom desempenho. Vale salientar que nem a mistura de referência obteve resultado de Flow Number e Lottman satisfatórios, o que pode justificar as baixas respostas mecânicas das misturas modificadas. Entretanto, as misturas modificadas com cera apresentaram aspectos positivos, como o aumento da resistência à tração da amostra com 1% de cera, e mesmo os outros teores, apesar de apresentarem resultados inferiores a mistura de referência, os valores encontrados atendem ao limite mínimo estabelecido por norma. De maneira geral, esperava-se resultados semelhantes entre a mistura convencional e as misturas mornas, no entanto, em sua maioria, os resultados se apresentaram inferiores. Fato esse, atribuído a relação da temperatura com

a interação ligante/agregados, e conseqüentemente, a densidade da mistura, ou seja, misturas trabalhadas à temperaturas inferiores, provoca alterações na densidade dessa mistura, interferindo diretamente no desempenho mecânico. Problemática que poderia ser resolvida com a determinação das temperaturas de usinagem e compactação que promovesse uma mistura com densidade análoga à mistura a quente.

Por fim, baseado nas análises reológicas, químicas e mecânicas foi possível validar a hipótese testada neste estudo. A adição da cera de abelha no teor de 5% destacou-se, sendo o teor mais eficaz de incorporação desse aditivo ao ligante asfáltico CAP 50/70, e único a enquadrar a classificar a mistura na faixa de baixa energia. Com uma redução de 9°C na temperatura de usinagem e 12°C na temperatura de compactação, espera-se por consequência, a redução das emissões de poluentes, redução do consumo de energia e melhores condições de trabalho. No entanto, ainda existem algumas lacunas que necessitam ser preenchidas para o emprego deste aditivo, e encontram-se sugeridas no tópico 5.1.

### **5.1 Sugestões para Pesquisas Futuras**

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

- Avaliar misturas asfálticas modificadas com a cera de abelha empregando-se agregados graníticos, aditivo melhorador de adesividade e maior quantidade de fíler;
- Verificar, por meio de outros ensaios químicos, a influência do tipo de cera de abelha na modificação do ligante asfáltico convencional;
- Estudar outras faixas granulométricas para misturas asfálticas, para a verificação das propriedades volumétricas e mecânicas com a cera de abelha;
- Analisar o desempenho das misturas asfálticas convencionais e as modificadas com adição da cera em trechos experimentais;
- Avaliar a cera de abelha como agente rejuvenescedor de misturas asfálticas recicladas;

- Realizar dosagens baseadas em cada teor de aditivo tendo em vista que a dosagem realizada na presente pesquisa foi feita baseada no ligante puro, podendo esse teor de ligante não ser o ideal quando se tratar de ligante modificado;
- Analisar o comportamento mecânico de misturas mornas usinadas e compactadas à temperaturas determinadas com base na densidade da mistura convencional.

**6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- 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 D6925: Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor. EUA, 2009.
- AMIN, M.; PUTRA, N.; KOSASIH, E. A.; PRAWIRO, E.; LUANTO, R. A.; MAHLIA, T. M. I. Thermal properties of beeswax/graphene phase change material as energy storage for building applications. *Applied Thermal Engineering*, 2016.
- AREGA, Z.; BHASIN, A.; MOTAMED, A; TURNER, F. Influence of warm-mix additives and reduced aging on the rheology of asphalt binders with different natural wax contents. *Journal of Material in Civil Engineering*, 1453, 2011.
- 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.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6560: Materiais betuminosos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15087: Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, 2004.
- BARROS, L. M. Deformação permanente de misturas asfálticas: avaliação do desempenho pelo critério de Flow Number de misturas quentes e mornas. Dissertação (Mestrado) – 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. 3ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2010.
- BULATOVIC, V. O.; REK, V.; MARKOVIC, J. Rheological Properties of Bitumen Modified with Ethylene Butylacrylate Glycidylmethacrylate. *Polymer Engineering & Science*, v. 54, n. 5, p. 1056–1065, 2014.
- D'ANGELO, J.; ROBERT, K.; RAJ N, S.; LUDO, Z. Revision of the Superpave high-temperature binder specification: the multiple stress creep recovery test. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. White Bear Lake, v. 76, p. 123-162, 2007.
- CERATTI, J. A. P., BERNUCCI, L. B., SOARES, J. B. Guia Técnico - Utilização de Ligantes em Serviço de Pavimentação. 1a ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 166p. 2015.
- 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, F. P. 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.

COSTA, D. B. Análise da deformação permanente de misturas asfálticas a partir dos critérios de mohr coulomb. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2018.

D'ANGELO, J.; ROBERT, K.; RAJ N, S.; LUDO, Z. Revision of the Superpave high-temperature binder specification: the multiple stress creep recovery test. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. White Bear Lake, v. 76, p. 123-162, 2007.

D'ANGELO, J.; HARM, E.; BARTOSZEK, J.; BAUMGARDINER, G.; CORRIGAN, M.; COWSERT, J.; HARMAN, T.; JAMSHIDI, M.; JONES, W.; NEWCOMB, D.; PROWELL, B.; SINES, R.; YEATON, B. Warm-Mix Asphalt: European Practice. Report, n. 10, FHWA-PL-08-007. American Trade Initiatives, Alexandria, USA, 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE (DNIT). Manual da Pavimentação. 3.ed. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_ DNIT – ME 084/1995 – Agregado miúdo - determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_ DNIT – ME 035/1998. Agregados – Determinação da Abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_ DNIT – ME 083/1998. Agregados – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_ DNIT – ES 031/2006 Pavimentos Flexíveis - Concreto Asfáltico. Rio de Janeiro, 2006.

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

\_\_\_\_\_ DNIT - ME 136/2010 – 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.
- \_\_\_\_\_. 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.
- DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L.; SC, D. Susceptibility of Asphalt Binders to Rutting: Literature Review. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 28, n. 2, p. 1–8, 2015.
- 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.
- FIELDER, H., Argüeso, M. “The Characterization of Casting Wax Rheology”, Argüeso & Co, Inc., 2005.
- GAMA, D. A. Utilização do Etileno Acetato de Vinila (EVA) descartado pela indústria calçadista em misturas asfálticas. Dissertação, Universidade Federal de Campina Grande, 2013.
- GUERRA, T. D. Utilização do óleo de canola para redução das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2019.
- HANZ, A. J.; FAHEEM, A.; MAHMOUD, E.; BAHIA, H. U. Measuring effects of warm mix additives using a newly developed asphalt binder lubricity test for the DSR. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 89, Washington. Anais. Washington: TRB, 2010.
- JALALI, V. Performance of warm mix asphalt compacted at reduced temperature. PhD thesis, University of Nottingham. Reino Unido, 2016.
- JAVID, M.A. Effect of polymer modification on rheological properties of asphalt. *Journal of Civil Engineering Research*, v. 6, n. 3, p. 55-60. 2016.

- KODRAT, I.; SOHN, D.; HESP, S. Comparison of Polyphosphoric Acid – Modified Asphalt Binders with Straight and Polymer-Modified Materials. Transportation Research Board, v. 1998, p. 47–55, 2007.
- LEITE, L. F. M.. FILHO, L. R. S.; ASSUMPCÃO, D. F.; NASCIMENTO, L. A. H.; MARTINS, A. T.; CRAVO, M. C. C. Composição e processo de preparação de ligante asfáltico modificado por cera de origem natural. Brasil. PI0901484-5 A2, 2011.
- LIMA, A. T. Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.
- LUZ, P. M. S. G. Avaliação reológica do ligante asfáltico 50/70 modificado com lignina das madeiras pinus e eucalipto. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2019.
- MICHON, L. C.; NETZEL, D. A.; TURNER, T. F.; MARTIN, D.; PLANCH, J. P. A 13C NMR and DSC study of the amorphous and crystalline phases in asphalts. Energy Fuels, 13, 3, 602-610, 1999.
- MORAES, T. M. R. P. de. 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.
- MOTTA, R. S.; BERNUCCI, L. B.; FARIAS, V. C. Misturas asfálticas para revestimentos de pavimentos produzidos com baixa energia e redução de temperatura, para diminuição de consumo energético e de emissão de poluentes. Revista ANTT, v. 4, n. 2, 2012.
- MUÑOZ, V. N. Estudio de aditivos naturales para la reducción de las temperaturas de fabricación y colocación de las mezclas en caliente. Centro Técnico para el Desarrollo de los Materiales de Construcción. VIII Conf. Científica de la construcción. Habana, 2010.
- 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 Pós-Graduação em Engenharia Civil. COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (NCHRP). A manual for design of hot mix asphalt with commentary. Report 673. Transportation research board. Executive committee. Advanced Asphalt Technologies, Sterling, VA, 2011.

NUNES, L. A.; OLIVEIRA, M. E. C. SILVEIRA, T. A.; MARCHINI, L. C.; SILVA, J. W. P.. Produção de Cera. Universidade de São Paulo. Piracicaba: ESALQ - Divisão de Biblioteca, 2012. (Série Produtor Rural, nº 52).

NUÑEZ, J. Y. M.; DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L. Susceptibility of lowdensity polyethylene and polyphosphoric acid-modified asphalt binders to rutting and fatigue cracking. *Construction and Building Materials*, v. 73, p. 509–514, 2014.

OLARD, F. Low energy asphalts. In: 23° World Road Congress – General Report and Conclusions – PIARC Prizes, 23, Paris, França, 2008.

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

PAMPLONA, T. F. Efeito da adição de ácido polifosfórico em ligantes asfálticos de diferentes fontes. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo (EESC/USP). São Carlos, 2013.

POLACCO, G., FILIPPI, S., PACI, M., GIULIANI, F., MERUSI, F. “Structural and Rheological Characterization of Wax Modified Bitumens”, *Fuel*, Vol. 95, pp 407-416, 2012.

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, 2016.

- PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C. Warm-mix asphalt: Best Practices. Quality Improvement Series 125. Lanham: NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION, 2007.
- 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, 2015.
- SANTOS, N. S. Propriedades reológicas do ligante asfáltico (CAP/5070) modificado por adição de lignina. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2017.
- SCHUSTER, S. L. Estudo do comportamento à fadiga de misturas asfálticas aplicadas em campo por meio da teoria viscoelástica de dano contínuo. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2018.
- 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.
- SOBREIRO, F. Efeito Da Adição De Ácidos Fosfóricos No Comportamento Reológico De Ligantes Asfálticos Puros E Modificados Com Copolímero SBS. 2014. 346 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- SOFYAN, T. S.; YAMIN, R. A.; ASCHURI, I.; MARTINI, R. S. Characteristic of Warm Mix Asphalt Modified with Natural Wax Based Additive. International Conference of Applied Science on Engineering, Business, Linguistics and Information Technology, 2017.
- SOUSA FILHO, A. C. Produção de misturas asfálticas mornas pela inserção de zeólitas. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2006.
- SOUSA NETO, V. F. Avaliação reológica do ligante asfáltico modificado com nanopartículas de óxido de zinco. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

TEYMOURPOUR, P.; BAHIA, H. Linear Amplitude Sweep Test: Binder Grading Specification and Field Validation. Binder Expert Task Group Meeting, 2014.

VAITKUS, A.; CYGAS, A.; LAURINAVICIUS, A.; PERVENECKAS, Z. Analysis and evaluation of possibilities for the use of warm mix asphalt in Lithuania. The BalticJournal of Road and Bridge Engineering, 4, 2, 80-86, 2009.

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