



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS – CTRN
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL – UAEC

ANA CECÍLIA DE ARAÚJO FELIPE

**ESTUDO DA REDUÇÃO DE TEMPERATURA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS E A
INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE CERA DE ABELHA**

CAMPINA GRANDE

2021

ANA CECÍLIA DE ARAÚJO FELIPE

**ESTUDO DA REDUÇÃO DE TEMPERATURA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS E A
INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE CERA DE ABELHA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade
Federal de Campina Grande, como requisito para o título de
bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena
Co-orientadora: MSc. Talita Miranda de Sousa

CAMPINA GRANDE

2021

DEDICATÓRIA

A Deus, pela sua graça e o seu favor que sempre me acompanhou. Aos meus pais, Ailton Felipe e Ana Lúcia, e aos meus irmãos, João Lucas e Pedro Henrique, que sempre me apoiaram e me incentivaram, sem medir esforços, essa conquista será sempre nossa!

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me capacitou e me deu forças para nunca desistir.

Aos meus pais, Ailton Felipe e Ana Lúcia, que desde pequena sempre lutaram juntos para que eu pudesse estudar e me dedicar ao sonho de me formar, por todo amor e cuidado, a quem deve tudo o que sou.

Aos meus irmãos, João Lucas e Pedro Henrique, por sempre estarem ao meu lado, me ajudando e apoiando. Meus melhores amigos!

A minha avó, Maria, que sonha junto comigo e sempre esteve orando por mim.

A minha família, que sempre acreditou em mim.

A Danilo, que sempre me incentivou na realização dos meus sonhos, obrigada por todo o companheirismo durante esses anos e por ter me ajudado a não fraquejar nos momentos difíceis, serei sempre grata pelo seu apoio

Ao meu orientador, Prof. Dr. Adriano Elísio, pela orientação, por todo o conhecimento transmitido. Obrigada pela confiança.

A minha co-orientadora, Msc Talita Miranda, por ter sido tão paciente e me auxiliado durante toda a minha pesquisa, você foi essencial para a conclusão desse trabalho e serei sempre grata por isso.

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia de Pavimentos, Ildinho e Jadilson, e ao Msc Conrado, pelo auxílio durante a pesquisa.

Aos meus amigos de graduação, Gabriela e Renan, sem vocês o início da jornada universitária teria sido bem mais árdua, gratidão eterna por toda a ajuda, por todos os momentos compartilhados com vocês e por nunca terem pensado duas vezes para me ajudar.

Aos meus amigos que o estágio me deu, Pablo, Fernanda, Júlio e Alcides, com quem compartilhei momentos de aprendizados, de angústias e de suporte diário.

As minhas amigas, Dayanne e Jéssica, com quem compartilhei muitos momentos dessa trajetória e que sempre estiveram comigo, para ouvir e aconselhar.

Aos meus ex-líderes, Cássia e Marizaldo, e líderes, Tatiane e Valderi, que me apoiaram espiritualmente.

A todos que colaboraram, direta ou indiretamente, para que eu concluísse essa etapa.

RESUMO

As misturas asfálticas usinadas à quente passam por um processo de aquecimento com altas temperaturas, o que ocasiona gastos energéticos elevados e emissões de gases prejudiciais ao meio ambiente e aos trabalhadores expostos. Além disso, as altas temperaturas também influenciam na qualidade do ligante. Buscando amenizar esses problemas, foram desenvolvidos estudos para reduzir as temperaturas de usinagem e compactação das misturas, dando origem às misturas asfálticas mornas (MAMs), em que são desenvolvidas com uso de aditivos. Desse modo, o objetivo desta pesquisa foi avaliar as alterações nas propriedades mecânicas de uma mistura asfáltica quando utilizada suas temperaturas de usinagem e compactação aproximadas ao obtido para uma mistura asfáltica morna com uso de 5% de cera de abelha, buscando compará-las. Utilizando o método de dosagem SUPERPAVE e as temperaturas encontradas no ensaio de Viscosidade Rotacional, foram moldados os corpos de prova para realização dos ensaios de Resistência a Tração e Módulo Resiliência. Nesse contexto, com os resultados obtidos pode-se concluir que o uso da cera de abelha, no teor de 5%, para reduzir as temperaturas de usinagem e compactação não mostrou resultados significativos quando comparados a mistura asfáltica puro na mesma faixa e variação de temperatura.

Palavras-chave: Cera de abelha, Misturas Asfálticas Mornas, Temperaturas.

ABSTRACT

Hot-machined asphalt mixtures undergo a heating process at high temperatures, which causes high energy costs and harmful gas emissions to the environment and to exposed workers. Furthermore, high temperatures also influence the quality of the binder. Seeking to alleviate these problems, studies were carried out to reduce the machining and compaction temperatures of the mixtures, giving rise to warm asphalt mixtures (WMAs), in which they are developed with the use of additives. Thus, the objective of this research was to evaluate the changes in the mechanical properties of an asphalt mixture when using its approximate machining and compaction temperatures to what was obtained for a warm asphalt mixture using 5% beeswax, seeking to compare them . Using the SUPERPAVE dosing method and the temperatures found in the Rotational Viscosity test, the specimens were molded to carry out the Tensile Strength and Modulus Resilience tests. In this context, with the results obtained, it can be concluded that the use of beeswax, at 5% content, to reduce machining and compaction temperatures did not show significant results when compared to pure asphalt mixture in the same range and temperature variation .

Keywords: Besswax, Warm Mix Asphalt, Temperature.

Lista de Figuras

Figura 1 - Classificação das misturas asfálticas em função das temperaturas de usinagem	18
Figura 2- Diferença de fumos liberados pela mistura a quente e pela mistura morna, a esquerda e a direita, respectivamente	24
Figura 3 - Produção do asfalto espuma	25
Figura 4 - Fluxograma	30
Figura 5 - Cera de abelha	32
Figura 6 - Curva Granulométrica dos agregados	34
Figura 7 - Fluxograma de dosagem SUPERPAVE	36
Figura 8 - Curvas de Fuller - Composição Granulométrica superior, intermediária e inferior	37
Figura 9 - Resultados do ensaio de penetração (Antes e após o RTFO)	40
Figura 10 - Temperaturas de ponto de amolecimento para os ligantes, puro e modificado	41
Figura 11 - Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional (Antes do RTFO)	42
Figura 12 - Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional (Após o RTFO)	43
Figura 13 - Perda de massa (Após RTFO)	45
Figura 14 - Resultados do ensaio de RT	46
Figura 15 - Resultados do ensaio de MR	47

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Asfalto espumado	26
Tabela 2 - Aditivos Surfactantes	27
Tabela 3 - Aditivos orgânicos	28
Tabela 4 - Caracterização do CAP puro	31
Tabela 5 - Ensaio para caracterização física dos agregados e normas utilizadas	32
Tabela 6 - Quantidade passante acumulada (%)	33
Tabela 7 - Resultados do Ensaio de Massa Específica	34
Tabela 8 - Resultados do Ensaio de Abrasão Los Angeles	35
Tabela 9 - Resultados do Ensaio de Equivalente Areia	35
Tabela 10 - Proporções dos agregados das misturas de projeto	37
Tabela 11 - Parâmetros Volumétricos da mistura	38
Tabela 12 - Ensaio mecânicos e suas metodologias	39
Tabela 13 - Penetração retida	41
Tabela 14 - Aumento da temperatura após o RTFO	42
Tabela 15 - Temperaturas de usinagem e compactação	43
Tabela 16 - Temperaturas de usinagem e compactação para as 3 misturas	44

LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AEMA – Asphalt Emulsion Manufacturers Association

ASTM – American Society for Testing Materials

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CNT – Confederação Nacional de Transportes

DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

FHWA – Federal Highway Administration

G_{mm} – Densidade Máxima da Mistura

HMA – Hot mix asphalt

LEP – Laboratório de Engenharia dos Pavimentos e Geotécnica

MAMs – Misturas Asfálticas Mornas

ME – Método de Ensaio

MR – Módulo de Resiliência

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

Nprojeto – Número de Giros de Projeto

PB – Paraíba

RT – Resistência à Tração por Compressão Diametral

RTFO – Rolling Thin Film Oven Test

SUPERPAVE – Superior Performing Pavements

TC – Temperatura de Compactação

TU – Temperatura de Usinagem

UAEC/UFCG – Unidade Acadêmica de Engenharia Civil/ Universidade Federal de Campina Grande

UFC – Universidade Federal do Ceará

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

VAM – Vazios do Agregado Mineral

Vv – Volume de Vazios

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo geral	16
2.2 Objetivo específico	16
3. REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1 Misturas asfálticas	17
3.1 Misturas mornas	19
3.1.1 Histórico	19
3.1.2 Vantagens	22
3.1.3 Desvantagens	24
3.2 Tecnologias para produção de misturas asfálticas mornas	24
3.2.1 Asfalto espumado	25
3.2.2 Aditivos Químicos (Surfactantes)	26
3.2.3 Aditivos Orgânicos	27
3.3 Cera de abelha	28
4. METODOLOGIA	30
4.1 Misturas asfálticas	31
4.1.1 Ligante asfáltico	31
4.1.2 Agregados	31
4.1.3 Cera de abelha	31
4.2 Propriedades físicas e mecânicas dos materiais	32
4.2.1 Agregados	32
4.2.1.1 Granulometria	32
4.2.1.2 Massa específica dos agregados graúdos e miúdos	34
4.2.1.3 Abrasão “Los Angeles”	34
4.2.1.4 Equivalente Areia	35
4.3 Mistura do Ligante com a Cera de abelha	35
4.4 Dosagem Superpave	35
4.5 Propriedades Mecânicas das Misturas Asfálticas	38
5. RESULTADOS	40
5.1 Caracterização do ligante asfáltico puro e modificado	40
5.1.1 Ensaio de penetração	40

5.1.2 Ponto de amolecimento	41
5.1.3 Viscosidade rotacional	42
5.1.4 Perda de massa	44
5.2 Caracterização mecânica das misturas asfálticas	45
5.2.1 Resistência à Tração por compressão diametral-RT	45
5.2.2 Módulo Resiliência-MR	46
6. CONCLUSÕES	48
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1. INTRODUÇÃO

As misturas asfálticas à quente, durante a sua preparação, precisam passar por um processo de aquecimento com temperaturas altas que podem variar de 150°C a 180°C. Este processo acarreta um elevado gasto energético e conseqüentemente a emissão de gases poluidores e nocivos. As altas temperaturas das misturas asfálticas quentes estão diretamente relacionadas ao processo de envelhecimento oxidativo do pavimento, geralmente ocorrendo no processo de usinagem (FEITOSA, 2015).

Em 1997 foi criado o Protocolo de Quioto, que tem como objetivo a diminuição da emissão dos gases causadores do efeito estufa e prováveis contribuintes para o aquecimento global. Na procura por seguir o proposto no Protocolo e amenizar os impactos causados pelas misturas quentes, surgiram as misturas asfálticas mornas (MAM) - Warm mix asphalt (WMA), no final da década de 90 na Europa (MOTTA et al., 2013). Essas necessitam de uma temperatura menor de usinagem, variando de 100°C a 145°C, fazendo com que haja a redução significativa da emissão de gases.

Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2018) “a diminuição da temperatura durante a usinagem acarreta menor oxidação do ligante asfáltico, reduzindo seu endurecimento, aumentando a resistência à fadiga e, conseqüentemente, a durabilidade do pavimento [...]”. As misturas asfálticas mornas além de reduzirem a emissão de gases, proporcionam menos riscos aos trabalhadores que as manuseiam, diminuição do consumo energético e melhor aplicação em locais frios ou que necessitam de longas distâncias.

As MAMs utilizam de tecnologias, como aditivos orgânicos, químicos, espumas à base de água e/ou contendo água. São diversas as tecnologias já existentes e empregadas, mas todas buscam garantir a mistura menor viscosidade do ligante, melhor trabalhabilidade da mistura e conseqüente diminuição da emissão de gases (RUBIO et al., 2011). Outras pesquisas indicam desempenho similar e até superior das misturas mornas quando comparadas com as misturas quentes (FILHO, 2013).

Aditivos a base de cera são exemplos de estudos feitos para a produção das MAMs. Na busca por um melhor desempenho e uso do material, em estudos feitos por Sousa (2020), foi utilizada a cera de abelha nos teores de 1%, 3% e 5% incorporada no ligante, observando que o teor de 5% de cera apresentou melhor desempenho quanto a diminuição da viscosidade do CAP 50/70. A adição do teor de 5% do aditivo também apresentou bom

desempenho na mistura no processo de usinagem e compactação, reduzindo 9°C e 12°C a suas temperaturas do processo, respectivamente (SOUSA, 2020).

A cera de abelha é impermeável à água e possui um ponto de fusão variando de 61°C a 65°C, essas temperaturas são menores do que as utilizadas nas misturas mornas, fazendo com que seja interessante incorporá-la na mistura. Esta pesquisa buscou verificar a eficácia do uso da mistura asfáltica morna com a incorporação do teor 5% de cera de abelha e o seu comparativo com a mistura sem a adição da mesma. Desse modo, foram avaliadas as propriedades mecânicas das misturas com a redução de 10°C nas temperaturas de usinagem e compactação.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo desta pesquisa foi avaliar as alterações nas propriedades mecânicas de uma mistura asfáltica quando utilizada suas temperaturas de usinagem e compactação aproximadas ao obtido para uma mistura asfáltica morna com uso de 5% de cera de abelha, buscando compará-las

2.2 Objetivo específico

- Avaliar os efeitos da redução das temperaturas de usinagem e compactação, em 10°C, sobre as propriedades mecânicas da mistura;
- Avaliar os efeitos da adição de 5% da cera de abelha sobre as propriedades físicas da mistura asfáltica;
- Realizar a comparação das propriedades mecânicas do ligante puro com redução de temperatura e do ligante modificado na temperatura de referência.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Os pavimentos podem ser classificados como flexíveis, semi-flexíveis ou semi-rígido, e pavimentos rígidos. Os flexíveis, são compostos por uma camada de revestimento asfáltico, já os rígidos por placas de concreto de cimento Portland. Os semi-rígidos ou semi-flexíveis, são compostos por revestimento asfáltico e camadas de material estabilizado com adição de cimento.

Segundo dados do Ministério da Infraestrutura do Brasil (2017), o país possui 1.563,6 mil quilômetros de malha rodoviária, porém apenas 13,7% são pavimentadas, o que equivale a 1.350,1 mil quilômetros de vias não pavimentadas.

3.1. Misturas asfálticas

A mistura de ligante e agregados compõem o pavimento flexível, podendo ser aplicado em camadas de base. As características dos materiais, dosagem, condições de compactação, processo construtivo e outros, influenciam o desempenho da camada asfáltica (PIVOTO, 2004). De acordo com a função e utilização do pavimento é definida a composição granulométrica dos agregados, e o ligante busca garantir a agregação dos materiais e as propriedades visco-elásticas da mistura.

Concebido no período da 2ª Guerra Mundial, o método de dosagem Marshall para misturas asfálticas segue a norma DNIT-ME 043/95. A dosagem do tipo Marshall é a mais utilizada mundialmente, sendo realizada por meio da compactação por impacto. Em busca do teor ótimo de ligante para o projeto, o método Marshall inicia-se obtendo sua faixa granulométrica dos agregados relativa à mistura.

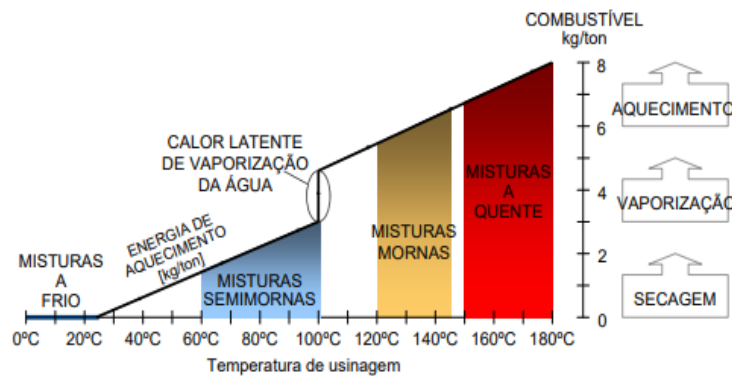
A dosagem Marshall apresentou teores de ligantes discordantes, o que, em alguns casos, causou exsudações com o passar dos anos, causando divergências entre a compactação exercida em laboratório (Bernucci et al.; 2008). Ao analisar a problemática existente, um estudo feito nos Estados Unidos, Strategic Highway Research Program (SHRP), surgiu o método de dosagem Superpave.

Na dosagem Superpave, a compactação é realizada por amassamento, esse método ainda não é tão aplicado no Brasil, sendo a sua maioria nos laboratórios de pesquisas. A dosagem Superpave utiliza pontos de controle e zona de restrição para escolha da granulometria dos agregados, de modo que se faz necessário um maior contato entre as partículas, mas também é necessário que haja vazios que possibilitem o ligante ser

incorporado (BERNUCCI et al, 2008). Para o método Superpave existem três níveis de complexidade de projetos variando de acordo com a importância do pavimento.

As misturas asfálticas possuem suas variações quanto a temperatura de usinagem (Figura 1), variando em misturas frias, semi-mornas, mornas e quentes.

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



Fonte: Motta (2011).

As misturas à quente são as mais utilizadas devido a sua boa resistência, porém essa mistura apresenta aquecimento elevado variando de 150°C a 180°C. O aquecimento dos agregados tem como finalidade garantir três objetivos: i) a retirada a água contida nos agregados, buscando evitar futuros problemas do efeito stripping, que ocasiona a desagregação do pavimento; ii) a manutenção da temperatura da mistura, buscando manter o asfalto diluído, sem interferência negativa em sua temperatura; iii) a redução da viscosidade do asfalto, para que esse mantenha sua trabalhabilidade adequada durante a fase de compactação (MOTTA, 2011; SOUSA, 2020).

As misturas mornas e semi-mornas, apresentam temperaturas variando de 120°C a 145°C e 60°C a 100°C, respectivamente. Devido às temperaturas inferiores quando comparadas com as misturas quentes, as misturas mornas e semi-mornas fazem uso de aditivos para garantir os objetivos mencionados no parágrafo anterior.

3.1 Misturas mornas

As misturas asfálticas mornas surgiram buscando amenizar as problemáticas causadas pelas misturas quentes relacionadas a questões ambientais, devido sua emissão de gases, questões econômicas e de saúde do operário. A utilização desta tecnologia apresenta

condições ecologicamente menos agressivas, quando comparadas às demais (KOENDERS et al., 2000).

A temperatura de usinagem das misturas mornas varia de 60°C a 100°C proporcionando um aumento no tempo de estocagem e transporte, fazendo com que haja a redução do envelhecimento por oxidação do ligante, tornando-o mais resistente e flexível a trincas por fadiga (SOUSA, 2017). Pesquisas realizadas pela Associação Europeia de Pavimentação (EAPA) apontam a possível redução de emissão de aerossóis pela metade quando reduzidas em 10°C a temperatura de produção das misturas (WALL, 2012, apud WARGHA FILHO, 2013).

Técnicas de adição de produtos são utilizados para produção das misturas mornas, como formação de espuma no ligante e a introdução de aditivos orgânicos e surfactantes. As alterações feitas nas misturas asfálticas mornas podem ocorrer no processo produtivo ou no ligante asfáltico (BUDNY et al., 2012). As modificações devem ser estudadas buscando garantir a viabilidade da utilização da mistura.

3.1.1 Histórico

Wargha Filho (2013) aponta a cronologia dos principais acontecimentos relacionados ao uso das misturas mornas, desse modo tem-se:

1956 – O professor Csanvi, da Universidade do Iowa, avalia o potencial da espuma de betume, formada por meio da introdução de vapor de água no ligante quente e que poderia ser utilizada como um ligante para solos (CHOWDHURY e BUTTON, 2008);

1968 – A empresa Mobil Oil na Austrália, detentora da patente da descoberta de Csanyi, passa a injetar água fria no lugar do vapor d'água dando uma agilidade maior ao processo de produção do betume-espuma (KRISTJANS DOTIR et al., 2007);

1977 – A empresa Chevron publica o manual Bituminous Mix, com informações sobre a metodologia de dimensionamento, a formulação e a produção de misturas com ligantes estabilizados com emulsões (CHOWDHURY e BUTTON, 2008);

1979 e 1981 – A Federal Highway Administration (FHWA) e a Asphalt Emulsion Manufacturers Association (AEMA) publicaram manuais sobre o assunto (CHOWDHURY e BUTTON, 2008);

1994 – Maccarone et al. (1994) estudaram as misturas asfálticas a frio com ligante espuma, e as misturas asfálticas com elevado conteúdo de emulsão, devido a eficiência energética e às baixas emissões geradas, afirmando que “... as tecnologias a frio representam o futuro nos revestimentos rodoviários”(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 WAM-Foam (HARRISON e CHRISTODULAKI, 2000 apud 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 Sasol Wax International AG (CHOWDHURY e BUTTON, 2008). Um programa denominado Low Temperature Asphalt é iniciado na Alemanha com a missão de investigar métodos para produção de misturas asfálticas à temperaturas mais baixas que aquelas produzidas a temperaturas convencionais a quente (BARTHEL et al., 2004);

1999 – Jenkins et al. (1999) verificaram os benefícios do aquecimento do agregado a temperaturas abaixo de 100°C. De acordo com os pesquisadores, o pré-aquecimento dos agregados eleva o recobrimento deles, a coesão da mistura, a resistência à tração e à compactação. Ainda de acordo com estes pesquisadores, isto pode ser especialmente benéfico para aquelas misturas contendo agregados reciclados (CHOWDHURY e BUTTON, 2008);

2000 – Em uma Conferência Internacional de Pavimentos Asfálticos em Sidney, Austrália, o processo de produção das misturas mornas foi apresentado por Harrison e Christodulaki (OTTO, 2009). Ainda neste ano, o desempenho da mistura morna foi avaliado por meio 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 foi publicado no Brasil por Souza Filho (2006), por meio da 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 enviaram 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. Ceratti et al. (2007) elaboraram uma pesquisa a nível laboratorial sobre a redução das temperaturas de produção e compactação em misturas que sofrem a inserção de água no agregado miúdo;

2009 – Otto (2009) realizou 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 foi 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 são realizadas, de modo a difundir a utilização da redução de temperaturas na produção de misturas asfálticas. Motta (2011) elaborou 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) realizou estudo para avaliar o comportamento mecânico das misturas mornas.

2013 - Wargha Filho (2013) realizou o estudo acerca da influência da redução das temperaturas de usinagem e compactação no comportamento mecânico das misturas asfálticas mornas. Posterior ao estudo feito por Wargha Filho e pelo histórico apresentado por ele, tem-se os seguintes acontecimentos:

2015 – Merighi (2015) realizou um estudo do comportamento de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimento com adição de borracha moída de pneu.

2015 – Mocelir (2015) avaliou a trabalhabilidade de misturas asfálticas mornas com emprego de aditivo surfactante.

2015 – Feitosa (2015) estudou o uso de diferentes tipos de cera de carnaúba como aditivos de misturas mornas.

2015 – Sales (2015) avaliou características físicas e mecânicas pelo uso do CCBit como aditivo;

2016 – Silva (2016) realizou estudos reológicos do uso de aditivos na fabricação de misturas mornas;

2016 – Portugal (2016) estudou a reologia de ligantes asfálticos modificados com óleo de milho e de soja;

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.

2017 – Luz (2017) reduziu as temperaturas de usinagem e compactação em 10°C e 20°C em relação às obtidas no ensaio de viscosidade rotacional e avaliou o comportamento mecânico de misturas asfálticas com óleo de milho novo e residual para tais temperaturas;

2018 – Moraes (2018) estudou a utilização da cera de carnaúba como aditivo modificador para produção de misturas asfálticas;

2018 – Carvalho (2018) estudou o comportamento do asfalto modificado com óleo de girassol objetivando a redução das temperaturas de usinagem e compactação;

2018 – Andrade (2018) estudou o comportamento de misturas asfálticas modificadas com óleo de girassol utilizando temperaturas de 10°C e 20°C inferiores às obtidas no ensaio de viscosidade rotacional.

2019 – Guerra (2019) avaliou a utilização do óleo de canola para a redução das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas;

2019 – Luz (2019) estudou a reologia do ligante asfáltico modificado com lignina das madeiras pinus e eucalipto;

2019 – Sousa et al. (2019) avaliaram o comportamento mecânico de misturas asfálticas com CCBit para temperaturas de 10°C e 20°C inferiores às obtidas no ensaio de viscosidade rotacional.

2020 - Sousa (2020) avaliou 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.

As pesquisas relacionadas às misturas asfálticas mornas realizadas no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da UFCG foram as de Sales (2015), Silva (2016), Portugal (2016), Luz (2017), Moraes (2018), Carvalho (2018), Andrade (2018), Guerra (2019), Sousa et al. (2019) e Sousa (2020).

3.1.2 Vantagens

Prowell (2007) apontou possíveis Vantagens das Misturas Mornas, como a redução da emissão de gases (CO₂, SO₂, VOC, NO_x, Poeira, CO), redução do consumo de combustível, melhoria da trabalhabilidade para maiores distâncias de aplicação, menor esforço de compactação e redução da exposição aos fumos do asfalto.

Motta et al. (2012) elencam os principais benefícios que a redução das temperaturas das misturas pode proporcionar:

- 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. A 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);
- 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 limitada (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 favorece 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).

Budny (2012) também citou como vantagens, para o uso das misturas mornas, a redução no envelhecimento do ligante asfáltico por oxidação, melhoria na trabalhabilidade da mistura, a facilidade da compactação, redução do consumo de combustível da usina em até 30%, diminuição considerável da emissão de gases, melhoria nas condições de trabalho, possibilidade de aplicação em regiões mais frias, abertura ao tráfego mais rápida sobre a mistura asfáltica recém compactada e a possibilidade de utilização de maior volume de material de fresagem quando se usa em reciclagem.

A Figura 2 mostra o comparativo da redução de emissão de fumos, entre uma mistura convencional e uma mistura morna. Desse modo, é notório que a aplicação do uso dessa tecnologia acarreta vantagens econômicas, ambientais e de condições de trabalho.

Figura 2- Diferença de fumos liberados pela mistura a quente e pela mistura morna, a esquerda e a direita, respectivamente



Fonte: Motta (2011).

3.1.3 Desvantagens

A redução da temperatura traz diversos benefícios, porém também pode ocasionar problemas indesejados, como o trincamento precoce devido a não expulsão de toda água presente da estrutura. Normativas que regularizem as técnicas de utilização no processo ainda não existem, o que dificulta a prática e comparativos posteriores. Essas misturas também necessitam a incorporação de aditivos e tecnologias diferenciadas, em que existe um valor agregado a esses adicionais, por isso o custo pode não apresentar vantagem.

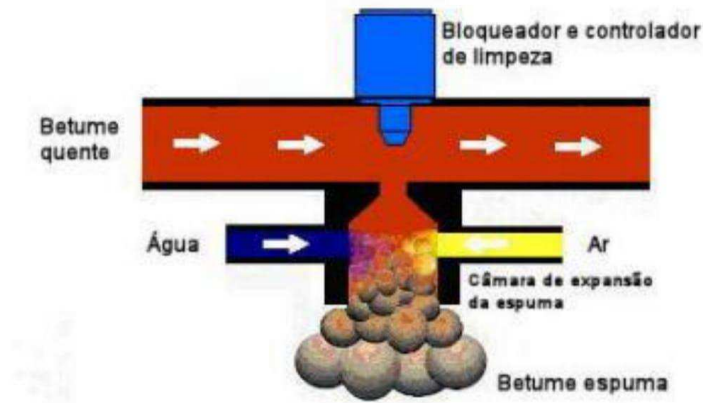
3.2 Tecnologias para produção das Misturas Asfálticas Mornas

3.2.1 Asfalto espumado

O asfalto espumado é a reação entre a água e o ligante, fazendo com que o ligante aumente o seu volume e conseqüentemente diminua a sua viscosidade. Essa tecnologia pode ser feita por meio de pequenas injeções de quantidades de água, agregado

úmido ou material hidrofílico, como as zeólitas. A Figura 3 mostra a produção com uso de água.

Figura 3 - Produção do asfalto espuma



Fonte: Pereira, 2010 apud Sousa, 2017.

A água ao ser adicionada e entrar em contato com o ligante em temperatura altas, sofre o processo de vaporização e o vapor é encapsulado, causando a expansão do ligante. A viscosidade do ligante é reduzida, consequentemente sua temperatura de usinagem, o que facilita a compactação (CHOWDHURY e BUTTON, 2008).

A Tabela 1 aponta algumas tecnologias existentes para produção das MAMs com o uso do asfalto espumado.

Tabela 1 - Asfalto espumado

TECNOLOGIA	EMPRESA RESPONSÁVEL DA PATENTE	TEMPERATURAS DE USINAGEM
ESPUMA DE BETUME COM MINERAIS SINTÉTICOS OU NATURAIS		
Aspha - Min (Zeólito sintético)	MHI Group e Eurovia Services GmbH, Alemanha	Depende da gama de penetração do ligante, mas habitualmente entre os 130 e os 170°C
Advera (Zeólito sintético)	PQ Corporation, EUA	
Zeólito natural	Vários	
ESPUMA DE BETUME POR INJEÇÃO DE ÁGUA		
WAM Foan	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	LEA-CO (Joint-Adventure Eiffage/Fairco para divulgar LEA). Nos EUA os direitos de utilização são da McConnaughay.	<100°C
LT Asphalt (LEA)	Nynas, Suécia	
LEAB	Royal BAM Group, Holanda	110- 115°C
Ultrafoam Gx	Gencor Industries, EUA	

Fonte: Sales, 2015.

3.2.2 Aditivos Químicos (Surfactantes)

Os aditivos Surfactantes podem ser introduzidos previamente ao ligante ou durante a usinagem, agindo na interface ligante/agregado. O uso da tecnologia faz com que haja a redução do atrito interno da mistura, possibilitando melhor poder de recobrimento do ligante, em menor temperatura (SOUSA et al., 2019).

A utilização dos aditivos Surfactantes não resulta em alterações de propriedades do ligante, como consistência, viscosidade, penetração e ponto de amolecimento (MOTTA, 2011). A Tabela 2 mostra alguns aditivos Surfactantes utilizados para produção das MAMs.

Tabela 2 - Aditivos Surfactantes

TECNOLOGIA	EMPRESA RESPONSÁVEL DA PATENTE	TEMPERATURAS DE USINAGEM
ADITIVOS QUÍMICOS (SURFACTANTES)		
Rediset	Akzo Nobel, Holanda	Reduções de cerca de 15°C de 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.

O uso do Rediset WMX em misturas asfálticas permite uma redução superior a 30°C na temperatura de produção, reduzindo o consumo de combustível em cerca de 20% e, por consequência, a emissão de gases durante as fases de mistura e compactação (PEREIRA et al. 2010). Essa tecnologia possibilita o melhor envelhecimento do ligante, alongando o tempo de vida útil do pavimento (SALES, 2015). Além de melhorar o recobrimento do ligante sobre a superfície dos agregados atuando como melhorador de adesividade.

O Iterlow T é introduzido do ligante asfáltico para redução da temperatura em seu estado líquido. Essa tecnologia atua como um agente tensoativo, sem modificar propriedades químicas ou físicas do ligante e é estável durante a fase de armazenamento (PEREIRA, 2010).

3.2.3 Aditivos Orgânicos

Os aditivos orgânicos podem ser incorporados antes ou durante a usinagem, proporcionando uma redução de temperatura da mistura de 30°C a 40°C. Essa tecnologia faz uso de ceras, que alteram as propriedades reológicas do ligante, tendo como consequência a redução da viscosidade. Conforme a mistura esfria, estes aditivos se solidificam em partículas microscópicas que ocasionam um aumento da rigidez do ligante (RUBIO et al., 2012).

A Tabela 3 mostra algumas tecnologias de aditivos orgânicos utilizados para produção das MAMs.

Tabela 3 - Aditivos orgânicos

TECNOLOGIA	EMPRESA RESPONSÁVEL DA PATENTE	TEMPERATURAS DE USINAGEM
ADITIVOS ORGÂNICOS		
CCBit 113 AD	Dr. Hutschenreuther, Alemanha	Depende da gama de penetração do ligante, mas habitualmente entre 130°C e os 170°C.
Sasobit (Ficher - 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.

Pesquisas feitas com o uso do CCBit como aditivo foi capaz de reduzir a temperatura de usinagem e compactação em até 40°C (OLIVEIRA, 2014). Em estudos feitos por Sousa et al. (2019) apontou a redução da temperatura de compactação em 4,5°C e de usinagem em 3,5°C, em relação ao CAP puro, para um teor de 2% do ligante.

Os óleos vegetais buscam atuar na redução da viscosidade do ligante asfáltico. Um exemplo do uso foi feito por Lucena et al. (2016), em que foi utilizado o óleo de Moringa Oleifera Lam em diversos teores. Nesse estudo observou um retardo no envelhecimento do CAP, redução das temperaturas de usinagem e compactação em 5°C, aproximadamente.

3.3 Cera de abelha

A cera de abelha é derivada do mel que é ingerido pelas operárias, feito com o auxílio de oito glândulas cerígenas localizadas no lado ventral do abdômen, sendo necessário em média 6 a 7 gramas de mel para produção de 1 grama de cera de abelha. A cera tem sua

composição na mistura de ésteres (67%), hidrocarbonetos (14%), ácidos graxos (12%) e álcoois (1%) (TULLOCH, 1980).

A palavra “Múmia” tem sua origem persa “moun”, que significa cera. Os romanos faziam o uso da cera para modelar o perfil humano mas, ela também já foi utilizada para pagamento de tributos, taxas e multas. No passado, a cera também foi empregada na impermeabilização de vasos, cestos, barcos e outros. Hoje, o uso da cera está difundido na indústria, nas farmácias, medicina e cosméticos.

A cera de abelha possui função de isolante térmico, se funde numa temperatura entre 63°C e 64°C, essa temperatura possibilita o uso dela como redutor de viscosidade do ligante asfáltico. O seu ponto de amolecimento é a partir dos 35°C, possuindo densidade aproximada à densidade da água. A cera possui três principais produtos: a cera abelha amarela, que é o produto bruto obtido no favo de mel; a cera de abelha branca, que é o branqueamento da cera amarela; a pura cera de abelha, que é a cera amarela tratada com álcool.

O estudo com adição das ceras nos ligantes asfálticos visa a redução de temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas. O estudo de Sofyan et al. (2017) é um dos poucos na área da adição da cera de abelha nas misturas asfálticas, em que teve como objetivo conhecer o uso potencial da adição na produção de MAMs, sendo utilizado um ligante natural específico da Indonésia, o Asbuton - BNA.

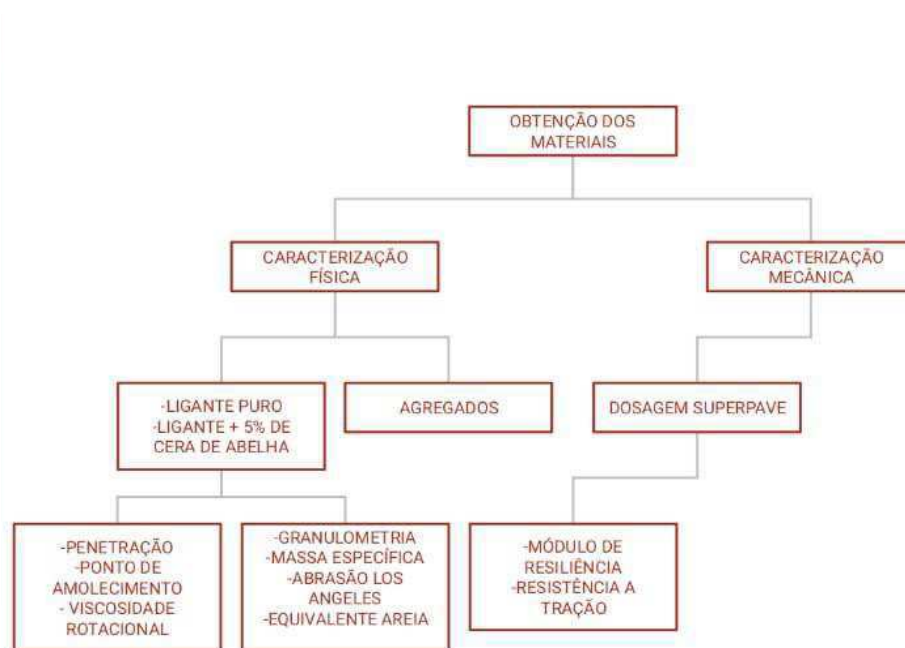
Os estudos de Sofyan et al. (2017) puderam concluir que:

- 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.

4. METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados para pesquisa e as especificações para a obtenção das propriedades físicas dos agregados e do ligante asfáltico utilizado, bem como, os procedimentos realizados para a avaliação mecânica da mistura asfáltica, em decorrência das alterações realizadas durante o estudo. O Fluxograma apresentado na Figura 4 descreve a metodologia abordada.

Figura 4 - Fluxograma



Fonte: Autoria própria

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

4.1 Misturas asfálticas

4.1.1 Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa foi o CAP 50/70, devido ao seu uso comum na região Nordeste. Na Tabela 4 são apresentadas as características físicas do ligante, as normas referentes a cada ensaio e os seus limites, em que pode-se observar que o CAP se localiza nos limites estabelecidos por norma.

Tabela 4 - Caracterização do CAP puro

Característica	CAP puro	Limites	Métodos
Penetração (0,1 mm)	57,3	50 - 70	NBR - 6576
Ponto de amolecimento (°C)	48,5	46 (mín.)	NBR - 6560
Viscosidade Rotacional 135 °C (cP)	371,3	274 (mín.)	NBR - 15184
Viscosidade Rotacional 150 °C (cP)	185,0	112 (mín.)	NBR - 15184
Viscosidade Rotacional 177 °C (cP)	69,25	57 - 285	NBR - 15184
Ponto de Fulgor (°C)	250,0	235 (mín.)	NBR - 11341

Fonte: Autoria própria

4.1.2 Agregados

Os agregados utilizados nesta pesquisa foram a brita 19mm, brita 9,5mm, areia e pó de pedra, a cal hidratada foi utilizada como filer. As britas e o pó de pedra foram fornecidas pela empresa Rocha Cavalcante, oriundos de pedreira própria com sede em Campina Grande- PB. A areia é proveniente do Rio Paraíba e o filer utilizado foi a cal hidratada, ambos obtidos no comércio local.

4.1.3 Cera de abelha

A cera de abelha, aditivo utilizado nesta pesquisa, foi disponibilizada pela empresa Apiário Nutrimel.

Figura 5 - Cera de abelha



Fonte: Sousa, 2020.

4.2 Propriedades físicas e mecânicas dos materiais

4.2.1 Agregados

Os ensaios realizados para caracterização dos agregados estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5 - Ensaio para caracterização física dos agregados e normas utilizadas

Ensaio	Metodologia
Análise granulométrica dos agregados por peneiramento	DNIT - ME 083/98
Massa específica real dos agregados graúdos	DNIT - ME 081/98
Massa específica real dos agregados miúdos	DNIT - ME 084/95
Abrasão “Los Angeles”	DNIT - ME 035/98
Equivalente areia	DNIT - ME 054/97

Fonte: Autoria própria

4.2.1.1 Granulometria

O ensaio de granulometria por peneiramento possibilita a determinação da distribuição granulométrica do agregado, com representação por meio de uma curva. A

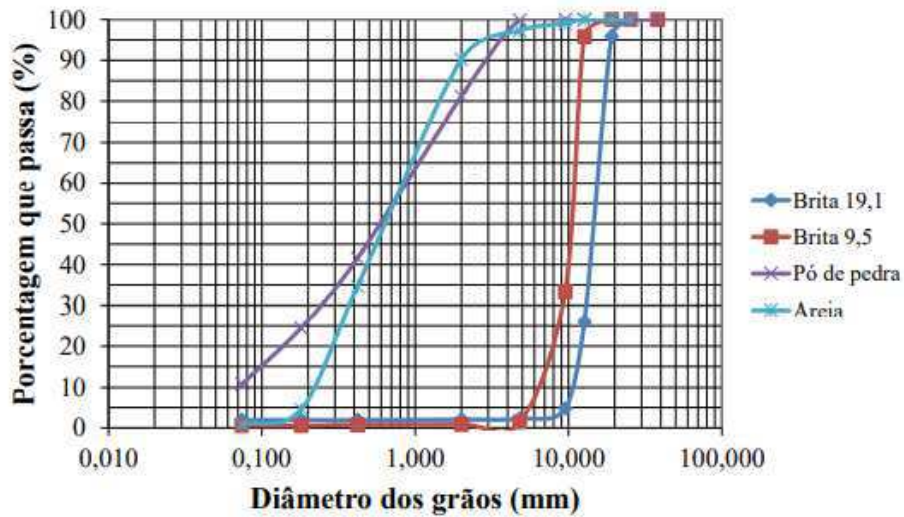
norma regulamentadora para este ensaio é a DNIT-ME 083/98 - Distribuição dos tamanhos das partículas dos agregados, a qual foi utilizada como base na presente pesquisa. Na Tabela 6 e na Figura 6 estão apresentadas a quantidade passante dos agregados e suas curvas granulométricas, respectivamente.

Tabela 6 - Quantidade passante acumulada (%)

Tabela 6 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
¾"	19,10	95,90	100,00	100,00	100,00
½"	12,70	26,03	95,82	100,00	100,00
⅜"	9,50	4,78	33,35	99,13	100,00
Nº 4	4,90	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

Fonte: Autoria própria

Figura 6 - Curva Granulométrica dos agregados



Fonte: Sousa, 2020.

4.2.1.2 Massa específica dos agregados graúdos e miúdos

Os resultados decorrentes do ensaio de massa específica, sendo a massa específica real, aparente e da absorção dos agregados graúdos e miúdos, estão dispostos na Tabela 7, apresentando-se dentro do especificado para uso.

Tabela 7 - Resultados do Ensaio de Massa Específica

Agregados	Massa específica real (g/cm ³)	Massa específica aparente (g/cm ³)	Absorção (%)
Brita 19 mm	2,775	2,799	0,47
Brita 9,5 mm	2,722	2,757	0,47
Areia	2,576	2,555	0,32
Pó de Pedra	2,54	2,426	0,48

Fonte: Autoria própria

4.2.1.3 Abrasão “Los Angeles”

Os resultados do desgaste sofrido pelo ensaio de Abrasão Los Angeles, para brita 19mm e 9,5mm, estão dispostos na Tabela 8, estando dentro do limite máximo especificado pela norma do DNIT 031/2006 ES.

Tabela 8 - Resultados do Ensaio de Abrasão Los Angeles

Agregados	Abrasão “Los Angeles” (%)	Limite máximo (%)
Brita 19 mm	24,7	55
Brita 9,5 mm	18,57	55

Fonte: Autoria própria

4.2.1.4 Equivalente Areia

Os resultados referentes ao ensaio de equivalente areia tanto para o pó de pedra, como para a areia, estão apresentados na Tabela 9. Ambos se encontram dentro do parâmetro estabelecido pelo DNIT 031/2006 ES, que preconiza o valor mínimo para o resultado de equivalente areia de 55%.

Tabela 9 - Resultados do Ensaio de Equivalente Areia

Agregados	Equivalente areia (%)	Limite mínimo (%)
Pó de pedra	55,2	55
Areia	72,32	55

Fonte: Autoria própria

4.3 Mistura do Ligante com a cera de abelha

O teor de incorporação da cera de abelha foi definido a partir da revisão da literatura, sendo escolhido o teor de 5%, tomando-se como referência os estudos realizados por Sousa (2020).

Foram feitos ensaios pilotos, para a definição de uma metodologia apropriada para o manuseio da cera de abelha. As misturas foram produzidas com 5% 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.

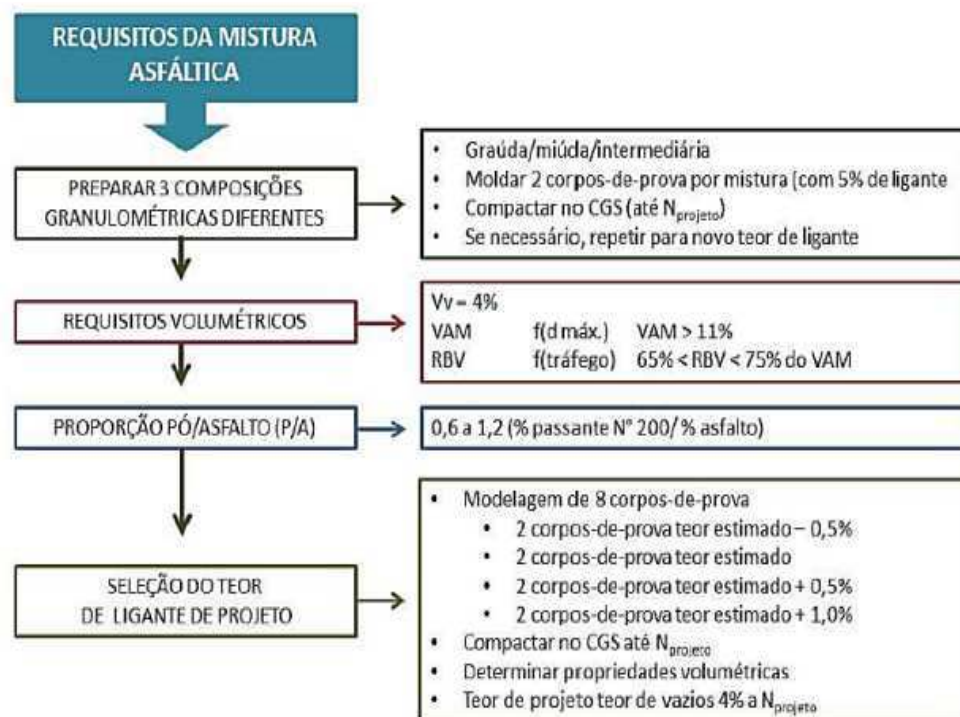
A mistura para incorporar a cera de abelha ao ligante foi realizada de forma semelhante ao recomendado por Silva (2016), utilizando-se um agitador mecânico FISATOM, Modelo 72. Os componentes foram misturados com agitação frequente, tomando-se cuidado para não exceder a temperatura e o tempo de reação.

Após a realização da mistura, fez-se também todos os ensaios de propriedades físicas, indicados na Tabela 4, para o ligante modificado. Tanto o ligante puro como o ligante modificado, foram submetidos ao processo de envelhecimento no RTFO, para a possível comparação dos parâmetros físicos antes e após o envelhecimento.

4.4 Dosagem SUPERPAVE

Para a determinação do teor ótimo do ligante asfáltico para a mistura estudada na pesquisa, utilizou a metodologia de dosagem SUPERPAVE. A sequência de atividades está descrita no fluxograma da Figura 7.

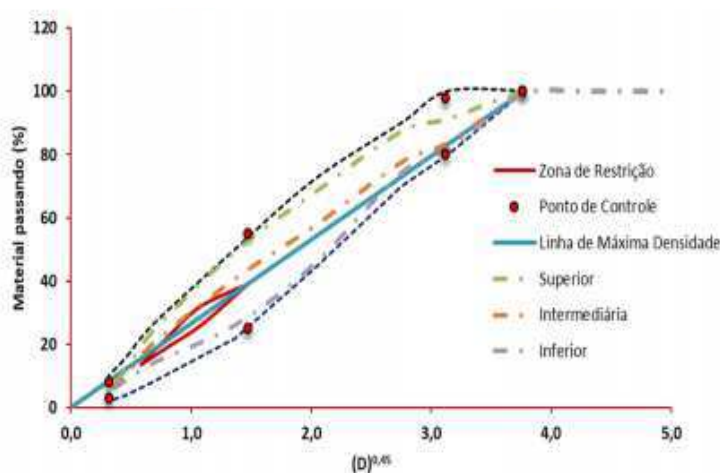
Figura 7 - Fluxograma de dosagem SUPERPAVE



Fonte: BERNUCCI et al. (2017)

Inicialmente é realizada a composição granulométrica dos agregados, que neste caso é constituída de brita 19mm, brita 9,5mm, pó de pedra, areia e cal, enquadradas na faixa C do DNIT, em que é levado em consideração os conceitos de Pontos de Controle e Zonas de Restrição. Em seguida, estipulou-se três composições granulométricas para serem testadas, denominadas curvas de Fuller, sendo uma inferior, uma intermediária e uma superior, como indicado na Figura 8, as proporções dos agregados demonstradas nas curvas estão indicadas na Tabela 10.

Figura 8 - Curvas de Fuller - Composição Granulométrica superior, intermediária e inferior



Fonte: Sousa, 2020.

Tabela 10 - Proporções dos agregados das misturas de projeto

Curva	Brita 19	Brita 9,5	Areia	Pó de pedra	Filler
Superior	12%	30%	15%	42%	1%
Intermediária	22%	31%	15%	30%	2%
Inferior	25%	45%	3%	25%	2%

Fonte: Autoria própria

Seguindo 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). Desse modo, na etapa posterior realizou a moldagem de 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.

Para simulação do envelhecimento a curto prazo durante a usinagem em campo, a mistura, ainda não compactada, permaneceu por 2 horas em estufa. 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).

Após a moldagem dos corpos de prova, foi possível obter os valores de V_v (volume de vazios), VAM (vazios no agregado mineral), por meio dos diâmetros, alturas, pesos secos e submersos, dos CPs. A densidade máxima medida foi obtida pelo método Rice, também nomeada como Gmm, preconizado pela norma americana ASTM D2041. Tais parâmetros estão apresentados na Tabela 11, com isso, escolheu-se a curva inferior, em virtude do volume de vazios ser equivalente a 4%.

Tabela 11 - Parâmetros Volumétricos da mistura

%Gmm						
Curva	% Ligante	N inicial	N projeto	N máximo	VAM (%)	Vv (%)
Superior	5,00	87,69	94,51	95,32	12,15	5,49
Intermediária	5,00	90,80	96,48	97,13	11,52	3,52
Inferior	5,00	93,07	95,95	97,18	12,85	4,05

Fonte: Autoria própria

Sendo assim, o teor de ligante escolhido para ser utilizado foi de 5% e a composição dos agregados os referentes a curva inferior.

4.5 Propriedades mecânicas das misturas asfálticas

Nesta etapa, foi realizada a mistura do ligante modificado com os agregados graúdos e miúdos. Após a realização das misturas, a compactação por amassamento com o uso do compactador giratório, moldaram-se três corpos de prova para realização de cada ensaio mecânico. A compactação baseou-se na ASTM D 6925-09.

Realizou-se os ensaios mecânicos de Módulo de Resiliência e Resistência a Tração objetivando-se analisar a influência da adição da cera de abelha e da redução da

temperatura ideal, no desempenho mecânico das misturas asfálticas. Os ensaios realizados e a metodologia adotada estão dispostos na Tabela 12.

Tabela 12 - Ensaio mecânicos e suas metodologias

Ensaio	Metodologia
Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral	DNIT - ME 136/10
Módulo de Resiliência	NBR 16018/11 e ASTM D 4123-82

Fonte: Autoria própria

5. RESULTADOS

Neste tópico serão apresentados e discutidos os resultados referentes a pesquisa realizada. Serão discutidos sobre a caracterização física do CAP 50/70, bem como, do CAP modificado com 5% de cera de abelha e sua caracterização mecânica das misturas asfálticas com uso de CAP modificado e com o uso do CAP puro com redução de temperatura.

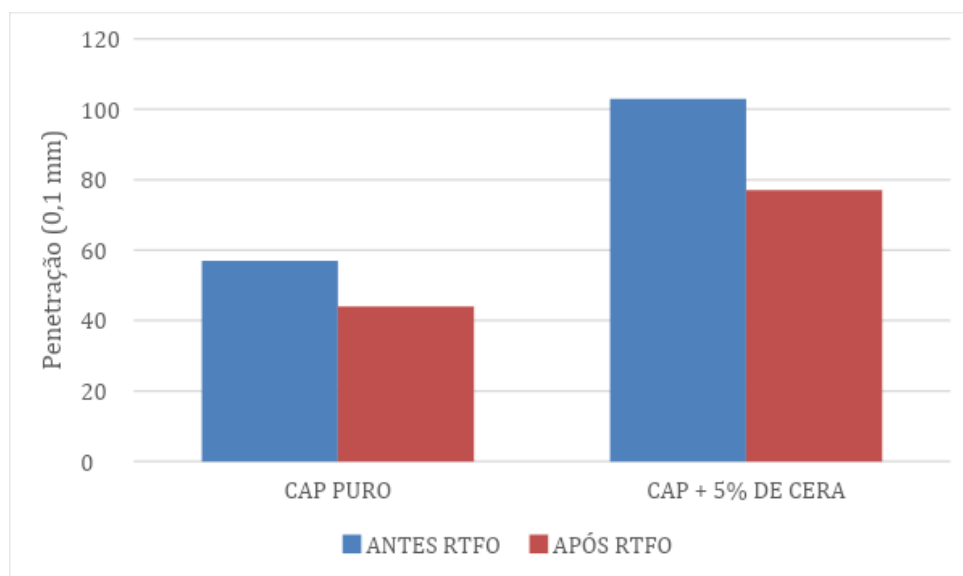
As misturas com o CAP puro foram compactadas na temperatura obtida por meio do ensaio de viscosidade rotacional e em uma temperatura inferior, com 10°C a menos do que a temperatura de referência. Essa temperatura foi escolhida, por se aproximar da temperatura que foi encontrada para a mistura do CAP com 5% de cera de abelha, buscando verificar se alterações das propriedades é devido a adição da cera ou devido a redução da temperatura.

5.1 Caracterização do ligante asfáltico puro e modificado

5.1.1 Ensaio de penetração

No gráfico da Figura 9 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de penetração para o CAP puro e para o CAP modificado com adição de 5% de cera de abelha.

Figura 9 - Resultados do ensaio de penetração (Antes e após o RTFO)



Fonte: Autoria própria

O comportamento ocorreu conforme o esperado com a adição do ligante, visto que a cera proporciona a redução da viscosidade do ligante asfáltico, o que o torna menos consistente, aumentando a sua penetração. De acordo com o previsto na norma do DNIT

095/2006 – EM a penetração retida mínima deve ser de 55%. Na Tabela 13 é possível observar que o resultado foi satisfatório tanto para o CAP puro como para o CAP modificado.

Tabela 13 - Penetração retida

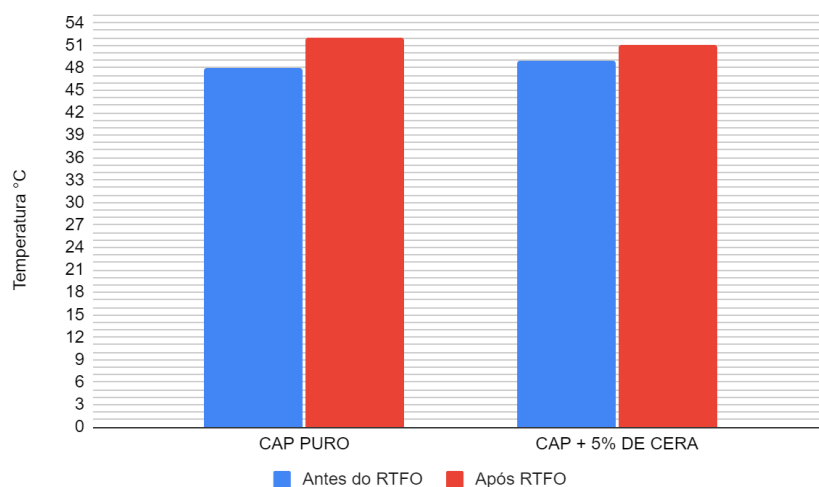
Amostra	CAP puro	5% de cera de abelha
Penetração retida mínima (%)	77,5	74,7

Fonte: Autoria própria

5.1.2 Ponto de amolecimento

O gráfico da Figura 10 apresenta os resultados do ponto de amolecimento do ligante asfáltico, para o CAP puro e para o CAP com 5% de cera de abelha.

Figura 10 - Temperaturas de ponto de amolecimento para os ligantes, puro e modificado



Fonte: Autoria própria

Como é visto nas especificações do DNIT (2006), para o ligante asfáltico CAP 50/70 o ponto de amolecimento mínimo é de 46°C, em que pode ser observado que o ligante puro e o modificado encontram-se dentro do limite estabelecido pela norma. A adição da cera de abelha no teor de 5% reduziu a temperatura do ponto de amolecimento comparado ao CAP puro, semelhantemente ao que ocorreu nas pesquisas de Portugal (2017) e Silva (2016), que utilizaram de aditivos reduzindo o ponto de amolecimento da mistura.

Tabela 14 - Aumento da temperatura após o RTFO

Amostra	CAP puro	5% de cera de abelha
Aumento da temperatura (°C)	4,0	1,7

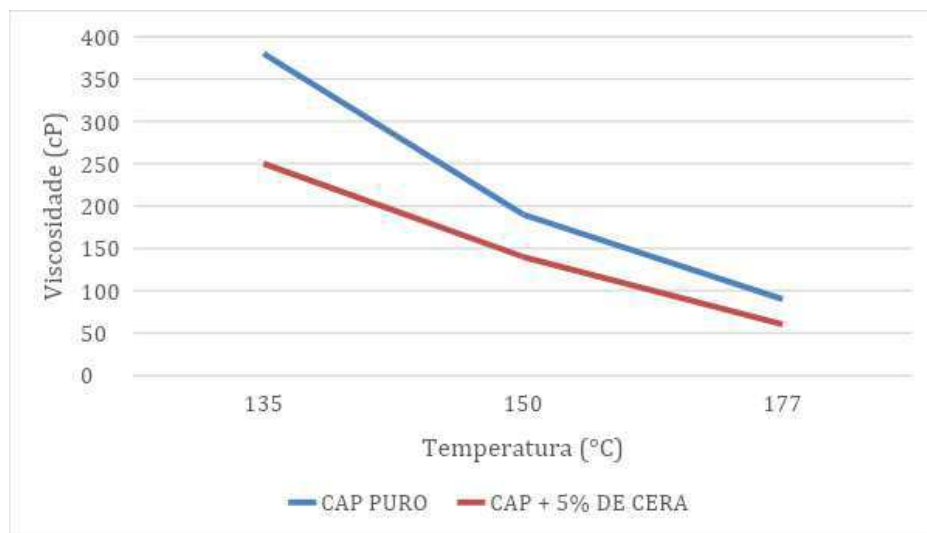
Fonte: Autoria própria

A norma DNIT 095/2006 - EM , estabelece que a variação do ponto de amolecimento após o envelhecimento não deve ultrapassar 8°C, o que é possível notar na Tabela 14 que o CAP puro e o modificado se encontram dentro da norma. Porém o ligante modificado com a cera de abelha apresentou uma variação inferior ao que foi obtido pelo ligante puro, reforçando sua influência na resistência ao envelhecimento.

5.1.3 Viscosidade rotacional

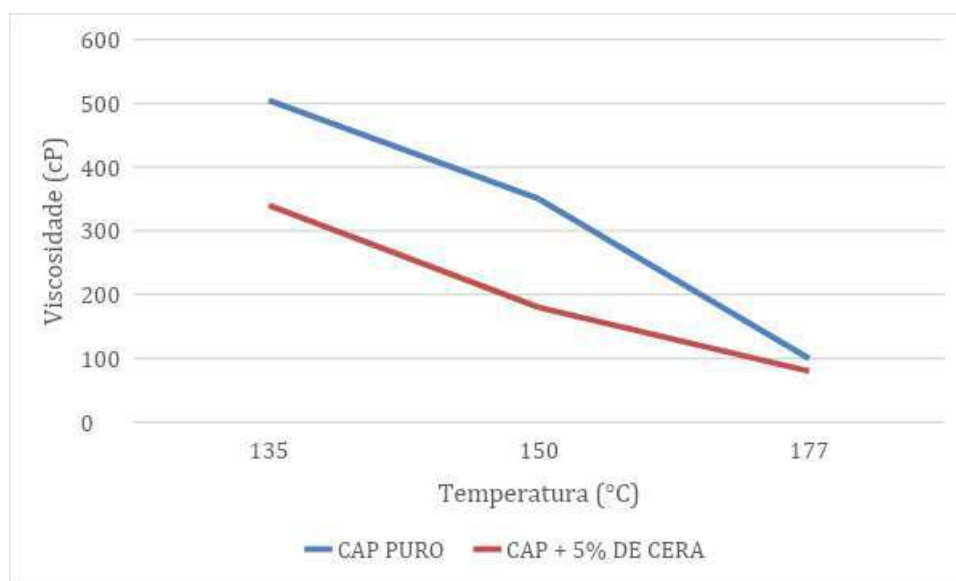
Os resultados do ensaio de viscosidade rotacional do CAP puro e modificado com a cera de abelha estão apresentados nas Figuras 11 e 12.

Figura 11 - Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional (Antes do RTFO)



Fonte: Autoria própria

Figura 12 - Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional (Após o RTFO)



Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado nos gráficos das Figuras 11 e 12, houve uma redução da viscosidade, ocasionado pela adição da cera. As temperaturas de usinagem e compactação do ligante asfáltico são obtidas através do ensaio de viscosidade, em que para determinação de tais temperaturas, o método tradicional regido pela ASTM D 2493 -16, estabelece uma TU na qual o ligante apresente Viscosidade Rotacional de $0,17 \pm 0,02$ Pa.s e uma TC na qual o ligante apresente Viscosidade Rotacional de $0,28 \pm 0,03$ Pa.s.

A partir desse método, foram gerados gráficos para o CAP puro e para o CAP modificado, com os intervalos de viscosidade, em que foi possível determinar as temperaturas de usinagem e compactação, apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 - Temperaturas de usinagem e compactação

Amostra	CAP puro	CAP + 5% de cera de abelha
Temperatura de usinagem (°C)	154	145
Temperatura de compactação (°C)	142	130

Fonte: Autoria própria

Por meio da Tabela 15, pode-se observar que houve uma diminuição na temperatura de Usinagem e Compactação do CAP modificado em função do teor de cera utilizado. Todos os valores encontrados para as temperaturas de usinagem e compactação são inferiores a 180°C, satisfazendo o que estabelece a DNER 385/1999. Com a redução nas temperaturas, a mistura se enquadra nos parâmetros de uma mistura asfáltica morna, desse modo, optou-se pela redução da temperatura de usinagem e compactação em 10°C da mistura com o CAP puro, buscando enquadrá-lo como uma MAM, realizando-se a análise das propriedades mecânicas da mistura, para saber se está sendo influenciado pela temperatura ou pelo aditivo.

A Tabela 16 mostra as temperaturas utilizadas para cada mistura.

Tabela 16 - Temperaturas de usinagem e compactação para as 3 misturas

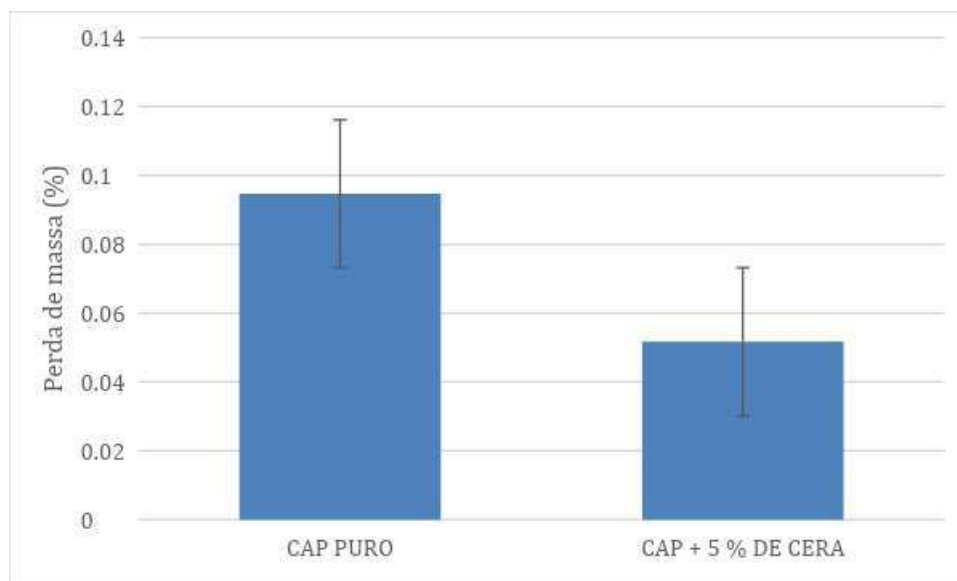
Amostra	Ligante puro	Ligante + 5 % de cera	Ligante puro - 10°C
Temperatura de usinagem (°C)	154	145	144
Temperatura de compactação (°C)	142	130	132

Fonte: Autoria própria

5.1.4 Perda de massa

A capacidade de envelhecimento do CAP é determinada pela perda de massa. O gráfico da Figura 13 mostra os resultados da perda de massa das misturas asfálticas. A perda de massa determina a capacidade de envelhecimento do ligante.

Figura 13 - Perda de massa (Após RTFO)



Fonte: Autoria própria

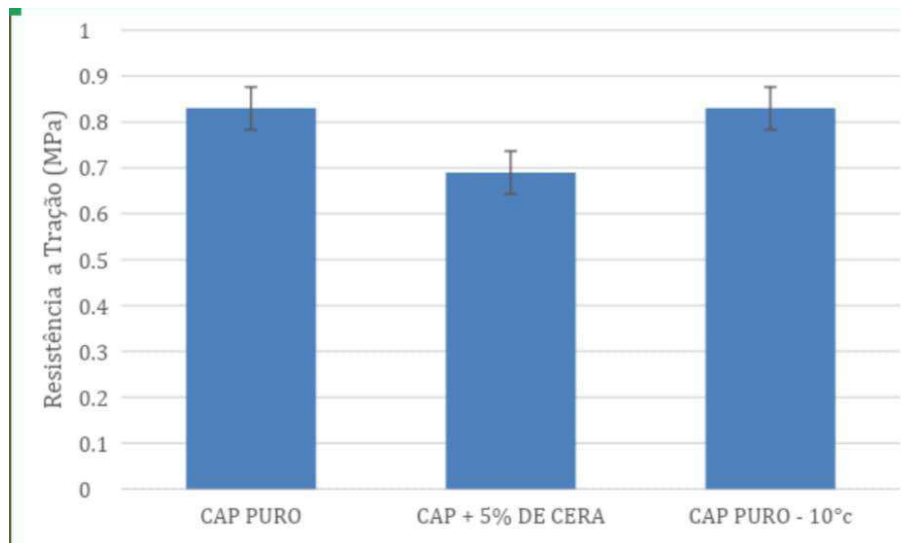
O limite da perda de massa especificado pela norma 095/2006 do DNIT é 0,5%, desse modo, todas pode-se observar que o CAP puro e modificado se encontra dentro do estabelecido, sem interferir na qualidade do pavimento. Pode-se destacar que o ligante modificado apresenta menor perda de massa comparado ao ligante puro.

5.2 Caracterização mecânica das misturas asfálticas

5.2.1 Resistência à Tração por compressão diametral - RT

No gráfico da Figura 14 estão dispostos os resultados referentes ao ensaio de Resistência à Tração por compressão diametral para as amostras de CAP puro, CAP + 5% de cera de abelha e o CAP puro com redução de 10°C da temperatura de compactação referência encontrada no ensaio de viscosidade.

Figura 14 - Resultados do ensaio de RT



Fonte: Autoria própria

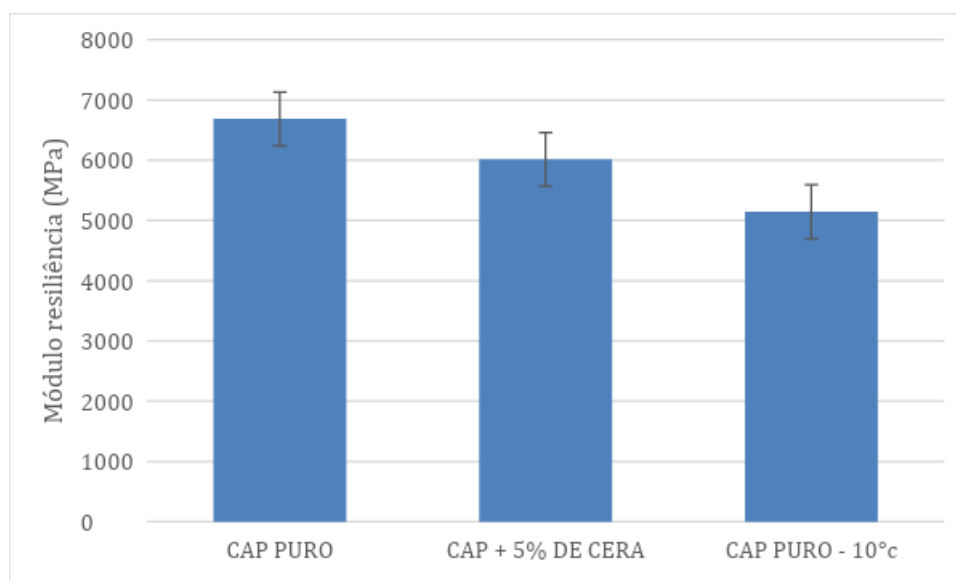
Pela norma do DNIT ME 136/10 o valor médio da RT mínimo preconizado deve ser de 0,65 MPa (a 25°C) em misturas asfálticas destinadas a camadas de rolamento, o que pode ser observado nas misturas.

É possível observar que há uma queda na resistência à tração para a amostra modificada com 5% de cera de abelha, quando comparada ao valor da RT da mistura com o ligante puro. No entanto, para a mistura com o ligante puro com a redução da temperatura, o valor da RT se manteve igual, o que evidencia a possibilidade do teor de 5% de cera de abelha está prejudicando a mistura, já que a mistura com a cera de abelha e a mistura com redução de temperatura, foram usinadas e compactadas em temperaturas próximas, sendo usinagem 145°C e 144°C, para o CAP modificado e para o CAP puro, respectivamente, e de compactação 130°C e 132°C, para o CAP modificado e para o CAP puro, respectivamente.

5.2.2 Módulo Resiliência - MR

Na Figura 15 encontram-se os resultados obtidos por meio do ensaio de Módulo Resiliência, MR, para o comportamento das médias de 3 corpos de prova para cada mistura. Os valores foram obtidos por meio da NBR 16018/2011.

Figura 15 - Resultados do ensaio de MR



Fonte: Aatoria própria

Segundo Bernucci (2008) os valores típicos do módulo de resiliência estão na faixa entre 2.000 MPa e 8.000 MPa a temperatura de 25°C, com isso, verifica-se que todos os resultados encontrados se apresentam dentro desta faixa.

As misturas com ligante puro e o ligante modificado não apresentaram grandes variações, no entanto, ao reduzir a temperatura da mistura do CAP puro em 10°C, houve uma redução da MR. Desse modo, para o ligante puro a redução da temperatura apresenta influência no módulo resiliência. Segundo Silva (2011) a análise do Módulo Resiliência está relacionada à rigidez da mistura, em que não pode ser feita de forma direta, ou seja, os valores maiores ou menores da MR podem ser aceitos, dependendo da estrutura do pavimento.

A pesquisa de Luz, et al. (2018) na qual estudou as propriedades mecânicas de misturas modificadas com adição de óleo de milho e óleo de soja, indicou um resultado diferente do encontrado na presente pesquisa. Os maiores valores encontrados para o MR foram para a temperatura de 130°C, equivalente a uma redução de 10° na temperatura de referência.

6. CONCLUSÕES

De modo geral, com a redução da temperatura da mistura do ligante puro se assemelhando a temperatura utilizada para a mistura com adição de 5% de cera de abelha, pode-se fazer um comparativo entre as duas. As propriedades mecânicas de resistência a tração foram mantidas para o CAP puro, apesar dos resultados do módulo resiliência terem sido inferiores, esses podem ser reduzidos sem prejuízos, como já explicado no tópico anterior.

Apesar da mistura com CAP modificado também apresentar resultados satisfatórios, a mistura pura se mostrou mais eficiente. Desse modo, a cera de abelha trouxe redução da resistência à tração, o que aponta um prejuízo à mistura. Porém, esse teor pode ser elevado e estudado futuramente buscando elevar as propriedades, podendo ser mais oneroso.

Com isso, para o objetivo da pesquisa, a redução da temperatura da mistura com o ligante puro, demonstrou resultados satisfatórios nas propriedades do ligante asfáltico, sem a necessidade de um aditivo, a cera de abelha, demonstrando que a temperatura que estava influenciando e não o aditivo. A cera de abelha ainda pode ser considerada uma alternativa para melhoria nas propriedades mecânicas da mistura, mas no teor de 5% não foi o ideal.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

BUDNY, J. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

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

CHOWDHURY, A.; BUTTON, J.W. **A Review of Warm Mix Asphalt**. Texas A&M University System, EUA, 2008.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE - CNT. **Pesquisa CNT de rodovias 2019**. Brasília: CNT: SEST SENAT, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER - ES 385/99**. Pavimentação: Concreto asfáltico com asfalto polímero. Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER - ME 081/98**. Agregados - Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE. **DNIT 031/2006** – ES – Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE. **DNIT – ME 083/98**. Agregados – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE **DNIT - ME 084/95** – Agregado miúdo - determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE **DNIT – ME 095**. Cimento Asfáltico de Petróleo – Especificações de material. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE. **DNIT – ME 131/10**. Materiais Asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE. **DNIT - ME 135/10** – Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE. **DNIT - ME 180/18** – Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE. **DNIT-ME 385/99** – Pavimentação – concreto asfáltico com asfalto polímero. Rio de Janeiro, 1999.

FEITOSA, J. P. M. **Avaliação do uso de diferentes tipos de cera de carnaúba como aditivos para misturas mornas**. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, Ceará. 2015.

GUERRA, T.D. **Utilização do óleo de canola para redução das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2019.

KOENDERS, B. G. et al. **Innovative processes in asphalt production and application to obtain lower operating temperatures**. 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona, Spain, 2000.

LUCENA, L. C. DE F. L.; SILVEIRA, I. V. DA; COSTA, D. B. DA. **Asphalt binders modified with Moringa Oleifera Lam oil**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 21, n. 1, p. 72– 82, 2016.

LUZ, P. M. S. G. et al. **Avaliação das propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas modificadas com adição de óleos vegetais**. Revista Transportes. Vol. 27, p. 149-150, Abril de 2019. ISSN: 2237-1346.

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

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

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, 2012.

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

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. 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.

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

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, T. M. A. **Avaliação das propriedades mecânicas de misturas asfálticas modificadas com adição do CCBit.** Trabalho e conclusão de curso – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2017.

SOUSA, T. M.; LUCENA, A. E. F. L.; PATRÍCIO, J. D.; COSTA, D. B.; NÓBREGA, E. R.; SILVA, C. C. V. P. **Avaliação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas modificadas com adição do CCBit.** 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, Balneário Camboriu-SC, p. 1950-1961, 2019.

SOUSA, T. M. **Estudos de misturas asfálticas mornas modificadas com adição da cera de abelha.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Campina Grande, 2020.

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.

RUBIO, M. C.; MARTÍNEZ, G.; BAENA, L.; MORENO, F. **Warm mix asphalt: an overview**. *Journal of Cleaner Production*, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652611004926>> . Acesso em: 23 de setembro de 2020.