



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

LARISSA ÉRIKA FRAZÃO BEZERRA

**INFLUÊNCIA DAS TEMPERATURAS DE USINAGEM E COMPACTAÇÃO EM
MISTURAS ASFALTICAS MODIFICADAS COM CERA DE ABELHA**

CAMPINA GRANDE

2019

LARISSA ÉRIKA FRAZÃO BEZERRA

**INFLUÊNCIA DAS TEMPERATURAS DE USINAGEM E COMPACTAÇÃO EM
MISTURAS ASFALTICAS MODIFICADAS COM 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: Talita Miranda de Sousa

CAMPINA GRANDE

2019

FOLHA DE APROVAÇÃO

LARISSA ÉRIKA FRAZÃO BEZERRA

INFLUÊNCIA DAS TEMPERATURAS DE USINAGEM E COMPACTAÇÃO EM MISTURAS ASFALTICAS MODIFICADAS COM 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.

Aprovada em: ____ de _____ de ____.

BANCA EXAMINADORA

Nota _____

Orientador – DSc. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Nota _____

Co-orientadora – Talita Miranda de Sousa

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Nota _____

Examinadora interna – DSc. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Nota _____

Examinadora externa – MSc. Jeovanesa Regis de Carvalho

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Emília Érica e Gneton Bezerra, por não medirem esforços para colaborar com meu sonho, essa conquista será eternamente nossa.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter sido meu alicerce durante toda essa jornada, por ter me proporcionado tantas graças e por sempre ter me dado a força necessária para continuar.

Aos meus pais, Emília Érica e Gneton Bezerra, por terem sido o meu amparo em todos os momentos, por não medirem esforços em prol da minha felicidade, por todas as vezes que percorreram 600km para me ver e por todo o amor, essa vitória é tão de vocês quanto minha, aos dois devo a minha vida, quem sou e tudo que conquisto.

Aos meus irmãos, Luiz Felipe e Gneton Lucas, por toda a parceria e carinho.

Aos meus avós, Alzira, Adeaula, Rosa, Luiza (in memorian), Antônio (in memorian), Juraci (in memorian) e Zé Luiz (in memorian), pelo amor transmitido, pelas rezas pedindo a Deus por mim e por cada Deus te abençoe que me deram nos momentos de despedidas.

A minha família, pela confiança depositada em mim.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Adriano Elísio, pela orientação, por todo o conhecimento transmitido, tanto durante o projeto de pesquisa como no meu trabalho de conclusão de curso. Obrigada pela confiança.

A minha co-orientadora, 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.

A Thamires Guerra, que me incentivou na jornada de iniciação científica e por sempre ser tão prestativa, não esquecerei da sua colaboração.

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

As minhas amigas, Dandara, Vitória e Belinha, que se tornaram uma família para mim enquanto estive em Pombal, 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.

A Mickael, que acima de tudo, 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.

A Anderson Vinícius, que no cursinho me avisou e incentivou a fazer a inscrição para Pombal e por estar presente em minha vida até hoje, sem você talvez a trajetória tivesse sido diferente.

As minhas amigas de infância, Jaqueline, Vitória, Amanda e Bárbara, pela amizade e amor durante todo esse percurso e por independente da distância eu sempre poder contar com vocês.

A minha amiga de infância e parceira de vida em Campina Grande, Alany Diniz. Obrigada pelos momentos de estudo juntas, por me amparar nos momentos difíceis, por compartilhar das minhas alegrias e por cada conselho.

Aos amigos (as) que o curso me deu, Alinne, Camilla, Marcela, João, Igor, Manoel, Carlos, Sávio, Matheus, por todos os momentos compartilhados, por terem me acolhido em Campina e pela amizade construída, estarão sempre em meu coração.

As minhas amigas que se fizeram irmãs, Clara e Drihelly, que foram minhas parceiras de curso e de vida durante esses anos, foi nos mínimos detalhes que se tornaram tão especiais para mim. Fizeram a jornada ser mais leve e foram meu impulso em muitos momentos, levarei vocês sempre comigo.

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

RESUMO

As misturas asfálticas usinadas à quente, comumente utilizadas nas rodovias brasileiras, embora tenham potencial de resistência aos esforços solicitantes, tem acarretado em fatores negativos em alguns aspectos. Devido as elevadas temperaturas de produção das misturas usinadas à quente, estas necessitam de um elevado consumo energético, resultando em prejuízos ambientais e financeiros e os fumos de asfalto liberados, colocam em risco a saúde dos trabalhadores a eles expostos. Por esse motivo, desenvolveram-se estudos visando amenizar essa problemática, dentre as análises realizadas observou-se que a redução nas temperaturas de usinagem e compactação é uma alternativa viável na produção dos revestimentos asfálticos, reduzindo os problemas desencadeados pelas misturas usinadas à quente, tal redução pode ser alcançada com o uso de misturas asfálticas mornas (MAMs), desenvolvidas pelo uso de aditivos. Nesse contexto, o objetivo dessa pesquisa foi avaliar o efeito da variação da temperatura de compactação de misturas asfálticas modificadas com 1% de cera de abelha, analisando as propriedades físicas do ligante e mecânicas da mistura. A escolha da cera de abelha como aditivo modificador deu-se devido ao seu potencial na produção de misturas asfálticas mornas, visto que, por possuir um ponto de fusão entre 63°C e 64°C, tende a reduzir a viscosidade do ligante quando aquecido, reduzindo assim as temperaturas de usinagem e compactação. O método de dosagem utilizado foi o SUPERPAVE e o processo foi realizado para duas temperaturas, sendo uma a temperatura encontrada por meio do ensaio de Viscosidade Rotacional e a outra com 10°C a menos. Diante dos resultados obtidos, concluiu-se que a redução da temperatura ideal de compactação e o uso da cera de abelha como aditivo tem resultados eficazes, com todos os parâmetros exigidos para uso em pavimentação atendidos e proporcionando, em alguns aspectos, características mecânicas superiores aos encontrados utilizando a temperatura de referência.

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

ABSTRACT

Hot-machined asphalt mixtures, commonly used on Brazilian highways, although they have the potential to withstand stresses, have resulted in negative factors in some respects. Due to the high production temperatures of hot machined mixtures, they require high energy consumption, resulting in environmental and financial losses and the released asphalt fumes endanger the health of workers exposed to them. For this reason, studies have been developed to alleviate this problem. Among the analyzes performed, it was observed that the reduction in machining and compaction temperatures is a viable alternative in the production of asphalt coatings, reducing the problems caused by hot machined mixtures, such as Reduction can be achieved with the use of warm asphalt mixtures (MAMs) developed by the use of additives. In this context, the objective of this research was to evaluate the effect of variation of the compaction temperature of asphalt mixtures modified with 1% beeswax, analyzing the binder physical and mechanical properties of the mixture. The choice of beeswax as a modifying additive was due to its potential in the production of warm asphalt mixtures, as melting point between 63 ° C and 64 ° C tends to reduce binder viscosity when heated. thus reducing machining and compaction temperatures. The dosing method used was SUPERPAVE and the process was performed at two temperatures, one being the temperature found by the Rotational Viscosity test and the other with 10 ° C less. Given the results obtained, it was concluded that the reduction of the ideal compaction temperature and the use of beeswax as an additive has effective results, with all the parameters required for paving use met and providing, in some aspects, mechanical characteristics superior to the ones. found using the reference temperature.

Keywords: Besswax, Warm Mix Asphalt, Mechanical Properties.

Lista de Figuras

Figura 1 - Classificação das misturas asfálticas em função das temperaturas de usinagem	19
Figura 2 - Diferença durante a aplicação de Misturas a quente e Misturas Mornas	21
Figura 3 – (a) Cera Alveolada; (b) Cera Bruta; (c) Cera Branqueada; (d) Cera Colorida	28
Figura 4 - Pesquisa patentária no Google Patents.....	29
Figura 5 - Pesquisa patentária no Espacenet.....	29
Figura 6 - Fluxograma	33
Figura 7 - Agregados	34
Figura 8 - Cera de abelha.....	35
Figura 9 - Cera e abelha peneirada	35
Figura 10 - Curva granulométrica dos agregados	37
Figura 11 - Agitador mecânico.....	39
Figura 12 - Fluxograma de dosagem SUPERPAVE	39
Figura 13 - Curvas de Fuller - Composição granulométrica superior, intermediária e inferior.....	40
Figura 14 - Compactação dos corpos de prova a partir do SUPERPAVE.....	42
Figura 15 - Corpos de prova compactados	43
Figura 16 - Resultados do ensaio de penetração (Antes e após RTFO).....	44
Figura 17 - Resultados do ensaio de Ponto de Amolecimento (Antes e após RTFO)	45
Figura 18 - Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional (Antes do RTFO)	46
Figura 19 - Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional (Após RTFO)	47
Figura 20 - Perda de massa (Após RTFO).....	48
Figura 21 - Resultados do ensaio de RT	49
Figura 22 - Resultados do ensaio de MR.....	50
Figura 23- Resultados do ensaio de Lottman modificado	51

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Caracterização do CAP puro.....	34
Tabela 2 - Ensaio para caracterização física dos agregados e normas utilizadas	36
Tabela 3 - Quantidade passante acumulada (%)	36
Tabela 4 - Resultados do ensaio de massa específica	37
Tabela 5 - Resultados do ensaio Abrasão Los Angeles.....	38
Tabela 6 - Resultados do ensaio de Equivalente Areia	38
Tabela 7 - Proporções dos agregados das misturas de projeto	40
Tabela 8 - Parâmetros volumétricos das misturas	41
Tabela 9 - Ensaio mecânicos e suas metodologias	42
Tabela 10 - Penetração retida	45
Tabela 11 - Aumento da temperatura após RTFO	46
Tabela 12 - Temperaturas de Usinagem e Compactação	47

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

CGS – Compactador Giratório SUPERPAVE

CNT – Confederação Nacional de Transportes

DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

FHWA – Federal Highway Administration

Gmm – Densidade Máxima da Mistura

HMA – Hot mix asphalt

HPAs – Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos

LEP – Laboratório de Engenharia dos Pavimentos e Geotécnica

LVDT – Linearvariable Differential Transformer

MAMs – Misturas Asfálticas Mornas

ME – Método de Ensaio

MR – Módulo de Resiliência

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

Nprojeto – Número de Giros de Projeto

PB – Paraíba

RPM – Rotações por minuto

RRT – Resistência Retida à Tração

RT – Resistência à Tração por Compressão Diametral

RTFO – Rolling Thin Film Oven Test

SUPERPAVE – Superior Performing Pavements

TC – Temperatura de Compactação

TCU – Tribunal de Contas da União

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

VOCs – Compostos Orgânicos Voláteis

Vv – Volume de Vazios

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
2.	OBJETIVOS	17
2.1.	OBJETIVO GERAL	17
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
3.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
3.1.	MISTURAS ASFÁLTICAS À QUENTE	19
3.2.	MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS.....	20
3.2.1.	Histórico	21
3.2.1.1.	Estudos com Misturas Asfálticas Mornas no Brasil.....	23
3.2.2.	Vantagens.....	24
3.2.3.	Desvantagens	25
3.3.	ADITIVOS UTILIZADOS PARA MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS.....	26
3.3.1.	Aditivos orgânicos	27
3.3.1.1.	Cera de abelha.....	27
3.3.1.1.1.	Histórico e produção	27
3.3.1.1.2.	Tipos de cera de abelha	27
3.3.1.1.3.	Propriedades e benefícios.....	28
3.3.1.1.4.	Pesquisas existentes utilizando a cera de abelha como aditivo no asfalto	29
3.3.1.2.	Cera de Carnáúba	29
3.3.1.3.	CCBit.....	30
3.3.1.4.	Sasobit®	30
3.3.1.5.	Óleos vegetais	31
3.3.2.	Aditivos surfactantes.....	31
3.3.3.	Asfalto espumado.....	32
4.	METODOLOGIA.....	33
4.1.	MATERIAIS UTILIZADOS.....	33
4.1.1.	Ligante asfáltico.....	33
4.1.2.	Agregados.....	34
4.1.3.	Cera de abelha.....	34
4.2.	PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS MATERIAIS.....	35
4.2.1.	Agregados.....	35
4.2.1.1.	Granulometria	36
4.2.1.2.	Resultados do ensaio de massa específica (Agregados graúdos e miúdos).....	37
4.2.1.3.	Resultados do ensaio de Abrasão “Los Angeles”	37
4.2.1.4.	Resultados do ensaio de Equivalente Areia	38

4.2.2.	Mistura do ligante com a cera de abelha.....	38
4.2.3.	Dosagem SUPERPAVE.....	39
4.2.4.	Propriedades mecânicas das misturas asfálticas	41
5.	RESULTADOS	44
5.1.	CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO PURO E MODIFICADO	44
5.1.1.	Ensaio de Penetração	44
5.1.2.	Ponto de Amolecimento	45
5.1.3.	Viscosidade Rotacional.....	46
5.1.4.	Perda de Massa	48
5.2.	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	48
5.2.1.	Resistência à Tração por compressão diametral.....	48
5.2.2.	Módulo de Resiliência	49
5.2.3.	Ensaio de Resistência ao Dano por Umidade Induzida - Lottman Modificado	51
6.	CONCLUSÕES.....	53
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, em virtude de poucos investimentos ferroviários e hidroviários, e do alto custo do transporte aéreo, a grande maioria das transferências de cargas e transporte de pessoas são realizadas pelo meio rodoviário. Entre os tipos de pavimentos rodoviários existentes tem-se o flexível (cujo revestimento é constituído por material betuminoso) e o rígido (formado por placas de concreto). As misturas asfálticas mais utilizadas no Brasil são produzidas à quente e a frio. As vantagens de se utilizar à quente em relação a fria está na sua maior resistência aos esforços oriundos do tráfego de veículos (LUCENA, 2016).

Segundo a Confederação Nacional de Transportes (2018) apenas 12,4% da malha rodoviária brasileira é pavimentada e, de acordo com a pesquisa da CNT (2019), 59,0% da malha rodoviária pavimentada apresenta algum tipo de problema, sendo considerada regular, ruim ou péssima. Quanto ao processo de mistura, a maioria das misturas asfálticas é produzida à quente, principalmente quando se trata de tráfego intenso e pesado.

Analisando tal contexto e a realidade encontrada no Brasil, pode-se perceber que as rodovias construídas no país não atendem, em sua totalidade, ao quesito durabilidade, visto que, em sua maioria, não correspondem ao tempo de vida útil para o qual foram projetadas. Segundo a CNT (Confederação Nacional de Transportes) apud TCU (Tribunal de Contas da União, 2017) as rodovias federais apresentam problemas estruturais e funcionais precocemente. Os defeitos apontados pela auditoria ocorreram, em média, sete meses após o recebimento da obra rodoviária.

Embora as misturas usinadas à quente, usualmente utilizadas nas malhas rodoviárias brasileiras, possuam boa resistência aos esforços solicitantes do tráfego rodoviário, observa-se a necessidade de melhoria em critérios negativos, decorrentes das suas elevadas temperaturas de produção, que variam na faixa de 150 e 180°C. Devido às elevadas temperaturas, estas necessitam de uma alta queima de combustível durante o processo de usinagem, implicando em um gasto energético exagerado e em emissão de gases agravadores do efeito estufa, acarretando em prejuízos financeiros e ambientais. Além disso, os fumos de asfalto liberados, colocando em risco a saúde dos trabalhadores a eles expostos, o que resulta em danos no ambiente de trabalho.

A qualidade do ligante asfáltico diminui em função do tempo desde sua fabricação na refinaria até o final de sua vida útil em uma rodovia. Esta evolução é traduzida pela perda das propriedades mecânicas da mistura, conhecida como envelhecimento. Este é o principal fator que ocasiona problemas nas misturas asfálticas a quente (CEZARO JUNIOR et al. 2008).

Diante desse cenário, começou-se a estudar práticas alternativas a fim de reduzir as temperaturas de usinagem e compactação, mantendo a qualidade da mistura usinada à quente, com isso, surgiram as Misturas Asfálticas Mornas (MAM). Estas utilizam temperaturas intermediárias, entre 100 e 145°C, que resultam em um menor consumo de combustível e, conseqüentemente, em menor gasto energético, acarretando assim em vantagens ambientais e melhores condições de trabalho. Em decorrência da redução nas temperaturas de compactação e usinagem, ocorre uma diminuição do envelhecimento por oxidação.

Para a obtenção das MAMs, pode-se recorrer a uma alteração na produção da mistura, bem como, na incorporação de um aditivo modificador, como asfalto espumado e aditivos orgânicos, que atuam na diminuição da viscosidade do ligante asfáltico reduzindo, conseqüentemente, as temperaturas de usinagem e compactação. Sendo possível recorrer também ao uso de aditivos surfactantes, para a melhoria das propriedades do ligante, principalmente a lubricidade.

Nesta pesquisa, optou-se pela cera de abelha como aditivo modificador devido ao seu potencial na produção de misturas mornas, pois, por possuir ponto de fusão entre 61°C e 65°C, tende a provocar redução na viscosidade e conseqüentemente nas temperaturas de usinagem e compactação.

Para garantir a viabilidade o uso de misturas asfálticas mornas, faz-se imprescindível o estudo das propriedades mecânicas. Devido a tal vertente, esta pesquisa visa analisar as alterações das propriedades mecânicas da mistura asfáltica modificada com a cera de abelha, avaliando-se tais propriedades por meio da redução em 10°C das temperaturas de usinagem e compactação em relação as temperaturas ideais encontradas no ensaio de viscosidade rotacional.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa tem como objetivo principal avaliar as alterações nas propriedades mecânicas da mistura asfáltica com adição da cera de abelha, através da redução das temperaturas de usinagem e compactação em 10°C em relação as temperaturas ideais.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a adição do teor de 1% de cera de abelha no ligante puro;
- Realizar a comparação das propriedades físicas do ligante puro e do ligante modificado com a cera de abelha;
- Avaliar os efeitos da redução das temperaturas de usinagem e compactação, em 10°C, sobre as propriedades mecânicas da mistura.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Dentre os pavimentos rodoviários utilizados no Brasil, tem-se os rígidos e os flexíveis, que diferem devido ao revestimento utilizado em sua produção e na forma como as cargas são distribuídas nas camadas inferiores. Para o pavimento flexível, o revestimento é realizado com o uso de material betuminoso e as cargas nele aplicadas são concentradas em um único ponto, já no pavimento rígido, utilizam-se placas de concreto e a distribuição de cargas é dada em uma área maior.

Os pavimentos flexíveis em sua maioria são associados às misturas asfálticas compostas basicamente de agregados e ligantes asfálticos. Este tipo de pavimento é uma das soluções mais tradicionais e utilizadas na construção e recuperação de vias urbanas, estradas e rodovias. Na maioria dos países, a pavimentação asfáltica é a principal forma de revestimento. O mesmo acontece no Brasil, mais de 95% das estradas foram pavimentadas com material asfáltico. (ARAÚJO, et al. 2016)

Embora os pavimentos rígidos tenham uma estimativa de vida útil superior à dos pavimentos flexíveis e garantam a resistência exigida pelo uso, no Brasil, opta-se, em larga escala, pela construção de rodovias utilizando-se o pavimento flexível.

As misturas asfálticas comumente utilizadas no Brasil são as produzidas à quente e à frio, sendo priorizado o uso de misturas asfálticas à quente devido a sua maior resistência a carregamentos elevados, já as misturas à frio são restritas a uso em rodovias que possuem baixo volume de tráfego.

Segundo Sales (2015) a temperatura influencia diretamente na qualidade do ligante asfáltico, visto que, quando este é exposto a elevadas temperaturas, libera voláteis e oxida, resultando no aumento do surgimento de fissuras, acelerando o efeito de envelhecimento do asfalto. Tal envelhecimento aumenta sua rigidez e diminui sua ductilidade e elasticidade, ou seja, ao mesmo tempo que fica mais resistente às deformações permanentes, também se torna mais frágil e susceptível ao trincamento. Por esse motivo, as temperaturas de usinagem e aplicação devem ser as mais baixas possíveis, visando reduzir o efeito de envelhecimento para melhorar a qualidade do ligante asfáltico.

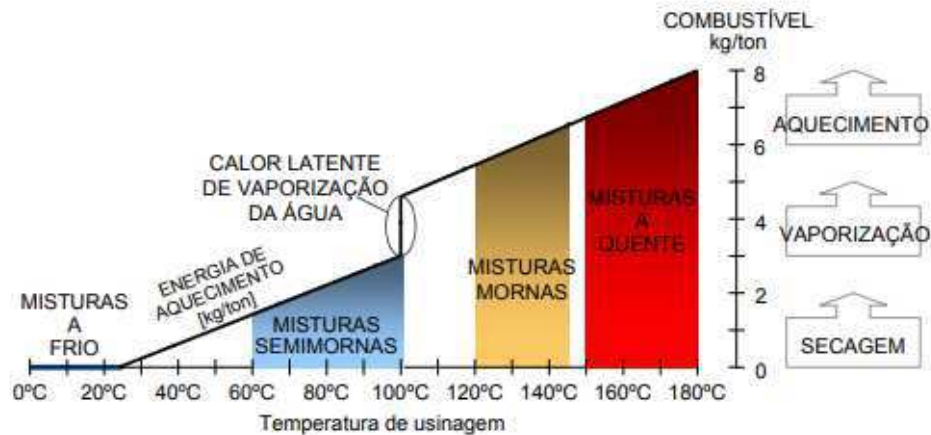
Devido aos reflexos negativos decorrentes das elevadas temperaturas, tanto em questões ambientais como de trabalho, começou-se a estudar novas alternativas para solucionar tal problemática, surgindo as Misturas Asfálticas Mornas (MAM), visando reduzir as temperaturas de usinagem e compactação em relação as convencionais.

Esse tipo de tecnologia surgiu na Europa (Chowdhury & Button, 2008) no ano de 1997, em consequência da imposição de uma gama de restrições relacionadas as emissões de gases

poluentes. Com isso, surgiu a necessidade de idealizar novas técnicas a fim de reduzir os impactos ambientais causados pelas atividades e materiais da construção civil.

A Figura 1 apresenta a classificação das misturas asfálticas de acordo com as temperaturas de usinagem, além da indicação do consumo de combustível aproximado para cada tipo de mistura. Motta (2011) menciona que é interessante notar que os processos de secagem e vaporização da água demandam grande quantidade energética para serem efetuados.

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



Fonte: Motta (2011)

3.1. MISTURAS ASFÁLTICAS À QUENTE

As misturas asfálticas à quente são utilizadas como revestimento de rodovias por possuírem boa resistência. Estas geralmente apresentam disposição de partículas com granulometria bem graduada, além de quantidade ideal de ligante asfáltico. (BERNUCCI et al., 2008).

A produção de misturas asfálticas à quente ocorre com temperaturas entre 150°C e 180°C para garantir a estabilidade e durabilidade ao pavimento, necessitando então da queima e alto consumo de combustíveis durante sua usinagem. Além disso, é responsável por emissão de gases agravadores do efeito estufa, acarretando em prejuízos no quesito aquecimento global. Além de gerar os chamados fumos de asfalto, prejudiciais aos trabalhadores em contato com o mesmo.

Quando as misturas asfálticas atingem temperaturas elevadas são emitidos vapores que ao resfriarem se condensam na forma de fumos de asfalto, os quais são compostos por elementos poluentes, como os Compostos Orgânicos Voláteis (VOCs) que se vaporizam facilmente a pressão atmosférica, sendo considerados tóxicos e carcinogênicos.

A oxidação decorrente do envelhecimento precoce do asfalto é a principal razão para a deterioração em estradas construídas com asfalto usinado à quente, pois a oxidação torna o asfalto quebradiço e, conseqüentemente, mais susceptível a fissuras superficiais, o que resulta na redução da sua vida útil, bem como, na qualidade de condução dos pavimentos asfálticos. (ZHANG et al., 2011 apud DUARTE, 2018)

3.2. MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS

Em meio as problemáticas ambientais, econômicas e humanas causadas pelas altas temperaturas das misturas asfálticas usinadas a quente, surgiram as Misturas Asfálticas Mornas, como alternativa para reduzir as temperaturas de usinagem e compactação, desde que assegurem a manutenção das propriedades indispensáveis das misturas asfálticas. Na Figura 2 pode-se observar a diferença visual em relação a emissão de fumos, em caso de aplicação de Misturas Usinadas à Quente e Misturas Asfálticas Mornas.

De acordo com Budny (2012) as misturas asfálticas mornas, produzidas utilizando temperaturas de usinagem e compactação na faixa de 100°C e 145°C, com o uso de aditivos como espumado e zeólitas, possibilitam melhoras nas condições de trabalho e no meio ambiente, visto que, reduzem os impactos ambientais se comparado as misturas usinadas à quente, além disso, resulta em benefícios em termos de qualidade, trabalhabilidade e durabilidade.

A tecnologia de Misturas Asfálticas Mornas se apresenta como um produto alternativo, por ser ecologicamente menos agressiva quando comparado com outras tecnologias, principalmente as misturas à quente. (KOENDERS et al, 2000)

Uma das principais vantagens em relação ao uso de misturas mornas, em substituição as misturas usinadas à quente, é sua reduzida taxa de resfriamento, apresentando assim um maior potencial de tempo de estocagem e de transporte, reduzindo o envelhecimento por oxidação do ligante asfáltico, tornando-o mais flexível e resistente a trincas por fadiga, além das melhorias ao ambiente de trabalho deixando os operários menos expostos às emissões de gases.

Figura 2 - Diferença durante a aplicação de Misturas a quente e Misturas Mornas



Fonte: Motta, et al. (2013)

3.2.1. Histórico

Filho (2013) especificou, cronologicamente, os acontecimentos mais relevantes do quesito Misturas Asfálticas Mornas, estando dispostos da seguinte forma:

1956 – O professor Csanvi, da Universidade do Iowa, analisou o potencial da espuma de betume, resultante da introdução de vapor de água no betume quente, como ligante para solos (CHOWDHURY e BUTTON, 2008);

1968 – Na Austrália, a empresa Mobil Oil, detentora da patente da descoberta de Csanyi, otimizou o processo de produção do betume-espuma, injetando água fria no lugar do vapor d'água (KRISTJANSDOTTIR et al., 2007);

1977 – A empresa Chevron publicou o manual Bituminous Mix, que possui informações sobre a metodologia de dimensionamento, a formulação e a produção de misturas asfálticas estabilizadas 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 betuminosas (asfálticas) a frio, que possuem betume espuma como ligante, e as misturas betuminosas com elevado conteúdo de emulsão, observando que a eficiência energética atrelada as baixas emissões justificam a aceitação mundial deste tipo de mistura (CHOWDHURY e BUTTON, 2008);

1995 – A empresa Shell patenteou uma técnica que utiliza dois componentes, a qual resultou anos mais tarde no desenvolvimento da tecnologia WAM-Foam (HARRISON e CHRISTODULAKI, 2000 apud CHOWDHURY e BUTTON, 2008);

1995 – Na Alemanha, foram executadas as primeiras rodovias com revestimento composto por mistura morna, utilizando um zeólito sintético (Aspha-Min®) como aditivo. Esse processo se repetiu na Noruega e na Dinamarca (PROWELL e HURLEY, 2007);

1996 – A União Européia iniciou estudos visando cumprir as metas estabelecidas pelo Protocolo de Kyoto, e o Ministério do Trabalho e das Relações Sociais alemão estabelece limites de exposição para os trabalhadores expostos a fumos de asfalto (MOTTA, 2011);

1997 – Iniciou a comercialização do aditivo Sasobit® na Europa, pela empresa Sasol Wax International AG (CHOWDHURY e BUTTON, 2008). Na Alemanha, começou o programa Low Temperature Asphalt, com o objetivo de investigar métodos para produção de misturas asfálticas à temperaturas inferiores as convencionalmente produzidas a quente (BARTHEL et al., 2004);

1999 – Jenkins et al. (1999) analisaram os benefícios de aquecer os agregados a temperaturas inferiores a 100°C, antes da aplicação da espuma de asfalto. Concluindo que o pré-aquecimento dos agregados eleva o recobrimento, a coesão da mistura, a resistência à tração e à compactação (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). No mesmo ano, avaliou-se o desempenho da mistura morna por testes, tanto laboratoriais como em campo, na Noruega, no Reino Unido e na Holanda, resultando em um artigo elaborado por Koenders et al. (2000);

2007 – Os Estados Unidos enviou uma equipe de especialistas para analisar as Misturas Mornas na Europa, incluindo representantes da AASHTO e da FHWA. Ceratti et al. (2007) elaboraram uma pesquisa 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;

2011 – Foi concluído o relatório NCHRP 691 (2011) com o objetivo de apresentar métodos e procedimentos a serem utilizados em misturas mornas. O mesmo desencadeou novas pesquisas,

de modo a difundir a utilização da redução de temperaturas na produção de misturas asfálticas. Motta (2011) elabora um estudo para 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.

3.2.1.1. *Estudos com Misturas Asfálticas Mornas no Brasil*

2006 – Foi publicado um dos primeiros trabalhos sobre misturas mornas no Brasil, intitulado por “Produção de Misturas Asfálticas Mornas pela Inserção de Zeólitas”, da dissertação de Mestrado de Souza Filho (2006), na Universidade Federal do Ceará (UFC);

2010 – Cavalcanti (2010) realizou um estudo envolvendo diversos aditivos em misturas asfálticas, incluindo os que possibilitam a redução de temperatura de produção e compactação, onde avaliou o efeito destes aditivos na vida de fadiga e na resistência à deformação permanente das misturas asfálticas;

2013 – Filho (2013) realizou estudo para verificar a influência da redução das temperaturas de usinagem e compactação no comportamento mecânico das misturas asfálticas mornas;

2015 – Merighi (2015) analisou o comportamento de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimento através da adição de borracha moída de pneu;

2015 – Mocelin (2015), estudou a influência do uso de aditivo surfactante na trabalhabilidade de misturas asfálticas mornas;

2015 – Feitosa (2015) avaliou o uso da cera de carnaúba como aditivo 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;

2017 – Luz (2017) reduziu as temperaturas de usinagem e compactação em 10°C e 20°C em relação as 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 as 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;

3.2.2. Vantagens

Budny (2012) citou como vantagens devido ao uso das Misturas Asfálticas Mornas, os seguintes aspectos:

- Redução no envelhecimento do ligante asfáltico por oxidação – as temperaturas de usinagem e compactação mais baixas reduzem a perda de componentes nobres do ligante (como os maltenos) reduzindo, conseqüentemente, o risco de oxidação do ligante e retarda o processo de fissuramento, ou seja, reduz o efeito de envelhecimento do mesmo;
- Melhoria na trabalhabilidade da mistura asfáltica e facilidade da compactação;
- Redução do consumo de combustível da usina em até 30% - decorrente da diminuição do consumo energético necessário para o processo de produção da mistura;
- Diminuição considerável da emissão de gases – a menor quantidade de combustível queimado para a produção das misturas resulta na melhoria da qualidade do ar durante a produção e aplicação da mistura asfáltica;
- Melhoria nas condições de trabalho – Com a diminuição das temperaturas de usinagem e compactação, a geração dos fumos de asfalto também diminui, bem como os odores, reduzindo a exposição dos trabalhadores aos mesmos;
- Possibilidade de aplicação em regiões mais frias;
- Aumento na distância de transporte de mistura asfáltica, além de remendos e aplicações de camadas mais delgadas com melhor qualidade, devido ao menor potencial de resfriamento – decorrente da menor taxa de esfriamento e conseqüente menor gradiente térmico;

- Abertura ao tráfego mais rápida sobre a mistura asfáltica recém compactada – devido ao menor tempo de resfriamento da mesma;
- Possibilidade de utilização de maior volume de material de fresagem quando se usa em reciclagem – as temperaturas das misturas mornas proporcionam menor possibilidade de oxidação do asfalto contido no fresado.

De acordo com D'Angelo (2008) apud Moraes (2018) as misturas mornas proporcionam a redução da emissão de CO₂ e a diminuição no consumo de energia. Representando uma redução entre 30% e 40% da quantidade de CO₂ e SO₂, 50% da quantidade de compostos orgânicos voláteis (VOC's), entre 10% e 30% de CO e entre 60% e 70% de NO, NO₂ e NO₃. Além de redução entre 30% e 50% de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs).

Com isso, pode-se perceber que a utilização desse tipo de mistura resulta em vantagens em diversos âmbitos, desde o ambiente de trabalho, onde os trabalhadores vão estar menos expostos aos fumos de asfalto, ou seja, menos propensos a riscos cancerígenos, até o quesito ambiental, com a diminuição de emissão dos gases poluentes. Além disso, tem o fator econômico, visto que, a redução do combustível gasto acarreta em um menor consumo energético.

3.2.3. Desvantagens

Embora as vantagens relacionadas ao uso de MAMs sejam significativas, é necessário a análise das possíveis desvantagens do uso das mesmas. Dentre elas, tem-se:

- Possibilidade de trincamento precoce: O uso de temperaturas inferiores pode fazer com que o agregado não expulse a água de sua estrutura completamente, prejudicando o potencial adesivo do ligante na superfície do agregado.
- Custos: É necessária uma avaliação de custos para verificação da viabilidade econômica do uso de MAMs. Visto que, não necessariamente a redução no consumo de energia vai compensar, financeiramente, o valor empregado no aditivo e na tecnologia escolhida.
- Normas: Atualmente, não existem normas regulamentadoras de técnicas a serem utilizadas no processo, o que pode acarretar dificuldade em sua execução, bem como, na comparação entre estudos.

3.3. ADITIVOS UTILIZADOS PARA MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS

A obtenção de uma mistura asfáltica morna é resultado do uso de aditivos modificadores no ligante asfáltico puro. Técnicas de processamento e produtos de marca comercial registrada foram desenvolvidos para se obter a produção das misturas asfálticas mornas, como o uso de zeólitas, naturais ou sintéticas, parafinas, ceras e produtos orgânicos. (BUDNY, et al., 2012). Exemplos de ceras naturais que podem ser estudadas são as ceras de abelha e as ceras de carnaúba (LEITE et al., 2011).

As misturas asfálticas mornas foram desenvolvidas na Europa e as ceras foram um dos primeiros aditivos utilizados para sua obtenção. Introduziu-se os aditivos orgânicos objetivando reduzir a viscosidade do ligante, pois quando estes são submetidos a temperaturas elevadas acarretam na redução da viscosidade do ligante asfáltico. (BONAQUIST, 2011 apud MORAES, 2018).

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

Trabalhos recentes realizados na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) têm mostrado o potencial do uso de aditivos na produção de misturas mornas. Silva (2016) ao trabalhar com quatro aditivos (CCBit, cera de carnaúba, óleo de girassol e óleo de moringa) na busca de novas alternativas de modificadores de misturas asfálticas, observou que todos os aditivos obtiveram êxito em reduzir a viscosidade do ligante puro, implicando na redução de sua temperatura de compactação e usinagem. Segundo o autor, a durabilidade de uma mistura asfáltica pode ser definida como a sua habilidade em manter as propriedades reológicas, coesão e a adesão ao longo do tempo de uso. Entre os principais fatores que afetam a durabilidade de um revestimento asfáltico, estão os endurecimentos oxidativo, evaporativo e exsudativo.

Moraes (2018) utilizou em sua pesquisa a cera de carnaúba como aditivo modificador do CAP puro, visando reduzir as temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas, obtendo como resultado uma redução de aproximadamente 6% nas temperaturas e os demais resultados analisados indicaram a mistura estando dentro dos parâmetros especificados para uso na pavimentação.

A adição dos aditivos orgânicos, pode ser realizada pela prévia introdução no ligante, bem como, durante a usinagem, reduzindo a viscosidade do ligante asfáltico e, conseqüentemente, as temperaturas de usinagem e compactação. (CERATTI et al., 2015).

3.3.1. Aditivos orgânicos

3.3.1.1. Cera de abelha

3.3.1.1.1. Histórico e produção

A cera de abelha, devido a sua propriedade de oxidação lenta e conseqüente longa vida útil, possui um antigo histórico de utilização, tendo resquícios de blocos de cera inalterados em túmulos egípcios e em navios naufragados, uma vez que os antigos egípcios utilizavam a cera em processo de mumificação. Em alguns países, o produto já foi usado como forma de pagamento de tributos, taxas e multas.

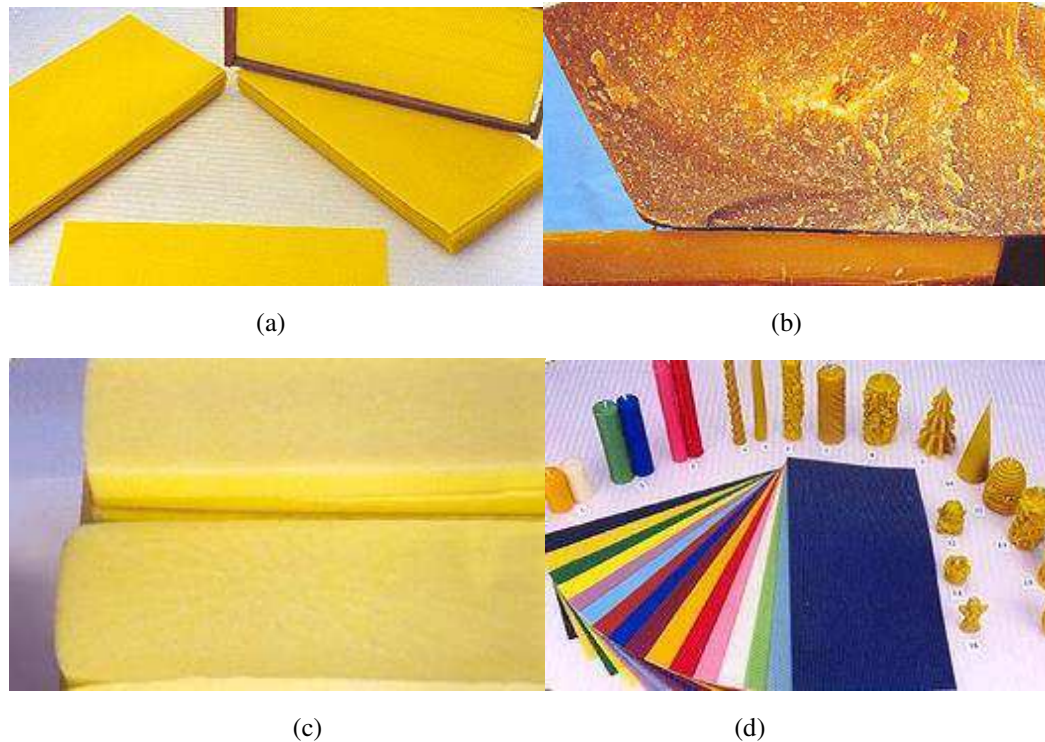
O início da produção de cera no Brasil ocorreu a partir do ano de 1839, de acordo com (ZORAVO, 2007 apud LIRA, 2011), que foi quando as abelhas da espécie *Apis mellifera* foram introduzidas no país, pelo Padre Antônio Pinto Carneiro, com a devida autorização de D. Pedro II (Decreto nº 72 de 12 de junho de 1839), com o intuito de obter cera para manufatura de velas para a liturgia da igreja Católica. Uma das primeiras famílias a trabalhar com o beneficiamento da cera de abelha foi a família Zovaro, iniciando suas atividades em 1946.

A produção da cera, é feita por abelhas com idade entre 12 e 18 dias, período em que são capazes de construir a colmeia com a própria cera produzida. A produção é resultado da secreção de oito glândulas cerígenas, que estão localizadas no abdômen das abelhas. Calcula-se que as abelhas precisam consumir 6kg de mel para produzir 1kg de cera e que, no geral, a produção de cera equivale a 2% da produção de mel. (SEBRAE, 2015)

3.3.1.1.2. Tipos de cera de abelha

A cera de abelha possui diferentes formas de apresentação, com usos específicos para cada tipo. Pode ser encontrada na forma de cera alveolada, utilizada na apicultura, cera branqueada, utilizada na indústria de cosméticos, colorida, para fabricação de velas e artesanato, bem como, a cera bruta, que possui usos diversos, estes tipos de cera estão ilustrados na Figura 3. Quanto ao nível de pureza é classificada em: filtrada, clarificada, branca em flocos e branca em pedaços, sendo a cera de abelha amarela a mais pura.

Figura 3 – (a) Cera Alveolada; (b) Cera Bruta; (c) Cera Branqueada; (d) Cera Colorida



Fonte: ZORAVO (2007)

3.3.1.1.3. Propriedades e benefícios

Historicamente, a cera de abelha tem larga utilização devido a suas propriedades, dentre elas, tem-se:

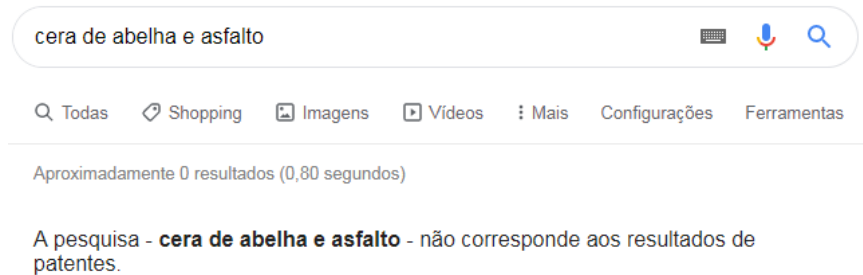
- Temperatura de fusão: Entre 63 °C e 64 °C, que possibilita a redução da viscosidade do ligante asfáltico quando submetido a elevadas temperaturas;
- Oxidação lenta: Em condições normais, possui essa característica e, por isso, tem longo tempo de duração, ocorrendo o contrário apenas em casos de ataques de traças de cera.
- Benefícios cosméticos: Pelo fato de conter vitamina A em sua composição, fornece hidratação e redução de oleosidade. Há muitas décadas, a cera de abelha, é utilizada para depilação corporal.

Segundo a Câmara Setorial da Apicultura (2018), a traça da cera ou verme da cera é uma infestação de larvas nos favos das colmeias das abelhas melíferas (*Apis mellifera*) causadas principalmente por dois gêneros de traças, que são a traça pequena da cera (*Achroia grisella*) e a traça grande da cera (*Galleria mellonella*).

3.3.1.1.4. Pesquisas existentes utilizando a cera de abelha como aditivo no asfalto

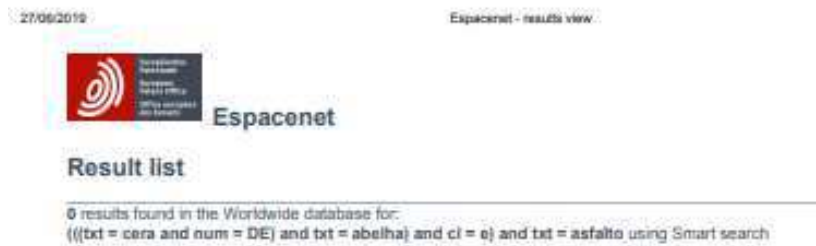
A pesquisa patentária, utilizando as palavras chaves: asfalto e cera de abelha, realizada nos portais Google Patents e Espacenet, não constou nenhum resultado, como mostrado nas Figuras 4 e 5.

Figura 4 - Pesquisa patentária no Google Patents



Fonte: Google

Figura 5 - Pesquisa patentária no Espacenet



Fonte: Google

3.3.1.2. Cera de Carnaúba

A cera de carnaúba é derivada da carnaubeira, uma planta originária do semi-árido nordestino, comumente encontrada em solos argilosos, apresentando-se resistente as secas severas, possuindo grande longevidade (aproximadamente 200 anos). Tem papel fundamental no bioma da caatinga, sendo responsável pela conservação do solo e pela proteção dos rios, evitando fenômenos como erosão e assoreamento dos rios (VARELA, 2011).

A carnaubeira foi descoberta em 1790, é cientificamente denominada de Copernícia Cerífera, e popularmente conhecida no Nordeste como “árvore da vida”, sendo uma planta que possibilita seu uso integral, desde as folhas até o tronco.

Na fibra da carnaubeira existe uma espécie de película que recobre a sua superfície, é a cera de carnaúba, que tem por objetivo o controle da perda excessiva de água para o meio ambiente (VARELA, 2011).

A cera de carnaúba é classificada em quatro tipos, intituladas do tipo 1 ao tipo 4, de acordo com sua diferença química, que se dá devido a forma de extração e industrialização, visando auxiliar no destino e uso adequado do produto, visto que, pode ser utilizado de diferentes formas na indústria e comércio.

Moraes (2018) realizou um estudo utilizou a cera de carnaúba como aditivo para redução das temperaturas de usinagem e compactação, obtendo resultados positivos, estando dentro dos parâmetros exigidos para uso em pavimentação, e obtendo uma redução nas temperaturas de usinagem e compactação de, aproximadamente, 6%.

3.3.1.3. *CCBit*

De acordo com Hutschenreuther (2010) o CCBit é um éster metílico de ácido graxo, fornecido na forma de pó, podendo estar apresentado na forma de grânulos ou flocos e possui cor amarela esbranquiçada, sem presença de odor. Seu ponto de liquefação é de aproximadamente 139°C e ponto de fulgor de 279°C. É insolúvel em água à 20°C e sua densidade varia entre 0,99 – 1,01 g/cm³ (23°C), tendo pH de 9 (10g diluídos em 100 ml de água) e viscosidade dinâmica de aproximadamente 15mPa.s (150°C).

Oliveira (2014) realizou um estudo utilizando o CCBit 113AD como aditivo para verificar o comportamento mecânico de misturas asfálticas, a partir disso, concluiu que a adição do teor de 2,5% do aditivo foi capaz de reduzir a temperatura de usinagem e compactação em até 40°C, sem apresentar perdas significativas nas características mecânicas, comparando-se com as misturas originais, e mantendo-se dentro dos parâmetros de uso especificados.

Sousa (2017) mostrou com o resultado de sua pesquisa, utilizando CCBit como aditivo modificador, 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. Analisou também, em termos mecânicos, através dos ensaios de RT, MR e Lottman, a mistura com temperatura de compactação 10°C e 20°C abaixo da temperatura ideal. O ensaio de Lottman foi o único que respondeu de forma negativa a redução da temperatura, o que pode ser resolvido através da adição de filler a mistura.

3.3.1.4. *Sasobit®*

O Sasobit® é um aditivo orgânico, produzido através de gás natural, considerado uma cera parafínica, a qual é desenvolvida a partir de um processo de Fischer-Tropsch (FT), patentado pela empresa alemã Sasol Wax GmbH. Ceras sintéticas resultam do processo de gaseificação do carvão na presença de um catalisador e apresentam ponto de fusão entre 60 e 120°C dependendo da sua massa molecular.

Tal aditivo pode ser incorporado as misturas asfálticas mornas. Segundo Feitosa (2015), a mistura do Sasobit® com o ligante asfáltico, acarreta na redução do seu ponto de fusão, o que permite que a compactação da mistura ocorra em temperaturas de, aproximadamente, 100°C.

3.3.1.5. Óleos vegetais

A utilização de óleos vegetais, como aditivos em misturas asfálticas, é uma alternativa para diminuir as temperaturas de usinagem e compactação, através da redução da viscosidade do ligante asfáltico. Existem diversas opções de óleos que podem ser utilizados com tal finalidade, já havendo estudos asfálticos com variados tipos, como: Óleo de canola, de girassol, de milho, de moringa, de canola.

Lucena et al. (2016) utilizaram o óleo de Moringa Oleífera Lam em diversos teores, com isso, observou-se um retardo no envelhecimento do CAP. Ainda nesse estudo, concluiu-se que o teor indicado de incorporação do óleo de Moringa Oleífera Lam, é entre 0,5% a 1%, intervalo em que se observou a redução das temperaturas de usinagem e compactação de, aproximadamente, 5°C, sem prejuízos no comportamento do ligante asfáltico.

Carvalho (2018) recorreu ao uso do óleo de girassol, para avaliar o comportamento das misturas asfálticas, utilizando os teores de 1%, 2% e 3% do aditivo, sendo o teor de 2% o que mostrou resultado mais satisfatório, visto que, proporcionou melhor desempenho mecânico e volumétrico, de acordo com o previsto em norma, comparado aos demais teores.

Guerra (2019) avaliou os efeitos do uso de óleo de canola na redução das temperaturas de usinagem e compactação e nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas, utilizando os teores de 1%, 2% e 3% do aditivo estudado. Em termos de redução de temperatura, o teor de 3% foi o mais satisfatório, visto que, as temperaturas reduziram linearmente com o aumento do teor, obtendo-se para este, uma diminuição de 5,2°C, o que não foi suficiente para uma classificação como mistura asfáltica morna, porém, foi benéfica no quesito economia de energia.

3.3.2. Aditivos surfactantes

Os aditivos surfactantes atuam diretamente na interface ligante/agregado reduzindo o atrito interno da mistura, possibilitando melhor poder de recobrimento, adesividade e trabalhabilidade do ligante asfáltico a menores temperaturas.

De acordo com Silva (2016), os aditivos surfactantes podem ser introduzidos no ligante tanto antes como durante o processo de usinagem, possibilitando uma redução de até 40°C.

3.3.3. *Asfalto espumado*

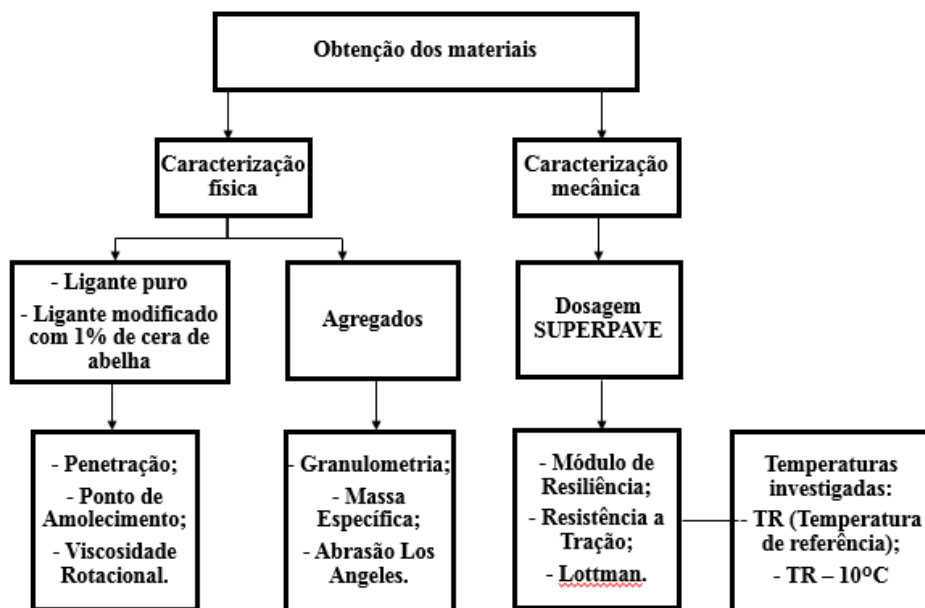
O asfalto espumado, também intitulado de espuma asfáltica ou espuma de asfalto, é uma tecnologia resultante da mistura do ligante asfáltico com água, sob determinadas condições de temperatura e pressão. Com objetivo de proporcionar uma reação térmica entre a água em sua temperatura ambiente e o ligante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

4. METODOLOGIA

Neste tópico estão descritos os materiais utilizados para a realização da 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.

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). O Fluxograma apresentado na Figura 6, descreve a metodologia abordada.

Figura 6 - Fluxograma



Fonte: Autoria própria

4.1. MATERIAIS UTILIZADOS

4.1.1. Ligante asfáltico

Utilizou-se na pesquisa o ligante classificado como CAP 50/70, por ser comumente utilizado na região Nordeste. A caracterização física do mesmo está disposta na Tabela 1, na qual observa-se que o CAP se encontra dentro de todos os limites especificados por norma.

A análise das propriedades físicas do ligante é imprescindível, visto que, indica a possibilidade ou não de seu uso na pavimentação. Por meio dos ensaios realizados, indicados

na Tabela 1, tem-se como resultados o ponto de amolecimento do ligante, que representa uma temperatura equivalente do ponto de fusão do asfalto, bem como, o valor da penetração do ligante que é utilizado para classificação do CAP quanto a dureza. Além disso, obteve-se o resultado de viscosidade rotacional, que é considerado uma medida de consistência do ligante e permite o cálculo das temperaturas de usinagem e compactação.

Tabela 1 - Caracterização do CAP puro

Característica	CAP PURO	Limite inferior	Limite superior	Norma
Penetração (0,1mm)	57,3	50	70	NBR-6576
Ponto de Amolecimento (°C)	48,5	46	-	NBR-6560
Ponto de Fulgor (°C)	250,0	235	-	NBR-11341
Viscosidade Rotacional 135°C (cP)	371,3	274	-	NBR-15184
Viscosidade Rotacional 150°C (cP)	185,0	112	-	NBR-15184
Viscosidade Rotacional 177°C (cP)	69,25	57	285	NBR-15184

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 fíler, estando todos apresentados na Figura 7.

Figura 7 - Agregados



Fonte: Autoria própria

4.1.3. Cera de abelha

A cera de abelha, aditivo utilizado nesta pesquisa, foi disponibilizada pela empresa Apiário Nutrimel, no formato de bloco, como mostrado na Figura 8.

Silva (2016) indicou em sua pesquisa, com cera de carnaúba, que a cera deve ser moída com auxílio da mão de gral, passando posteriormente na peneira de número 40 (0,42mm), com

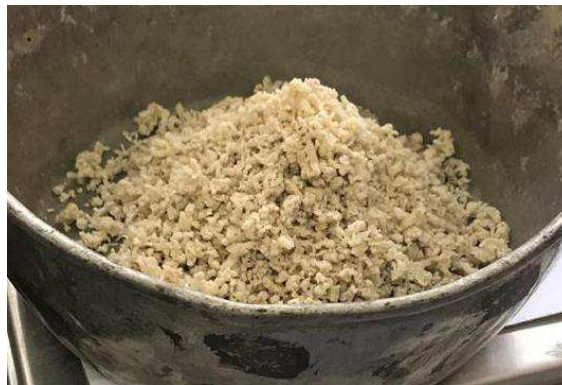
o objetivo de facilitar a fusão do cimento asfáltico de petróleo com a cera. Porém, nessa pesquisa não foi possível utilizar a mesma metodologia, visto que, a consistência da cera de abelha é diferente da cera de carnaúba, sendo assim, utilizou-se a peneira de número 8 para possível realização da mistura. A Figura 9 mostra a cera após o processo de peneiramento.

Figura 8 - Cera de abelha



Fonte: Autoria própria

Figura 9 - Cera e abelha peneirada



Fonte: Autoria própria

4.2. PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DOS MATERIAIS

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia dos Pavimentos e Geotécnica (LEP) do Bloco CT – UAEC/UFCG.

4.2.1. Agregados

Os ensaios realizados para a caracterização dos agregados estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Ensaios para caracterização física dos agregados e normas utilizadas

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

Fonte: Autoria própria

4.2.1.1. Granulometria

O ensaio de granulometria por peneiramento possibilita a determinação da distribuição granulométrica do agregado, com representação através 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.

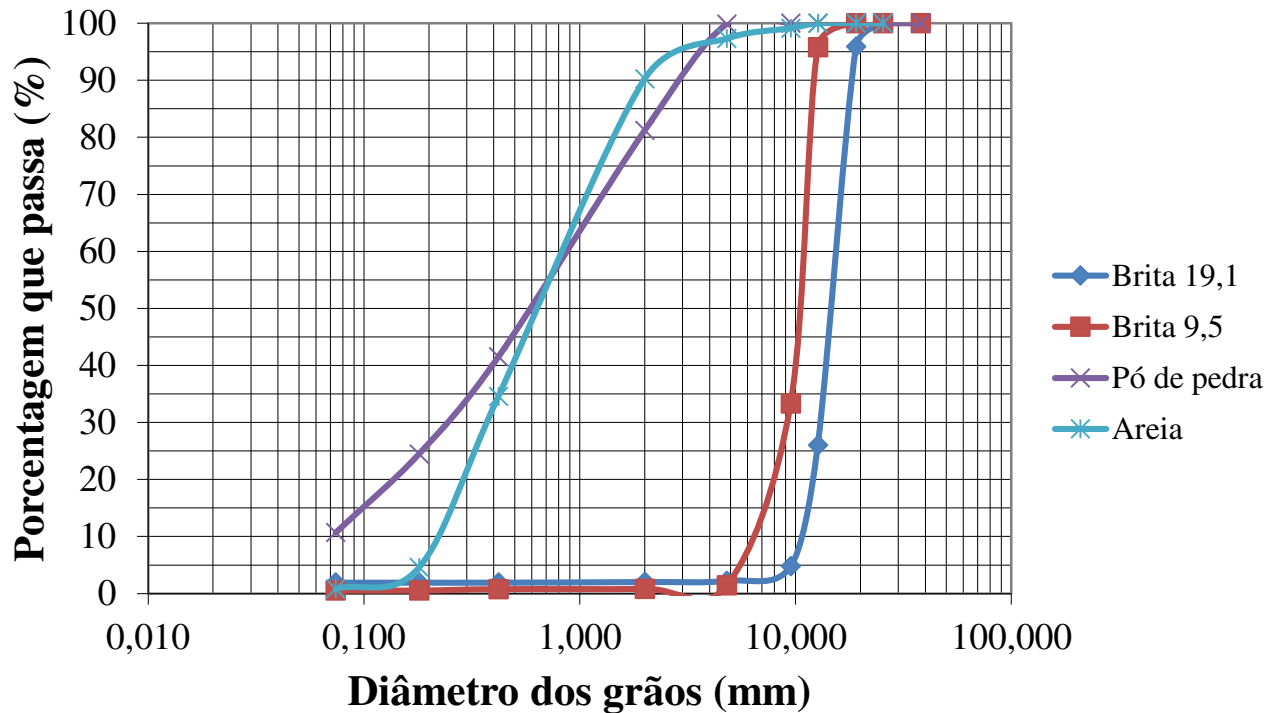
Na Tabela 3 e na Figura 10 estão apresentadas a quantidade passante dos agregados e suas curvas granulométricas, respectivamente.

Tabela 3 - Quantidade passante acumulada (%)

Peneira	Diâmetro (mm)	Brita 19 mm	Brita 9,5 mm	Areia	Pó de pedra
1 1/2"	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,1	95,90	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,7	26,03	95,82	100,00	100,00
3/8"	9,5	4,78	33,35	99,13	100,00
N^o 4	4,8	2,25	1,44	97,30	99,85
N^o 10	2	2,04	0,82	90,23	81,18
N^o 40	0,42	1,93	0,77	34,58	41,52
N^o 80	0,18	1,93	0,52	4,57	24,48
N^o 200	0,074	1,92	0,52	0,85	10,69

Fonte: Autoria própria

Figura 10 - Curva granulométrica dos agregados



Fonte: Autoria própria

4.2.1.2. Resultados do ensaio de massa específica (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 4, apresentando-se dentro do especificado para uso no estado da Paraíba.

Tabela 4 - Resultados do ensaio de massa específica

Agregados	Massa Específica Real (g/cm ³)	Massa Específica Aparente (g/cm ³)	Absorção (%)
Brita 19mm	2,775	2,799	0,47
Brita 9,5mm	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. Resultados do ensaio de Abrasão “Los Angeles”

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

Tabela 5 - Resultados do ensaio Abrasão Los Angeles

Agregados	Abrasão "Los Angeles" (%)	Limite superior (%)
Brita 9,5mm	24,7	50
Brita 19mm	18,57	50

Fonte: Autoria própria

4.2.1.4. Resultados do ensaio de Equivalente Areia

Os resultados referentes ao ensaio de equivalente areia tanto para o pó de pedra, como para a areia, estão apresentados na Tabela 6. 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 6 - Resultados do ensaio de Equivalente Areia

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

Fonte: Autoria própria

4.2.2. 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 1%, tomando-se como referência os estudos realizados por Moraes (2018) e Silva (2016).

A mistura foi realizada por meio da incorporação da cera de abelha ao ligante, em um agitador mecânico (FISATOM, Modelo 722) (Figura 11), com as condições de temperatura e rotações controladas. Adotou-se como referência a metodologia utilizada na pesquisa de Silva (2016), empregando-se uma temperatura de 130°C durante 40 minutos a uma velocidade de 1015rpm, com adição lenta e fracionada do aditivo, durante os primeiros 20 minutos.

Após a realização da mistura, fez-se também todos os ensaios de propriedades físicas, indicados na Tabela 1, 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.

Figura 11 - Agitador mecânico

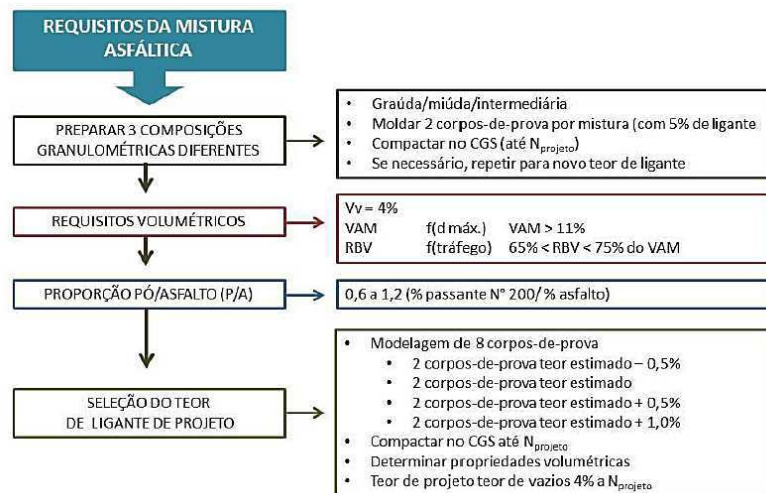


Fonte: Autoria própria

4.2.3. Dosagem SUPERPAVE

Realizou-se a dosagem SUPERPAVE, visando determinar o teor ótimo de ligante asfáltico para a mistura estudada na pesquisa. Para isso, seguiu-se o procedimento indicado no Fluxograma da Figura 12.

Figura 12 - Fluxograma de dosagem SUPERPAVE



Fonte: BERNUCCI et al. (2007)

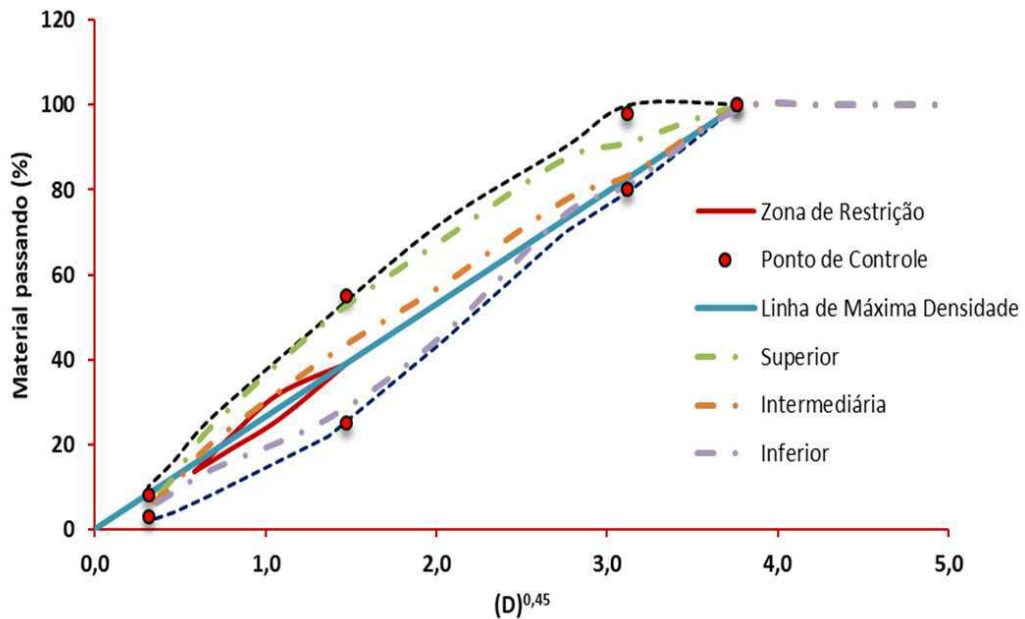
O primeiro passo corresponde a constituição da composição granulométrica, que neste caso é constituída de brita 19mm, brita 9,5mm, pó de pedra, areia e cal, enquadradas na faixa C do DNIT, levando em consideração os conceitos de Pontos de Controle e Zonas de Restrição. Após a realização da granulometria de todos os agregados, estipulou-se três composições granulométricas para serem testadas, denominadas curvas de Fuller, sendo uma inferior, uma intermediária e uma superior, como indicado na Figura 13, as proporções dos agregados demonstradas nas curvas estão indicadas na Tabela 7.

Tabela 7 - 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

Figura 13 - Curvas de Fuller - Composição granulométrica superior, intermediária e inferior



Fonte: Autoria própria

De posse das curvas, foram realizadas as moldagens de 18 corpos de prova, com o teor de ligante de 5%, sendo 6 corpos de prova destinados para cada curva granulométrica, destes dois são para o N_{inicial}, dois para o N_{projeto} e dois para N_{máximo}. A compactação dos corpos de prova ocorreu de acordo com a norma ASTM D 6925-09, que indica a compactação em diferente número de giros de acordo com o volume de tráfego considerado, nesta pesquisa,

considerou-se o tráfego Médio a Alto, com isso, utilizou-se $N_{inicial} = 8$ giros, $N_{projeto} = 100$ giros e $N_{máximo} = 160$ giros.

O $N_{inicial}$ e o $N_{máximo}$ são utilizados como parâmetro para avaliação da compactabilidade da mistura e com $N_{projeto}$ deve-se encontrar o volume de vazios igual a 4%, sendo usado para a determinação do teor de ligante da mistura. Além disso, analisou-se a densidade máxima medida (Gmm), determinada por meio do ensaio RICE TEST, seguindo a norma ASTM D 2041.

Com a realização da pesagem dos corpos de prova secos e submersos e pela medição dos diâmetros e altura média, calculou-se os volumes de vazios (Vv), os vazios no agregado mineral (VAM) e a massa específica máxima (Gmm), a partir desses parâmetros, foi possível escolher a curva a ser trabalhada. Tais parâmetros estão apresentados na Tabela 8, com isso, escolheu-se a curva inferior, em virtude do volume de vazios ser equivalente a 4%. Sendo assim, o teor de ligante escolhido para ser utilizado foi de 5% e a composição dos agregados os referentes a curva inferior.

Tabela 8 - Parâmetros volumétricos das misturas

CURVA	% LIGANTE	%Gmm			VAM (%)	Vv (%)
		Ninicial	Nprojeto	Nmáximo		
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

4.2.4. Propriedades mecânicas das misturas asfálticas

Nesta etapa, realizou-se a mistura do CAP modificado com os agregados graúdos e miúdos. Após a realização das misturas, moldaram-se doze corpos de prova para realização dos ensaios mecânicos, através da compactação por amassamento com o uso do compactador giratório. A compactação baseou-se na ASTM D 6925-09 com procedimento indicado na Figura 14 e os corpos de prova moldados estão apresentados na Figura 15.

Nesta pesquisa foram realizados os ensaios mecânicos de Módulo de Resiliência, Resistência a Tração e Lottman, 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 9.

Tabela 9 - Ensaio mecânicos e suas metodologias

ENSAIOS	METODOLOGIA
Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral	DNIT - ME 136/10
Módulo de Resiliência	NBR 16018/11 e ASTM D 4123-82
Dano por umidade induzida - Lottman Modificado	DNIT - ME 180/18

Fonte: Autoria própria

Figura 14 - Compactação dos corpos de prova a partir do SUPERPAVE



Fonte: Autoria própria

Figura 15 - Corpos de prova compactados



Fonte: Autoria própria

5. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados referentes aos experimentos realizados nessa pesquisa. Os resultados incluem a caracterização física do CAP 50/70, bem como, do CAP modificado com 1% de cera de abelha e a caracterização mecânica das misturas asfálticas com incorporação de do teor de 1% de cera de abelha, compactadas na temperatura encontrada através do ensaio de viscosidade rotacional e em uma temperatura inferior, com 10°C a menos do que a temperatura de referência, visando enquadrar a mistura em uma MAM.

5.1. CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE ASFÁLTICO PURO E MODIFICADO

5.1.1. Ensaio de Penetração

No gráfico da Figura 16 estão apresentados os resultados do ensaio de penetração tanto do CAP puro como das amostras de CAP com adição de 1% de cera de abelha.

Figura 16 - Resultados do ensaio de penetração (Antes e após RTFO)



Fonte: Autoria própria

O comportamento resultante demonstrou um aumento na penetração com o acréscimo da cera de abelha, tanto antes como após o envelhecimento.

De acordo com a norma do DNIT 095/2006 – EM a penetração retida mínima deve ser de 55%. Pela Tabela 10, observa-se que o resultado foi satisfatório tanto para o CAP puro como para o CAP modificado.

Tabela 10 - Penetração retida

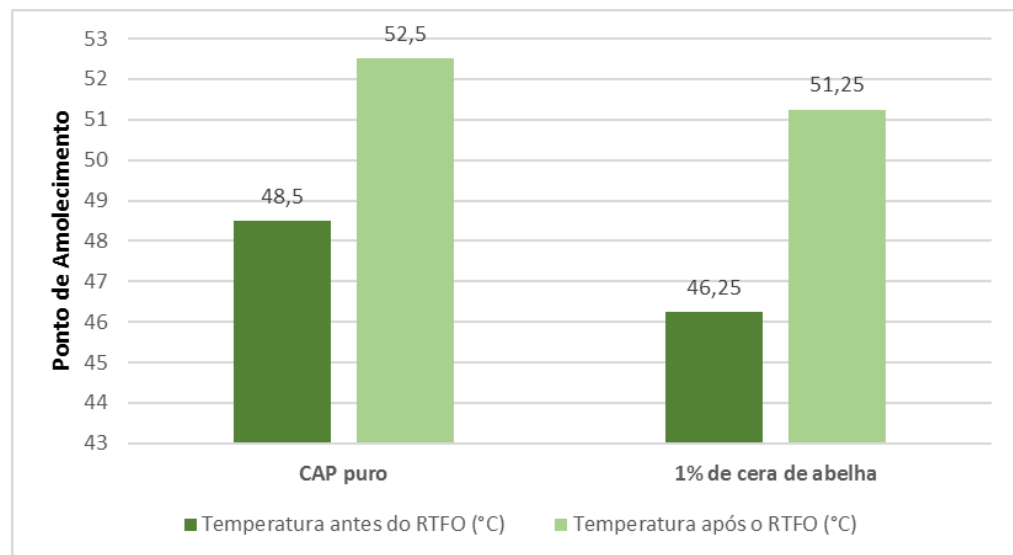
Amostra	CAP puro	1% de cera de abelha
Penetração retida mínima (%)	76,21	57,63

Fonte: Autoria própria

5.1.2. Ponto de Amolecimento

O gráfico da Figura 17 apresenta os resultados referentes ao ponto de amolecimento do ligante asfáltico, para o CAP puro e para o CAP com 1% de cera de abelha.

Figura 17 - Resultados do ensaio de Ponto de Amolecimento (Antes e após RTFO)



Fonte: Autoria própria

De acordo com as especificações do DNIT (2006), o ponto de amolecimento mínimo para o ligante asfáltico classificado como CAP 50/70 é de 46°C, observa-se então que o ligante asfáltico puro, bem como, o modificado se encontra dentro do limite estabelecido por norma.

A adição da cera de abelha no teor de 1% promoveu a redução da temperatura de ponto de amolecimento em relação ao CAP puro. Fato semelhante aconteceu em outras pesquisas que abordam a mesma vertente. Na pesquisa de Portugal (2017) foi utilizado como aditivo óleo de milho e soja, provocando a redução do ponto de amolecimento. O autor afirma que este comportamento pode comprometer o desempenho das misturas ao serem empregadas em campo, visto que, torna o ligante mais sensível ao aumento das temperaturas do pavimento. Silva (2016), por sua vez, introduziu teores de óleo de moringa e do óleo de girassol ao ligante estudado, obtendo também uma redução no ponto de amolecimento, em decorrência da adição dos óleos, afirmando que a redução da temperatura implica na perda de resistência do ligante,

porém, também reflete em um ganho de trabalhabilidade da mistura, resultado que pode ser satisfatório de acordo com a alteração desejada.

Tabela 11 - Aumento da temperatura após RTFO

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

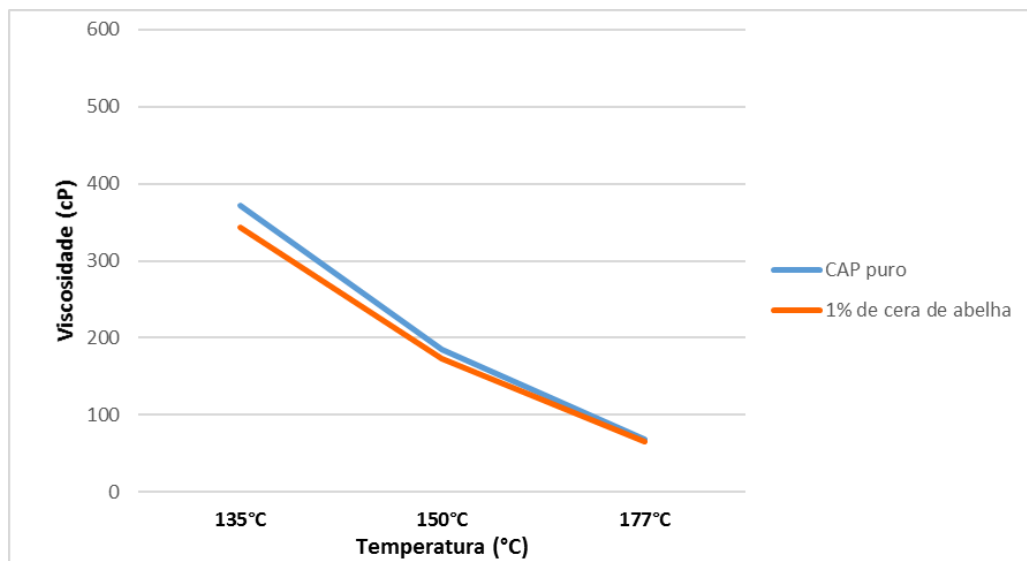
Fonte: Autoria própria

A norma do DNIT 095/2006 – EM, estabelece um limite de até 8°C de aumento de temperatura do ponto de amolecimento após RTFO. Observa-se, na Tabela 11, que tanto o CAP puro como o CAP modificado apresentaram-se dentro do especificado por norma.

5.1.3. Viscosidade Rotacional

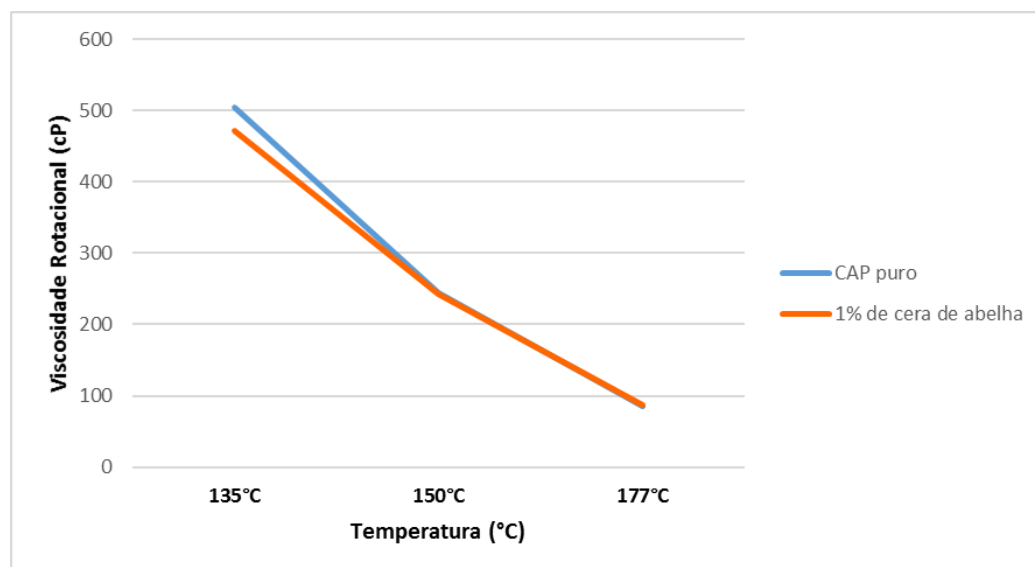
Os resultados do ensaio de viscosidade rotacional, com CAP puro e modificado com cera de abelha estão apresentados nos gráficos das Figuras 18 e 19, tanto antes como após o RTFO.

Figura 18 - Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional (Antes do RTFO)



Fonte: Autoria própria

Figura 19 - Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional (Após RTFO)



Fonte: Autoria própria

De acordo com os gráficos apresentados nas Figuras 18 e 19, observa-se que houve a redução da viscosidade decorrente da adição da cera ao ligante, tanto antes como após o RTFO.

Um dos objetivos da determinação da viscosidade é encontrar as temperaturas de usinagem e compactação do ligante asfáltico. Para determinação de tais temperaturas, utilizou-se o método tradicional regido pela ASTM D 2493 -16, que 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 conceito, gerou-se os gráficos, individualmente, tanto para o CAP puro como para o CAP modificado, com os devidos intervalos para viscosidade.

De posse dos gráficos, foi possível verificar os intervalos de temperatura para cada ligante estudado e, assim, determinar as respectivas temperaturas de usinagem e compactação, apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Temperaturas de Usinagem e Compactação

Amostra	Temperatura de Usinagem (°C)	Temperatura de Compactação (°C)
CAP puro	154	142
1% de cera de abelha	152	141

Fonte: Autoria própria

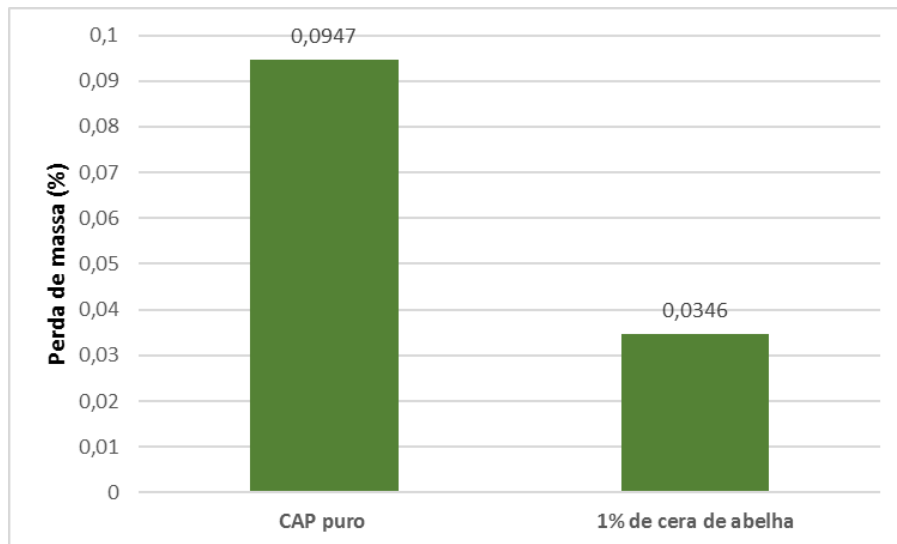
Na Tabela 12, verifica-se que houve uma diminuição nas temperaturas de Usinagem e Compactação em relação ao CAP puro, em função da adição do teor de 1% de cera utilizada.

Todos os valores encontrados para as temperaturas de usinagem e compactação são inferiores a 180°C, satisfazendo ao que estabelece a DNER 385/1999. Porém, mesmo com a redução nas temperaturas, a mistura não se enquadra nos parâmetros de uma mistura asfáltica morna. Por esse motivo, optou-se pela redução das temperaturas de usinagem e compactação em 10°C, visando enquadrar a mistura como uma MAM, realizando-se a análise das propriedades mecânicas da mistura.

5.1.4. Perda de Massa

A perda de massa determina a capacidade de envelhecimento do ligante. O gráfico da Figura 20 apresenta os resultados da perda de massa das misturas asfálticas.

Figura 20 - Perda de massa (Após RTFO)



Fonte: Autoria própria

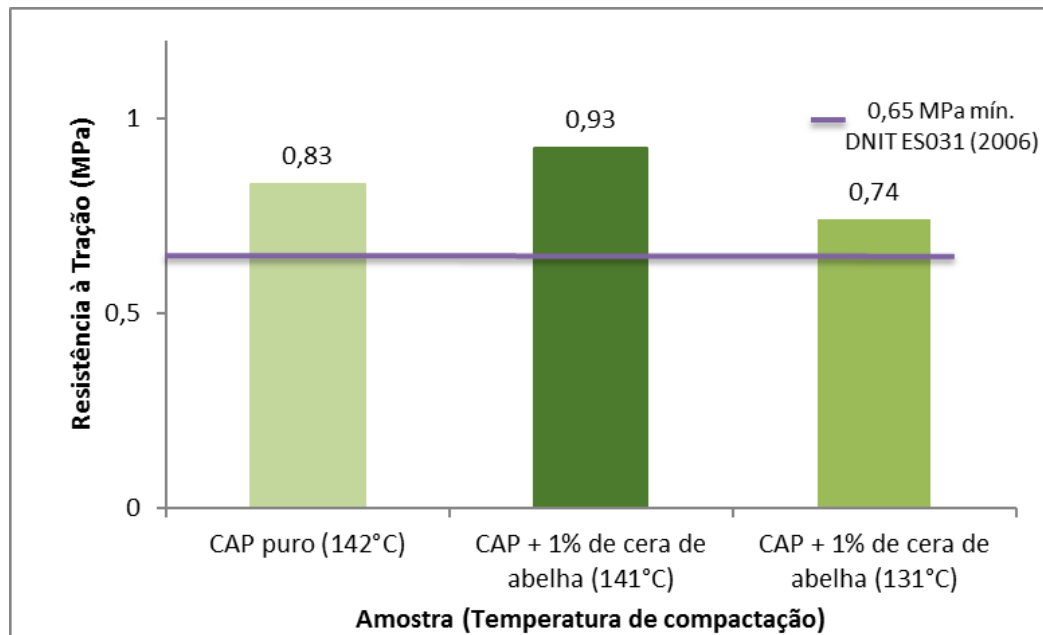
A norma do DNIT 095/2006, limita a perda de massa em até 0,5%, pelo gráfico da Figura 20 percebe-se que tanto o CAP puro como modificado estão dentro da tolerância de envelhecimento do material, sem interferir na qualidade do pavimento.

5.2. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

5.2.1. Resistência à Tração por compressão diametral

No gráfico da Figura 21 estão dispostos os resultados referentes ao ensaio de Resistência à Tração por compressão diametral para as amostras modificada com 1% de cera de abelha, tanto para a temperatura de compactação referência encontrada no ensaio de viscosidade, como para temperatura com 10°C a menos.

Figura 21 - Resultados do ensaio de RT



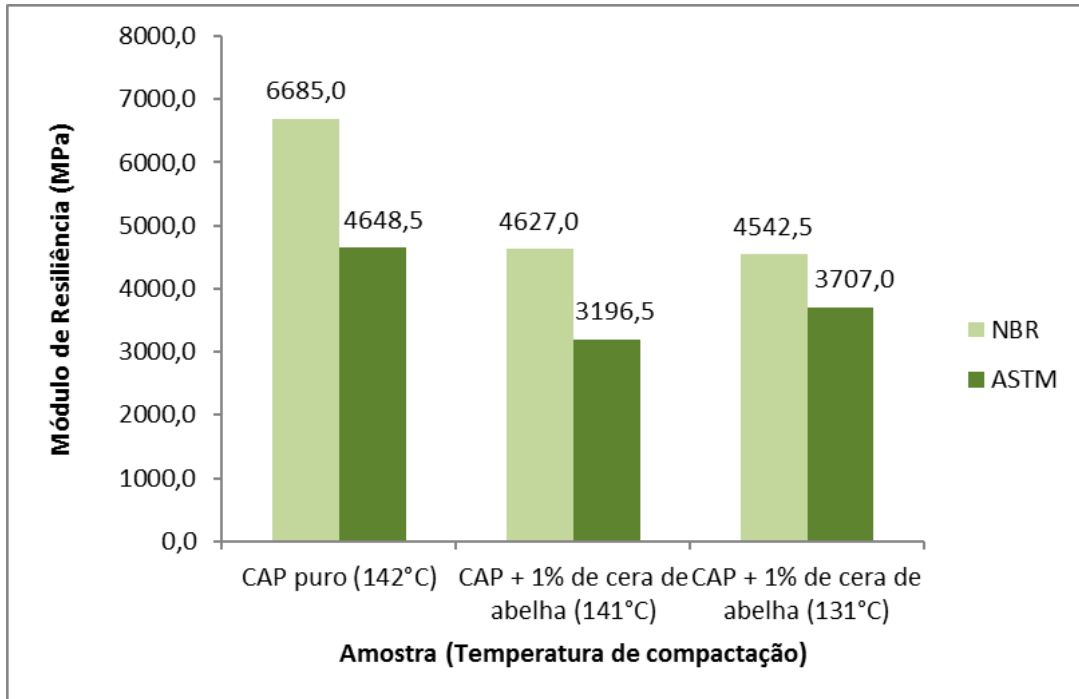
Fonte: Autoria própria

Segundo Motta (2009), a mudança na temperatura de moldagem pode acarretar em uma variação significativa de volume de vazios das misturas e, conseqüentemente, interferir no valor da RT. Analisando-se os resultados dispostos na Figura 21, percebe-se a adição do teor de 1% de cera de abelha provocou um aumento na resistência à tração e houve uma posterior redução decorrente da diminuição, em 10°C, da temperatura de compactação. Porém, mesmo com a diminuição, o valor encontrado indica que a mistura se encontra dentro do limite mínimo estabelecido pela norma do DNIT ES 031/2006 para misturas asfálticas destinadas a uso em camadas de rolamento, sendo assim, o resultado satisfatório.

5.2.2. Módulo de Resiliência

Na Figura 22 estão apresentados os resultados encontrados por meio do ensaio de MR, em dois corpos de prova para a temperatura padrão de 141°C e em dois corpos de prova para a temperatura de compactação de 131°C. O gráfico da Figura 22 ilustra o comportamento das médias encontradas pelos resultados do MR. Em ambas as representações se tem os valores obtidos tanto pela NBR 16018/2011 como pela ASTM D4123-82.

Figura 22 - Resultados do ensaio de MR



Fonte: Autoria própria

Observou-se nos resultados da Figura 22, observa-se que para o método da NBR houve uma brusca redução inicial no valor do MR devido a adição da cera de abelha e uma pequena redução, equivalente a 1,83% decorrente da diminuição em 10°C da temperatura. Para o ensaio baseado na ASTM verifica-se uma redução novamente no resultado do MR com a adição da cera de abelha e um aumento considerável após a redução da temperatura, representando um acréscimo de 15,97%.

Com isso, para o resultado da ASTM, observa-se um ganho no valor do MR, indicando um aumento na rigidez decorrente da redução da temperatura de compactação.

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.

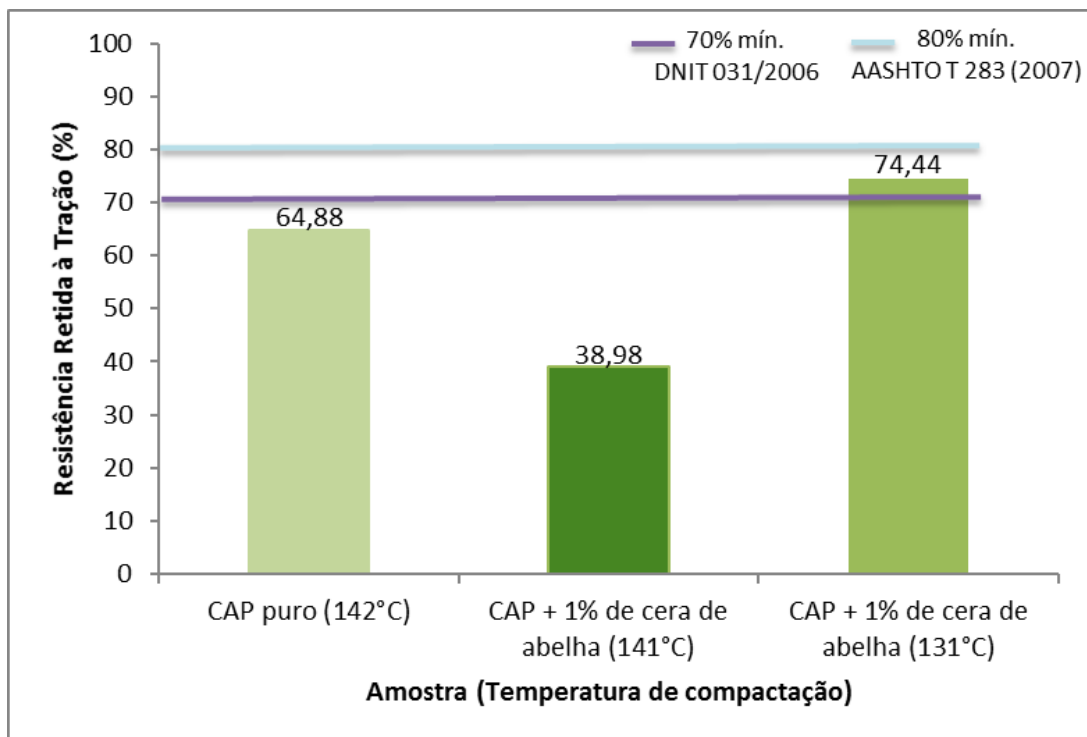
A pesquisa de Luz, et al. (2018) indicou um resultado semelhante ao encontrado na presente pesquisa, na qual estudou as propriedades mecânicas de misturas modificadas com adição de óleo de milho e óleo de soja. Sendo possível observar que os maiores valores encontrados para o MR foram para a temperatura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

Segundo Silva (2011) a análise do Módulo de Resiliência não pode ser feita de forma direta, visto que, está relacionado a rigidez da mistura. Sendo assim, valores maiores ou menores podem ser aceitos, dependendo da estrutura do pavimento, devendo ser considerada a compatibilidade de deformações entre as camadas que o constituem, principalmente a camada de base.

5.2.3. Ensaio de Resistência ao Dano por Umidade Induzida - Lottman Modificado

O gráfico da Figura 23 apresenta os resultados do ensaio de Lottman modificado, com o uso da temperatura encontrada por meio do ensaio de viscosidade rotacional, sendo 141°C, e da temperatura com 10°C inferior a esta, equivalente a 131°C.

Figura 23- Resultados do ensaio de Lottman modificado



Fonte: Autoria própria

A norma do DNIT 031/2006 preconiza que os valores de resistência retida à tração sejam superiores a 70%. Já a norma AASHTO T 283 (2007) considera 80% como parâmetro mínimo. Através dos resultados mostrados na Figura 23, observa-se que a mistura utilizando o ligante puro e a mistura compactada com a temperatura referenciada pelo ensaio de viscosidade não atingiram aos requisitos estabelecidos, estando com um resultado inferior ao mínimo estipulado pelas duas normas e com uma diferença considerável. Para a mistura compactada a uma temperatura inferior, com 10°C a menos, o resultado apresentou-se dentro de outra perspectiva, estando acima do valor preconizado pela norma do DNIT 031/2006, e abaixo do

estipulado pela AASHTO T 283 (2007), porém estando apenas 6,95% abaixo do estabelecido, o que pode ser resolvido com adição de cal a mistura, visando aumentar a resistência da mesma.

Pela Figura 23, comparando-se as duas misturas analisada neste ensaio, pode-se perceber que a variação na temperatura de compactação provocou um aumento de 47,64% na resistência retida à tração, sendo assim, a redução da temperatura de compactação refletiu positivamente nesse quesito.

Na pesquisa realizada por Moraes (2018), a adição da cera de carnaúba provocou um resultado semelhante, ocasionando um aumento expressivo da resistência retida à tração. Sendo o teor de 2% o que possuiu maior aumento, de aproximadamente 43%, atingindo um valor de resistência retida à tração de 91,4%.

6. CONCLUSÕES

Diante do exposto, conclui-se que a adição do teor de 1% de cera de abelha ao ligante asfáltico proporcionou resultados positivos, no que diz respeito as propriedades do ligante, verificando-se que tanto o CAP puro como o CAP modificado atenderam aos critérios estabelecidos para uso na pavimentação. Além dos resultados das propriedades físicas do ligante terem sido favoráveis, a adição da cera de abelha acarretou em uma redução nas temperaturas de usinagem e compactação em 2°C e 1°C, respectivamente.

Avaliando-se as propriedades mecânicas da mistura, a redução de 10°C nas temperaturas de usinagem compactação em relação a temperatura de referência encontrada através do ensaio de viscosidade rotacional, também apresentou resultados satisfatórios, proporcionando, em alguns aspectos, características mecânicas superiores aos encontrados utilizando a temperatura de referência.

Com isso, para o objetivo da pesquisa, a adição da cera de abelha demonstrou resultados satisfatórios nas propriedades do ligante asfáltico e a redução das temperaturas de usinagem e compactação mostrou-se benéfica, podendo ser considerada uma alternativa para melhoria nas propriedades mecânicas da mistura.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T 283/2007. **Standard Method of Test for Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture-Induced Damage**. Washington, 2007.
- 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 D2493**: Standard Practice for Viscosity-Temperature Chart for Asphalt Binders, West Conshohocken, PA, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 4123**: Standard Method of Indirect Tension Test For Resilient Modulus Of Bituminous Mixtures, EUA, 1982.
- 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.
- ARAÚJO, M. A; et. al. **Análise Comparativa de Métodos de Pavimentação – Pavimento Rígido (concreto) x Flexível (asfalto)**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo Do Conhecimento. Ano 01, Edição 11, Vol. 10, p. 187-196, Novembro de 2016. ISSN: 2448-0959.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15184**: Materiais Betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando viscosímetro rotacional. São Paulo, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16018**: Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida. São Paulo, 2011.
- BARTHEL, W.; MARCHAND, J.-P.; DEVIVERE, M., **Warm Asphalt Mixes by Adding a Synthetic Zeolite**. In: Euraspalt & Eurobitume Congress, Vienna, Austria, 2004.
- BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI J. A. P., SOARES J. B. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. 1ed. Rio de Janeiro: ABEDA, p.501, 2007.
- BUDNY, J. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- Câmara Setorial da Apicultura. **‘Traça da Cera’ O inimigo das Apis!** 2018. Disponível em: <<http://apicultura.to.gov.br/?p=207>> Acesso em: 05 de Junho de 2019.
- 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.
- 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, p.166, 2015.
- CEZARO JUNIOR, T. **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas convencionais e modificadas**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2008.
- CHOWDHURY, A.; BUTTON, J.W. **A Review of Warm Mix Asphalt**, Texas A&M University System, EUA, 2008.

- Confederação Nacional do Transporte (CNT). **Somente 12,4% da malha rodoviária brasileira é pavimentada**. Brasília, 2018. Disponível em: < <https://cnt.org.br/agencia-cnt/somente-12-da-malha-rodoviaria-brasileira-pavimentada>>. Acesso em: 21 de outubro de 2019.
- Confederação Nacional do Transporte (CNT). **Transporte rodoviário: Porque os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** Brasília, 2017.
- Confederação Nacional do Transporte (CNT). **10 fatos revelados pela pesquisa CNT de rodovias 2019 no Brasil**. Brasília, 2019. Disponível em: < <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/10-fatos-revelados-pela-pesquisa-cnt-de-rodovias-2019-no-brasil>>. Acesso em: 22 de outubro de 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.
- DUARTE, E. V. N. **AVALIAÇÃO REOLÓGICA DE LIGANTE ASFÁLTICO 50/70 MODIFICADO COM POLÍMERO REATIVO E NÃO-REATIVO ASSOCIADO AO ÁCIDO POLIFOSFÓRICO**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Campina Grande. Campinha Grande, PB, 2018.

- 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, CE, Brasil, 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.
- FILHO, N.W. **Avaliação da Influência da redução das Temperaturas de Usinagem e de Compactação no Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Mornas**. Dissertação - Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, Brasil, 2013.
- HUTSCHENREUTHER, J. **New technologies developed by the use of Warm Asphalt Technologies**. Reunião Anual de Pavimentação, Rio de Janeiro, 2010.
- KOENDERS, B. G. et al. **Innovative processes in asphalt production and application to obtain lower operating temperatures**. 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona, Spain, 2000.
- KRISTJANSDOTTIR, O.; MUENCH, S.; MICHAEL, L.; BURKE, G. **Assessing the potential for warm mix asphalt technology adoption**. In: Transportation research board annual meeting, Washington Anais, Washington, 2007.
- LEITE, L. F. M. FILHO, L. R. S.; ASSUMPÇÃO, 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.
- LIRA, T, S. **AVALIAÇÃO DE DOIS MÉTODOS DE PRODUÇÃO DE CERA DE ABELHAS NA ZONA DA MATA ALAGOANA**. p. 12, Rio Largo, AL, 2011. Disponível em: < <http://www.ufal.edu.br/unidadeacademica/ceca/pt-br/graduacao/agronomia/documentos/tcc/tcc-2011/thiago-s-lira>> Acesso em: 09 de Junho de 2019.
- 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. **Avaliação das propriedades mecânicas de misturas asfálticas modificadas com a adição do óleo de milho**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.
- 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.
- MERIGHI, C. F. **Estudo do comportamento de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos com adição de borracha moída de pneu**. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2015.
- MOCELIN, D. M. **Avaliação da Trabalhabilidade de Misturas Asfálticas Mornas com Emprego de Aditivo Sufactante**, 2015. Trabalho de diplomação – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.
- 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. Campinha Grande, PB, 2018.
- MOTTA, L. M. G. **Contribuição para a Estimativa do Módulo Resiliente de Misturas Asfálticas**. 14º Encontro de Asfalto, IBP, Rio de Janeiro, 2009.
- MOTTA, R. BERNUCCI, L. VASCONCELLOS, P. **Emissões de Misturas Asfálticas Mornas e a Quente devido à Temperatura**. 5 ed. São Paulo, SP, 2013.

- 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.
- NASCIMENTO, E.B et al. **A cera de carnaúba: Origem, produção e mercados.** VIII EEPA. p. 2. Disponível em:< http://www.fecilcam.br/anais/viii_eeпа/arquivos/12-03.pdf> Acesso em: 09 de Junho de 2019.
- OLIVEIRA, R. B. **Estudo sobre o efeito do ccbt-113ad no comportamento mecânico de misturas asfálticas.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil, 2014.
- OTTO, G. G. **Misturas asfálticas mornas: Verificação da fadiga e do módulo complexo.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 179p. Florianópolis, 2009.
- PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos.** 2.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.
- 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.** Lanham: National Asphalt Pavement Association, 2007.
- RUBIO, M. C.; MARTINEZ, G.; BAENA, L.; MORENO, F. **Warm mix asphalt: an overview.** Journal of Cleaner Production, 2012.
- SALES, P. M. **Avaliação das Características Físicas e Mecânicas de Misturas Asfálticas Modificadas com Adição de CCBt.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2015.
- SANTOS, K.P. – **Estudo da incorporação de argilas montmorilonitas como modificador em cimentos asfálticos de petróleo.** Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2012.
- SEBRAE. **Apicultura: Cera de abelha.** Santa Catarina, 2015. Disponível em:< https://hbjunior19.files.wordpress.com/2013/07/bt_apic_2015_07_ceradeabelha.pdf> Acesso em: 09 de Junho de 2019.
- SILVA, G. G. **Estudos Reológicos de Aditivos Utilizados na Fabricação de Misturas Mornas,** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2016.
- SOUSA, T, M. A. **Avaliação das propriedades mecânicas de misturas asfálticas modificadas com adição do CCBt.** Trabalho e conclusão de curso – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2017.
- VARELA, A, F, C. **Instituições prevaletes, tradição e persistência no extrativismo da cera de carnauba em Limoeiro do Norte – CE.** Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2011.
- ZORAVO. **Cera de Abelhas.** Caieiras, SP. Disponível em: <http://www.zovaro.com.br/ceras_mel_propolis_cera.htm#> Acesso em: 15 de Junho de 2019.