



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL**

**HELKER HILUEY AGRA FILHO**

**INFLUÊNCIA DA REDUÇÃO DAS TEMPERATURAS DE USINAGEM E  
COMPACTAÇÃO EM MISTURAS ASFÁLTICAS COM CERA DE CARNAÚBA**

**Campina Grande - PB**

**Julho de 2019**

**HELKER HILUEY AGRA FILHO**

**INFLUÊNCIA DA REDUÇÃO DAS TEMPERATURAS DE USINAGEM E  
COMPACTAÇÃO EM MISTURAS ASFÁLTICAS COM CERA DE CARNAÚBA**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à Unidade Acadêmica de Engenharia Civil (UAEC) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) para encerramento do componente curricular e conclusão da graduação em Engenharia Civil.

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

Co-orientadora: Ma. Thalita Maria Ramos Pôrto de  
Moraes

Área de concentração – Geotecnia

**Campina Grande – PB**

**Julho de 2019**

HELKER HILUEY AGRA FILHO

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

INFLUÊNCIA DA REDUÇÃO DAS TEMPERATURAS DE USINAGEM E  
COMPACTAÇÃO EM MISTURAS ASFÁLTICAS COM CERA DE CARNAÚBA

Aprovado e defendido em: \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

---

Co-orientadora: Ma. Thalita Maria Ramos Pôrto de Moraes  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

---

Examinador interno: Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

---

Examinador externo: Prof<sup>ª</sup>. Ma. Maria das Vitórias do Nascimento  
Universidade Estadual da Paraíba – UEPB

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Helker e Eylika, por todo suporte, orientação, carinho e por fornecerem todas as condições necessárias para que eu pudesse ter a melhor educação possível. A vocês dedico esta e qualquer outra conquista que eu venha a obter em minha vida pessoal, acadêmica e profissional.

Ao meu irmão, Edes Neto, que sempre me ajudou durante minha trajetória acadêmica, transmitindo ensinamentos e me passando tranquilidade.

Ao meu orientador, Prof. Adriano Elísio, que me transmitiu inúmeros conhecimentos em disciplinas durante o curso e principalmente neste trabalho de conclusão, me dando total apoio e acreditando no meu potencial.

À minha co-orientadora, Thalita Porto, que mesmo distante, sempre esteve disponível para me dar instrução e me passar dicas essenciais para a realização e conclusão desta pesquisa.

À instituição UFCG, ambiente de aprendizado que me possibilitou conhecer mestres, fundamentais para minha construção profissional, e amigos que guardarei para a vida.

À toda equipe de funcionários, técnicos, laboratoristas e alunos do LEP, em especial à Jadílson, Josenildo, Christian, Ablenya e Jeovanesa, por toda disposição para auxiliar na execução das mais diversas etapas deste trabalho.

À Luanna Bezerra, minha parceira de pesquisa, com quem tive o prazer de caminhar lado a lado durante toda esta caminhada. Meus mais sinceros agradecimentos pela convivência, cooperação e paciência.

Aos meus amigos de graduação que levarei para o resto da vida, Igor, Lucas e Victor, que comigo compartilharam experiências inesquecíveis, noites de estudos e projetos, tornando estes difíceis momentos muito mais leves e alegres.

Por fim, à todos os familiares e amigos do coração, por todo o incentivo e boas energias transmitidas para que eu pudesse alcançar meus objetivos e concluir mais esta etapa da minha vida.

*Muito obrigado!*

## RESUMO

Nos últimos anos a área da pavimentação vem seguindo a tendência de buscar novas tecnologias mais sustentáveis, com o intuito de reduzir os danos causados ao meio ambiente e aos trabalhadores envolvidos na pavimentação. A partir daí, as misturas asfálticas mornas surgem como uma solução capaz de reduzir as temperaturas de produção do asfalto sem comprometer seu desempenho, além de propiciar vantagens econômicas. Desta forma, este trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas modificadas com 2% de cera de carnaúba a partir da redução das temperaturas de usinagem e compactação. A fim de avaliar os efeitos da redução das temperaturas de produção das misturas modificadas com cera de carnaúba, foram realizados os ensaios mecânicos de Resistência a Tração, Módulo de Resiliência e Dano por Umidade (Lottman). Comparadas à mistura com ligante puro, as misturas modificadas com cera de carnaúba apresentaram melhores resultados mecânicos nos ensaios realizados. A redução de 10°C nas temperaturas de usinagem e compactação das misturas com cera, apresentaram resultados satisfatórios e também superiores às misturas com CAP puro, porém inferiores às com cera confeccionadas nas temperaturas ótimas. Os resultados obtidos se mostraram bastante relevantes, uma vez que, as reduções das temperaturas de usinagem e compactação promoverem uma economia energética e um menor impacto sobre o meio ambiente e as condições de trabalho dos operários, além de cumprir com as exigências mecânicas estabelecidas para a pavimentação.

**Palavras-chaves:** pavimentação; misturas asfálticas mornas; cera de carnaúba.

## ABSTRACT

In recent years, the paving area has been following a world trend of seeking more sustainable technologies in order to reduce damages to the environment and workers involved in paving services. Based on that, warm asphalt mixtures appear as a solution capable of reducing the production temperatures of the asphalt without compromising its performance, and also providing economic advantages. The addition of carnauba wax to the asphalt mixtures proved to be an efficient alternative in reducing machining and compaction temperatures of the mixtures. Thus, this work's aim was to evaluate the mechanical properties of modified asphalt mixtures with 2% of carnauba wax from the reduction of machining and compacting temperatures. In order to evaluate the effects of the reducing of the production temperatures of the modified mixtures with carnauba wax, the mechanical tests of Indirect Tensile Strength, Resilience Modulus and Modified Lottman were performed. Compared to pure binder mixtures, the modified mixtures with carnauba wax presented better mechanical results at the tests performed. The reduction of 10°C in the machining and compaction temperatures of the mixtures with wax, presented satisfactory results and also superior to the mixtures with pure binder mixtures, but inferior to those with wax, produced and compacted at optimum temperatures. The results obtained were very relevant since the reduction of machining and compaction temperatures promoted an energy saving and lower impacts on the environment and workers conditions, besides complying with the mechanical requirements for paving.

**Keywords:** paving; warm asphalt mixtures; carnauba wax.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação das misturas asfálticas em função das temperaturas típicas de usinagem. ....	4
Figura 2- Exemplos de composições granulométricas dos tipos de misturas a quente. ....	6
Figura 3- Misturas quente e morna recém produzidas. ....	7
Figura 4 - Processo de formação do asfalto espumado. ....	10
Figura 5- Comportamento da viscosidade do ligante modificado com aditivo orgânico conforme a variação da temperatura. ....	11
Figura 6- (a) Cera de abelha; (b) Cera de carnaúba. ....	12
Figura 7- Carnaubeira. ....	13
Figura 8 - Tipos de cera de carnaúba. (a) Tipo 1; (b) Tipo 2; (c) Tipo 3 e (d) Tipo 4. ....	14
Figura 9 - Etapas de execução da pesquisa. ....	17
Figura 10 - Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP 50/70). ....	17
Figura 11- Agregados (a) Brita 19mm; (b) Brita 9,5mm; (c) Pó de Pedra; (d) Cal hidratada. ....	18
Figura 12 - Cera de Carnaúba. ....	19
Figura 13 - Sequência de peneiras. ....	20
Figura 14 - Curva granulométrica dos agregados. ....	21
Figura 15 - Verificação da massa submersa da brita 19mm. ....	22
Figura 16 - Secagem superficial do pó de pedra. ....	22
Figura 17 - Procedimento de mistura do CAP com cera. ....	24
Figura 18- Penetrômetro. ....	24
Figura 19- Ensaio de Ponto de Amolecimento. ....	25
Figura 20- Viscosímetro rotacional Brookfield. ....	26
Figura 21 - Fluxograma da Dosagem SUPERPAVE. ....	27
Figura 22 - Curva de Fuller intermediária. ....	28
Figura 23 - Compactador giratório SERVOPAC. ....	29
Figura 24- (a) Pesagem da mistura; (b) Pesagem do recipiente com água; (c) Aparelho Rice. ....	30
Figura 25 - Massas consideradas para o cálculo da Gmm. ....	31
Figura 26 - Gráfico Volume de Vazios versus Teor de CAP. ....	32
Figura 27 - Prensa utilizada para o ensaio de RT. ....	32
Figura 28 - Prensa UTM - 25. ....	34

Figura 29 – (a) Saturação dos corpos de prova; (b) Inserção dos CPs nos sacos plásticos com 10ml de água destilada; (c) Amostras na geladeira a -18°C; (d) CPs em água a 60°C; (e) CPs na estufa a 60°C; (f) Rompimento dos CPs por compressão diametral. ....	35
Figura 30 - Gráfico Viscosidade versus Temperatura para o CAP puro e CAP com cera .....	38
Figura 31 - Resultados do ensaio de RT.....	39
Figura 32 - Resultados do ensaio de MR.....	41
Figura 33 - Resultados do ensaio de Lottman. ....	42



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Possíveis vantagens da utilização das misturas asfálticas mornas. ....	8
Tabela 2 - Características físico-químicas da cera de carnaúba tipo 1.....	14
Tabela 3 - Estudos utilizando a cera de carnaúba como aditivo em misturas asfálticas. ....	15
Tabela 4 - Caracterização do CAP .....	18
Tabela 5 - Porcentagem passante acumulada .....	20
Tabela 6 - Massas específicas dos agregados.....	23
Tabela 7 - Proporção de agregados na mistura.....	28
Tabela 8 - Temperaturas de Usinagem e Compactação .....	29
Tabela 9 - Tabela resumos das propriedades volumétricas para cada teor de CAP. ....	31
Tabela 10 - Resultados do Ensaio de Penetração .....	36
Tabela 11 - Resultados do Ponto de Amolecimento.....	36
Tabela 12 - Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional.....	37
Tabela 13- Temperaturas de Usinagem e Compactação. ....	39
Tabela 14- Resultados do ensaio de RT. ....	39
Tabela 15 - Resultados do ensaio de MR. ....	40
Tabela 16 - Resultados do ensaio de Lottman.....	41

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CP	Corpos de Prova
CPA	Camada Porosa de Atrito
DMT	Densidade Máxima Teórica
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EAP	Emulsão Asfáltica de Petróleo
Gmm	Densidade Máxima da Mistura
HPAs	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
LVDT	Linear Variable Differential Transducer
MAM	Misturas Asfálticas Mornas
ME	Método de Ensaio
MR	Módulo de Resiliência
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NM	Norma Mercosul
NO <sub>x</sub>	Óxidos de Nitrogênio
RBV	Relação Betume/Vazios
RRT	Resistência Retida a Tração
RT	Resistência a Tração
RTu	Resistência a Tração Condicionado
SHRP	Strategic Highway Research Program
SMA	Stone Matrix Asphalt
SO <sub>2</sub>	Dióxido de Enxofre
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavement
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
UTM	Universal Testing Machine

VAM	Vazios do Agregado Mineral
VOCs	Compostos Orgânicos Voláteis
Vv	Volume de Vazios
WMA	Warm Mix Asphalt

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. OBJETIVOS .....	2
1.1.1. Objetivo geral.....	2
1.1.2. Objetivos específicos .....	2
1.2. JUSTIFICATIVA .....	3
2. REFERENCIAL TEÓRICO .....	4
2.1. MISTURAS ASFÁLTICAS.....	4
2.1.1. Misturas Asfálticas a Quente .....	5
2.1.2. Misturas Asfálticas a Frio .....	6
2.1.3. Misturas Asfálticas Mornas .....	6
2.1.3.1. Vantagens das misturas mornas.....	7
2.1.3.2. Desvantagens das misturas mornas .....	9
2.1.3.3. Classificação das Misturas Mornas .....	9
2.2. A CARNAUBEIRA .....	12
2.2.1. Cera de Carnaúba.....	13
2.2.2. Utilização da cera de carnaúba na fabricação de Misturas Asfálticas Mornas .....	15
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	17
3.1. MATERIAIS UTILIZADOS.....	17
3.1.1. Ligante Asfáltico.....	17
3.1.2. Agregados .....	18
3.1.3. Cera de Carnaúba.....	19
3.2. MÉTODOS UTILIZADOS .....	19
3.2.1. Caracterização dos agregados .....	19
3.2.1.1. Análise granulométrica .....	19
3.2.1.2. Massa específica e absorção.....	21

3.2.1.2.1.	Absorção e densidade dos agregados graúdos.....	21
3.2.1.2.2.	Massa específica do agregado miúdo .....	22
3.2.1.2.3.	Resultados dos ensaios de massa específica dos agregados graúdos e miúdos..	23
3.2.2.	Cimento Asfáltico de Petróleo .....	23
3.2.2.1.	Mistura do CAP com cera de carnaúba.....	23
3.2.2.2.	Ensaio de Penetração.....	24
3.2.2.3.	Ponto de Amolecimento .....	25
3.2.2.4.	Viscosidade Rotacional .....	26
3.2.3.	Dosagem SUPERPAVE.....	26
3.2.3.1.	Determinação da Temperatura de Usinagem e Compactação.....	28
3.2.3.2.	Compactação dos Corpos de Prova.....	29
3.2.3.2.1.	Método Teórico .....	30
3.2.3.2.2.	Rice Test.....	30
3.2.3.3.	Determinação do teor de ligante.....	31
3.2.4.	Caracterização mecânica das misturas asfálticas .....	32
3.2.4.1.	Resistência a tração por compressão diametral – RT.....	32
3.2.4.2.	Módulo de Resiliência – MR .....	33
3.2.4.3.	Ensaio de resistência ao dano por umidade induzida – Lottman Modificado.....	34
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	36
4.1.	CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DO CAP PURO E MODIFICADO .....	36
4.1.1.	Ensaio de Penetração .....	36
4.1.2.	Ponto de Amolecimento.....	36
4.1.3.	Viscosidade Rotacional.....	37
4.2.	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS .....	39
4.2.1.	Resistência a tração por compressão diametral – RT .....	39
4.2.2.	Módulo de resiliência – MR .....	40
4.2.3.	Resistência ao dano por umidade induzida – Lottman Modificado.....	41

5.0 CONCLUSÕES .....	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	45

# 1. INTRODUÇÃO

As questões ambientais vêm, desde o final do último século, influenciando cada vez mais nas escolhas e definições das mais distintas áreas de atividades humanas. Diante disto, se torna primordial a utilização de soluções sustentáveis para uma melhor relação entre o homem e o meio. O setor rodoviário vem buscando acompanhar esta tendência, desenvolvendo tecnologias cada vez mais ‘limpas’ para a pavimentação, afim de ajudar com as questões ambientais (MOTTA, 2011), tais como: reutilização de pavimento, utilização de asfalto-borracha proveniente de pó de pneus e misturas asfálticas mornas.

Misturas asfálticas a frio são fabricadas em temperatura ambiente, entre 20 e 50°C, por outro lado, as misturas asfálticas a quente são fabricadas em temperaturas bem mais altas, entre 140 e 180°C (SILVA, 2016). Enquanto as misturas a frio apresentam melhores condições de trabalhabilidade e produção, as misturas a quente ostentam melhor resistência. Logo, há a necessidade de busca por uma solução que atenda aos requisitos de qualidade de ambos os tipos de mistura.

Desta forma, as misturas asfálticas mornas surgem como resposta para o problema. Sua produção é feita em temperaturas entre 105 e 135°C, e, através do uso de aditivos, além da diminuição da temperatura de usinagem e compactação, podem também apresentar melhoramento nas propriedades reológicas do ligante asfáltico e nas propriedades mecânicas da mistura asfáltica.

Nesse contexto, nascem as Misturas Asfálticas Mornas (MAMs), uma alternativa que visa a redução das temperaturas de usinagem e compactação, assegura economia energética, diminuição de emissão de poluentes e melhores condições de trabalho aos envolvidos. Desta forma, a utilização das MAMs, satisfaz o Protocolo de Kyoto, de 1997, sem condicionar um desempenho que as tornem impróprias para uso na pavimentação. Ou seja, por mais que possam ter um rendimento inferior, em termos de resistência, em relação às misturas asfálticas a quente, ainda podem ser amplamente utilizadas.

Ainda que seja um estudo recente e ainda existam limitadas bases bibliográficas as quais insira-se cera de carnaúba às misturas asfálticas, esta cera natural, produzida no nordeste brasileiro, vem demonstrando ser um possível aditivo para misturas asfálticas mornas, possibilitando a redução das temperaturas de usinagem sem perdas consideráveis nas propriedades.

Moraes (2018) conclui em sua pesquisa que a adição de cera de carnaúba aferiu boas propriedades à mistura asfáltica, mantendo os resultados dentro dos parâmetros especificados para o uso na pavimentação e algumas vezes proporcionando a mistura modificada com teores de cera características mecânicas superiores a mistura asfáltica convencional.

Visto que as misturas asfálticas mornas apresentam melhor trabalhabilidade e são menos danosas ao meio-ambiente em relação às misturas a quente, esta pesquisa objetiva avaliar a redução das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas mornas com aditivo de cera de carnaúba em 10°C da temperatura ótima da mistura asfáltica a quente, afim de compará-las em termos de propriedades mecânicas.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo geral

Avaliar os efeitos da redução das temperaturas ideais de usinagem e compactação de misturas asfálticas mornas com aditivo de cera de carnaúba.

### 1.1.2. Objetivos específicos

- Analisar os efeitos da adição da cera de carnaúba no cimento asfáltico de petróleo (CAP);
- Observar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas com aditivo de cera de carnaúba produzida e compactada em temperaturas de 10 °C abaixo da temperatura de referência;
- Comparar as propriedades mecânicas da mistura asfáltica morna com as da mistura asfáltica a quente;
- Contribuir para o desenvolvimento sustentável na área de pavimentação asfáltica através da busca por soluções para a produção de misturas asfálticas de forma menos danosa ao meio e aos trabalhadores.



## 1.2. JUSTIFICATIVA

A crescente preocupação com as questões ambientais induziu à busca por alternativas cada vez mais sustentáveis no setor rodoviário. A usinagem de misturas asfálticas em temperaturas elevadas é responsável por emitir gases nocivos, afetando não só ao meio ambiente, através do efeito estufa, mas também às pessoas envolvidas no trabalho com a pavimentação. A questão da emissão de poluentes juntamente com a necessidade de uma maior eficiência energética na área, desperta a pesquisa de misturas asfálticas usinadas em temperaturas inferiores.

As misturas asfálticas mornas se apresentam nesse contexto como ótima alternativa, oferecendo uma grande quantidade de benefícios, dos quais podem-se citar: menor emissão de poluentes atmosféricos; melhoria do ambiente de trabalho na pavimentação; diminuição do consumo energético; menor envelhecimento do ligante asfáltico; etc.

Com isso, conhecendo-se as vantagens proporcionadas pelas misturas asfálticas mornas, esta pesquisa tem por objetivo avaliar o desempenho do ligante asfáltico com adição da cera de carnaúba em temperaturas inferiores às temperaturas usuais de usinagem e compactação.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. MISTURAS ASFÁLTICAS

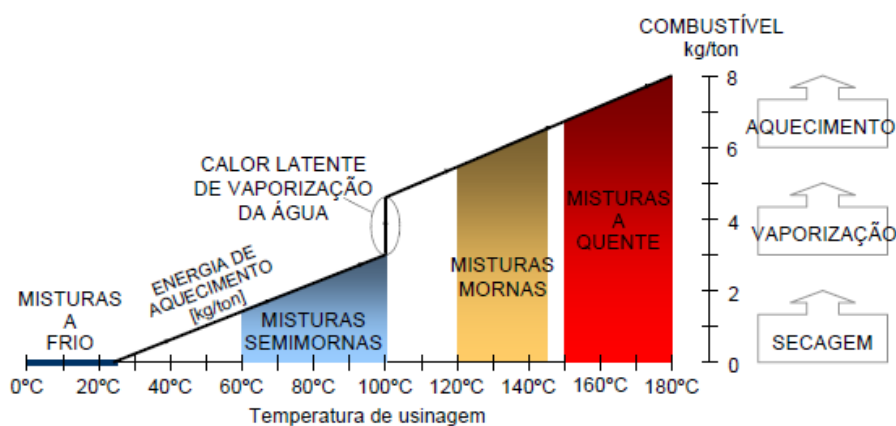
Segundo Bruxel (2015), mistura asfáltica é definida como uma mistura de materiais granulares, enchimento e o ligante asfáltico, onde este último, opera como agente aglutinante entre os agregados, proporcionando impermeabilidade, rigidez e resistência à mistura dos agregados.

No Brasil, na maior parte dos pavimentos utiliza-se revestimento com misturas asfálticas, que processado adequadamente, fornece impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, baseado no tráfego esperado em projeto e clima (BERNUCCI et al, 2008).

Muitos são os fatores que podem influenciar na performance das misturas asfálticas, são eles: práticas de execução, propriedades dos materiais, o projeto de mistura e a utilização de aditivos (ROHDE, 2007).

Os diferentes tipos de misturas asfálticas vêm sendo classificados de acordo com a temperatura empregada em sua produção/aplicação, podendo ser divididos basicamente em quatro grupos: misturas a quente, misturas a frio, misturas semimornas e misturas mornas. A Figura 1 ilustra, de maneira esquemática, esta divisão por classes considerando as temperaturas de usinagem.

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



Fonte: MOTTA (2011), adaptada de OLARD, 2008 e D'ANGELO et al., 2008

Da Figura 1, pode-se observar que as misturas a quente são produzidas em temperaturas elevadas, da ordem de 150 a 180°C; já as misturas asfálticas a frio são fabricadas em temperatura ambiente. As misturas semimornas e mornas são preparadas em temperaturas intermediárias às das misturas a quente e frio.

A diferença entre as misturas semimornas e mornas reside na temperatura final pós-usinagem. Para temperaturas inferiores a 100°C a mistura é dita semimorna, acima disto, é considerada morna (D'ANGELO, 2008; PROWELL e HURLEY, 2007).

#### 2.1.1. Misturas Asfálticas a Quente

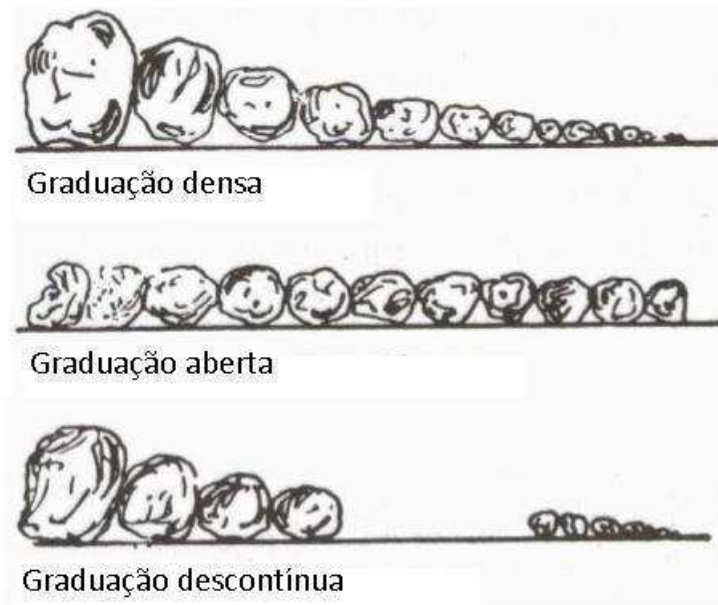
As misturas a quente são as mais empregadas na pavimentação e podem ser produzidas com diferentes tipos de asfalto e granulometria diversa, para diferentes níveis de tráfego, assegurando durabilidade e boa resistência (MOTTA, 2011).

O padrão granulométrico utilizado e as propriedades mecânicas exigidas, de acordo com a sua aplicação, distinguem as misturas asfálticas a quente em vários tipos (BERNUCCI et al., 2008), dos quais pode-se destacar três, sendo estes os mais usuais:

- a) *Graduação densa*: possui curva granulométrica contínua e bem graduada, o que garante a existência de poucos vazios. Pode-se apontar como exemplo o concreto asfáltico (CA), também conhecido como concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ);
- b) *Graduação aberta*: curva granulométrica uniforme com agregados de quase mesmo diâmetro, com vários vazios entre as partículas maiores, pela falta de material fino para preenchê-los. Um exemplo a ser citado é a mistura asfáltica drenante, também denominada camada porosa de atrito (CPA).
- c) *Graduação descontínua*: curva granulométrica com predominância dos grãos maiores em relação aos grãos de dimensões intermediárias. A matriz pétreo asfáltica (SMA) é um exemplo deste tipo de mistura.

A Figura 2 mostra composições de agregados de diferentes graduações.

Figura 2- Exemplos de composições granulométricas dos tipos de misturas a quente.



Fonte: Corrêa (2015) - adaptada

#### 2.1.2. Misturas Asfálticas a Frio

As misturas asfálticas a frio consistem em misturas usinadas de agregados com emulsão asfáltica de petróleo à temperatura ambiente (BERNUCCI, 2008).

Os benefícios da utilização das misturas a frio estão vinculados, essencialmente, ao uso de equipamentos menos sofisticados, melhor trabalhabilidade, boa adesividade com praticamente todos os tipos de agregado britado, facilidade de estocagem e alta flexibilidade (ABEDA, 2001).

O uso das misturas asfálticas a frio normalmente se restringem aos revestimentos de pavimentos de baixo ou médio volume de tráfego ou às camadas intermediárias, pois não são estruturalmente tão resistentes quanto as misturas a quente para serem utilizadas em camadas de revestimento de vias de tráfego elevado (MOTTA, 2011).

#### 2.1.3. Misturas Asfálticas Mornas

As misturas asfálticas mornas (MAM), ou *Warm Mix Asphalt (WMA)*, são misturas fabricadas em temperaturas de no mínimo 30°C abaixo das tipicamente usadas na produção das misturas a quente. As misturas mornas têm de apresentar resistência, durabilidade e performance equivalentes quando comparado às misturas asfálticas a quente. As mais diversas vantagens das misturas asfálticas mornas confirmam, assim, a importância de sua utilização (PROWELL e HURLEY, 2007).

O aparecimento dessa solução se deu devido à necessidade de se obter resistência e durabilidade compatíveis às misturas quentes, porém com uma redução na emissão de gases poluentes, menores impactos sobre operários e a não degradação do ligante asfáltico, devido às temperaturas inferiores (NEWCOMB, 2007).

As MAMs garantem a diminuição da emissão de CO<sub>2</sub> e a redução no consumo energético. Dados apontam que a aplicação dessas misturas pode diminuir de 30 a 40% a quantidade de CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>; 50% da quantidade de compostos orgânicos voláteis (VOCs); entre 10 e 30% de CO e entre 60-70% de NO, NO<sub>2</sub> e NO<sub>3</sub>; além de uma redução de 30 a 50% de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) (D'ANGUELO, 2008).

Na Figura 3 tem-se dois caminhões com misturas asfálticas quente e mornas recém produzidas, a qual é possível facilmente verificar a redução de emissões de fumos asfálticos entre os dois tipos.

Figura 3- Misturas quente e morna recém produzidas.



Fonte: Prowell (2007)

#### 2.1.3.1. Vantagens das misturas mornas

Prowell (2007) expõe em seu artigo diversas vantagens do uso de misturas asfálticas mornas. Dentre as principais vantagens apresentadas, estão o desenvolvimento sustentável, com a diminuição no consumo de energia, a preocupação com os aspectos ambientais, através da redução de emissão de gases poluentes, além do bem-estar e saúde dos operários envolvidos nos serviços de pavimentação, devido a exposição dos mesmos às altas temperaturas. A Tabela

1, apresenta possíveis benefícios do uso das MAMs, como também as melhorias esperadas a partir da utilização destas.

Tabela 1 - Possíveis vantagens da utilização das misturas asfálticas mornas.

<b>BENEFÍCIOS</b>	<b>DADOS ESPERADOS</b>
Redução das emissões (%): CO2	30 – 40%
SO2	35%
VOC	50%
NOx	60 – 70%
CO	10 – 30%
Pavimento	Ocorre melhoria na trabalhabilidade na compactação para maiores distâncias de aplicação.
Bem-estar dos trabalhadores	Redução de 30 a 50% na exposição aos fumos em comparação com as misturas asfálticas a quente.

**Fonte: Prowell (2007)**

Penz (2010) reúne e sumariza os principais benefícios das misturas mornas, destacando:

- Redução do envelhecimento dos ligantes asfálticos por oxidação, preservando a sua resposta elástica, retardando o processo de fissuração dos revestimentos asfálticos;
- Melhoria na trabalhabilidade da mistura asfáltica e otimização da compactação;
- Redução do consumo de combustível da usina em até 30%;
- Diminuição significativa de gases poluentes;
- Redução da exposição dos trabalhadores aos fumos e odores, melhorando as condições de trabalho;
- Aumento da distância de transporte de massa asfáltica;
- Abertura de tráfego mais rápido sobre a mistura asfáltica recém compactada;
- Possibilidade de utilização de um volume maior de material de fresagem quando se usa em reciclagem.

### 2.1.3.2. Desvantagens das misturas mornas

Em sua tese, Zaumanis (2010) defende que as misturas asfálticas mornas também apresenta desvantagens. Destaca-se que não se pode generalizar as vantagens destas técnicas, já que existem diversos produtos no mercado e que cada um possui composição distinta e por consequência o seu desempenho não será o mesmo. Dentre as desvantagens resultantes da utilização de misturas mornas, destacam-se:

- há possibilidade de trincamento precoce em consequência da presença de umidade residual no espaço entre ligante e agregado. Devido às reduzidas temperaturas aplicadas na usinagem e compactação, pode acontecer da umidade não ser expulsa por completo da mistura, prejudicando assim, a adesividade do ligante com os agregados;
- uma vez que é um estudo recente, ainda existem limitados dados para corroborar ou não com a utilização de algumas técnicas ou produtos desta tecnologia;
- não se tem uma certeza sobre a verdadeira redução dos custos. É preciso investigar se a redução no consumo energético é bastante para tornar a produção mais econômica;
- alguns aditivos que fazem utilização de ceras em sua composição não demonstram um desempenho aceitável a temperaturas muito baixas. Isto se dá pela cristalização das ceras, que tendem a elevar a viscosidade e rigidez do ligante.

### 2.1.3.3. Classificação das Misturas Mornas

A utilização das misturas asfálticas mornas engloba o emprego de diferentes tipos de tecnologias, das quais podemos destacar: asfalto espumado; aditivos surfactantes e introdução de aditivos orgânicos ou ceras. Por conseguinte, as MAMs podem ser classificadas pelo tipo de tecnologia empregada.

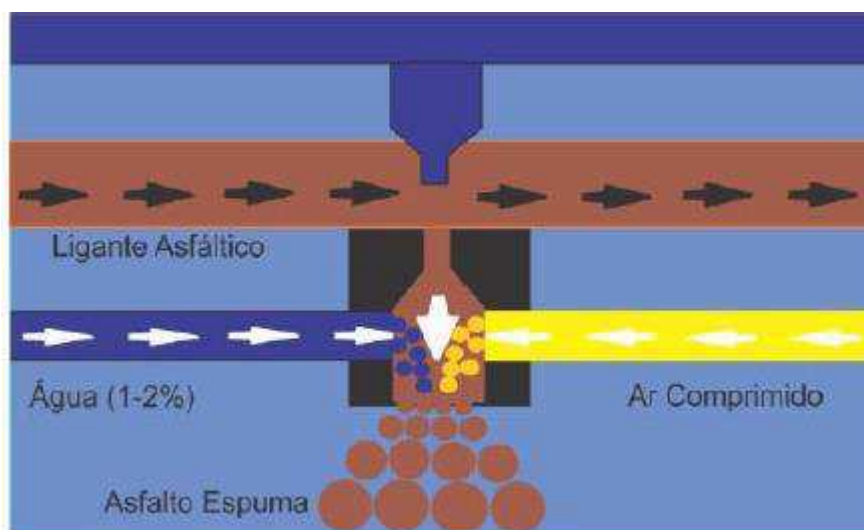
#### Asfalto Espumado

A tecnologia do asfalto espumado objetiva propiciar uma reação térmica entre a água, em temperatura ambiente, e o ligante asfáltico aquecido, produzindo a espuma de asfalto, que irá colaborar no recobrimento do asfalto e na trabalhabilidade da mistura asfáltica. Esta reação irá modificar a viscosidade do CAP, tornando possível a diminuição da temperatura de

usinagem e facilitando a compactação em campo (CHOWDHURY e BUTTON, 2008). A Figura 4 ilustra o processo de formação do asfalto espumado a partir da introdução de água fria no processo.

Dentre alguns exemplos de técnicas de espumejo do asfalto têm-se: LEA® LT Asphalt® (misturas semimornas), Advera® WMA, AQUABlack® Warm Mix Asphalt, Aspha-Min®, Double Barrel® Green, LEA B®, Ultrafoam GX2™, WAM- Foam®, WMA Terex®.

Figura 4 - Processo de formação do asfalto espumado.



Fonte: Feitosa (2015).

### Aditivos Surfactantes

A inserção de aditivos surfactantes no ligante asfáltico tem por finalidade a produção de misturas mornas e semimornas (SILVA, 2016). Essa tecnologia propicia uma boa adesividade ao material, elevando a ligação entre o ligante e os agregados, e também promove um melhoramento no processo de recobrimento dos agregados. Apesar dessas melhorias, a utilização de aditivos deste tipo, normalmente não altera as propriedades de consistência (viscosidade, penetração e amolecimento) do ligante (MOTTA, 2011).

A utilização dessa tecnologia garante a redução da temperatura de usinagem em torno de 30 e 40°C (SILVA, 2016).

Dentre os aditivos pertencentes a classe surfactante pode-se citar alguns exemplos como: Cecabase RT®, Evotherm™, Gemul XT14, Rediset™ WMX, Revix™.



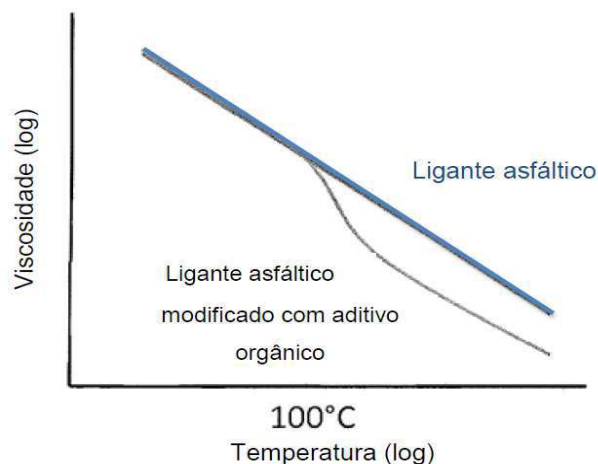
### Aditivos orgânicos ou ceras

Outro importante tipo de tecnologia de misturas asfálticas mornas é a utilização de aditivos orgânicos ou ceras junto às misturas, afim de reduzir a viscosidade do asfalto. Quando sujeitos a temperaturas acima de seu ponto de amolecimento, os aditivos interferem nas propriedades do CAP, proporcionando uma redução na viscosidade do ligante (MOTTA, 2011).

Os aditivos orgânicos podem ser introduzido tanto antes como durante a usinagem, ocasionando uma redução da temperatura de mistura em aproximadamente 30, 40°C. Após o resfriamento da mistura, os aditivos passam por um processo de cristalização dispersa no ligante, resultando num aumento da rigidez do asfalto e da mistura como um todo (RÜHL, 2008).

A utilização de aditivos orgânicos em forma de cera apresentam bons resultados em programas experimentais e aplicações de campo (WARGHA FILHO, 2013). O gráfico presente na Figura 5 ilustra a relação existente entre a temperatura e a viscosidade do ligante asfáltico modificado com aditivos orgânicos.

Figura 5- Comportamento da viscosidade do ligante modificado com aditivo orgânico conforme a variação da temperatura.



**Fonte: Merighi (2015)**

Dentre alguns exemplos de tecnologias e aditivos orgânicos/ceras têm-se: Asphaltan B®, CCBit 113AD, Licomont BS 100® e Sasobit®. Além disso, ainda se tem as amidas de ácidos graxos sintéticos, que são fabricadas a partir da reação entre as amidas e os ácidos graxos.

As ceras de origem vegetal ou naturais também podem ser introduzidos ao ligante asfáltico em misturas asfálticas mornas; para que a incorporação seja possível, é necessário que

as ceras apresentem ponto de fusão superior a 60°C. Exemplos de ceras naturais que podem ser estudadas são as ceras de abelha e as ceras de carnaúba (LEITTE et al., 2011). A Figura 6 apresenta exemplos desses dois tipos de ceras.

Figura 6- (a) Cera de abelha; (b) Cera de carnaúba.



**Fonte: Fenixceras (Acesso: 03 de Dezembro de 2018)**

## 2.2. A CARNAUBEIRA

A carnaubeira, ou carnaúba (*Copernicia Prunifera*) é uma planta nativa do semi-árido nordestino brasileiro. Essa palmeira pode ser encontrada nos vales de rios e cursos de água nessa região, principalmente do Rio Parnaíba e seus afluentes, do rio Jaguaribe, Acaraú e Cauípe, no Ceará, do rio Apodi no Rio Grande do Norte e do médio do rio São Francisco cumprindo um importante papel no bioma caatinga, relativo à conservação dos solos e na proteção dos rios, evitando assim a erosão e o assoreamento (VARELA, 2011).

O grande interesse na carnaubeira se dá graças ao emprego integral de todas as suas partes, ou seja, utilizam-se as folhas, os frutos, as raízes e o tronco (MORAES, 2018), sendo a folha a parte mais importante, economicamente falando. A Figura 7 apresenta a foto de uma carnaubeira.

Figura 7- Carnaubeira



**Fonte: Educalingo (Acesso: 03 de Dezembro de 2018)**

#### 2.2.1. Cera de Carnaúba

Somente a partir de 1836, a cera de carnaúba começou a ser utilizada. A princípio a cera era usada como cera para assoalho, para polimento de móveis de madeira e para a fabricação de velas. Gradativamente a cera passou a ser cada vez mais valorizado, vindo a figurar como um dos principais produtos da economia da região (VARELA, 2011)

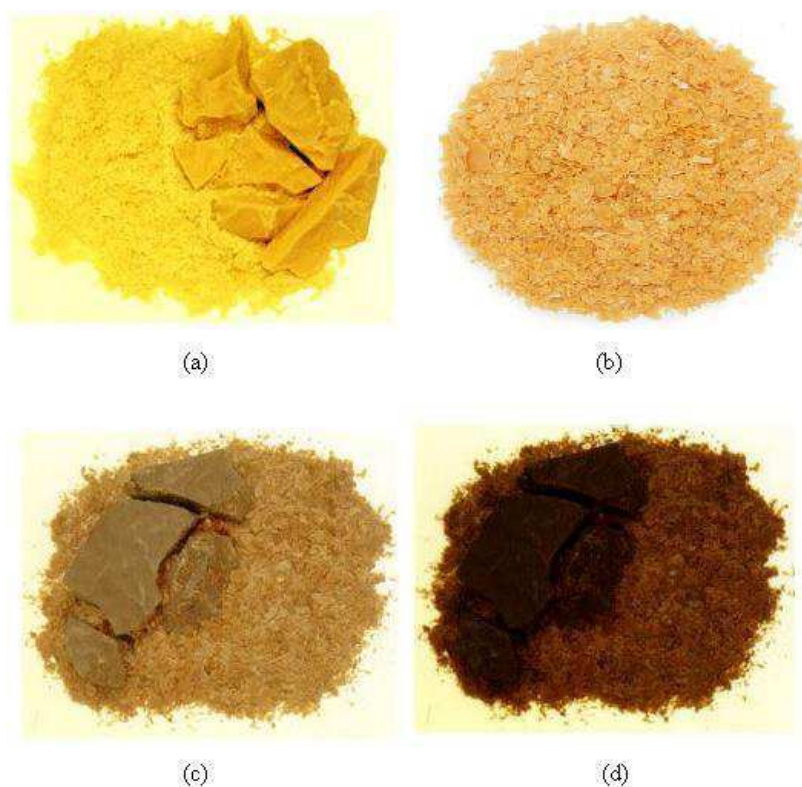
Ainda que não tenha a mesma força econômica de outrora, a cera de carnaúba ainda se mostra altamente útil na fabricação de medicamentos, no revestimento térmico de chips de informática e na conservação de frutas e legumes em substituição ao plástico. Assim sendo, a cera de carnaúba ainda revela-se apropriada para aplicação em vários ramos da indústria (VARELA, 2011).

A cera de carnaúba é obtida das folhas da Carnaubeira. Ela apresenta-se amorfa, dura, de alto ponto de fusão, firme e lustrosa. Possui odor agradável e quebra com uma fratura limpa (WARTH, 1947; RIZZO, 2008).

Rizzo (2008) divide a cera de carnaúba em quatro tipos: cera tipo 1; tipo 2; tipo 3 e tipo 4. As formas de extração e industrialização oferecem a diferenciação química entre elas. A cera de carnaúba tipo 1 é obtida do pó do “olho” das carnaubeiras e apresenta cor amarelo-ouro. Enquanto os outros três tipos são obtidos do pó da palha e todas se apresentam na forma de escamas. A cera tipo 2 é refinada e clareada, e apresenta cor amarelo-laranja. A cera tipo 3 é

filtrada e clareada e apresenta cor marrom escuro. Já a cera tipo 4 é filtrada e tem coloração preta. A Figura 8 apresenta os quatro tipos de cera de carnaúba.

Figura 8 - Tipos de cera de carnaúba. (a) Tipo 1; (b) Tipo 2; (c) Tipo 3 e (d) Tipo 4



Fontes: Roguimo (Acesso em 12 Dezembro de 2018) /GM Ceras (Acesso em 02 de Maio de 2019)

Nesta pesquisa, o tipo de cera de carnaúba utilizada é o tipo 1. Algumas de suas características físico-químicas estão especificadas na Tabela 2, a seguir:

Tabela 2 - Características físico-químicas da cera de carnaúba tipo 1.

<b>Parâmetros</b>	<b>Características</b>
Aparência	Escamas
Cor	Amarelo ouro
Odor	Característico
Faixa de Fusão (°C)	81 – 86
Índice de Saponificação, mgKOH/g amostra	68 - 88

Fonte: Rizzo (2008)

### 2.2.2. Utilização da cera de carnaúba na fabricação de Misturas Asfálticas Mornas

A introdução de ceras aos ligantes asfálticos tem como propósito reduzir as temperaturas de usinagem e compactação das misturas. De acordo com Reyes (2009) esta redução de temperatura gira em torno de 20°C. O autor mostrou, em sua pesquisa, semelhanças nos resultados de fadiga e módulo dinâmico, quando comparados ligantes modificados com polímero SBS e misturas sem aditivos em sua composição. Poucas são as bases bibliográficas disponíveis as quais há a introdução de cera de carnaúba às misturas asfálticas, sendo assim considerado um estudo ainda recente em relação às misturas asfálticas mornas. Na Tabela 3 são mostrados os estudos realizados com adição de cera de carnaúba as misturas asfálticas.

Tabela 3 - Estudos utilizando a cera de carnaúba como aditivo em misturas asfálticas.

<b>Autores</b>	<b>Títulos</b>	<b>Tipo</b>
Wargha Filho (2013)	Avaliação da influência da redução das temperaturas de usinagem e de compactação no comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas.	Dissertação
Feitosa (2015)	Avaliação do uso de diferentes tipos de cera de carnaúba como aditivos para misturas mornas.	Tese
Silva (2016)	Estudos reológicos de aditivos utilizados na fabricação de misturas mornas.	Dissertação
Moraes (2018)	Utilização da cera de carnaúba como aditivo redutor de temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas.	Dissertação

**Fonte: Moraes (2018) - adaptada**

Wargha Filho (2013) apresentou um estudo que concluiu que utilizando um teor de 5% de cera de carnaúba (tipo 4) em relação ao peso do CAP se torna possível a utilização da mistura asfáltica a 125°C, ou seja, quando comparado com o CAP de referência o aditivo proporcionou uma redução de 20°C para a temperatura de compactação.

Feitosa (2015) concluiu em seus estudos que a cera de carnaúba tipo 4, na proporção de 5% em massa, mostrou ser o aditivo que mais reduziu a viscosidade do ligante asfáltico (em

torno de 46%), obtendo também os melhores resultados para as temperaturas de usinagem e compactação.

Em seus estudos Silva (2016) fez a caracterização reológica da cera de carnaúba com teores de 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5%. Foi determinado que o teor de 2% de cera seria o ideal, uma vez que, além de apresentar melhor trabalhabilidade, apresentou também uma maior redução (cerca de 5°C) das temperaturas de usinagem e compactação.

Já Moraes (2018) em sua dissertação, pôde concluir que o teor de 2% de cera carnaúba (tipo 1) foi o que apresentou melhores resultados reológicos e mecânicos, como: melhor trabalhabilidade, maior redução das temperaturas de usinagem e compactação e maior resistência à deformação permanente.

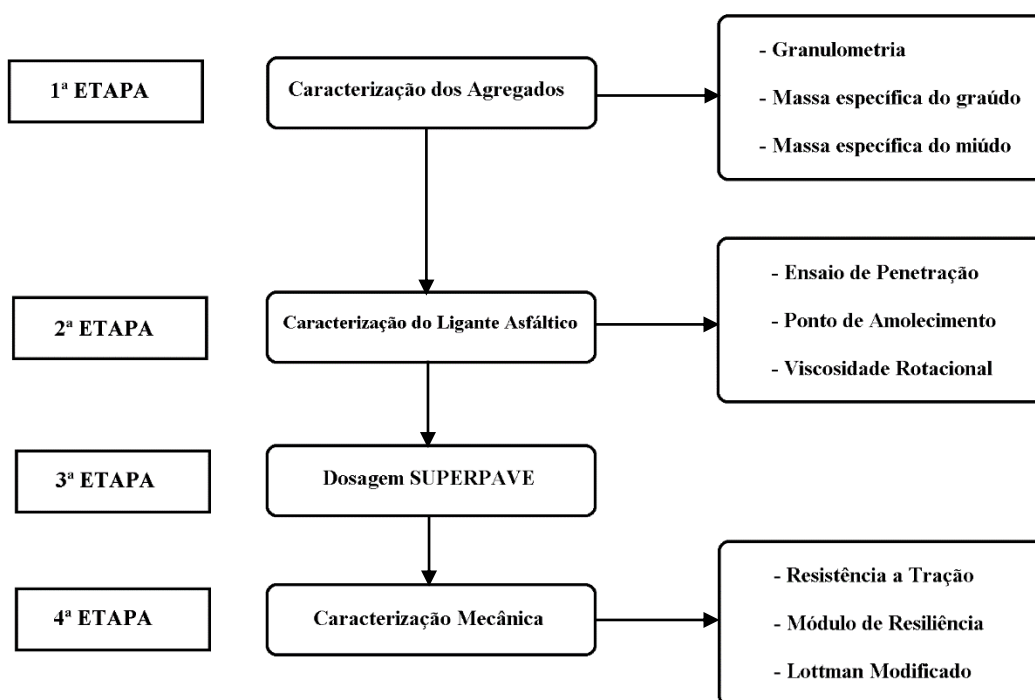
Em suma, todos os quatro trabalhos citados, concluíram que a utilização da cera de carnaúba é um aditivo potencialmente útil para ser usado na preparação de misturas asfálticas mornas, contribuindo na redução dos gastos energéticos, diminuição das emissões de gases, além de apresentar melhorias nas propriedades físicas e mecânicas do ligante asfáltico.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. MATERIAIS UTILIZADOS

Afim de obter os objetivos propostos, foram realizados ensaios laboratoriais no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Os procedimentos experimentais e os materiais utilizados nesta pesquisa estão descritos neste capítulo. A Figura 9 apresenta a sequência das atividades desenvolvidas.

Figura 9 - Etapas de execução da pesquisa.



##### 3.1.1. Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico utilizado neste trabalho foi o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70 (Figura 10) fornecido pela construtora Rocha Cavalcante.

Figura 10 - Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP 50/70).





Através de ensaios físicos foi possível caracterizar o ligante (Tabela 4):

Tabela 4 - Caracterização do CAP

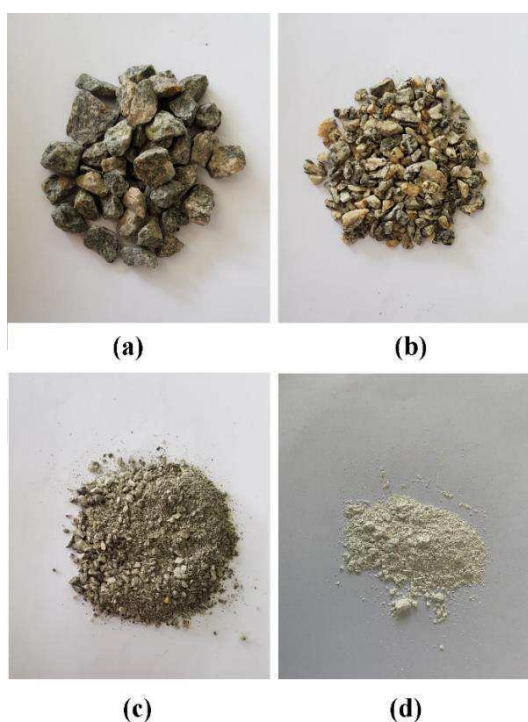
Característica	CAP Puro	Limites	Norma
Penetração (0,1mm)	49	50-70	NBR 6576
Ponto de Amolecimento (°C)	48.25	46 (mín)	NBR 6560
Viscosidade Rotacional 135°C (cp)	385	274 (mín)	NBR 15184
Viscosidade Rotacional 150°C (cp)	193	112 (mín)	NBR 15185
Viscosidade Rotacional 177°C (cp)	71	57 - 285	NBR 15186

A penetração do CAP, por mais que esteja abaixo dos limites estabelecidos por norma, é aceitável, uma vez que além de ser um valor bem próximo, se trata de um CAP ligeiramente envelhecido e que, nesta pesquisa, não será utilizado puro. Portanto não afetaria de maneira significativa a possibilidade da comparação do comportamento do ligante asfáltico com e sem incorporação da cera de carnaúba.

### 3.1.2. Agregados

Os agregados usados nesta pesquisa foram brita 19mm, brita 9,5mm, pó de pedra e cal hidratada como material de enchimento (fíler), obtidos no comércio local. A Figura 11 ilustra amostras dos agregados utilizados.

Figura 11- Agregados (a) Brita 19mm; (b) Brita 9,5mm; (c) Pó de Pedra; (d) Cal hidratada.





### 3.1.3. Cera de Carnaúba

O aditivo utilizado neste trabalho foi a cera de carnaúba do tipo CT1. Esta mesma cera foi também utilizada por Moraes (2018) e anteriormente por Silva (2016), onde este último especificou como a cera deve ser preparada para utilização como aditivo na mistura asfáltica.

Segundo Silva (2016), a cera de carnaúba deve ser moída e passada na peneira de nº40 (0,42mm), afim de facilitar no processo de mistura com o ligante. A Figura 12 apresenta a cera de carnaúba antes e após moída.

Figura 12 - Cera de Carnaúba.



## 3.2. MÉTODOS UTILIZADOS

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

### 3.2.1. Caracterização dos agregados

#### 3.2.1.1. Análise granulométrica

Para a realização da análise granulométrica dos agregados graúdos e miúdos, foi utilizada a norma DNIT-ME 083/98, que prescreve o procedimento adequado para determinar a composição granulométrica dos agregados através de peneiramento. As peneiras usadas foram as de malhas de abertura de 38,1mm, 25,4mm, 19,1mm, 12,7mm, 9,5mm, 4,8mm, 2mm, 0,42mm, 0,18mm e 0,074mm, que estão ilustradas na foto da Figura 13 abaixo.

Figura 13 - Sequência de peneiras

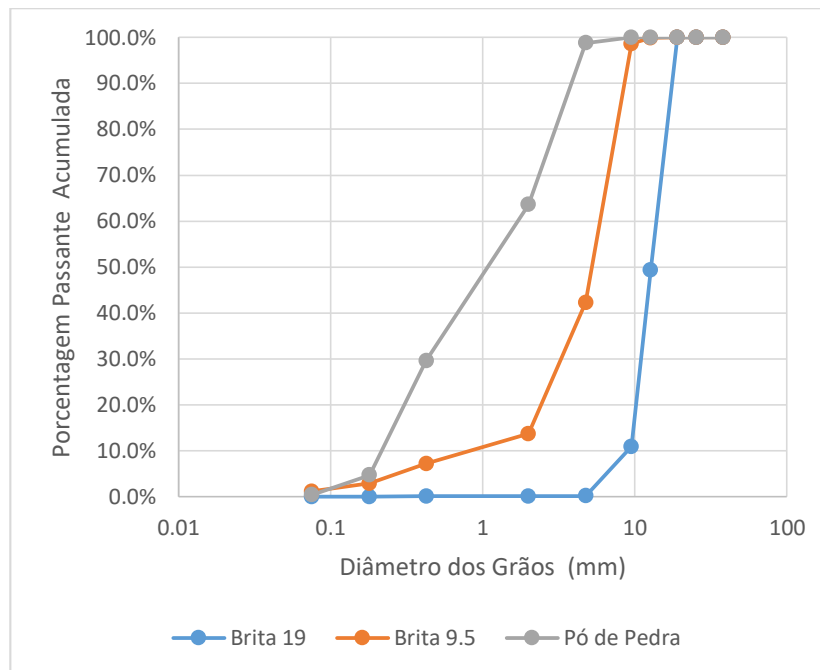


A fim de retirar a umidade do material, os agregados foram secos, previamente, em estufa a 110°C. O peneiramento foi feito manualmente e as quantidades retidas e passantes em cada peneira foram pesadas. Através dos dados de massa passantes nas peneiras, expressos em porcentagem da massa total, foi possível desenvolver a Tabela 5 e subsequentemente, a curva granulométrica dos agregados (Figura 14).

Tabela 5 - Porcentagem passante acumulada

<b>Peneira</b>	<b>Peneira (mm)</b>	<b>Brita 19</b>	<b>Brita 9.5</b>	<b>Pó de Pedra</b>
<b>1 1/2"</b>	<b>38.1</b>	100.0%	100.0%	100.0%
<b>1"</b>	<b>25.4</b>	100.0%	100.0%	100.0%
<b>3/4"</b>	<b>19</b>	100.0%	100.0%	100.0%
<b>1/2"</b>	<b>12.7</b>	49.3%	99.9%	100.0%
<b>3/8"</b>	<b>9.5</b>	10.9%	98.6%	100.0%
<b>N° 4</b>	<b>4.76</b>	0.2%	42.3%	98.8%
<b>N° 10</b>	<b>2</b>	0.1%	13.7%	63.6%
<b>N° 40</b>	<b>0.425</b>	0.1%	7.2%	29.6%
<b>N° 80</b>	<b>0.18</b>	0.0%	2.9%	4.7%
<b>N° 200</b>	<b>0.075</b>	0.0%	1.2%	0.4%

Figura 14 - Curva granulométrica dos agregados



### 3.2.1.2. Massa específica e absorção

#### 3.2.1.2.1. Absorção e densidade dos agregados graúdos

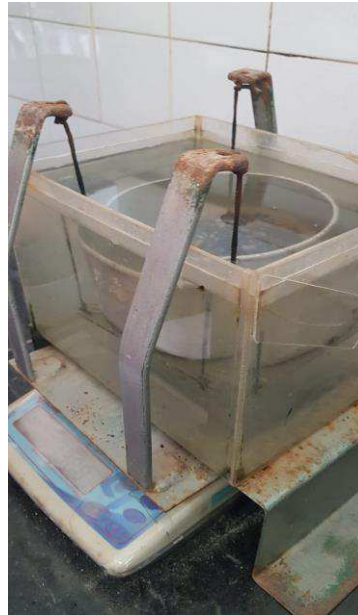
Para a determinação da absorção e densidade dos agregados graúdos utilizou-se a norma do DNIT – ME 081/98: Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo.

Para a brita 19 foram utilizados 3.000g de amostra, enquanto que para a brita 9.5, 2.000g, desprezando todo material passante na peneira 4.8mm. As amostras foram lavadas e colocadas em estufa para secagem. Após secas, foram imersas em água à temperatura ambiente por 24 horas.

Após retirá-las da água, o material foi seco superficialmente com a utilização de flanelas e pesado, a fim de determinar a massa na condição saturada superfície seca. Em seguida, foram colocadas num tanque d'água (Figura 15) sobre a balança e determinada a massa submersa.

Após isso, o material voltou a ser seco em estufa durante 4 horas, e em sequência pesado, determinando assim, a massa do agregado seco.

Figura 15 - Verificação da massa submersa da brita 19mm.



#### 3.2.1.2.2. Massa específica do agregado miúdo

Para a determinação da massa específica dos agregados miúdos se fez uso da norma NBR NM 52/2002: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente.

Foi selecionada uma amostra de aproximadamente 2000g de pó de pedra. Inicialmente, esse material fica imerso em água por 24h e em seguida foi seco em uma superfície plana através de uma corrente de ar. A Figura 16 ilustra o processo de secagem do agregado.

Figura 16 - Secagem superficial do pó de pedra.



Para verificar se o agregado estava na condição de saturado superfície seca, o material foi colado num molde tronco-cônico e compactado. Caso o agregado mantivesse a forma do molde, ainda existia umidade superficial. Portanto, este procedimento de secagem e moldagem se repetiu até que o agregado não mais conservasse a forma do molde.

Foram colocados duas amostras de 500g de pó de pedra em dois picnômetros, para determinar a massa do conjunto. Encheu-se, em seguida, o frasco com água destilada. Outros 500g de amostra foram pesados e colocado em estufa para determinar a massa da amostra seca.

Os picnômetros foram mantidos durante cerca de 1 hora em banho a temperatura constante e em seguida foram completados o picnômetros com água destilada, determinando a massa do conjunto (picnômetro + água + agregado).

Através dos dados coletados de massas e volumes, foi determinada, através de cálculos, a massa específica aparente do agregado miúdo.

#### 3.2.1.2.3. Resultados dos ensaios de massa específica dos agregados graúdos e miúdos

Utilizando os cálculos determinados nas normas aplicadas nos ensaios, foi possível determinar os valores de massa específica real, massa específica aparente e absorção dos agregados graúdos e miúdos. A Tabela 6 apresenta os resultados encontrados:

Tabela 6 - Massas específicas dos agregados.

<b>Agregados</b>	<b>Massa Específica Real (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa Específica Aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Absorção (%)</b>
<b>Brita 19</b>	2.7	2.72	0.35%
<b>Brita 9.5</b>	2.57	2.65	1.96%
<b>Pó de Pedra</b>	2.44	2.45	0.16%

#### 3.2.2. Cimento Asfáltico de Petróleo

##### 3.2.2.1. Mistura do CAP com cera de carnaúba

Para realizar a mistura entre o ligante asfáltico e a cera de carnaúba, foi necessário moer e passar a cera na peneira 40 (0,42mm) afim de facilitar o processo de mistura. Foi utilizado um teor de 2% de cera de carnaúba em relação com o CAP seguindo sugestão de Moraes (2018).

A princípio, o CAP foi inserido no recipiente do misturador e aquecido a uma temperatura de 130°C, aplicando uma rotação de 1015 rotações por minuto durante 40 minutos sendo a cera adicionada lentamente ao CAP nos primeiros minutos (Figura 17).

Figura 17 - Procedimento de mistura do CAP com cera.



Os ensaios descritos a seguir foram realizados com o CAP puro e com a mistura de CAP com cera de carnaúba, com o intuito de caracterizar o ligante e a mistura.

#### 3.2.2.2. Ensaio de Penetração

A penetração é a profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha padronizada de 100g penetra numa amostra de cimento asfáltico durante 5 segundos, à temperatura de 25°C (BERNUCCI, 2008). Para a realização deste ensaio se faz uso do Penetrômetro (Figura 18).

Figura 18- Penetrômetro.





A norma DNIT 155/2010-ME regulamenta o ensaio e prescreve que para cada ensaio devem ser feitas três medidas de penetração, e a média desses valores será o resultado final. Portanto, quanto menor a penetração da agulha, maior será a consistência do CAP.

A importância do ensaio de penetração está, também, na classificação do cimento asfáltico de petróleo, uma vez que o classifica quanto a sua dureza.

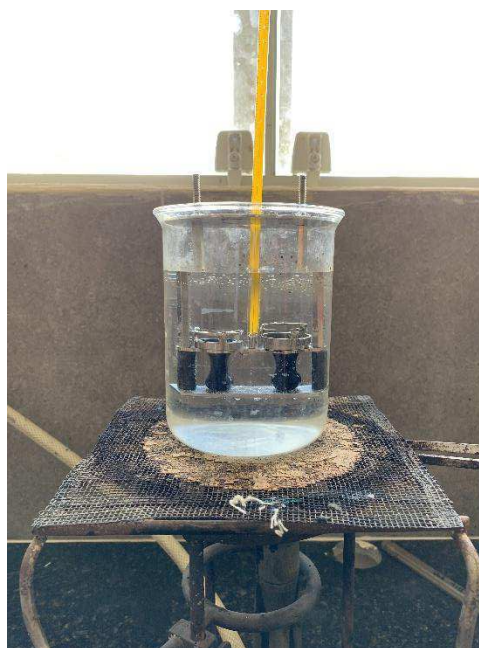
### 3.2.2.3. Ponto de Amolecimento

Segundo Bernucci (2008), o ponto de amolecimento é uma medida empírica que correlaciona a temperatura na qual o asfalto amolece quando aquecido e atinge uma determinada condição de escoamento.

Este ensaio utiliza a aparelhagem ‘Anel e Bola’ e segue o método prescrito na norma DNIT ME 131/2000, que consiste em colocar duas bolas de aço padronizadas no centro de uma amostra de CAP confinada num anel metálico e aquecer o conjunto. A partir de certa temperatura, o ligante não vai mais suportar o peso da esfera, que irá se deslocar para baixo junto ao asfalto.

O Ponto de Amolecimento, portanto, será a temperatura no instante em que o material que envolve a bola tocar a placa do fundo do equipamento padrão do ensaio. A Figura 19 ilustra o ensaio de Ponto de amolecimento sendo executado.

Figura 19- Ensaio de Ponto de Amolecimento.



#### 3.2.2.4. Viscosidade Rotacional

A realização do ensaio de viscosidade rotacional foi segundo a norma NBR 15184/2007, e consiste em determinar a viscosidade do ligante através da medição do torque necessário para a rotação do *spindle*, que estará imerso na amostra de CAP. O ensaio é realizado nas temperaturas de 135, 150 e 177°C, e para cada temperatura, se obtém um resultado de viscosidade.

O aparelho utilizado para o ensaio é o viscosímetro rotacional do tipo Brookfield, modelo DVII+, que é operado juntamente a um controlador de temperatura, o Thermosel (Figura 20).

Figura 20- Viscosímetro rotacional Brookfield.



#### 3.2.3. Dosagem SUPERPAVE

A metodologia SUPERPAVE foi desenvolvida pelo Strategic Highway Research Program (SHRP), um programa de pesquisa de asfalto estabelecido nos Estados Unidos como um plano de estudos para melhorar o desempenho das estradas, sendo o SUPERPAVE um dos seus principais resultados. A dosagem SUPERPAVE trabalha com duas ferramentas que são a compactação em laboratório e os testes de desempenho e consiste basicamente em estimar um teor provável de projeto pela fixação do volume de vazios e conhecimento da granulometria dos agregados (PRUDENTE, 2015).

A principal diferença entre o procedimento SUPERPAVE e a dosagem Marshall é que enquanto esta última opera a compactação através de golpes, na SUPERPAVE a compactação é feito por amassamento giratório. Outra importante diferença entre os dois métodos é a forma de escolher a granulometria do agregado, onde a metodologia SUPERPAVE utiliza os conceitos de pontos de controle e zona de restrição (BERNUCCI, 2008).

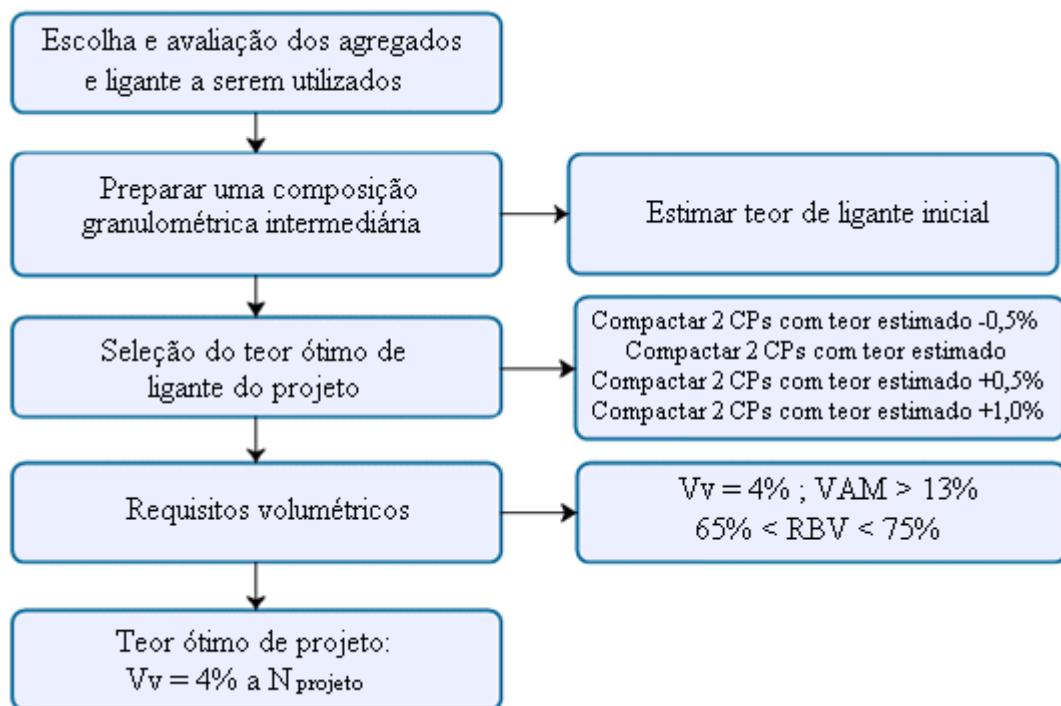


Segundo Asphalt Institute (2003) os pontos de controle são faixas através do qual as gradações, que variam de acordo com o tamanho nominal da composição dos agregados, devem passar. Já a zona de restrição é uma região na qual a curva não pode passar, uma vez que garantiriam à mistura uma estrutura frágil, que depende muito do ligante para obter resistência ao cisalhamento (BERNUCCI, 2008).

Ainda segundo Bernucci (2008), vários investigadores propuseram faixas granulométricas para a densidade máxima, sendo a mais conhecida e a utilizada nesta pesquisa, a curva de Fuller.

A dosagem SUPERPAVE consiste basicamente em estimar um teor provável de projeto de ligante através da fixação do volume de vazios e da granulometria dos agregados. O procedimento adotado é esquematizado no fluxograma da Figura 21, abaixo:

Figura 21 - Fluxograma da Dosagem SUPERPAVE



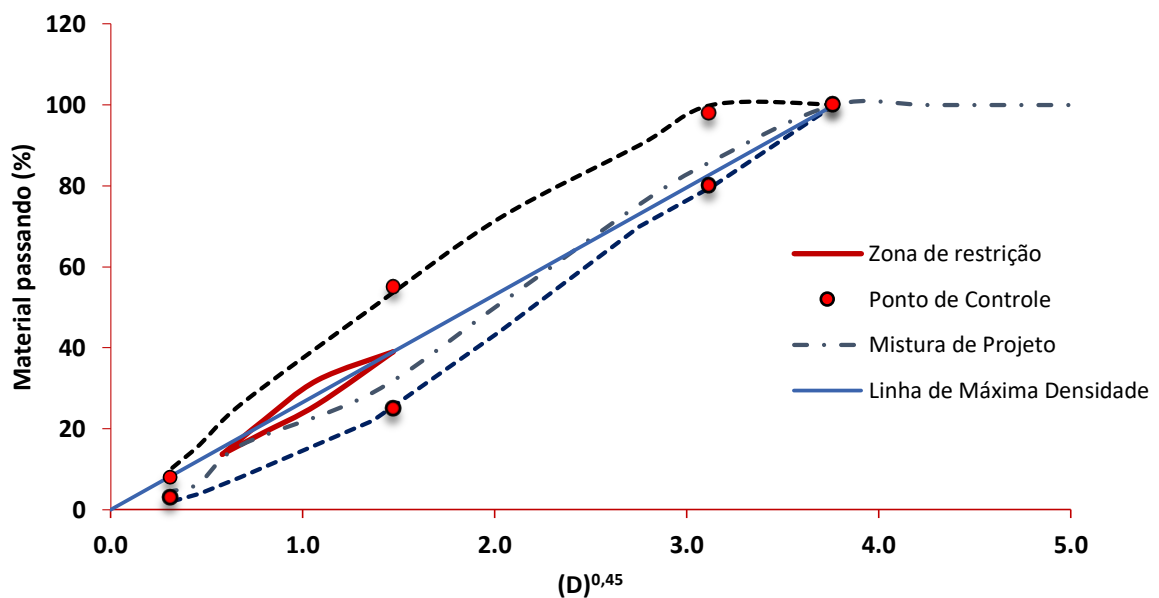
A composição granulométrica foi determinada a partir da granulometria dos agregados (Figura 13). Foi elaborada, então, uma curva de Fuller intermediária para o diâmetro nominal de 19 mm, utilizando-se a faixa C especificada pelo DNIT, e também as zonas de restrições e pontos de controle. A proporção dos agregados encontrada para cada mistura é apresentada na Tabela 7, a seguir:

Tabela 7 - Proporção de agregados na mistura

Brita 19	Brita 9.5	Pó de Pedra	Fíller
27%	38%	31%	4%

A curva de Fuller (Figura 22) apresenta, graficamente, a composição granulométrica dos agregados, bem como as zonas de restrições e pontos de controles.

Figura 22 - Curva de Fuller intermediária



### 3.2.3.1. Determinação da Temperatura de Usinagem e Compactação

As temperaturas são obtidas dos dados do ensaio de Viscosidade Rotacional, através do gráfico logarítmico que relaciona a viscosidade e a temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).

De acordo com Bernucci (2008), a temperatura do ligante na hora de ser misturado aos agregados deve ser tal que sua viscosidade esteja situada entre 150 e 190 cP, não podendo ser inferior a  $107^{\circ}\text{C}$  e nem superior a  $177^{\circ}\text{C}$ . Já a temperatura dos agregados deve ser de 10 a  $15^{\circ}\text{C}$  acima da definida para o CAP, sem ultrapassar, também,  $177^{\circ}\text{C}$ . Por fim, a temperatura de compactação deve ser tal que o ligante apresente viscosidade entre 250 e 310 cP.

As temperaturas encontradas para o CAP puro são apresentadas a seguir na Tabela 8:

Tabela 8 - Temperaturas de Usinagem e Compactação

<b>Temperatura do Ligante (°C)</b>	153 °C
<b>Temperatura dos Agregados (°C)</b>	165°C
<b>Temperatura de Compactação (°C)</b>	142°C

### 3.2.3.2. Compactação dos Corpos de Prova

Para atingir seu objetivo de determinar o teor ótimo de ligante, a metodologia SUPERPAVE parte da premissa de que essa quantidade de CAP seja tal que a mistura tenha um volume de vazios de 4%. Para determinar esse valor, é necessário realizar o cálculo da densidade máxima teórica da mistura e também a densidade do corpo de prova compactado.

Para tanto, inicialmente foram moldados corpos de provas com diferentes teores de CAP puro, adotando um teor inicial e fazendo também com  $\pm 0,5\%$  e  $+1\%$  em relação a esse teor estimado. Em seguida os agregados e o ligante foram misturados e, antes de serem compactados, foram deixados em estufa por duas horas, afim de simular o envelhecimento de curto prazo durante a usinagem. Para compactá-los utilizou-se do compactador giratório SERVOPAC (Figura 23), com um número de giros de 100 (N de projeto).

Figura 23 - Compactador giratório SERVOPAC



Para a determinação da densidade máxima teórica das misturas (DMT), se faz uso de dois métodos: o Método Teórico e o Rice Test.

#### 3.2.3.2.1. Método Teórico

A densidade máxima teórica da mistura asfáltica é obtida através de uma ponderação proporcional das porcentagens e densidades de todos os materiais que compõem a mistura, incluindo os agregados, fíller e ligante. Todavia, esse método leva em consideração os materiais separadamente, não considerando a penetração do ligante nos agregados. Desta forma, não é indicado a utilização desses resultados para os cálculos de volume de vazios da mistura.

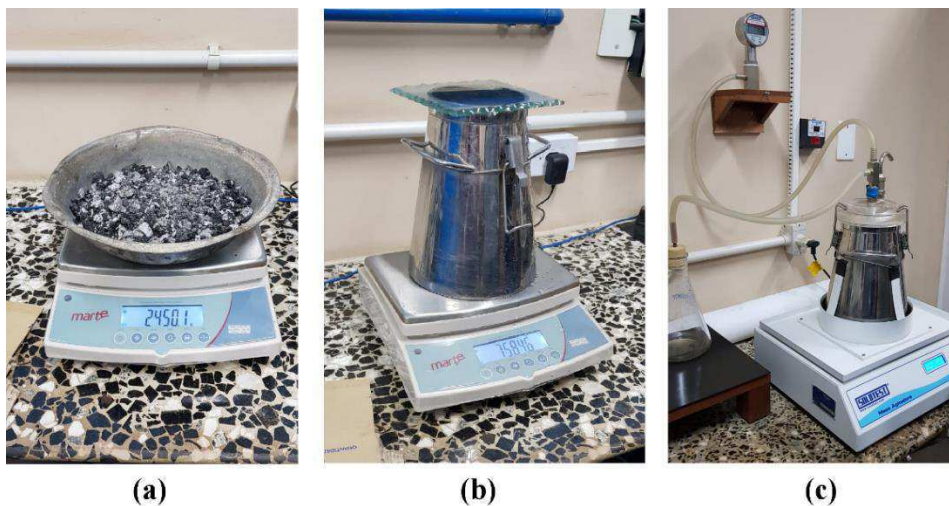
#### 3.2.3.2.2. Rice Test

A vantagem do método do Rice Test, segundo Bernucci (2008), é que não é necessário obter as massas específicas individuais dos constituintes para se ter a massa específica da mistura, além de que a absorção do ligante pelos agregados também é considerada.

No método Rice, a densidade máxima é obtida pela razão entre o peso ao ar de um volume de mistura asfáltica não compactada e o peso de um volume igual de água destilada livre de ar (MARQUES, 2004).

Para a execução do Rice Test foram misturadas quatro misturas asfálticas com diferentes teores de CAP (4,5%, 5%, 5,5% e 6%) e cada uma foi pesada. Em seguida, o recipiente utilizado no ensaio foi preenchido com água e pesado. A mistura foi então colocada no recipiente vazio, que após isso foi preenchido de água até que o material ficasse submerso. Foi então aplicada uma pressão de vácuo, com o intuito de retirar o ar existente entre os agregados recobertos pelo ligante. Por fim, completa-se o recipiente com água e pesa-se todo o conjunto (Recipiente, água e mistura). A Figura 24 retrata alguns dos passos para a execução do Rice Test.

Figura 24- (a) Pesagem da mistura; (b) Pesagem do recipiente com água; (c) Aparelho Rice



A massa específica máxima medida ( $G_{mm}$ ) é, então, determinada pela expressão abaixo, representada na Figura 25:

$$G_{mm} = \frac{A}{A+B-C} \quad (\text{Equação 1})$$

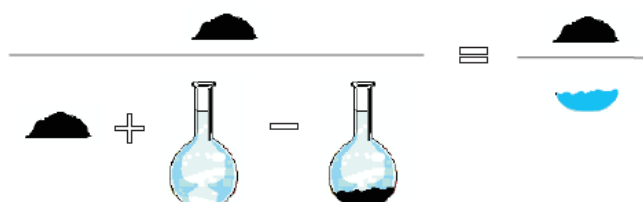
Onde:

A = massa da amostra (g);

B = massa do recipiente preenchido com água (g);

C = massa do recipiente com a mistura e água (g).

Figura 25 - Massas consideradas para o cálculo da  $G_{mm}$



Fonte: Bernucci (2008).

### 3.2.3.3. Determinação do teor de ligante

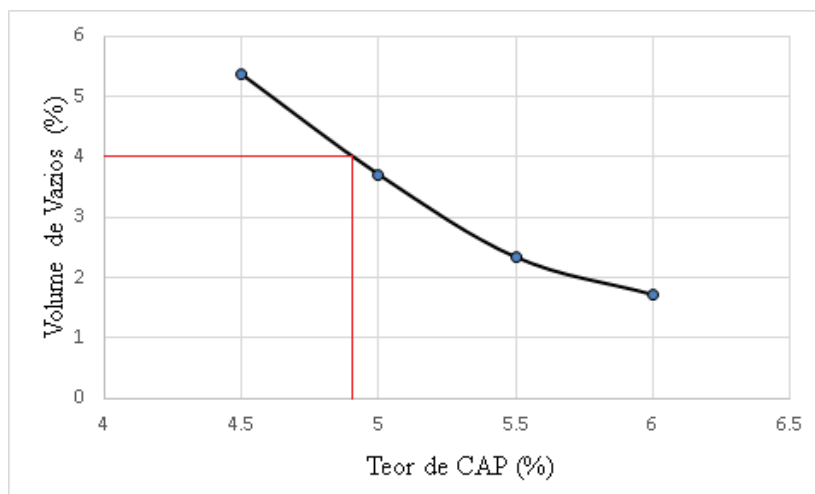
Após realizadas as compactações dos corpos de provas com os diferentes teores de ligante asfáltico, dos mesmos foram medidas suas dimensões afim de calcular o volume e pesados (seco e submerso em água). Juntamente a esses números, utilizou-se os resultados de massa específica da mistura pelo Rice Test para encontrar os parâmetros volumétricos da mistura, que são Volumes de Vazios ( $V_v$ ), Vazios do Agregado Mineral (VAM) e Relação Betume/Vazios. Os resultados encontrados para os teores de CAP adotados estão na Tabela 9.

Tabela 9 - Tabela resumos das propriedades volumétricas para cada teor de CAP.

	4,50%	5,00%	5,50%	6,00%	Valores Normalizados
<b>V<sub>v</sub> (%)</b>	5,37	3,71	2,34	1,72	<b>4%</b>
<b>VAM (%)</b>	14,63	14,34	14,48	14,81	<b>&gt; 13%</b>
<b>G<sub>mm</sub> (%)</b>	94,63	96,29	97,66	98,28	<b>96%</b>
<b>RBV (%)</b>	72,13	72,23	72,99	73,80	<b>65% &lt; RBV &lt; 75%</b>

Da tabela acima, é possível verificar que nenhum dos teores atendeu ao valor normalizado de volume de vazios (4%). Para definir, então, o teor ótimo, foi utilizado o gráfico que relaciona os teores de CAP com os volumes de vazios (Figura 26). A partir daí, foi encontrado o teor ótimo de ligante, que corresponde a 4,9% da mistura.

Figura 26 - Gráfico Volume de Vazios *versus* Teor de CAP



### 3.2.4. Caracterização mecânica das misturas asfálticas

#### 3.2.4.1. Resistência a tração por compressão diametral – RT

O ensaio de Tração indireta por compressão diametral, ou *Brazilian Test*, determina a tensão máxima suportada por uma mistura asfáltica até a ruptura. Este ensaio foi desenvolvido pelo professor Luís Fernando Lobo Carneiro, e é constituído de um equipamento simples que permite a imposição de um plano de ruptura semelhante ao plano de aplicação de uma carga.

O RT segue a norma DNIT 136/2010-ME e a preparação dos corpos de prova é realizada através do compactador giratório SERVOPAC, sendo utilizado o teor ótimo de ligante encontrado na dosagem SUPERPAVE. O equipamento utilizado para o procedimento é uma prensa mecânica (Figura 27) que aplica ao corpo de prova numa carga progressiva a uma velocidade de  $0,8 \pm 0,1$  mm/s, até que ocorra a ruptura segundo o plano diametral vertical.

Figura 27 - Prensa utilizada para o ensaio de RT



O valor de resistência a tração do corpo de prova rompido é, portanto, calculada através da expressão:

$$\sigma_R = \frac{2 \cdot F \cdot k}{10 \pi \cdot D \cdot H} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$\sigma_R$  = resistência a tração, em MPa;

F = carga de Ruptura, em kgf;

k = coeficiente da prensa, igual a 1,931;

D = diâmetro do CP, em cm;

H = altura do CP, em cm.

#### 3.2.4.2. Módulo de Resiliência – MR

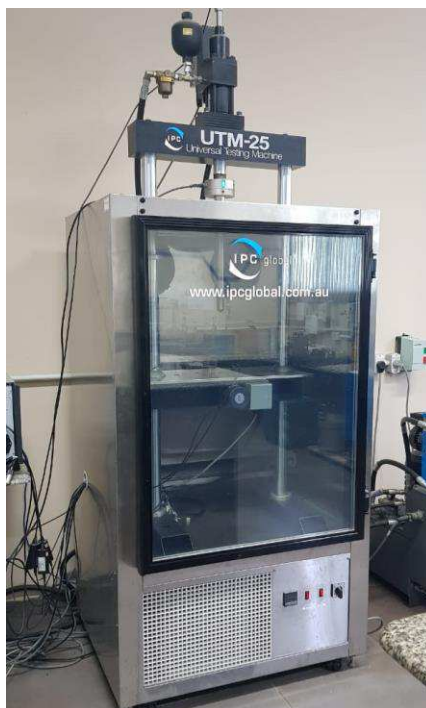
O ensaio de módulo de resiliência é realizado aplicando-se uma carga repetidamente no plano diametral vertical de um corpo de prova. Transversalmente ao plano de aplicação da carga, será gerada uma tensão. Então, mede-se o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente a tensão gerada (BERNUCCI, 2008).

O procedimento do ensaio de MR segue a norma DNIT 135/2017-ME e os equipamentos utilizados para realização do ensaio foram a prensa *Universal Testing Machine* (UTM-25), que é um sistema pneumático de carregamento com controle do tempo e frequência de aplicação da carga; um sistema de medição do deslocamento axial, o LVDTs (*Linear Variable Differential Transducer*) e o software UTS003 1.39 *Indirect Tensile Modulus Test*, para coleta e análise dos dados. A Figura 28 ilustra o UTM-25, responsável pela aplicação da carga à mistura.

O ensaio de Módulo de Resiliência tem por objetivo simular o efeito do tráfego, que aplica cargas transientes provenientes do movimento dos veículos. Afim de reproduzir isso, o procedimento consiste na aplicação de uma carga a uma frequência de sessenta ciclos por minuto, com tempo de aplicação de 0,1 segundo e 0,9 segundo de repouso. O valor da carga aplicada é referente a 10% da resistência à tração da mistura obtida no ensaio de RT.



Figura 28 - Prensa UTM - 25.



#### 3.2.4.3. Ensaio de resistência ao dano por umidade induzida – Lottman Modificado

O ensaio de Lottman Modificado é usado para avaliar as propriedades de adesividade em misturas asfálticas, em termos de resistência a tração, considerando o efeito deletério da água em diferentes ciclos de temperaturas.

A realização desse ensaio segue a norma AASHTO T 283 e objetiva avaliar os danos causados nas misturas asfálticas devido à ação da água e a ciclos de gelo e degelo. Para isso foram moldados corpos de prova, tanto com CAP puro como com CAP mais cera de carnaúba, compactados no compactador giratório, aplicando 25 giros. Os corpos de prova foram separados em dois grupos: condicionados e não condicionados.

Os CPs não condicionados foram submetidos a um banho a 25°C por 2h e rompidos à tração por compressão diametral (RT), sem condicionamento térmico.

Já os condicionados, foram colocados em um recipiente com água, onde foi aplicado um vácuo até a saturação entre 70 e 80%. Posteriormente, com o intuito de simular condições de temperaturas extremamente baixas, os corpos de prova foram inseridos em sacos plásticos com 10ml de água e colocados na geladeira, a uma temperatura de -18°C, durante 16 horas. Em seguida, os corpos de prova, ainda dentro das sacolas, foram colocados a uma temperatura de 60°C por cerca de 24 horas. Após isso, afim de estabilizar a temperatura do conjunto, foram

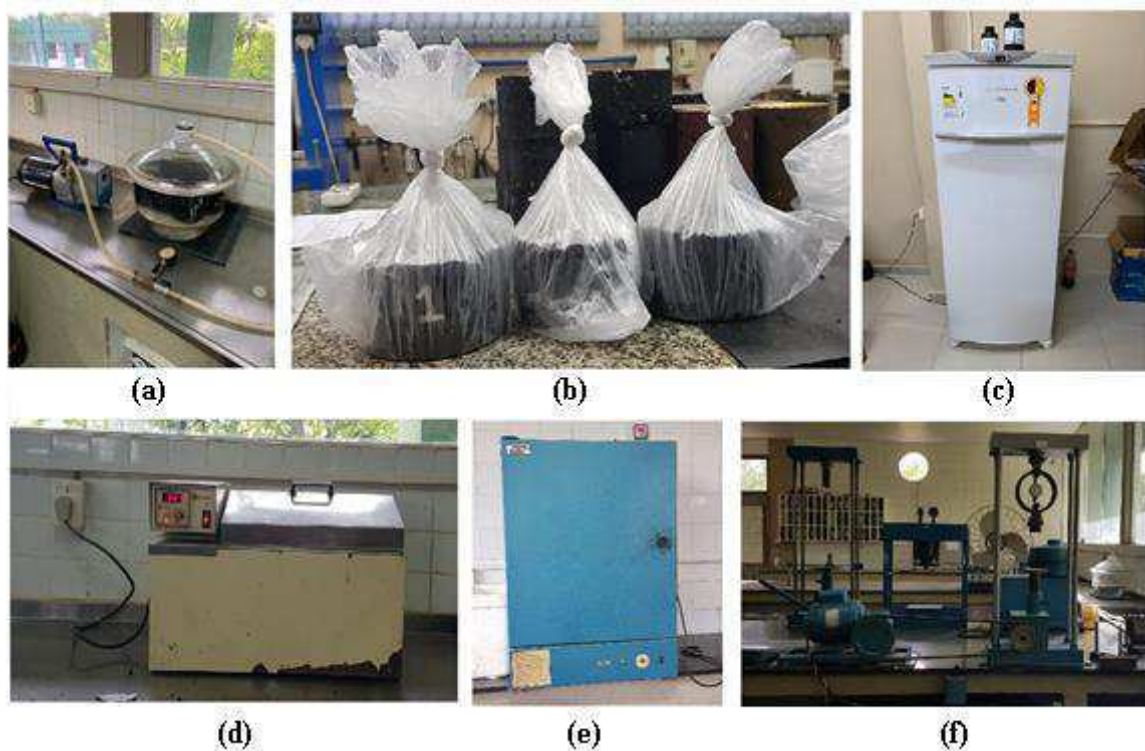


colocados imersos em água a uma temperatura de 25°C por 2 horas. Por fim, retirou-se os corpos de prova dos sacos e os submeteu ao ensaio de tração por compressão diametral (RTu).

Portanto, a análise é feita através da relação entre a RT e a RTu, encontrando a resistência a tração por umidade induzida (RRT), dada em porcentagem. O critério para aceitação de uma mistura asfáltica segundo a AASHTO T283 é de 80%, enquanto para DNIT 031/2006 é 70%.

A Figura 29, retrata algumas das etapas realizadas no ensaio de resistência ao dano por umidade reduzida.

Figura 29 – (a) Saturação dos corpos de prova; (b) Inserção dos CPs nos sacos plásticos com 10ml de água destilada; (c) Amostras na geladeira a -18°C; (d) CPs em água a 60°C; (e) CPs na estufa a 60°C; (f) Rompimento dos CPs por compressão diametral.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DO CAP PURO E MODIFICADO

Os ensaios realizados para caracterização do ligante asfáltico foram também feitos com a adição de 2% em massa de cera de Carnaúba ao ligante. Segundo Moraes (2018), este é o teor que apresenta melhores resultados reológicos e mecânicos.

#### 4.1.1. Ensaio de Penetração

Os resultados obtidos a partir do ensaio de penetração com o ligante asfáltico puro e com o ligante adicionado de 2% de cera de carnaúba estão expostos na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados do Ensaio de Penetração

	<b>CAP PURO</b>	<b>CAP + Cera</b>
<b>Penetração (0,1mm)</b>	49,2	61,8

A inserção da cera ao CAP ocasionou um aumento de aproximadamente 26% em relação ao CAP puro. Esse aumento já era esperado, uma vez que a adição da cera ao ligante ocasiona uma redução da viscosidade do ligante, e portanto, uma menor resistência do material à penetração da agulha.

Apesar de coerente com a previsão, o resultado aqui encontrado difere dos resultados vistos em outras pesquisas com cera de carnaúba. Moraes (2018) e Silva (2016) em seus estudos, obtiveram uma redução na penetração com a adição de 2% de cera de carnaúba ao ligante de 10% e 15%, respectivamente, em relação ao CAP puro. Essa diminuição, de acordo com Moraes (2018), possivelmente se dá, pois na temperatura do ensaio (25°C) a cera atua com carga particular, reduzindo a penetração, tornando a mistura mais consistente.

#### 4.1.2. Ponto de Amolecimento

Apresenta-se na Tabela 11, os resultados oriundos do ensaio de Ponto de Amolecimento com o CAP com e sem a adição de cera de carnaúba.

Tabela 11 - Resultados do Ponto de Amolecimento

	<b>CAP PURO</b>	<b>CAP + Cera</b>
<b>Ponto de Amolecimento (°C)</b>	48,25	47,0

Como é possível verificar na tabela acima, ao adicionar 2% em massa da cera de carnaúba ao ligante o ponto de amolecimento ocorreu uma redução 2,5% em relação ao CAP puro. Todavia, de acordo com as especificações do DNIT, o ponto de amolecimento mínimo para o CAP 50/70 é de 46°C, logo, mesmo com a redução no resultado, o ligante com cera se mostra satisfatório.

Moraes (2018) em sua pesquisa, encontrou valores bem próximos aos encontrados aqui neste trabalho, contudo, a adição de 2% de cera de carnaúba à mistura ocasionou um aumento de 1% no ponto de amolecimento. Silva (2016) também obteve um aumento em seus estudos, de 4% em relação ao ligante puro.

A diminuição no ponto de amolecimento reflete uma diminuição da rigidez do material, que é o contrário do que se esperava, uma vez que o aumento da rigidez é um benefício em relação a longevidade na utilização em campo do material.

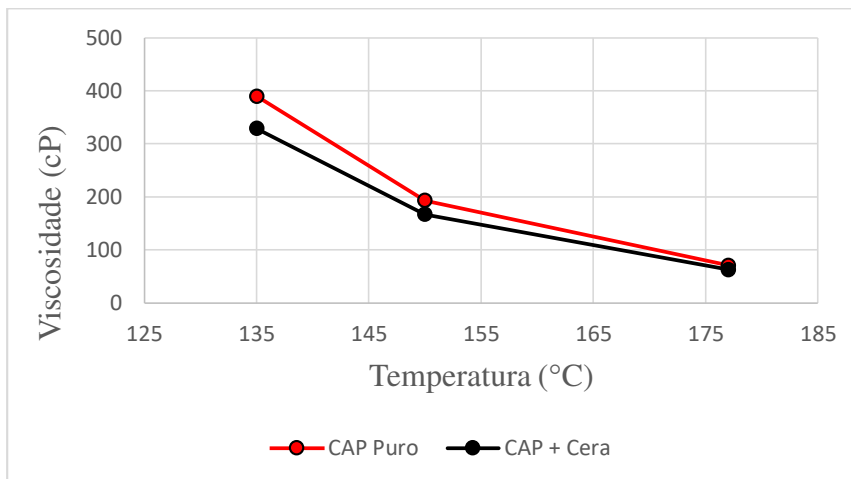
#### 4.1.3. Viscosidade Rotacional

Os resultados obtidos no ensaio de viscosidade rotacional Brookfield para o ligante puro e ligante modificado com cera de carnaúba, estão apresentados na Tabela 12 e no gráfico da Figura 30.

Tabela 12 - Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional.

	<b>Viscosidade Rotacional (cP)</b>	
	<b>CAP PURO</b>	<b>CAP + Cera</b>
<b>135°C</b>	390	329
<b>150°C</b>	193	167
<b>177°C</b>	71	63

Figura 30 - Gráfico Viscosidade versus Temperatura para o CAP puro e CAP com cera



A adição de 2% de cera de carnaúba ao ligante, como esperado, resultou numa diminuição dos valores de viscosidade de 16, 13 e 11%, para as temperaturas de 135, 150 e 177°C, respectivamente. Esse resultado comprova a importância da incorporação da cera de carnaúba ao CAP nas reduções das temperaturas de produção e compactação das misturas asfálticas.

A redução da viscosidade devido à adição da cera de carnaúba é observada também nos ensaios realizados por Moraes (2018). Para o teor de 2% em massa de cera, a autora, obteve uma redução de 19% na viscosidade comparada ao CAP puro, o que resultou numa diminuição de 6% nas temperaturas de usinagem e compactação, não sendo considerada, porém, uma mistura asfáltica morna. Já Silva (2016) obteve uma redução de cerca de 27% na viscosidade, a partir da adição de 2% de cera ao ligante.

O ensaio de viscosidade rotacional gera um gráfico que relaciona a viscosidade e a temperatura (Figura 30) e através dele foi possível determinar as temperaturas ideais de usinagem e compactação das misturas asfálticas. A partir da inserção da cera de carnaúba ao ligante, essas temperaturas tiveram uma redução de cerca de 2%.

As temperaturas ótimas de usinagem e compactação encontradas para a mistura de CAP com cera de carnaúba foram reduzidas em 10°C, caracterizando-se como outra amostra de mistura asfáltica a ser utilizada nesta pesquisa. Essa última mistura, pelas temperaturas utilizadas, passa a se enquadrar como uma mistura asfáltica morna, daí a importância de se analisar a redução de 10°C nas temperaturas de usinagem e compactação.

As temperaturas do ligante, dos agregados e de compactação das três amostras são expostas na Tabela 13, abaixo.

Tabela 13- Temperaturas de Usinagem e Compactação.

	<b>CAP Puro</b>	<b>CAP + Cera</b>	<b>CAP + Cera -10°C</b>
<b>Temperatura do Ligante (°C)</b>	153	150	140
<b>Temperatura dos Agregados (°C)</b>	165	162	152
<b>Temperatura de Compactação (°C)</b>	142	138	128

#### 4.2. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Para mensurar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas com a adição de cera de carnaúba e compará-las em sua temperatura ótima e com a redução de 10°C na temperatura foram realizados os ensaios mecânicos de RT, MR e Lottman com corpos de prova de CAP puro, CAP com adição de 2% de cera de carnaúba na temperatura ótima e com redução de 10°C em relação à essas temperaturas, determinadas a partir do ensaio de viscosidade (Tabela 13).

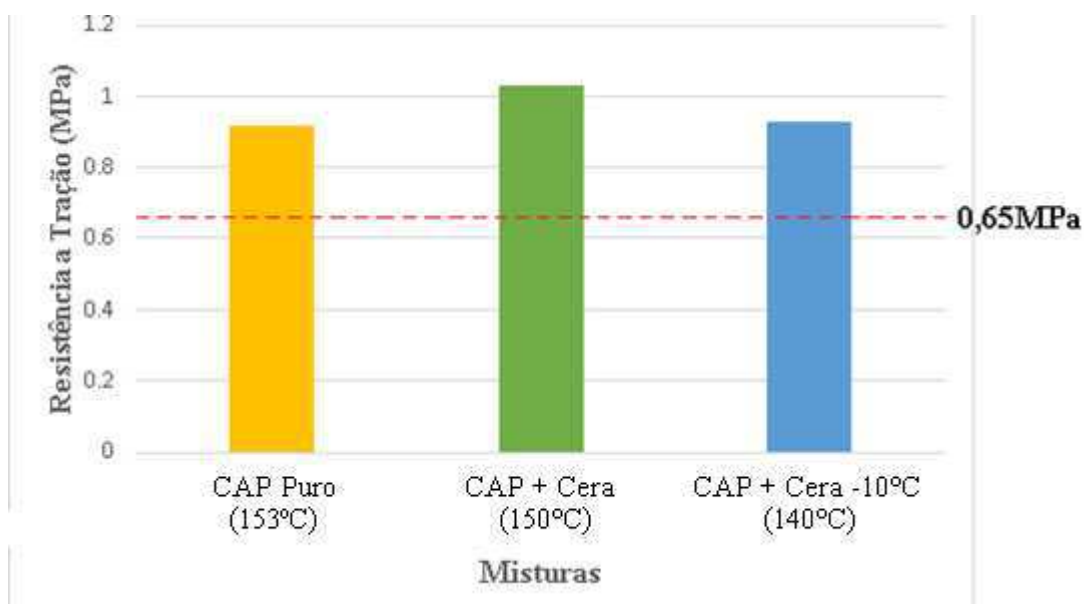
##### 4.2.1. Resistência a tração por compressão diametral – RT

Através da realização do ensaio de RT foi possível encontrar os seguintes valores de resistência a tração, expostos na Tabela 14 e Figura 31.

Tabela 14- Resultados do ensaio de RT.

	<b>CAP Puro (153°C)</b>	<b>CAP + Cera (150°C)</b>	<b>CAP + Cera -10°C (140°C)</b>
<b>Resistência à Tração (MPa)</b>	0,92	1,03	0,93

Figura 31 - Resultados do ensaio de RT.



Segundo a norma do DNIT 031/2006 – ES, o valor médio de resistência a tração é de no mínimo 0,65MPa para misturas asfálticas utilizadas como camada de rolamento. Observa-se, portanto, que os resultados para os três tipos de misturas são satisfatórios e apresentam-se dentro do limite especificado por norma.

Os resultados apontam aumentos de 12% e 1% das misturas com adição de cera de carnaúba na temperatura ótima e com cera a menos 10°C, respectivamente, em relação à mistura com CAP puro. Comparando as misturas com cera, a redução de 10°C nas temperaturas, ocasionou uma redução de 10% no valor da resistência à tração.

Com a adição da cera de carnaúba e posterior redução de temperaturas, esperava-se que o CAP puro apresentasse os melhores resultados, uma vez que as menores temperaturas de produção e compactação, resultariam numa menor rigidez da mistura (Moraes, 2018). No entanto, observou-se um aumento nos resultados de RT para a adição de cera à mistura, que pode ser explicado pelas diferentes condições de produção dos corpos de prova e da dificuldade de manter as temperaturas desejadas com precisão em laboratório. A redução na resistência comparando a mistura com cera na temperatura ótima e com redução de 10°C já era esperada, já que, como dito anteriormente, a temperatura e a rigidez do material estão diretamente ligadas.

Moraes (2018) em sua pesquisa, encontrou um valor bem próximo ao aqui detectado, 0,95MPa para a mistura com 2% de cera de carnaúba. Contudo, comparando-o com a mistura com CAP puro (1,20MPa), houve uma diminuição de 20% na resistência, enquanto que no presente trabalho, um aumento.

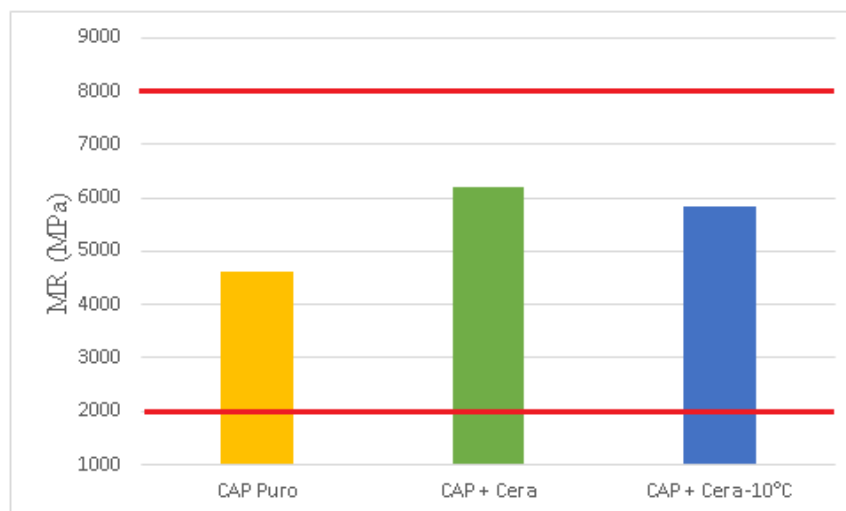
#### 4.2.2. Módulo de resiliência – MR

A Tabela 15 e a Figura 32 apresentam os resultados de módulo de resiliência para os corpos de provas ensaiados.

Tabela 15 - Resultados do ensaio de MR.

	<b>MR (MPa)</b>
<b>CAP Puro</b>	4602
<b>CAP + Cera</b>	6202
<b>CAP + Cera -10°C</b>	5844

Figura 32 - Resultados do ensaio de MR.



De acordo com Bernucci (2008), os valores típicos de misturas asfálticas a 25°C estão situados entre 2000 e 8000 MPa, como observou-se que todas as misturas apresentam-se dentro dessa faixa. Pôde-se verificar, também, que há uma correlação entre os resultados de MR e RT, em que para ambos os ensaios, os valores encontrados para o CAP puro foram os mais baixos, enquanto que para o CAP com adição de cera em temperatura ótima, se mostraram os mais elevados.

Como pode ser aferido da tabela 15 e figura 32, a mistura de CAP + cera propiciou um aumento de 35% no módulo de resiliência em relação à mistura com CAP puro. Quando diminuídas as temperaturas em 10°C, o aumento foi de 27% em relação ao CAP não modificado. Analisando apenas as duas misturas com ligante modificado com cera, observou-se que a redução das temperaturas acarretou uma queda de 6% no resultado do MR.

Em seus estudos, Moraes (2018) obteve, a partir da incorporação de 2% de cera de carnaúba ao ligante, uma redução de 14% nos resultados do ensaio de MR em relação às amostras com CAP puro.

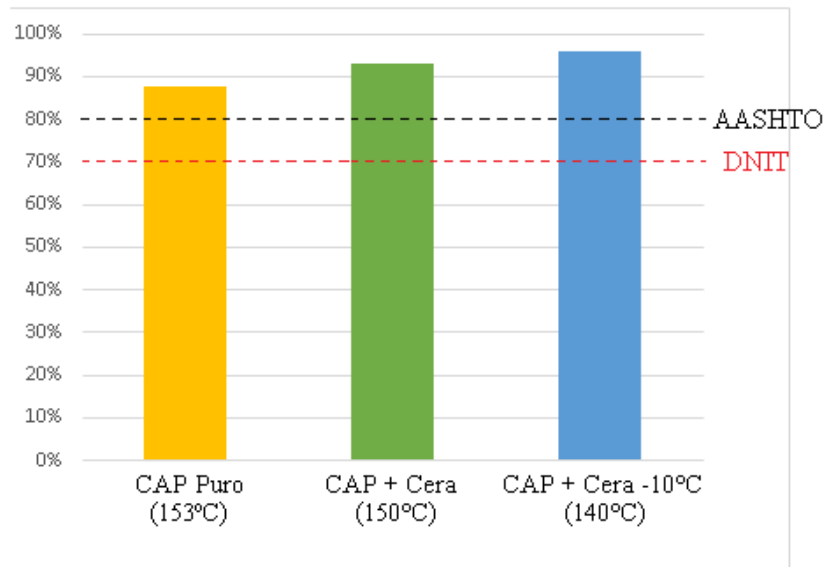
#### 4.2.3. Resistência ao dano por umidade induzida – Lottman Modificado

Na Tabela 16 e na Figura 33 estão apresentados os resultados obtidos através do ensaio de Lottman.

Tabela 16 - Resultados do ensaio de Lottman.

	<b>RT (MPa)</b>	<b>RTu (MPa)</b>	<b>RRT (%)</b>
<b>CAP Puro</b>	430	377	88%
<b>CAP + Cera</b>	417	388	93%
<b>CAP + Cera -10°C</b>	388	372	96%

Figura 33 - Resultados do ensaio de Lottman.



De acordo com a AASHTO T 283 de 2007, os valores de resistência retida a tração devem ser superiores a 80%. A especificação do DNIT-ES 031 de 2006 normatiza que este valor deve ser de 70%. Conforme exposto no gráfico acima, é possível verificar que tanto as amostras de CAP puro, como as misturas com adição de cera de carnaúba na temperatura ótima e com menos 10°C, satisfazem as especificações mínimas de ambas as normas.

Dos resultados obtidos, pode-se observar que a mistura com CAP + cera aumentou em cerca de 6% a resistência retida a tração da mistura em relação à amostra com CAP puro. Quando diminuídas as temperaturas de usinagem e compactação da mistura com cera de carnaúba em 10°C, os resultados mantiveram-se superiores à mistura com CAP puro (um aumento de 9%), e ainda 3% maiores que as misturas com cera produzidas nas temperaturas ótimas. Moraes (2018) obteve em sua pesquisa, um aumento de aproximadamente 43% com a adição de 2% de cera de carnaúba em relação à mistura com CAP puro.



## 5.0 CONCLUSÕES

Os resultados experimentais dessa pesquisa fornecem conhecimento de comportamento das misturas asfálticas produzidas com a adição de cera de carnaúba ao ligante em diferentes temperaturas, em relação aos ensaios mecânicos de Resistência a Tração Diametral, Módulo de Resiliência e Resistência ao dano por umidade induzida, com método de dosagem SUPERPAVE.

Foram estudados três tipos de misturas asfálticas, sendo elas com CAP puro, CAP com 2% de cera de carnaúba e CAP com 2% de cera de carnaúba com redução de 10°C em relação as temperaturas de usinagem e compactação determinadas.

Na caracterização do ligante asfáltico, a incorporação de cera de carnaúba ao CAP resultou num aumento expressivo no ponto de penetração, devido à redução na viscosidade do material. Para o ponto de amolecimento, a mistura de ligante com cera ocasionou numa pequena redução quando comparada ao ligante puro, porém continuou dentro dos limites de especificação.

Através do ensaio de viscosidade rotacional Brookfield, foi possível concluir que a adição de cera de carnaúba ao ligante acarreta numa diminuição da viscosidade do material e, conseqüentemente, há também a diminuição das temperaturas ótimas de usinagem e compactação, as quais foram de 3 e 4°C, respectivamente. Sendo assim, as misturas modificadas puderam ser produzidas em temperaturas inferiores.

Os ensaios mecânicos realizados demonstraram que a redução da temperatura em 10°C, em relação à amostra com temperatura ótima adição da cera de carnaúba à mistura, promoveu uma melhoria nas propriedades mecânicas das mistura asfáltica modificada com cera de carnaúba.

Com a redução de 10°C na temperatura ótima encontrada para o ligante com a cera, a mistura passou a ser considerada uma mistura asfáltica morna e observou-se uma redução nos valores encontrados nos ensaios realizados. Todavia, esses resultados se mostraram bastante satisfatórios, uma vez que atenderam à todas especificações normatizadas exigidas, mesmo com as reduções nas temperaturas.

A redução de 10°C nas temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas com ligante modificado com cera de carnaúba, acarretou numa diminuição de 10% e 6% nos resultados dos ensaios de RT e MR, respectivamente, em relação à mistura com cera na temperatura ótima. Além disso, ambas as misturas se mostraram mais eficazes que a mistura a quente com CAP puro.

Já para o ensaio de Lottman, comparando-se as misturas com adição de cera, a amostra com menores temperaturas, apesar de apresentar menores resultados de resistência a tração com e sem condicionamento, obteve uma resistência retida à tração 3% maior, indicando uma melhor adesão entre o agregado e o ligante nas condições de amostra parcialmente saturada. Os resultados para a mistura morna foram satisfatórios e se enquadraram nas especificações das normas.

Foi possível concluir, através dos ensaios, que com a redução de 10°C nas temperaturas de usinagem e compactação, as misturas asfálticas compostas com ligante adicionado com cera de carnaúba se mostram bastante promissoras, uma vez que apresentaram ótimos resultados mecânicos, estando dentro das especificações para todos os ensaios executados e inclusive apresentando respostas superiores às misturas com ligante puro.

O fato de se estar trabalhando com uma mistura asfáltica morna, na qual as temperaturas utilizadas são inferiores às temperaturas ótimas determinadas, e mesmo assim apresentar comportamentos mecânicos satisfatórios, é uma ocorrência que vem sendo observada em vários estudos que envolvem misturas mornas, sejam adicionadas com ceras ou com óleos. Além disso, ainda oferecem vantagens nas questões ambientais, uma vez que promovem a redução de emissão de gases poluentes, melhora as condições de trabalho dos operários envolvidos nos processos de produção das misturas asfálticas e também garantem um menor consumo energético.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 15184 (2004) – **Materiais Betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando viscosímetro rotacional**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP.

ABEDA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO. **Manual básico de emulsões asfálticas**. Rio de Janeiro: ABEDA, 2001.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO TP 283: Standard Method of Test of Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage**. Estados Unidos, 2014.

ASOCIACIÓN MERCOSUR NORMALIZACIÓN. NM 52: **Agregado miúdo – Determinação da massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.

ASPHALT INSTITUTE (2003) (Ed.). **Performance graded asphalt binder specification and testing**. Asphalt Institute.

BERNUCCI L. B., MOTTA, L. M., CERATTI J. A. P., SOARES J. P. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. 3 ed. Rio de Janeiro, RJ, 2008.

BRUXEL, D. F., **Estudo do comportamento viscoelástico de concretos asfálticos convencionais e modificados através de ensaios de laboratório e de análise de desempenho**. Santa Maria, RS, 2015.

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

D'ANGELO, J.; HARM, E.; BARTOSZEK, J.; BAUMGARDINER, G.; CORRIGAN, M.; COWSERT, J.; HARMAN, T.; JAMSHIDI, M.; JONES, W.; NEWCOMB, D.; PROWELL, B.; SINES, R.; YEATON, B. **Warm-Mix Asphalt: European Practice**. Report No.10, FHWA-PL-08-007. American Trade Initiatives, Alexandria, USA, 2008.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT  
– ME 131/2010. **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 135/17 – **Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação do módulo de resiliência.** Rio de Janeiro, 2017.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE DNIT  
– ME 155/2010 - **Material asfáltico - determinação da penetração.** Rio de Janeiro, 2010.

**Educalingo** < <http://educalingo.com/> > Acessado em dezembro de 2018.

EDWARDS, Y.; TASDEMIR, Y.; ISACSSON, U. **Effects of commercial waxes on asphalt concrete mixtures performance at low and medium temperatures.** Cold Regions Science and Technology. 45, 31–41, 2006.

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.

**Fenix Ceras** < <http://www.fenixceras.com.br/> > Acessado em dezembro de 2018.

HESP, S. **Reversible ageing in asphalt at low temperatures. Final Report.** Queen's University Dep of Chemistry, Kingston Ontario Canada, 2004.

LEITE, L. F. M. FILHO, L. R. S.; ASSUMPCÃO, D. F.; NASCIMENTO, L. A. H.; MARTINS, A. T.; CRAVO, M. C. C. **Composição e processo de preparação de ligante asfáltico modificado por cera de origem natural.** Brasil. PI0901484-5 A2, 2011.

MARQUES, G. L. de O. - **Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; efeito da compactação por impacto e giratória.** 2004. Tese de doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

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

MORAES, T. M. **Utilização de 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,** 2011. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, Brasil.

NEWCOMB, D. **Innovations in hot mix asphalt highway quality compendium.** Federal highway compendium, United States Department of Transportation, 132f, 2007.

OLARD, F. **Low energy asphalts.** Routes Roads, n. 336-337, p. 131-145, 2008. Apresentado a 23 World Road Congress: General Report and Conclusions: PIARC Prizes, 23, Paris, 2008.

PENZ, Gustavo. **Propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas com adição de zeólitas sintetizadas**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – RS, 2010.

PROWELL B. D., HURLEY G. C. **Warm-mix asphalt: best practices**. National Asphalt Pavement Association. Lanham. 27f, 2007.

PRUDENTE, C. Q. A. **Estudo laboratorial de misturas asfálticas a quente utilizadas em Goiás**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Goiás, GO, 2015.

REYES-ORTIZ, O. J. **Cambios dinámicos y mecánicos de una mezcla asfáltica densa por las propiedades del asfalto y la energía de compactación**. Revista Ingeniería y Desarrollo. 26, 140-155, 2009.

RIZZO, M. M. **Caracterização físico-química de materiais de esculturas de cera do museu Alpino**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. 20 p, 2008.

**Roguimo – Ceras de Carnaúba**. < <http://roguimo.com.br/> >. Acessado em dezembro de 2018.

ROHDE, L. **Estudo de Misturas Asfálticas de Módulo Elevado para Camadas Estruturais de Pavimentos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2007.

RÜHL, R. **Lower temperatures: The best for asphalt, bitumen, environment and health and safety**. In: EURASPHALT & EUROBITUME CONGRESS, 4., 2008, Copenhagen, 2008.

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

SOUZA, J.L.S. **Estudo das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas com Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado com Óleo de Mamona**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2012.

VARELA, A, F, C. **Instituições prevaletentes, 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.

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, CE, 2013.

ZAUMANIS, M. **Warm mix asphalt Investigation.** PhD Thesis, Riga Technical University, Kgs. Lyngby, Denmark, 2010.