

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL
CAMPUS I – CAMPINA GRANDE
ÁREA GEOTÉCNICA

UTILIZAÇÃO DA CERA DE CARNAÚBA COMO ADITIVO
REDUTOR DE TEMPERATURAS DE USINAGEM E
COMPACTAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Thalita Maria Ramos Pôrto de Moraes

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

Campina Grande – Paraíba

Fevereiro de 2018

**UTILIZAÇÃO DA CERA DE CARNAÚBA COMO ADITIVO
REDUTOR DE TEMPERATURAS DE USINAGEM E
COMPACTAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS**

Thalita Maria Ramos Pôrto de Moraes

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

Área de Concentração – Geotécnica

Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena

Orientador

Campina Grande – Paraíba

Fevereiro de 2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

M827u

Moraes, Thalita Maria Ramos Pôrto de.

Utilização da cera de carnaúba como aditivo redutor de temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas / Thalita Maria Ramos Pôrto de Moraes. – Campina Grande, 2018.

133 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2018.

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

Referências:

1. Misturas Asfálticas Mornas. 2. Ligante Asfáltico. 3. Cera de Carnaúba. I. Lucena, Adriano Elisio de Figueiredo Lopes. II. Título.

CDU 625.85(043)

FOLHA DE APROVAÇÃO

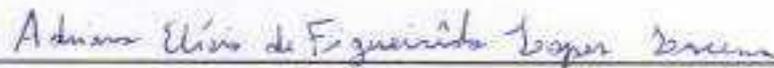
Autora: Thalita Maria Ramos Pôrto de Moraes

Título: UTILIZAÇÃO DA CERA DE CARNAÚBA COMO ADITIVO REDUTOR DE TEMPERATURAS DE USINAGEM E COMPACTAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Dissertação defendida e aprovada em: ____/____/____

Pela Banca Examinadora

(Assinatura):

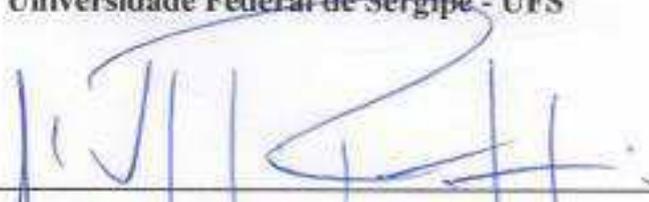


Prof. Dsc. (Orientador) Adriano Elisio de Figueiredo Lopes Lucena
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura):

Prof. Dsc. (Avaliador Externo) Fernando Silva Albuquerque
Universidade Federal de Sergipe - UFS

(Assinatura):



Prof. Dsc. (Avaliador Interno) John Kennedy Guedes Rodrigues
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Sem fé é impossível agradar a Deus, pois quem dele se aproxima precisa crer que ele existe e que recompensa aqueles que o buscam. (Hebreus 11:6)

“Deus é bom o tempo todo, o tempo todo Deus é bom.”

DEDICATÓRIA

A meu Deus, por ser essencial em minha vida. A minha família, por sempre torcerem por mim no decorrer de toda a minha vida acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, ao meu Deus, o qual me deu a oportunidade de poder aprender cada vez mais, sem em nenhum momento me deixar desamparada. A ele toda honra e glória.

A minha mãe, Maria Auxiliadora, por todo amor, dedicação e apoio. Obrigada por sempre estar ao meu lado, sempre me dando forças para continuar. A ela todo o amor e agradecimento.

Ao meu pai, Hélio Ramos, por todo apoio e incentivo nos meus estudos.

Ao meu melhor amigo, companheiro, cúmplice e esposo, Júnior Moraes, por me ajudar em todos os momentos, fazendo do meu dia mais leve e cheio de alegria, por toda ajuda direta e indireta na realização deste sonho. A você todo o meu amor.

Aos meus avôs, Cacilda Almeida e Domício Porto, verdadeiros anjos em minha vida. Os quais são à base de tudo, sempre me apoiando nos momentos difíceis. Obrigada por todo amor, carinho e orações.

A minha irmã, Tassila Porto, companheira em todos os momentos ao longo da vida.

Aos meus tios e primos, que sempre estiveram ao meu lado, torcendo e vibrando com as minhas conquistas.

A minha amada turma de mestrado, melhores amigas. Obrigada por toda ajuda e ensinamento.

Ao meu orientador, Adriano Elísio, obrigada por todo ensinamento, paciência e dedicação. Obrigada por acreditar no meu potencial e me conceder ferramentas para meu crescimento profissional, muito obrigada.

Aos professores do LEP Leda, Kennedy e Veruschka, obrigada por todo conhecimento compartilhado.

Aos técnicos e amigos do LEP, “Nildinho”, Jadilson, Daniel e Ladjane, por toda ajuda na execução dos ensaios.

Aos meus ajudantes, Bruna e Sávio, obrigada por toda ajuda e dedicação.

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

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

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

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

Muito obrigada!

RESUMO

As misturas mornas surgem como uma opção para a redução das temperaturas de usinagem e compactação, uma alternativa que proporciona vantagens econômicas, ambientais e técnicas. Este trabalho trata da utilização das ceras de carnaúba do tipo 1, nos teores de 1, 2 e 3% (m/m), como aditivo incorporado as misturas asfálticas para a obtenção de misturas mornas. A cera do tipo 1 foi utilizada para modificar o ligante 50/70 e foram avaliados seus efeitos a partir de ensaios empíricos: penetração, ponto de amolecimento e ensaios no viscosímetro rotacional. O ligante asfáltico modificado com 2 e 3% de cera de carnaúba apresentou uma considerável diminuição das temperaturas de usinagem (TU) de 9°C, reduzindo as emissões de gases poluentes (CO₂ e VOCs, por exemplo) e o gasto energético. Foi utilizado o método SUPERPAVE, com objetivo de produzir os corpos de prova que foram utilizados para fazer a análise mecânica. Com o propósito de avaliar os efeitos da redução das temperaturas de produção e compactação e a influência da incorporação do aditivo na mistura asfáltica, foram realizados ensaios mecânicos: Resistência à Tração, Módulo de Resiliência, Dano por Umidade (Lottman), Fadiga, *Flow Number*, Cântabro e Módulo Dinâmico. A mistura com 2% de cera de carnaúba apresentou melhores resultados em relação as análises mecânica e reológica, uma maior redução das temperatura de usinagem e compactação. Espera-se que tal pesquisa possa contribuir para a redução dos danos causados ao meio ambiente, maior viabilidade técnica e econômica. Portanto, a cera de carnaúba cumpre algumas exigências mecânicas e reológicas para a sua utilização como aditivo em misturas asfálticas mornas.

Palavras chaves: Misturas Asfálticas Mornas, Ligante Asfáltico, Cera de Carnaúba.

ABSTRACT

Warm mixtures appear as an option for reducing temperature machining and compression, an alternative that provides economic advantages, environmental and technical. This paper deals with the use of carnauba wax type 1, the levels 1, 2 and 3% (m / m), as an additive incorporated into the asphalt mixtures for obtaining mixtures of lukewarm. Wax type 1 was used to modify the binder 50/70 and evaluated its effects from empirical tests: penetration point testing the softening and rotational viscometer. The modified asphalt binder 2:03% carnauba wax showed a considerable reduction in temperature machining (TU) of 9 ° C, reducing pollutant emissions (CO₂ and VOCs, for example) and energy expenditure. SUPERPAVE the method was used, in order to producing the specimens which were used to make mechanical analysis. As order to evaluate the effects of reducing the production and compaction temperatures and the influence of the incorporation of the additive in the asphalt mixture, tests were conducted Mechanical: tensile strength, modulus of resilience, moisture damage (Lottman) Fatigue, Flow Number, Cántabro and dynamic modulus. The mixture with 2% wax carnauba showed better results than the mechanical and rheological analysis, further reducing the temperature machining and compression. It is expected that such research can contribute to the reduction of damage to the environment, most technical and economic feasibility. Therefore, carnauba wax meets certain requirements mechanical and rheological properties for use as an additive in warm asphalt mixes.

Key words: Asphalt mixtures Warm, Asphalt Binder, Carnauba Wax.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	22
1.0 INTRODUÇÃO	22
1.1 Objetivos	23
1.1.1 Objetivo Geral	23
1.1.2 Objetivos Específicos	23
1.2 Justificativa	24
1.3 Organização do Trabalho	24
CAPÍTULO 2	26
2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
2.1 Ligantes Asfálticos	26
2.2 Misturas Asfálticas Mornas	29
2.2.1 Histórico	31
2.2.2 Possíveis vantagens das misturas mornas	33
2.2.3 Emissão de Poluentes	34
2.2.4 Classificação das Misturas Mornas	36
2.2.4.1 Asfalto Espumado	36
2.2.4.2 Aditivos Sufactantes	37
2.2.4.2.1 Zeólitas	38
2.2.4.3 Aditivos Orgânicos ou Ceras	38
2.2.5 A Carnaubeira	40
2.2.5.2 Cera de carnaúba	41
2.2.5.3 Caracterização Reológica da Cera de Carnaúba	45
2.2.5.3.1 Resultados de PG-Grau de Performance (Performance Grade)	46
2.2.5.3.2 Resultados do ensaio de MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery)	46
2.2.5.3.3 Resultados do Monitoramento do Módulo Complexo (G^*) e da $\tan \delta$ em Varredura de Temperatura	47
2.2.5.3.4 Avaliação através das Curva Mestre	50

CAPÍTULO 3	51
3.0 MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1 Materiais Utilizados	52
3.1.1 Ligante Asfáltico	52
3.1.2 Agregados.....	52
3.1.3 Cera de Carnaúba	53
3.2 Propriedades Físicas e Mecânicas dos Materiais.....	54
3.2.1 Agregados.....	54
3.2.1.1 Granulometria.....	55
3.2.1.2 Absorção e densidade dos agregados graúdos.....	57
3.2.1.3 Massa específica do agregado miúdo	59
3.2.1.3.1 Resultados dos ensaios de Massa Específica dos agregados miúdos e graúdos	62
3.2.1.4 Abrasão Los Angeles.....	63
3.2.2 Caracterização da Cera de Carnaúba	64
3.2.2.1 Análise Termogravimétrica	64
3.2.2.2 Análise Térmica Diferencial.....	65
3.2.2.2.1 Resultados dos ensaios de Análise Térmica Diferencial (DTA) e Análise	
Termogravimétrica (TG)	65
3.2.3 Cimento Asfáltico de Petróleo	67
3.2.3.1 Mistura do CAP com a cera de carnaúba	67
3.2.3.2 Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT)	68
3.2.3.3 Ensaio de Penetração.....	68
3.2.3.4 Ponto de Amolecimento	69
3.2.3.5 Viscosidade Rotacional	70
3.2.4 Dosagem SUPERPAVE	70
3.2.4.1 Determinação da Temperatura de Usinagem e Compactação	75
3.2.4.2 Compactação dos Corpos de Prova	76
3.2.4.2.1 Método Teórico	76
3.2.4.2.2 Método Rice	77
3.2.4.2.4 Massa específica máxima medida – Procedimento com vácuo.....	78
3.2.4.2.5 Determinação do teor de ligante de projeto.....	80
3.2.5 Propriedades Mecânicas das Misturas Asfálticas.....	86
3.2.5.1 Ensaio de Tração Indireta por Compressão Diametral	87
3.2.5.2 Módulo de Resiliência.....	88

3.2.5.3	Ensaio de resistência ao dano por umidade induzida –Lottman Modificado	90
3.2.5.4	Vida de Fadiga	92
3.2.5.5	<i>Flow Number</i>	94
3.2.5.6	Cântabro	96
3.2.5.7	Módulo Dinâmico	97
CAPÍTULO 4.....		99
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	99
4.1	Caracterização reológica do CAP puro e CAP mais cera de carnaúba.....	99
4.1.1	Resultados do ensaio de Penetração	99
4.1.2	Resultados do ensaio de Ponto de Amolecimento.....	101
4.1.3	Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional.....	103
4.1.4	Resultados da Perda de Massa.....	105
4.2	Caracterização mecânica das misturas asfálticas	106
4.2.1	Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT) ..	106
4.2.2	Resultados do ensaio de módulo de resiliência	108
4.2.3	Resultados do ensaio de dano por umidade induzida – Lottman Modificado...	109
4.2.4	Resultados do ensaio de Vida de Fadiga	111
4.2.5	Resultados do ensaio de <i>Flow Number</i>	113
4.2.6	Resultados do ensaio de Cântabro.....	115
4.2.7	Resultados do ensaio de Módulo dinâmico	116
CAPÍTULO 5.....		121
5.1	Considerações Finais.....	123
5.2	Sugestões para Pesquisas Futuras.....	124
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		125

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Histórico do uso de misturas asfálticas mornas.....	8
Quadro 2 - Possíveis vantagens da utilização das misturas asfálticas mornas	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características físico-químicas da cera de carnaúba	43
Tabela 2 - Produção de cera de carnaúba nos anos de 2015 e 2016.....	43
Tabela 3 - Estudos utilizando a cera de carnaúba como aditivo em misturas asfálticas	45
Tabela 4 - Resultados de PG do CAP puro e com incorporação de teores de cera de carnaúba.....	46
Tabela 5 – Resumo ensaio MSCR.....	47
Tabela 6 - Caracterização do CAP	52
Tabela 7 - Ensaio dos agregados e especificações	55
Tabela 8 - Quantidade passante acumulada.....	56
Tabela 9 - Resultados do ensaio de massa específica com agregados graúdos e miúdos	62
Tabela 10 - Resultado do ensaio de Los Angeles	64
Tabela 11 - Normas dos ensaios de caracterização física das amostras de CAP.....	67
Tabela 12 - Proporções dos agregados nas granulometrias	73
Tabela 13 - Temperaturas de Usinagem e Compactação.....	76
Tabela 14 - Número e giros especificados na norma de dosagem SUPERPAVE.....	81
Tabela 15- Critérios volumétricos para a determinação do teor de projeto.....	83
Tabela 16 - Resumo da compactação das misturas asfálticas.....	84
Tabela 17 - Tabela de resumo dos critérios volumétricos para cada teor de CAP	85
Tabela 18 - Tabela de resumo dos parâmetros volumétricos para o teor de CAP de 5,10%.....	86
Tabela 19 - Resultados do ensaio de Penetração	99
Tabela 20 - Penetração Retida	101
Tabela 21 - Resultados do ensaio de Ponto de Amolecimento.....	101
Tabela 22 - Resultados do ensaio de viscosidade rotacional antes do RTFOT.....	103
Tabela 23 - Resultados do ensaio de viscosidade rotacional após o RTFOT	103
Tabela 24 - Temperatura de Usinagem e Compactação	105
Tabela 25 - Perda de Massa.....	106
Tabela 26 - Resultados do ensaio de RT	107
Tabela 27 - Resultados do ensaio de MR	108
Tabela 28 - Resultados do ensaio de Lottman Modificado	109

Tabela 29 - Parâmetros das curvas de fadiga para as amostras analisadas.....	112
Tabela 30 - Valores mínimos de <i>Flow Number</i> para diferentes níveis de tráfegos.....	115

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos ligantes asfálticos segundo faixas padronizadas de consistência.....	28
Figura 2 - Classificação das misturas asfálticas em função das temperaturas de usinagem.....	30
Figura 3 - Gráfico comparativo entre mistura a quente e mornas com relação a emissão de HPA	35
Figura 4 - Processo de formação do asfalto espuma	37
Figura 5 - Zeólitas comerciais	38
Figura 6 - Cera sintética (Sasobit®)	39
Figura 7 - (a) cera de abelha; (b) cera de carnaúba.....	40
Figura 8 - Carnaubeira e seus componentes (a) Carnaubeira; (b) folha da carnaubeira e (c) frutos da carnaubeira	41
Figura 9 - Tipos de cera de carnaúba (a) Cera de carnaúba do tipo 1; (b) Cera de carnaúba do tipo 2; (c) Cera de carnaúba do tipo 3 e (d) Cera de carnaúba do tipo 4....	42
Figura 10 - Gráfico da variação do Módulo Complexo (G^*) em função da temperatura antes do RTFO.....	47
Figura 11 - Gráfico da variação do Módulo Complexo (G^*) em função da temperatura após o RTFO.....	48
Figura 12 - Gráfico da variação da $\tan \delta$ em função da temperatura antes RTFO	49
Figura 13 - Gráfico da variação da $\tan \delta$ em função da temperatura após o RTFO	49
Figura 14 – Curva Mestra.....	50
Figura 15 - Caracterização dos Materiais	51
Figura 16 - (a) Brita 19mm, (b) Brita 12,5mm, (c) Pó de pedra e (d) Areia.	53
Figura 17 - Cera de carnaúba.....	53
Figura 18 - (a) Cera de carnaúba moída na mão de gral. (b) Peneira utilizada para separação granulométrica do resíduo de cera de carnaúba	54
Figura 19 - Cera de carnaúba moído e peneirada na peneira n°40	54
Figura 20 - Sequência de peneiras para ensaio de peneiramento	55
Figura 21 - (a) Granulometria brita 19,1mm. (b) Granulometria areia	56
Figura 22 - Curva granulométrica dos agregados.....	57

Figura 23 – (a) Passagem da brita 19,1mm (b) 12,5 mm para ensaio de massa específica	58
Figura 24 - Brita 12,5 em imersão	58
Figura 25 - Verificação da massa submersa das britas 19mm e 12,5mm.....	59
Figura 26 - Secagens do material	60
Figura 27 – (a) Tronco-cônico e haste de compactação (b) Agregado miúdo com forma de molde	60
Figura 28 – Materiais miúdos na condição de saturado superfície seca.....	61
Figura 29 - (a) Picnômetro mais amostra. (b) Amostra submersa com água destilada ..	61
Figura 30- Picnômetro mais amostra em banho à temperatura constante	61
Figura 31 – (a) Conjunto Picnômetro, água e amostra. (b) Conjunto sendo pesado	62
Figura 32 – Equipamento utilizado no ensaio de Abrasão Los Angeles	63
Figura 33 - Equipamento utilizado para realização de ensaios de análises térmicas.....	65
Figura 34 – Curvas TG e DTA	66
Figura 35 – Misturadores do CAP a Cera de Carnaúba	67
Figura 36 – Aparelho de RTFOT	68
Figura 37 – Penetrômetro	69
Figura 38 – Amostras no banho d'água	69
Figura 39 – Ensaios de Ponto de amolecimento	70
Figura 40 – Viscosímetros rotacional tipo Brookfield	70
Figura 41 – Compactador Giratório Superpave (CGS)	72
Figura 42 – Fluxogramas da Dosagem Superpave	73
Figura 43: Curva granulométrica Inferior	74
Figura 44 – Curva granulométrica Intermediária	74
Figura 45 – Curva granulométrica Inferior.....	75
Figura 46 – Volumes considerados na determinação da DMT e da Gmm.....	77
Figura 47 – Equipamentos para ensaio de determinação do Gmm	79
Figura 48 – Exemplo de procedimento para a determinação da Gmm em laboratório..	80
Figura 49 – Procedimento para a compactação dos corpos de prova a partir do Superpave	82
Figura 50 – Corpos de prova compactados com teor inicial de CAP de 5%.....	82
Figura 51 – Curva de compactação típica obtida no CGS.....	83
Figura 52 – Compactação com os teores de 4,5%, 5,5% e 6,0% no Np.....	84
Figura 53 – Determinação do teor de projeto	85

Figura 54 – Corpos de prova moldados com teor ótimo de 5,10% com 4% de volume de vazios.....	86
Figura 55 – Caracterização Mecânica da Mistura Asfáltica.....	87
Figura 56 – Equipamento utilizado no ensaio de RT.....	88
Figura 57: Realização do ensaio de RT em corpos de prova com teores de Cera de Carnaúba.....	88
Figura 58 – Equipamento utilizado para a determinação do Módulo de Resiliência.....	89
Figura 59- Execução do ensaio de Módulo de Resiliência.....	90
Figura 60 – Aplicação do vácuo até a saturação das amostras.....	91
Figura 61 - Passo a passo do ensaio de Lottman Modificado.....	92
Figura 62 - Compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.....	94
Figura 63 - Subdivisões de regiões oriundas do ensaio de <i>Flow Number</i>	94
Figura 64 - Ensaio de <i>Flow Number</i>	95
Figura 65- Ensaio de <i>Flow Number</i>	96
Figura 66 - Aspecto dos corpos de prova após o ensaio de Cântabro.....	97
Figura 67 – Realização do ensaio MD.....	98
Figura 68 - Resultados do ensaio de Penetração.....	100
Figura 69 -- Resultados do ensaio de Ponto de Amolecimento.....	101
Figura 70 - Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional antes o RTFOT.....	104
Figura 71- Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional após o RTFOT.....	104
Figura 72 - Resultados da perda de massa após o ensaio RTFO.....	106
Figura 73 - Resultados do ensaio de RT.....	107
Figura 74 - Resultados do ensaio de MR.....	108
Figura 75 - Resultados do ensaio de Lottman modificado.....	109
Figura 76 - Vida de Fadiga X Diferença de Tensões.....	111
Figura 77 - Vida de Fadiga X Deformação específica resiliente.....	112
Figura 78 - Resultados do ensaio de <i>Flow Number</i>	114
Figura 79 - Resultados do ensaio de Cântabro.....	115
Figura 80 - Curvas mestras de todas as misturas asfálticas avaliadas.....	116
Figura 81 - Módulo dinâmico das misturas asfálticas (4,4°C).....	117
Figura 82 - Módulo dinâmico das misturas asfálticas (21,1°C).....	117
Figura 83 - Módulo dinâmico das misturas asfálticas (37,8°C).....	118
Figura 84 - Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (4,4°C).....	118
Figura 85 - Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (21,1°C).....	119

Figura 86 - Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (37,8°C)..... 119

LISTA DE ABREVIATURAS

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

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AEMA – *Asphalt Emulsion Manufacturers Association*

ANP – Agência Nacional de Petróleo

ASTM – *American Society for Testing Materials*

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CGS – Compactador Giratório SUPERPAVE

CERA CT1 – Cera de Carnaúba tipo 1

CERA CT2 - Cera de Carnaúba tipo 2

CERA CT3 – Cera de Carnaúba tipo 3

CERA CT4 – Cera de Carnaúba tipo 4

DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DTA – Análise Térmica Diferencial

FHWA – *Federal Highway Administration*

FN – *Flow Number*

G_{mm} – Densidade Máxima da Mistura

HPAs – Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos

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

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

MAMs – Misturas Asfálticas Mornas

ME – Método de Ensaio

MR – Módulo de Resiliência

N – Vida de Fadiga

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

N_{projeto} – Número de Giros de Projeto

RRT – Resistência Retida à Tração

RT – Resistência à Tração por Compressão Diametral

RTFOT – *Rolling Thin Film Oven Test*

SUPERPAVE – Superior Performing Pavements

TG – Análise Termogravimétrica

TMN – Tamanho Máximo Nominal

TU – Temperatura de Usinagem

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

VAM – Vazios do Agregado Mineral

VOCs – Compostos Orgânicos Voláteis

V_v – Volume de Vazios

WMA – *Warm Mix Asphalt*

1.0 INTRODUÇÃO

As fortes mudanças climáticas aliadas ao acelerado crescimento populacional são preocupações evidentes tanto em países desenvolvidos, como também em países em desenvolvimento. Com isso, estão surgindo novas tecnologias com objetivo de diminuir os efeitos que os materiais utilizados na construção civil causam ao meio ambiente. A partir de tal preocupação surgiram as chamadas misturas asfálticas mornas (MAMs) ou *warm mix asphalt* (WMA). Esse tipo de tecnologia surgiu na Europa (Chowdhury e Button, 2008) em 1997, onde foi imposta uma série de restrições em relação as emissões de gases poluentes, sendo necessária idealizar novas técnicas que diminuam os impactos ambientais que tais atividades e materiais da construção civil causam.

O setor rodoviário também aderiu a novas tecnologias, tentando de alguma forma diminuir os impactos que tais emissões causam ao meio ambiente. O desenvolvimento de novas tecnologias que possam ser utilizadas na fabricação do asfalto, têm como objetivo aumentar a qualidade das vias asfálticas, a durabilidade e melhorar a qualidade de vida das pessoas que trabalham diretamente com esse tipo de material.

Misturas asfálticas são usualmente produzidas de duas maneiras: misturas a quente, com temperaturas em torno de 150-175°C, e a frio, misturadas em temperatura ambiente. Em termos de resistência do revestimento asfálticos, as misturas a quente são superiores e, geralmente, são utilizadas como revestimento de rodovias em que se espera um elevado tráfego de veículos. Já as misturas a frio, são mais utilizadas em rodovias com menor tráfego de veículos e sua principal aplicação está em operações de recapeamento, conservação e manutenção de estradas (RUBIO, 2013).

Assim, buscando métodos que pudessem diminuir as elevadas temperaturas das misturas a quente, melhorando as propriedades reológicas e mecânicas desse material, surgem pesquisas utilizando novas tecnologias e aditivos em busca de diminuir de forma considerável as temperaturas de usinagem e compactação do produto final. As misturas asfálticas mornas apresentam-se como uma alternativa para reduzir as emissões de CO₂ e consumir menos energia (KOENDERS et al, 2000). Busca-se a diminuição das temperaturas de usinagem e compactação da mistura final, mantendo as características

mecânicas do material asfáltico. A utilização de aditivos para as misturas mornas tem apresentado na literatura como benéfica tanto do ponto de vista ambiental, como também social.

A União Europeia, buscando novas formas de cumprir metas estabelecidas durante o protocolo de Kyoto, passou a considerar, em 1996, limites de tempo de exposição para trabalhadores ligados à pavimentação asfáltica processadas em altas temperaturas. A adoção dessas normas resultou na idealização de misturas asfálticas com temperaturas, de produção e aplicação, menores que as usuais, como forma de reduzir a emissão de poluentes e a redução consecutiva do gasto energético atribuído (PROWELL, 2007; MOTTA, 2011; FEITOSA, 2015).

Novas pesquisas estão sendo desenvolvidas nesse campo focando, principalmente, nas características dessas misturas, na produção, na quantificação dos benefícios que pode ser retirado de tal mistura, no âmbito social e ambiental, seu desempenho mecânico e comportamento frente as demandas impostas pelo crescente tráfego rodoviário. Dentro deste contexto, surge a necessidade de se utilizar novos aditivos que possam diminuir a temperatura de usinagem e compactação, mantendo assim as suas características mecânicas e reológicas. A cera de carnaúba entra nesse contexto, propondo a modificação do CAP puro, apresentando-se como uma ótima alternativa para as misturas mornas, pela busca da diminuição da temperatura e do gasto energético.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi estudar o efeito da incorporação da cera de carnaúba na temperatura de usinagem e compactação e no desempenho mecânico de misturas asfálticas.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são os seguintes:

- Quantificar e verificar a diminuição da temperatura de usinagem e compactação ao incorporar a mistura asfáltica diferentes teores da cera de carnaúba;

- Determinar o teor ideal de incorporação de cera de carnaúba para a produção, a partir de ensaios mecânicos, como: resistência à tração, ensaio de Lottman, módulo de resiliência, Fadiga, *Flow Number*, Cântabro e Módulo Dinâmico.

1.2 Justificativa

A redução da temperatura de usinagem e compactação têm como objetivos a diminuição do efeito estufa e a melhoria da saúde (respiratória, por exemplo) dos operários envolvidos diretamente em tal serviço de engenharia. Quando as misturas asfálticas atingem temperaturas em torno de 150°C, são emitidos vapores que ao se resfriarem, eles 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 e são considerados tóxicos e carcinogênicos.

No Brasil, existe um déficit em pavimentação rodoviária. Segundo o Ministério do Transporte (2014), apenas 12,1% das malhas rodoviárias são pavimentadas, e entre esse percentual apenas 2% das vias municipais apresentam pavimentação. Assim, sabendo-se nos benefícios que as misturas mornas podem proporcionar, esta pesquisa tem como objetivo trabalhar com um aditivo, a cera de carnaúba, com a finalidade de obter um asfalto de qualidade, aliando-se a redução das emissões de gases como também a diminuição da temperatura de transporte do material e do gasto de energia.

1.3 Organização do Trabalho

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

Capítulo 1 – Composto de Introdução, Objetivos e Organização do trabalho.

Capítulo 2 – É composto pela fundamentação teórica, onde são abordados assuntos relevantes tais como: ligantes asfálticos puros e modificados, misturas mornas e suas classificações, emissão de poluentes e aditivos como a cera de carnaúba.

Capítulo 3 – São descritos os materiais e métodos utilizados na pesquisa, além da caracterização física dos materiais.

Capítulo 4 – São apresentados as análises e resultados dos ensaios físicos e mecânicos.

Capítulo 5 – Apresenta as conclusões obtidas neste trabalho, além de sugestões para trabalhos futuros.

No final estão inseridas as referências bibliográficas.

2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão tratados assuntos relevantes para o desenvolvimento de tal pesquisa. Primeiro será realizado uma abordagem sobre os ligantes asfálticos de petróleo, apresentando sua definição e características. Em seguida faz-se uma abordagem acerca das misturas asfálticas mornas, mostrando suas principais características e classificação.

Por fim, serão abordados os tipos de aditivos utilizados, sejam eles naturais ou artificiais, destacando-se a sua utilização em misturas asfálticas, assim como a utilização da cera de carnaúba como aditivo modificador do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).

2.1 Ligantes Asfálticos

O asfalto é um dos mais antigos e versáteis materiais de construção encontrados na natureza, há indícios de seu uso desde 6000 a.C. Na antiguidade, por ser um material impermeável e aglutinante, foi usado por diversos povos como material cimentante, impermeabilizante e de revestimento. No entanto, a primeira utilização do asfalto na pavimentação ocorreu em Lyon, na França, no ano de 1829, com a utilização de um mastique asfáltico para melhorar as condições de rodagem (MANUAL DO ASFALTO, 1989).

O Manual de asfalto (IA, 1989 versão em português, 2001) lista mais de 100 das principais aplicações desse material, desde a agricultura até a indústria. O uso em pavimentação é um dos mais importantes entre todos e um dos mais antigos também. Na maioria dos países do mundo a pavimentação asfáltica é a principal forma de revestimento. No Brasil, cerca de 95% das estradas pavimentadas são de revestimento asfáltico, além de ser também utilizado em grande parte das ruas (BERNUCCI, 2008).

Existem inúmeras razões para a utilização do asfalto em pavimentos, como por exemplo, o asfalto proporciona uma perfeita união dos agregados, é impermeabilizante, apresenta uma durabilidade expressiva e é resistente a maioria dos ácidos, dos álcalis e dos sais. Pode-se utilizá-lo emulsionado ou aquecido, com ou sem aditivos.

Segundo Bernucci (2008), existem definições e conceituações empregadas como referência para o material:

- Betume: comumente é definido como uma mistura de hidrocarbonetos solúvel no bissulfeto de carbono;
- Asfalto: mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo de forma natural ou por destilação, cujo principal componente é o betume, podendo conter ainda outros materiais, como oxigênio, nitrogênio e enxofre, em pequena proporção;
- Alcatrão: é uma designação genérica de um produto que contém hidrocarbonetos, que se obtém da queima ou destilação do carvão, madeira etc.

Os asfaltos podem ser encontrados em jazidas naturais, na forma de bolsões de asfaltos, originados da evaporação natural das frações mais leves (mais voláteis) de jazidas de petróleo localizadas na superfície terrestre, e também podem ser obtidos por destilação do petróleo em unidades industriais, refinarias, onde após a remoção dos demais destilados de petróleo é obtido um resíduo que apresenta consistência adequada à pavimentação e é denominado de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). Segundo Bernucci et al (2007), a denominação CAP é dada para designar esse produto semissólido a baixas temperaturas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas (GAMA, 2013).

O Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) é uma combinação de hidrocarbonetos de alta massa molar, cujos itens fundamentais são o carbono e o hidrogênio, compreendendo também outros elementos, como por exemplo, o oxigênio, enxofre e certos metais.

Os CAPs são constituídos de 90 a 95% de hidrocarbonetos e de 5 a 10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais – vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio) unidos por ligação covalentes. Os cimentos asfálticos de petróleos brasileiros têm baixo teor de enxofre e de metais, e alto teor de nitrogênio (LEITE, 1999).

Departamento Nacional de Infra - Estrutura – DNIT, classifica os ligantes asfálticos segundo faixas padronizadas de consistência, tipos ou graus. Essa faixa refere-se as medidas obtidas a partir de ensaios de penetração (ASTM D5, 2005; NBR 6576, 2007). A consequente classificação que se dá pela medida, em décimos de milímetros, da

profundidade que a agulha penetra durante 5 segundos em uma amostra de ligante a temperatura de 25°C; temperatura essa considerada a temperatura média do pavimento em serviço e pode-se ser classificado da seguinte forma: 30-45, 50-70, 85-100 e 150-200 (Figura 1).

Figura 1 - Classificação dos ligantes asfálticos segundo faixas padronizadas de consistência

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES				MÉTODOS		
		CAP 30 / 45	CAP 50 / 70	CAP 85 / 100	CAP 150 / 200	ABNT	ASTM	DNER
Penetração (100 g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 - 45	50 - 70	85 - 100	150 - 200	NBR 6576	D 5	ME 003/99
	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36	
Viscosidade Saybolt Furol	s					NBR 14950	E 102	ME 004/94
a 135 °C, mín		192	141	110	80			
a 150 °C, mín		90	50	43	36			
a 177 °C		40 - 150	30 - 150	15 - 60	15 - 60			
OU								
Viscosidade Brookfield	cP					NBR 15184	D 4402	
a 135°C, SP 21, 20 rpm, mín		374	274	214	155			
a 150 °C, SP 21, mín.		203	112	97	81			
a 177 °C, SP 21		76 - 285	57 - 285	28 - 114	28 - 114			
Índice de susceptibilidade térmica (1)		(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)			
Ponto de fulgor mín	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92	ME 149/94
Solubilidade em tricloroetileno, mín	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042	ME 153/94
Ductilidade a 25° C, mín	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 min							D 2872	
Variação em massa, máx (2)	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5			
Ductilidade a 25° C, mín	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36	
Penetração retida, mín (3)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5	ME 003/99

Fonte: Norma DNIT 095/2006 – EM Cimento Asfáltico de Petróleo – Especificação de material

Os ligantes asfálticos quando são utilizados na pavimentação devem apresentar-se fluidos para que possa ajudar na mistura com os agregados e para a seguinte compactação na pista. Logo após a mistura lançado e compactada, deve apresentar-se suficientemente sólida de modo a conseguir suportar as cargas do tráfego, a altas temperaturas evitando deformações permanentes e a baixas temperaturas deve exibir flexibilidade para que impeça o aparecimento de trincas na camada de asfalto.

Outra característica importante da mistura betuminosa é a sua estabilidade. A estabilidade ótima é aquela que consegue atender aos requisitos de tráfego de forma satisfatória, pois quando a estabilidade é menor do que a demanda de tráfego há deformações e afundamento na superfície do pavimento. Além disso, a variação de temperatura também contribui para o afundamento nas trilhas de roda. Desta forma, a utilização de um asfalto com baixa susceptibilidade térmica é necessária para garantir a estabilidade do pavimento (GAMA *et al.*, 2013).

2.2 Misturas Asfálticas Mornas

No processo de fabricação de misturas asfálticas convencionais tanto os materiais granulares quanto o ligante asfáltico devem ser aquecidos a temperaturas elevadas em torno de 150 °C a 200 °C. Nesta faixa de temperatura, o ligante possui viscosidade capaz de encobrir os grãos do material granular e formar uma mistura homogênea. Para atingir tais temperaturas o processo requer um alto consumo de energia, que geralmente ocorre pela queima de combustíveis fósseis e, que por consequência, liberam quantidade considerável de gases nocivos à atmosfera, contribuindo assim para o conhecido efeito estufa. Atualmente, há necessidade de diminuir, cada vez mais, os agentes causadores do efeito estufa, e suas consequências ao meio ambiente (SALES *et al.* 2015).

Neste contexto, surgiram as chamadas misturas asfálticas mornas (MAMs em português e do inglês *Warm Mix Asphalt - WMA*), referindo-se a um grupo de novas tecnologias desenvolvidas com o intuito de reduzir a temperatura de produção e aplicação das misturas asfálticas convencionais entre 30 e 50°C (FEITOSA, 2015). Foram desenvolvidas inicialmente na Europa na década de 90, com o intuito de adequar o protocolo de Kyoto a indústria de pavimentação.

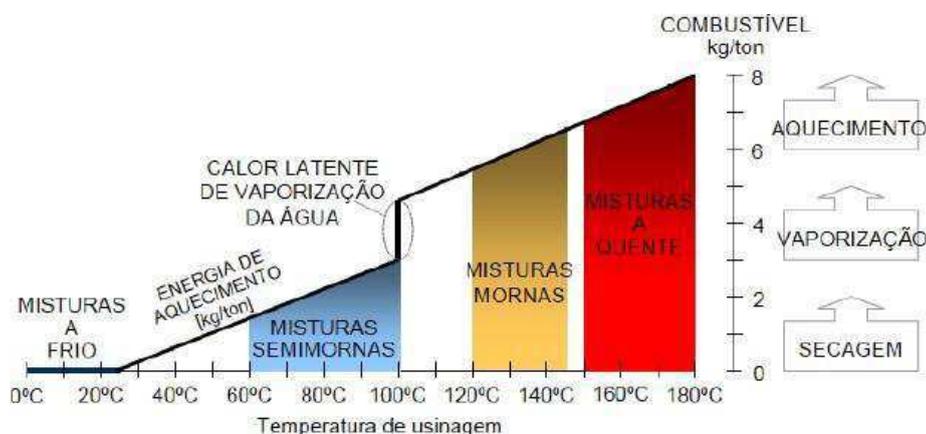
As misturas mornas proporcionam a redução da emissão de CO₂ e a diminuição no consumo de energia. Dados indicam que a utilização de MAMs pode reduzir entre 30-40% a quantidade de CO₂ e SO₂; 50% da quantidade de compostos orgânicos voláteis (VOCs); entre 10-30% de CO e entre 60-70% de NO, NO₂ e NO₃; além de considerável redução (30-50%) de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) (D'ANGELO, 2008).

Buscando-se métodos que possam diminuir as altas temperaturas das misturas a quente, mas que possam manter suas propriedades, vários pesquisadores têm

desenvolvidos novas tecnologias com ajuda de novos aditivos. Esses novos métodos são caracterizados por empregarem diferentes meios, químicos e mecânicos, com a intenção de reduzir a resistência ao cisalhamento da mistura asfáltica, promovendo assim, melhorias ao desempenho do pavimento produzido (FEITOSA, 2015).

As misturas asfálticas podem ser classificadas em misturas a quente, mornas, semi-mornas e a frio. As misturas a quente são caracterizadas pela alta temperatura, que não pode passar de 177°C (oxidação do asfalto), são muito utilizadas em rodovias de alto volume de tráfego, pois apresentam alta resistência e durabilidade. As misturas mornas e semi-mornas são caracterizadas por apresentarem temperatura de usinagem e compactação inferiores às misturas a quente. As misturas mornas são produzidas a temperaturas entre 100-120°C. As misturas a frio são aquelas produzidas à temperatura ambiente, entre 20 e 50°C, não apresentando a necessidade do aquecimento dos materiais granulares, porém com resistência e durabilidade menores que as misturas a quente. A Figura 2 apresenta a classificação das misturas asfálticas em função das temperaturas.

Figura 2 - Classificação das misturas asfálticas em função das temperaturas de usinagem.



Fonte: Motta (2011).

A temperatura influencia diretamente na qualidade do asfalto, portanto a temperatura de usinagem e aplicação devem ser a mais baixas possível para minimizar o efeito do envelhecimento na qualidade do asfalto. Este quando expostos a altas temperaturas libera gases voláteis e oxida, aumentando o aparecimento de fissuras nas misturas asfálticas. O envelhecimento do ligante torna-o mais rígido, que apesar de mais resistente a deformações permanentes ao mesmo tempo torna-o mais frágil, menos dúctil, menos elástico e, conseqüentemente, mais susceptível ao trincamento (SALES, 2015).

Entre os benefícios da utilização das misturas mornas, pode-se citar: diminuição na emissão de gases voláteis, redução da energia utilizada como também do envelhecimento do ligante asfáltico, melhoria da qualidade de vida dos profissionais que lidam diariamente com a pavimentação de vias. Em relação à saúde dos trabalhadores, dados indicam que ocorre uma redução significativa do risco em relação ao potencial carcinogênico da ação dos voláteis emitidos nos procedimentos de usinagem e compactação dos ligantes asfálticos. (FEITOSA et al, 2015).

2.2.1 Histórico

O Quadro 1 apresenta o histórico do uso de misturas asfálticas mornas. Para facilitar a visualização, foi realizado o histórico em cronologia anual com os principais acontecimentos relacionados à utilização e estudo das misturas mornas.

Quadro 1 - Histórico do uso de misturas asfálticas mornas

Ano	Histórico
1956	O professor Csanvi, da Universidade do Iowa, estuda a utilização da espuma de betume em ligantes para solos (CHOWDHURY e BUTTON, 2008).
1968	A empresa Mobil Oil, na Austrália, incorpora água fria no lugar de vapor de água na produção da espuma de betume (KRISTJANSDOTTIR et al., 2007).
1977	Publicação do manual <i>Bituminous Mix</i> , com informações sobre a metodologia de dimensionamento, a formulação e a produção de misturas betuminosas estabilizadas com emulsões (CHOWDHURY e BUTTON, 2008).
1979 e 1981	A <i>Federal Highway Administration</i> (FHWA) e a <i>Asphalt Emulsion Manufacturers Association</i> (AEMA) publicam manuais sobre o assunto (CHOWDHURY e BUTTON, 2008).
1994	Maccarone <i>et al.</i> (1994) estudam as misturas betuminosas (asfálticas) a frio com betume espuma como ligante, e as misturas betuminosas com elevado conteúdo de emulsão (CHOWDHURY e BUTTON, 2008).
1995	A empresa Shell patenteia uma técnica que utiliza dois componentes, a qual resultaria anos mais tarde no desenvolvimento da tecnologia <i>WAM-Foam</i> (CHOWDHURY e BUTTON, 2008).
1995	Na Alemanha, são executadas as primeiras rodovias com revestimento composto por mistura morna, através da adição de Aspha-Min®, um zeólito sintético. Posteriormente esta tecnologia é aplicada também na Noruega e na Dinamarca (PROWELL e HURLEY, 2007).
1996	A União Européia inicia estudos no sentido de buscar formas para o cumprimento das metas estabelecidas pelo Protocolo de Kyoto, e o Ministério do Trabalho e das Relações

	Sociais alemão determina limites de exposição para os trabalhadores expostos a fumos de asfalto (MOTTA, 2011).
1997	Tem início a comercialização do aditivo Sasobit® na Europa, pela empresa <i>Sasol Wax International AG</i> (BARTHEL et al., 2004).
1999	Jenkins <i>et al.</i> (1999) verificam os benefícios do aquecimento do agregado a temperaturas abaixo de 100°C, antes da aplicação da espuma de asfalto (CHOWDHURY e BUTTON, 2008).
2000	Em uma Conferência Internacional de Pavimentos Asfálticos em Sidney, Austrália, o processo de produção das misturas mornas é apresentado por Harrison e Christodulaki (OTTO, 2009). Ainda neste ano, o desempenho da mistura morna é avaliado através de testes laboratoriais e em campo na Noruega, no Reino Unido e na Holanda, resultando em um artigo elaborado por Koenders <i>et al.</i> (2000);
2006	Um dos primeiros trabalhos a respeito de misturas mornas é publicado no Brasil por Souza Filho (2006), através de dissertação de Mestrado deste autor na Universidade Federal do Ceará (UFC), tendo como título “Produção de Misturas Asfálticas Mornas pela Inserção de Zeólitas”;
2007	Os Estados Unidos enviam à Europa uma equipe de especialistas para avaliação da tecnologia de Misturas Mornas já há algum tempo utilizada naquele continente. Entre estes especialistas, representantes da AASHTO e da FHWA se fizeram presentes.
2009	Otto (2009) realiza estudo para verificar a fadiga e o módulo complexo em misturas asfálticas mornas;
2010	Um estudo com diversos aditivos em misturas asfálticas, inclusive àqueles que possibilitam a redução de temperatura de produção e compactação é realizado por Cavalcanti (2010) que avaliou o efeito destes aditivos na vida de fadiga e na resistência à deformação permanente das misturas asfálticas;
2011	O relatório NCHRP 691 (2011) com o objetivo de apresentar métodos e procedimentos a serem utilizados em misturas mornas é concluído. Com base neste relatório novas pesquisas estão sendo realizadas, de modo a difundir a utilização da redução de temperaturas na produção de misturas asfálticas. Motta (2011) elabora um estudo visando avaliar a diminuição do consumo energético e da emissão de poluentes gerados pela mistura morna em comparação com as misturas produzidas a temperaturas convencionais (elevadas);
2012	Budny (2012) realiza estudo para avaliar o comportamento mecânico das misturas mornas.
2013	Filho (2013) realiza um estudo acerca da influência da redução das temperaturas de usinagem e compactação no comportamento mecânico das misturas asfálticas mornas.
2015	Merighi (2015) realiza um estudo do comportamento de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimento com adição de borracha moída de pneu.
2015	Mocelin (2015), Avaliação da trabalhabilidade de misturas asfálticas mornas com emprego de aditivo surfactante.

2015	Feitosa (2015) estuda a avaliação do uso de diferentes tipos de cera de carnaúba como aditivos de misturas mornas.
2015	Sales (2015) estudou a utilização do aditivo CCBIt nas misturas asfálticas avaliando as suas características físicas e mecânicas.
2016	Silva (2016) estudos reológicos de aditivos utilizados na fabricação de misturas mornas.

Fonte: Filho (2013)

2.2.2 Possíveis vantagens das misturas mornas

Prowell (2007) apresenta em seu artigo possíveis benefícios da utilização de misturas asfálticas mornas. Entre os principais benefícios apontados, estão as preocupações com um desenvolvimento sustentável ou “construção verde”, os aspectos ambientais, particularmente a redução do consumo de energia e diminuição da emissão de gases poluentes para a atmosfera, como também o bem-estar dos trabalhadores envolvidos no serviço de pavimentação, particularmente com o mastique (mistura de ligante com fílier), que é produzido a temperaturas elevadas.

Segundo Barthel (2004), estudos mostram que a emissão de gases e fumos de asfalto é praticamente inexistentes a temperatura de 80°C, a sua maior parte está presente a temperatura de 150°C. Estudos realizados por Prowell (2007), a Noruega, Bélgica e França incluíram dados que indicam a diminuição da emissão de gases. A redução do consumo de combustível nas misturas mornas normalmente varia de 20 a 35%, podendo chegar a 50% ou mais no caso da técnica utilizando agregado miúdo. O Quadro 2, apresenta possíveis vantagens na utilização das misturas asfálticas mornas.

Quadro 2 - Possíveis vantagens da utilização das misturas asfálticas mornas

Benefícios	Dados esperados
Redução das emissões (%): CO ₂	30 – 40
SO ₂	35
VOC	50
NO _x	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 à quente.

Fonte: Prowell (2007)

Outra vantagem observada na utilização de misturas asfálticas mornas é a redução do odor quando comparadas com as misturas asfálticas convencionais. Em seus estudos Barthel (2004), enfatiza a redução expressiva do odor em misturas mornas em avaliações realizadas em campo.

Se por um lado as vantagens estão sendo pouco a pouco comprovadas, por outro não se tem ainda resultados do desempenho em longo prazo destas misturas, justamente por ser relativamente cedo para se fazer a referida avaliação. Desta forma, estudos e pesquisas são necessários para obter os resultados, tanto em laboratório como em campo para se comprovar a eficácia de misturas usinadas a temperaturas moderadas, com os agregados disponíveis no Brasil (FILHO, 2013).

2.2.3 Emissão de Poluentes

O ligante asfáltico quando se apresenta a temperatura ambiente, não oferece riscos à saúde humana nem riscos ao meio ambiente. Porém, como esse material é aquecido a altas temperaturas, entre 150 a 177°C, existe a necessidade de estudo sobre das emissões de gases poluentes.

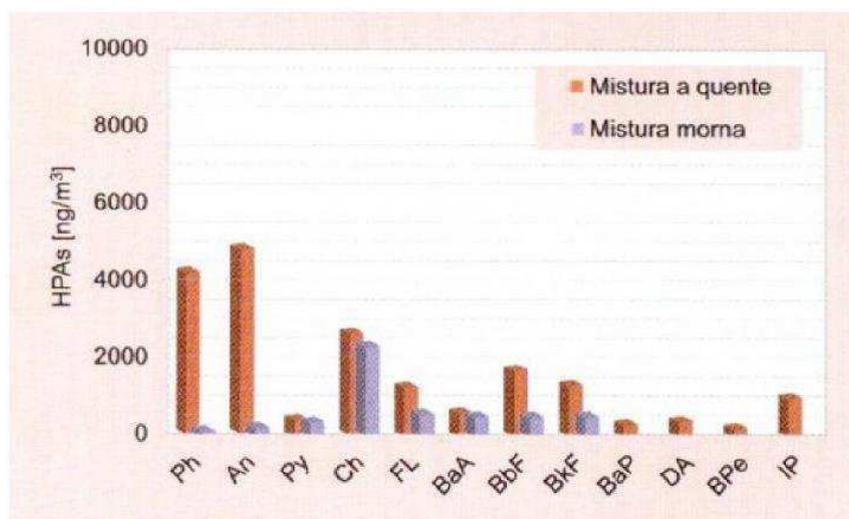
Devido à grande variabilidade das amostras de ligante asfáltico e sua elevada complexidade, definir a composição química exata dos fumos gerados não é uma tarefa possível, mas de um modo geral pode-se destacar a presença de metano, dióxido de

enxofre, monóxido de carbono, dióxido de nitrogênio, gás sulfídrico e solventes aromáticos como benzeno, tolueno e xileno. No entanto, do ponto de vista da saúde ocupacional, os componentes mais importantes devido à sua ação carcinogênica são os Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs). Os HPAs pertencem a uma classe de compostos químicos complexos, cuja estrutura se apresenta na forma de anéis de benzeno unidos, estando amplamente distribuídos na atmosfera e já podem ser considerados materiais com grande potencial carcinogênico e/ou mutagênico (PANIZ et al 2015).

Os fumos emitidos por ligantes asfálticos são constituídos por gases e gotículas de aerossol, que podem conter pequenas concentrações de compostos aromáticos policíclicos e agentes irritantes. Uma parte dos compostos emitidos é formada de HPAs. As emissões de fumaças e vapores começam a ser produzidos a uma temperatura de 150°C e são constituídos de hidrocarbonetos, H₂S e de compostos policíclicos aromáticos (HPAs) liberados da massa asfáltica no processo de aquecimento (BERNUCCI et al., 2008).

A temperatura influencia de forma direta nesses compostos químicos. Fumos que são gerados a baixas temperaturas apresentam-se menos nocivos, se comparados a fumos formados pelas misturas a quente. Logo, as misturas mornas emitem porcentagens menores de HPAs quando comparado com as misturas a quente, como é possível observar na Figura 3.

Figura 3 - Gráfico comparativo entre mistura a quente e mornas com relação a emissão de HPA



Fonte: Paniz (2015)

A determinação do estudo dos Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs) é muito complexa, e além dos HPAs, existem outras substâncias que podem causar danos à saúde humana. Segundo Paniz (2015), os HPAs têm recebido mais atenção devido aos possíveis danos em longo prazo causados por intoxicações crônicas.

A descoberta da carcinogenicidade de alguns HPAs na década de 30 trouxe uma nova preocupação ao meio científico. “As principais queixas de saúde entre os trabalhadores expostos aos fumos de asfalto nos serviços de pavimentação e construção civil (revestimento de telhados) são os efeitos do trato respiratório, tais como irritação de nariz e garganta, tosse, garganta seca, corrimento nasal, nariz sangrando, dificuldades de respiração e asma.” (HEALTH COUNCIL OF THE NETHERLANDS, 2007).

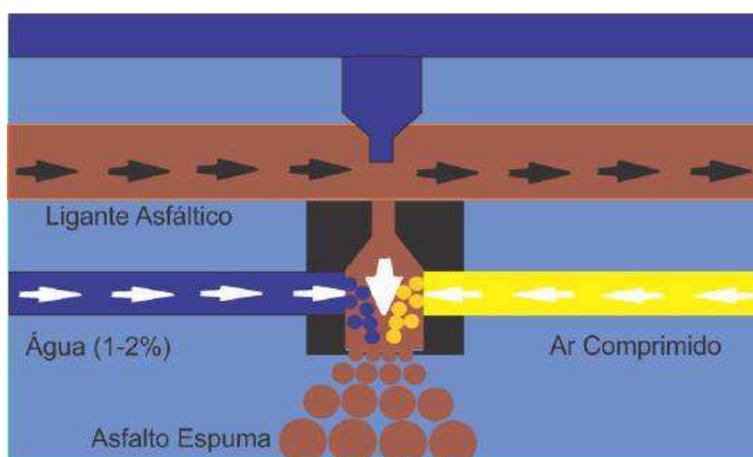
2.2.4 Classificação das Misturas Mornas

As misturas asfálticas podem se distinguir pelo tipo de tecnologia empregada para diminuir a temperatura de trabalho. Os aditivos mais usados são: Aditivos orgânicos ou ceras, asfalto espumado e aditivos surfactantes.

2.2.4.1 Asfalto Espumado

Esse processo foi primeiramente descrito em 1956 pelo professor L. Csanyi, da Universidade de IOWA nos USA, que percebeu a potencialidade no uso do ligante asfáltico espumado como ligante de solo. Doze anos mais tarde, a empresa Mobil Oil Austrália, dona da patente do método desenvolvido pelo professor Csanyi, modificou o processo inserindo água fria ao invés de vapor (Figura 4), facilitando o processo (CHOWDHURY; BUTTON, 2008; FEITOSA, 2015). Inicialmente, o asfalto espuma consistia apenas na incorporação de água na mistura, para que assim ocorresse a formação de uma espuma com uma elevação da temperatura do ligante asfáltico.

Figura 4 - Processo de formação do asfalto espuma



Fonte: Feitosa (2015)

A incorporação da água no processo de formação do asfalto espuma é motivada para que a temperatura entre as misturas mornas e semimornas sejam de 100°C, temperatura essa que a água utilizada passa ao estado de vapor. Quando a água incorporada nesses materiais se dispersa no asfalto aquecido torna-se vapor, deste modo, produz a expansão do ligante, resultando na redução da viscosidade (BUTTON, 2007).

2.2.4.2 Aditivos Sufactantes

Aditivos surfactantes são tecnologias que baseiam-se na introdução desses no ligante asfáltico ou em emulsões com elevado teor de resíduo asfáltico, com o intuito de produzir misturas mornas e semimornas (SILVA, 2016). Esse tipo de produto proporciona uma ótima adesividade do material, aumentando a ligação entre o ligante e os agregados, além do que, aperfeiçoamento no processo de recobrimentos dos agregados. Esse tipo de aditivo geralmente não modifica as propriedades de consistência do ligante, que são viscosidade, penetração e ponto de amolecimento (MOTTA, 2011).

A introdução dos aditivos surfactantes pode ser realizada antes e durante a usinagem, possuindo um sistema de utilização simples que não necessita de alterações na planta de usina, evitando assim um aumento nos custos iniciais. De acordo com a tecnologia utilizada, torna-se possível a redução da temperatura de usinagem por volta de 30°C a 40°C (SILVA, 2016). Podemos citar como exemplos de surfactantes, os produtos comerciais Gemul, Revix e Cecabase RT.

2.2.4.2.1 Zeólitas

Zeólitas são materiais formados por silicatos cristalinos alumino-hidratados (naturais ou sintéticos) contendo em sua estrutura alta porcentagem de água, aproximadamente 20%. São caracterizadas por liberar a água contida em seus poros de forma gradativa quando aquecida em temperaturas acima do ponto de vaporização da água, entre 90 e 180°C. Algumas dessas tecnologias utilizadas na produção de misturas mornas valem-se dessa informação para produção de espuma no asfalto (FEITOSA et al 2015).

Figura 5 - Zeólitas comerciais



Fonte: Feitosa (2015)

2.2.4.3 Aditivos Orgânicos ou Ceras

Segundo Bonaquist (2011), os aditivos orgânicos (ceras) foram um dos primeiros tipos de aditivo para mistura asfáltica morna desenvolvida na Europa. A introdução de aditivos orgânicos tem por objetivo promover a diminuição da viscosidade do ligante asfáltico, isto quer dizer que, quando submetidos a temperaturas superiores ao seu ponto de amolecimento, causam a redução da viscosidade do ligante.

Aditivos orgânicos podem ser introduzidos diretamente ou durante o processo de usinagem, possibilitando reduções na temperatura de mistura entre 30 e 40°C. Após a mistura desses aditivos, quando o resfriamento da mistura asfáltica ocorre, estes elementos cristalizam-se de forma dispersa dentro do ligante. Esse fato aumenta a rigidez do asfalto e, por consequência, da mistura asfáltica (FEITOSA et al., 2015).

Dentre os aditivos orgânicos que podem ser incorporados as misturas asfálticas mornas, destacam-se o aditivo comercial Sasobit®, que é produzido através de gás natural, considerado uma cera parafínica, a qual é produzida a partir de um processo de Fischer-Tropsch (FT), que é patenteado pela empresa alemã Sasol Wax GmbH, que promete atuar na redução de viscosidade do ligante asfáltico. As ceras sintéticas F-T são obtidas a partir 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. Segundo Feitosa (2015), quando misturado com o ligante asfáltico ocorre redução em seu ponto de fusão, permitindo a compactação da mistura asfáltica em temperaturas próximas a 100°C.

Figura 6 - Cera sintética (Sasobit®)



Fonte: Construction and Building Materials (2017)

Outros aditivos orgânicos são as amidas de ácidos graxos sintéticos. São fabricadas a partir da reação entre as amidas e os ácidos graxos. As amidas atuam como redutores de viscosidade dos ligantes asfálticos.

E as ceras de origem vegetal ou naturais também podem ser incorporadas ao ligante asfáltico em misturas mornas; para que a implantação seja possível, é preciso 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 (LEITE et al., 2011). A Figura 7 apresenta exemplos de ceras de abelha e carnaúba.

Figura 7 - (a) cera de abelha; (b) cera de carnaúba



Fonte: Fenixceras

2.2.5 A Carnaubeira

2.2.5.1 Origem

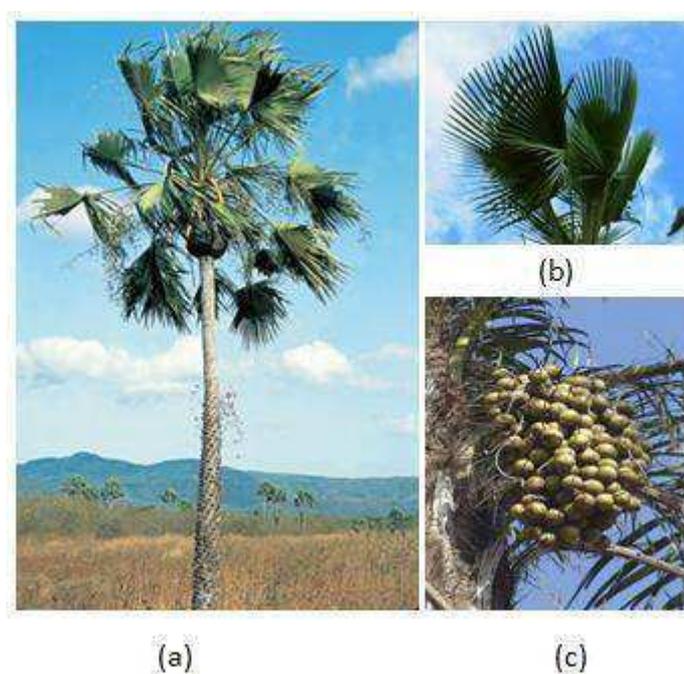
A carnaubeira é uma planta originária do semi-árido nordestino, é bastante comum em solos do tipo argilosos, apresentando-se resistentes as secas severas e com grande longevidade (aproximadamente 200 anos). Tendo papel fundamental no bioma da caatinga, responsável pela conservação do solo e pela proteção dos rios, evitando fenômenos como erosão e assoreamento dos rios (VARELA, 2011). Apresenta-se com maior ocorrência nos estados do Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte, com grande importância econômica, social e ecológica. A Copernícia Cerífera, como é chamada cientificamente a carnaubeira, foi descoberta no ano de 1790 e por apresentar inúmeras finalidades é chamada de “árvore da vida” pelos habitantes do nordeste.

O grande interesse da carnaubeira é por conta do emprego integral de todas as partes da planta, isto é, utilização das folhas, frutos, raízes e tronco. A extração da fibra proveniente das folhas da carnaubeira é utilizada na confecção de vassouras, bolsas, cordas, chapéus entre outros artesanatos, sendo utilizada também como componente na ração de animais durante períodos de seca e a parte da carnaubeira de maior importância econômica. 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).

O fruto apresenta grande valor nutricional, quando verde pode ser utilizado como ração para os animais e quando seco é utilizado no preparo de óleos. As raízes possuem várias propriedades medicinais de onde se produz um chá utilizado como um eficiente

medicamento contra o reumatismo, sífilis, pele ressecada, depurativo, diurético e em alterações do ciclo menstrual. Das cinzas das raízes pode-se obter uma espécie de sal, que pode ser utilizado em substituição ao sal de cozinha (CARVALHO, 1982). Os troncos são muito utilizados no ramo de construção civil: produção de caibros, ripas, portas, mesas, cobertas e lenha para combustão. Também é utilizado para a produção de pequenas embarcações como jangadas e botes. A Figura 8 apresenta fotos da carnaubeira e partes da planta.

Figura 8 - Carnaubeira e seus componentes (a) Carnaubeira; (b) folha da carnaubeira e (c) frutos da carnaubeira



Fonte: Autora (2018)

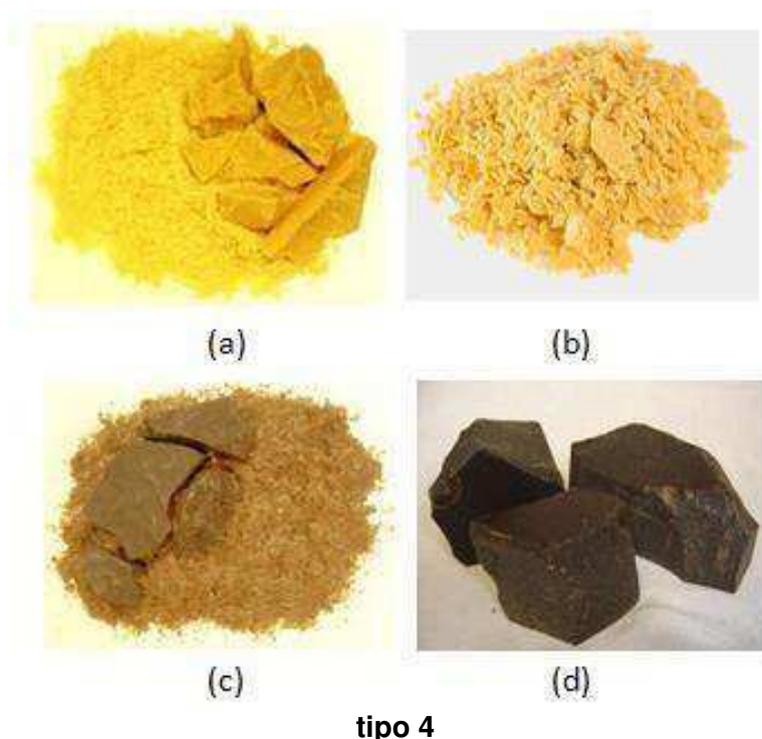
2.2.5.2 Cera de carnaúba

A cera de carnaúba é obtida das folhas de uma palmeira americana designada *Copernicia* (ou *Copernica*) *cerifera*, assim chamada em homenagem a Copérnico. Acredita-se que o nome carnaúba tenha vindo de uma distorção da palavra carnaíba do Tupi, composto de caraná ou carandá, que significa escamoso e “iba” que significa palmeira ou árvore. 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).

A classificação da cera de carnaúba em diferentes tipos auxilia na destinação e no uso adequado deste produto nos diferentes tipos de setores da indústria e comércio. Segundo Rizzo (2008), existe quatro tipos de cera de carnaúba, a diferença química entre elas deve-se a forma de extração e industrialização. A cera de carnaúba do tipo 1 é obtida do pó do “olho” das carnaubeiras e apresenta cor amarelo-ouro. É geralmente utilizada em indústrias farmacêuticas, cosméticas, alimentícias e em emulsões. Já as outras 3 opções (tipo 2, tipo 3 e tipo 4), são obtidas do pó da palha das carnaubeiras e todas se apresentam na forma de escamas.

A cera do tipo 2 apresenta cor amarelo-laranja, ela é refinada, clareada e geralmente é utilizada em tintas de impressoras e códigos de barras. A cera do tipo 3 apresenta cor marrom escuro e é utilizada em tintas, vernizes e cera para polimentos. A cera do tipo 4 tem coloração preta e é utilizada na produção de papel carbono. O Brasil é o principal produtor de cera de carnaúba do mundo e atualmente toda a sua produção de cera do tipo 2 é destinada à exportação. A Figura 9 apresenta os quatro tipos de cera de carnaúba.

Figura 9 - Tipos de cera de carnaúba (a) Cera de carnaúba do tipo 1; (b) Cera de carnaúba do tipo 2; (c) Cera de carnaúba do tipo 3 e (d) Cera de carnaúba do



Fonte: Roguimo Ceras de Carnaba

O tipo de cera de carnaúba utilizada nesta pesquisa classifica-se no tipo 1, com pigmentação amarelo-ouro. Na Tabela 1 estão especificadas algumas características físico-químicas e organolépticas da cera de carnaúba do tipo 1.

Tabela 1 - Características físico-químicas da cera de carnaúba

Parâmetros	Características
Aparência	Escamas
Cor	Amarelo Ouro
Odor	Característico
Faixa de Fusão °C	81-86
Índice de Saponificação, mgKOH/g amostra	68-88

Fonte: Rizzo (2008)

A cera obtida da folha da carnaubeira é considerada seu principal produto. Produto que no passado, Brasil Colônia, foi de grande importância para a exportação, além de ser utilizada na iluminação de casas, sob a forma de velas, principalmente no meio rural nordestino (FEITOSA, 2015).

Segundo o IBGE (2016), os estados de Piauí e Ceará concentram 96,3% da produção nacional de cera de carnaúba (pó cerífero), que totalizou 18 mil toneladas, uma queda de 10,1% em relação ao ano de 2015. Granja, Camocim e Santana do Acaraú são os maiores municípios produtores do Ceará, e Campo Maior, Piripiri e Piracuruca, os do Piauí. Na Tabela 2 observa-se a grande quantidade de pó de carnaúba produzido no Brasil, como também a quantidade de cera de carnaúba produzida nos anos de 2015 e 2016.

Tabela 2 - Produção de cera de carnaúba nos anos de 2015 e 2016

Produtos	Quantidade Produzida (2015/2016)	Variação (%)
Carnaúba (Cera)	2.060/1.674	(-)18,7
Carnaúba (pó)	19.974/17.957	(-)10,1

Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Agropecuária, Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2015-2016

Para a obtenção da cera de carnaúba utiliza-se as seguintes etapas: retirada das folhas das carnaubeiras, secagem, recolhimento do pó, processo de fusão, resfriamento e beneficiamento final. Abaixo são descritas as etapas de extração da cera de carnaúba (FEITOSA et al, 2015).

- A retirada das folhas da carnaubeira é feita entre os meses de julho e fevereiro, feita de forma manual por extrativistas locais, esta etapa nada mais é que uma pequena poda da folhagem da carnaubeira preservando a integridade da palmeira e retardando o envelhecimento da planta.
- O processo de secagem: as folhas da carnaubeira são postas lado a lado para secagem ao sol no lastro, local onde são depositadas as palhas. Nesse processo são separadas as palhas originadas do olho e as palhas mais externas (maduras) de forma que elas não se misturem.
- Após o período de secagem as palhas são batidas, nesse processo, as palhas são suspensas, utilizando-se de um pedaço de madeira (cassete) a palha é “batida” e o pó cerífero é despreendido da palha e depositado no chão. Industrialmente esse processo é feito com o auxílio de máquinas.
- O pó obtido após o processo de batimento das folhas é recolhido, passando por um processo de cozimento em água para evitar a queima e perda da cera de carnaúba. Após a fusão da cera, a mesma é coada com o auxílio de prensas de madeira. Industrialmente esse processo é substituído por extração à base de solventes.
- A etapa do resfriamento se faz em tanques rasos. Em seguida, o produto é dividido em pedras de cor amarelo esverdeada ou marrom escura (Cera Bruta).
- Na etapa do beneficiamento, a cera é submetida ao processo de fusão em tachos ou autoclaves. O processo é completado passando por etapas de centrifugação, filtração, clareamento e embalagem final. Essas etapas asseguram a pureza e a qualidade das variedades oferecidas no mercado.

A cera de carnaúba é utilizada em diversos setores, como por exemplo na medicina em revestimentos de cápsulas, cera dental e indústrias de cosméticos (produtos para pele, cabelo, batom e creme de barbear). É usada na produção de produtos como: vernizes, esmaltes, tintas, sabonetes, lubrificantes, produtos para polimento de sapatos e automóveis e impermeabilizantes. Está presente também como componente na produção de lápis de cera, papel carbono, cola e grafites. Na informática é componente na confecção de chips, tonners de impressoras e código de barras (OLIVEIRA, 2002).

Outras indústrias também utilizam a cera de carnaúba como componente de seus produtos, como: indústria alimentícia (produção de refrigerantes, goma de mascar e

doces), cerâmicas, explosivos e fósforo, embalagens de papelão para produtos alimentícios, poliéster, borracha e materiais elétricos (RISCH, 2012).

A adição de ceras aos ligantes asfálticos tem por objetivo a redução de temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas. Segundo Reyes (2009), esta redução é em torno de 20°C. Em suas pesquisas, Reyes (2009) mostrou semelhanças nos resultados de módulo dinâmico e fadiga, quando comparados com misturas as quais não apresentavam aditivos em sua composição. Existem poucas bases bibliográficas as quais adiciona-se tipos de ceras de carnaúba as misturas asfálticas, considerado um estudo bastante recente em relação as 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

Autores	Bibliografias	Tipo
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

Fonte: Autora (2018)

2.2.5.3 Caracterização Reológica da Cera de Carnaúba

Em seus estudos Silva (2016) realizou a caracterização reológica da cera de carnaúba com teores de 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5%. Foram realizados ensaios de PG-Grau de Performace (Performace Grade), ensaio MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery) e o Monitoramento do Módulo Complexo (G^*) e da $\tan \delta$ em Varredura de Temperatura. Serão apresentados nas Tabelas 4, 5 e 6, os resultados referentes ao CAP puro e teores de cera de carnaúba propostos por Silva (2016), o qual determinou que teor de 2% de cera seria o ideal, pois além de apresentar uma melhor trabalhabilidade e uma maior redução das temperaturas de usinagem e compactação.

2.2.5.3.1 Resultados de PG-Grau de Performance (Performance Grade)

Silva (2016) observou que todas as misturas por ele estudadas apresentaram um PG ou um grau de desempenho que indica que as mesmas possuem as propriedades físicas que as permitem serem utilizadas em campo. Observa-se que antes do RTFO, as temperaturas apresentaram-se semelhantes para todas as misturas. Após o RTFO pode-se observar uma diminuição de temperatura para os teores de 2 e 2,5% de cera, apresentando uma redução de 9,4% em relação ao CAP puro. O objetivo é superar ou manter a temperatura de PG do CAP puro, o que não foi observado no teor de 2 e 2,5% de cera, pois o acréscimo no $\sin\delta$ foi maior que no Módulo Complexo (G^*) reduzindo a rigidez do CAP (Tabela 4).

Tabela 4 - Resultados de PG do CAP puro e com incorporação de teores de cera de carnaúba

RTFO	Material	Temperatura de Falha (°C)	PG
Antes	CAP Puro	65,5	64
	1% de cera de carnaúba	65,8	64
	1,5% de cera de carnaúba	65,4	64
	2% de cera de carnaúba	65,3	64
	2,5% de cera de carnaúba	65,2	64
Após	CAP Puro	65,3	64
	1% de cera de carnaúba	65,2	64
	1,5% de cera de carnaúba	65,0	58
	2% de cera de carnaúba	61,5	58
	2,5% de cera de carnaúba	61,3	58

2.2.5.3.2 Resultados do ensaio de MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery)

Na tabela 5 estão expostos os resultados referentes ao ensaio de MSCR. Segundo Silva (2016), a adição de teores de cera de carnaúba de modo geral proporcionou efeito benéfico, uma vez que a amostra com 2% de cera de carnaúba mostrou-se apta a ser submetida a um tráfego pesado (H).

Tabela 5 – Resumo ensaio MSCR

Tipo	PG (°C)	Jnr 3.2 (kPa)	Intervalo Jnr (kPa-1)	Nível de tráfego
CAP puro	64	3,87	$2,0 \leq Jnr \leq 4,0$	Padrão (S)
1% de cera	64	3,45	$2,0 \leq Jnr \leq 4,0$	Padrão (S)
1,5% de cera	64	3,89	$2,0 \leq Jnr \leq 4,0$	Padrão (S)
2% de cera	58	1,84	$1,0 \leq Jnr \leq 2,0$	Pesado (H)
2,5% de cera	58	2,20	$2,0 \leq Jnr \leq 4,0$	Padrão (S)

2.2.5.3.3 Resultados do Monitoramento do Módulo Complexo (G^*) e da $\tan \delta$ em Varredura de Temperatura

Em relação aos resultados do monitoramento do Módulo Complexo (G^*) e da $\tan \delta$ em varredura de temperatura, as Figuras 10 e 11, respectivamente, representam o comportamento do Módulo Complexo (G^*) em função da temperatura para os CAP Puro e modificados com teores de cera de carnaúba.

Figura 10 - Gráfico da variação do Módulo Complexo (G^*) em função da temperatura antes do RTFO

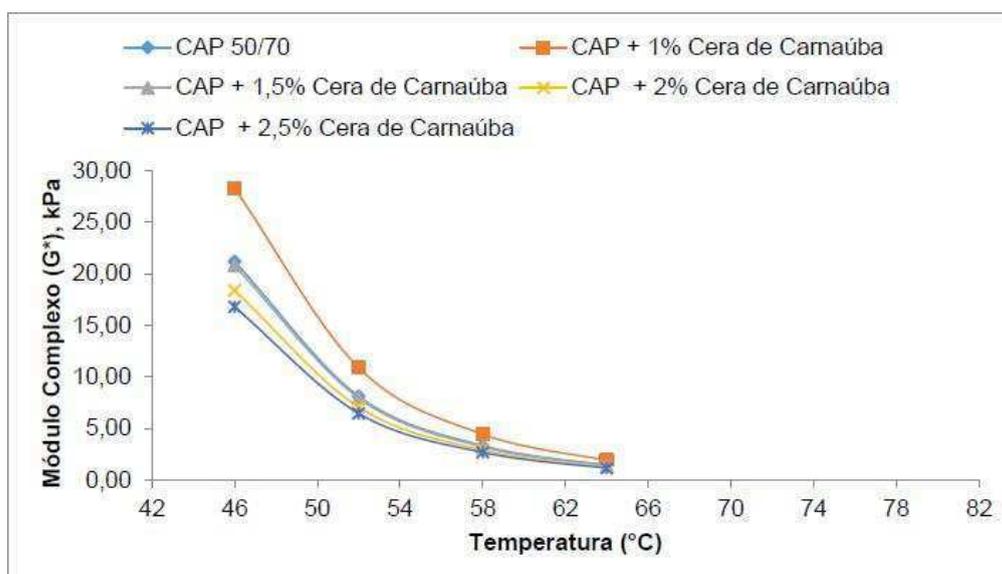
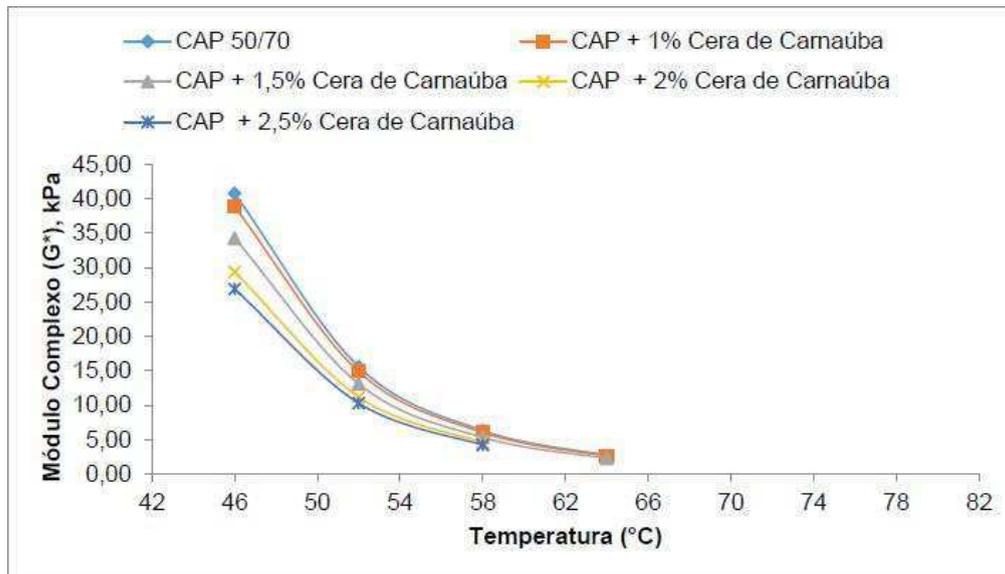


Figura 11 - Gráfico da variação do Módulo Complexo (G^*) em função da temperatura após o RTFO



Observa-se que o teor de 1% de cera de carnaúba foi o que apresentou antes do RTFO um maior módulo complexo, o que não foi observado após o envelhecimento à curto prazo. Em relação aos outros teores de cera de carnaúba, eles mostraram módulos complexos inferiores quando comparados ao CAP puro. Observa-se que G^* diminui, proporcionalmente, à medida que são adicionados teores de cera e aumenta a temperatura, este fato implica em uma redução da resistência à deformação do material.

As Figuras 12 e 13 representam, respectivamente, o comportamento da $\tan \delta$ em função da temperatura para o CAP puro e com teores de cera de carnaúba.

Figura 12 - Gráfico da variação da $\tan \delta$ em função da temperatura antes RTFO

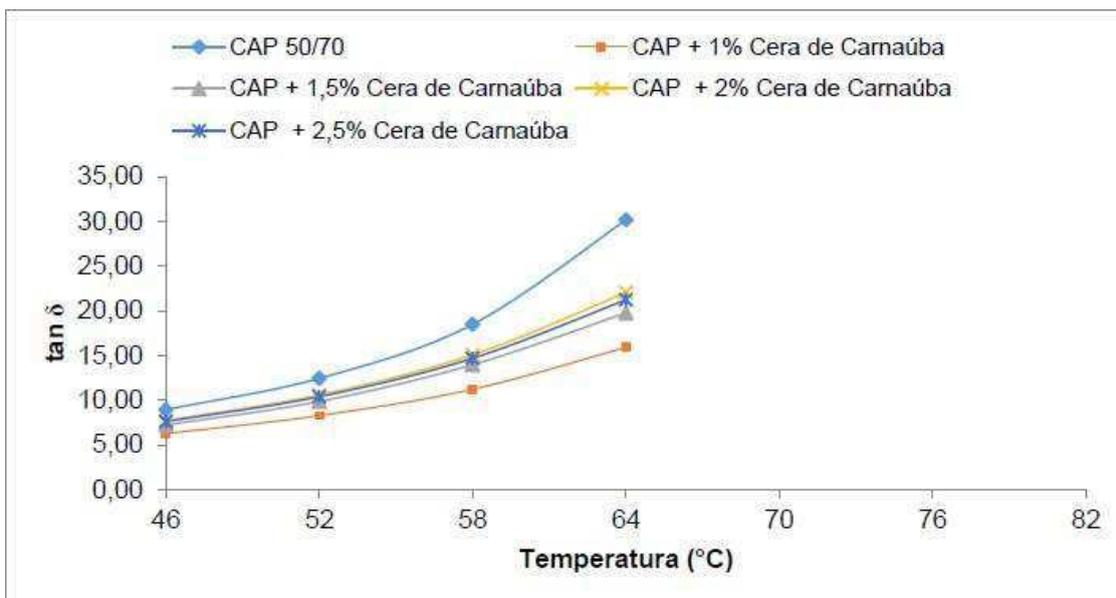
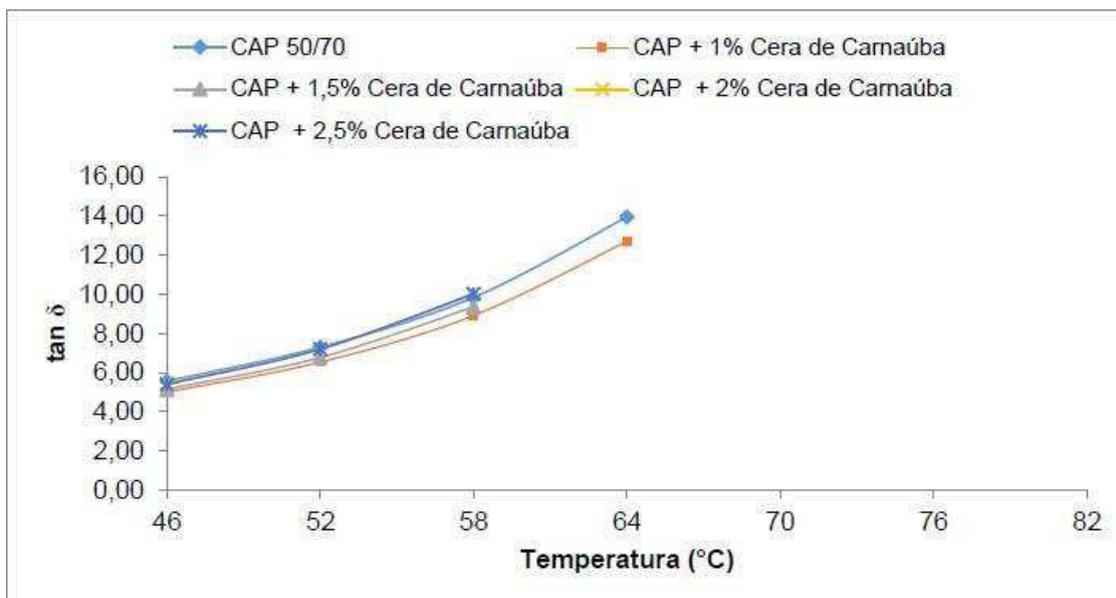


Figura 13 - Gráfico da variação da $\tan \delta$ em função da temperatura após o RTFO

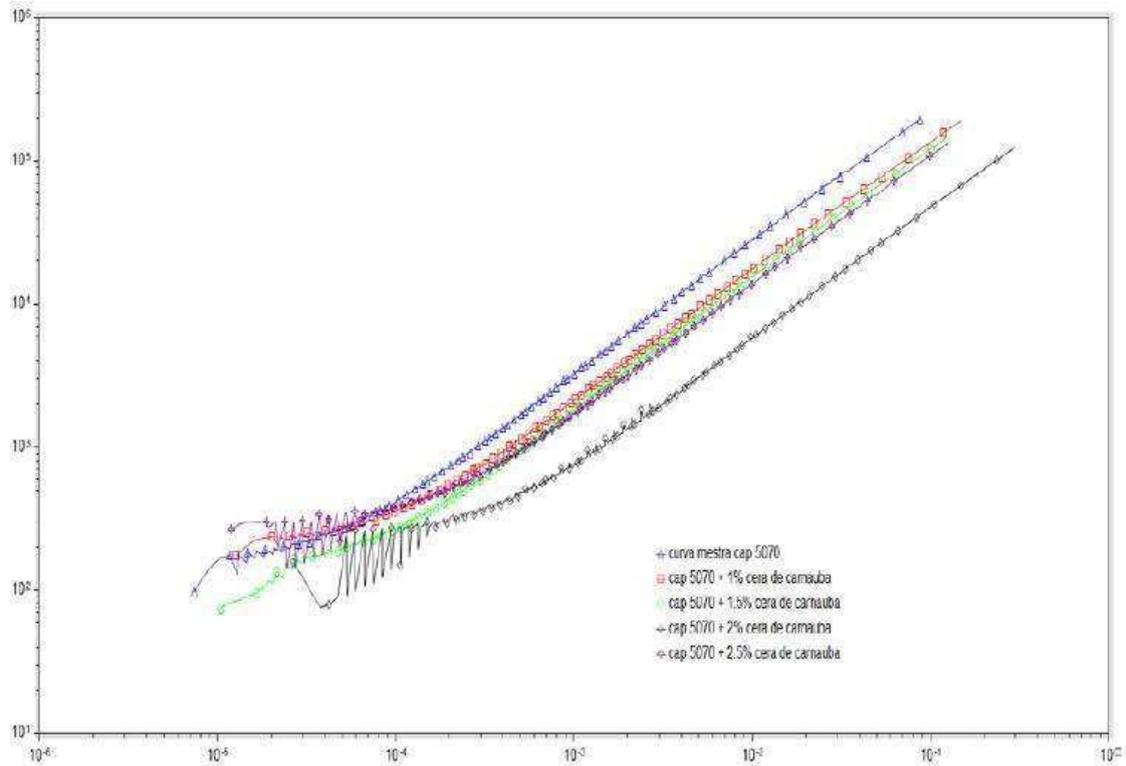


Observou-se que as misturas com cera de carnaúba antes do RTFO apresentaram valores menores de $\tan \delta$ quando comparados com o CAP puro. Após a realização do ensaio de RTFO, apenas os teores de 1 e 1,5% de cera apresentaram valores menores de $\tan \delta$. Os baixos valores de ângulos de fase nas misturas de 1 e 1,5% indicando uma melhor recuperação elástica em relação ao CAP puro. Os teores de 2 e 2,5% praticamente se igualaram ao CAP puro.

2.2.5.3.4 Avaliação através das Curva Mestre

A Figura 14 são lançados os gráficos de curva mestra obtidos para o CAP puro e com teores de cera de carnaúba.

Figura 14 – Curva Mestre



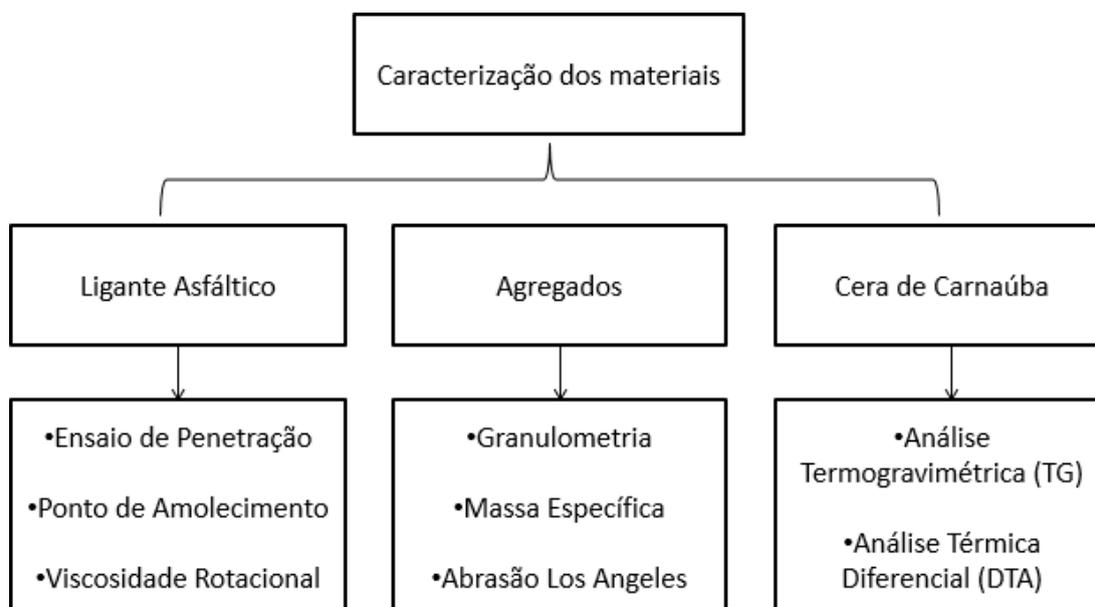
Para os teores de cera de carnaúba Silva (2016) observou, uma redução da temperatura de trabalhabilidade, principalmente, para o teor de 2% de cera. Foi verificado uma redução do módulo dinâmico o que infere em uma perda de resistência que pode ser justificada pela redução da viscosidade. Para os teores de 2 e 2,5% de cera, destaca-se uma alta susceptibilidade térmica, que pode ser confirmado pelas oscilações na curva.

CAPÍTULO 3

3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritos os procedimentos experimentais realizados nesta pesquisa, os materiais utilizados, como também as especificações para a obtenção das propriedades físicas dos agregados, ligantes e a caracterização química do aditivo, conforme mostrado no fluxograma da Figura 15. Como também as propriedades mecânicas da misturas asfáltica.

Figura 15 - Caracterização dos Materiais



A pesquisa experimental foi dividida em duas etapas. A primeira etapa teve como objetivo a obtenção dos materiais, como também a preparação e classificação dos mesmos (agregados, ligante asfáltico e cera de carnaúba). Esta fase é de suma importância para a verificação das características dos materiais, para que assim possa realizar a caracterização mecânica da mistura asfáltica. Os métodos de ensaios utilizados nesta pesquisa foram de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), do Departamento de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT) e da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO). A segunda etapa

tem como objetivo a realização das análises mecânicas dos corpos de prova com e sem a adição de teores de cera de carnaúba, a partir dos ensaios mecânicos: Resistência à Tração, Módulo de Resiliência, Lottman Modificado, Fadiga, *Flow Number*, Cântabro e Módulo Dinâmico.

3.1 Materiais Utilizados

3.1.1 Ligante Asfáltico

Utilizou-se o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70 fornecido pela construtora Rocha Cavalcante, com caracterização física apresentadas na tabela 6.

Tabela 6 - Caracterização do CAP

Característica	CAP PURO	Limites	Norma
Penetração(0,1mm)	66,77	50 -70	NBR-6576
Ponto de amolecimento(°C)	47,5	46(mín.)	NBR-6560
Viscosidade Rotacional 135 °C (cp)	455,0	274 (mín.)	NBR-15184
Viscosidade Rotacional 150 °C (cp)	221,0	112 (mín.)	NBR-15184
Viscosidade Rotacional 177 °C (cp)	79,5	57 – 285	NBR-15184

3.1.2 Agregados

Os agregados utilizados nesta pesquisa foram fornecidos pela construtora Rocha Cavalcante, com sede em Campina Grande – PB. Foram fornecidas amostras de brita 19mm, brita 12,5mm e pó de pedra (Figura 16). A areia e o fíler (cal hidratada) foram comprados no comércio local.

Figura 16 - (a) Brita 19mm, (b) Brita 12,5mm, (c) Pó de pedra e (d) Areia.



3.1.3 Cera de Carnaúba

O aditivo cera de carnaúba utilizado nesta pesquisa (Figura 17) foi adquirido através da empresa Ceras Microcristal, do tipo CT1 (classificação fornecida pelo fabricante) em tom amarelado, obtida a partir do processo de centrifugação, sabendo que esse é o seu estado de maior maturação. Possui um ponto de fusão de 86°C.

Figura 17 - Cera de carnaúba



Fonte: Silva (2016)

A cera de carnaúba usada nesta pesquisa foi também utilizada por Silva (2016), onde ele especificou a forma como deveria ser trabalhado o produto. Segundo Silva (2016), a cera deve ser moída com auxílio da mão de gral (Figura 18 – a), passando posteriormente na peneira de número 40 (0,42mm) (Figura 18 – b), com o objetivo de facilitar a fusão do cimento asfáltico de petróleo com a cera. Na mistura foi empregada

uma temperatura de 130°C durante 40 minutos a uma velocidade de 1015rpm. A Figura 19 apresenta a cera de carnaúba após o procedimento de peneiramento.

Figura 18 - (a) Cera de carnaúba moída na mão de gral. (b) Peneira utilizada para separação granulométrica do resíduo de cera de carnaúba



Figura 19 - Cera de carnaúba moído e peneirada na peneira n°40



3.2 Propriedades Físicas e Mecânicas dos Materiais

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

3.2.1 Agregados

Os ensaios utilizados para a caracterização dos agregados estão listados na tabela

7.

Tabela 7 - Ensaio dos agregados e especificações

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”	DNIT - ME 035/98

3.2.1.1 Granulometria

O ensaio de granulometria por peneiramento realizado nessa pesquisa seguiu a norma DNIT – ME 083/98, a qual descreve o procedimento de análise por peneiramento. O material utilizado para a realização do ensaio foi seco em estufa a 110°C por um tempo de 4 horas, com objetivo de retirar a umidade do material. O peneiramento foi realizado de forma manual (Figuras 21 – a e 21 – b). O ensaio de granulometria é realizado para que, a partir do mesmo, consiga-se realizar a dosagem das misturas asfálticas. Os resultados do ensaio de granulometria por peneiramento estão expostos na Tabela 8 e Figura 22.

Figura 20 - Sequência de peneiras para ensaio de peneiramento



Figura 21 - (a) Granulometria brita 19,1mm. (b) Granulometria areia

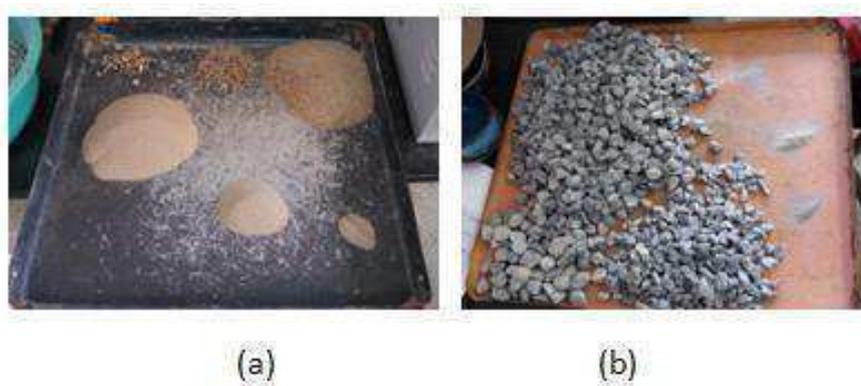
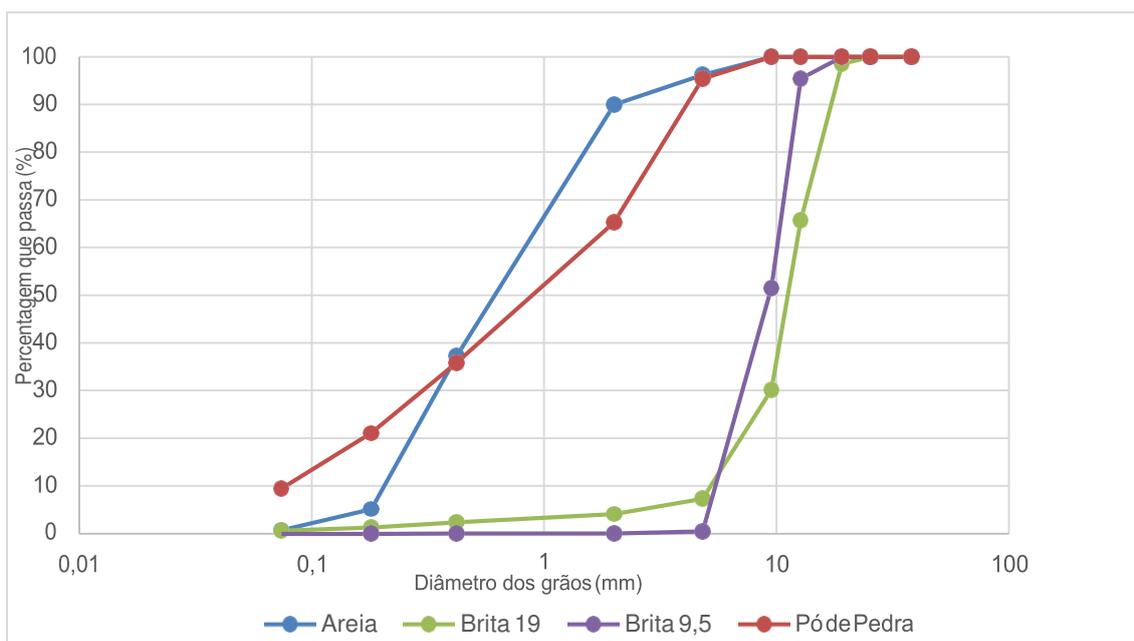


Tabela 8 - Quantidade passante acumulada

Peneira (N)	Peneira (N)	Brita 19mm	Brita 12,5mm	Areia	Pó de Pedra
1 ½'	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00
1'	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00
¾'	19,0	98,60	100,00	100,00	100,00
½'	12,7	65,77	95,43	100,00	100,00
3/8'	9,5	30,18	51,60	100,00	100,00
N° 4	4,76	7,38	0,54	96,24	95,44
N° 10	2,00	4,16	0,07	90,06	65,31
N° 40	0,42	2,43	0,05	37,23	35,88
N° 80	0,18	1,34	0,03	5,19	21,13
N° 200	0,074	0,69	0,00	0,75	9,50

Figura 22 - Curva granulométrica dos agregados



3.2.1.2 Absorção e densidade dos agregados graúdos

Segundo Pinto (2000), a relação entre a quantidade de matéria (massa) e volume determina a massa específica do material. Para a determinação da absorção e densidade dos agregados graúdos utilizou-se a norma do DNIT – ME 081/98.

Foram separados 3000g de brita 19mm e 2000g de brita 12,5mm (Figura 23 – a e 23 – b), em ambas foi desprezado o material passante na peneira 4,8mm através do método do peneiramento. As amostras foram lavadas para a retirada do pó e de impurezas e foram colocadas para serem secadas a 110°C durante 4 horas. Logo após resfriada a temperatura ambiente, as amostras foram colocadas imersas também à temperatura ambiente durante 24 horas.

Figura 23 – (a) Passagem da brita 19,1mm (b) 12,5 mm para ensaio de massa específica

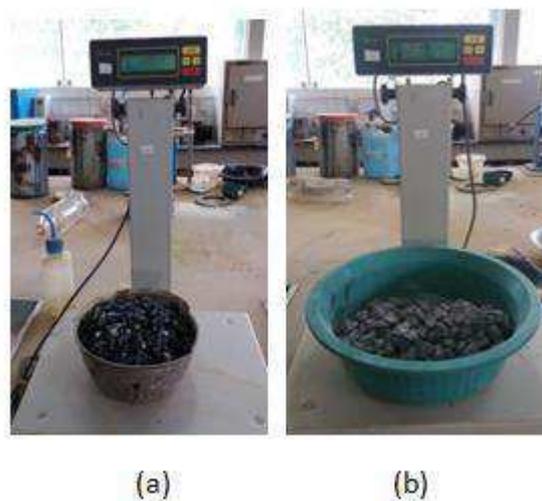
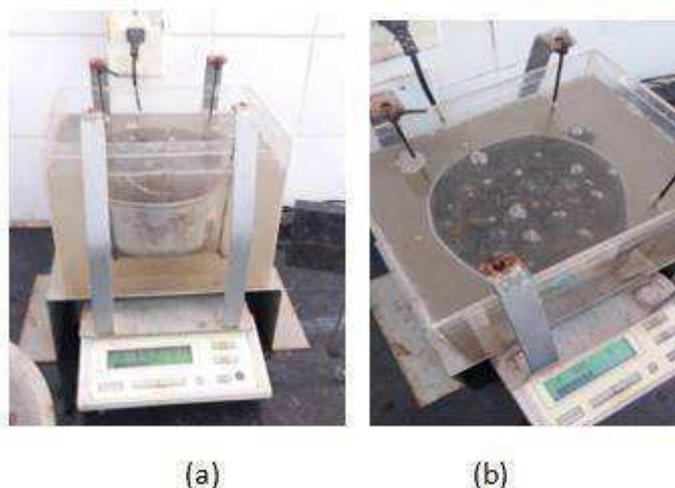


Figura 24 - Brita 12,5 em imersão



Após 24 horas imersas, o material foi removido e seco levemente para a verificação da massa úmida. E assim foi colocado em um recipiente para a determinação da massa submersa (Figura 25).

Figura 25 - Verificação da massa submersa das britas 19mm e 12,5mm



Depois de feita a pesagem, o material foi colocado novamente na estufa durante 4 horas, resfriado a temperatura ambiente e retirado a massa seca, para assim obter-se a densidade aparente a absorção dos agregados.

3.2.1.3 Massa específica do agregado miúdo

O método de ensaio DNIT – ME 084/95 é adotado para a determinação da massa específica dos agregados miúdos, com a denominação de densidade real dos grãos. Esse procedimento é semelhante ao do ensaio para a determinação da massa específica aparente seca de solos (DNIT – ME 093/94) e faz uso de um picnômetro de 50ml (BERNUCCI, 2008).

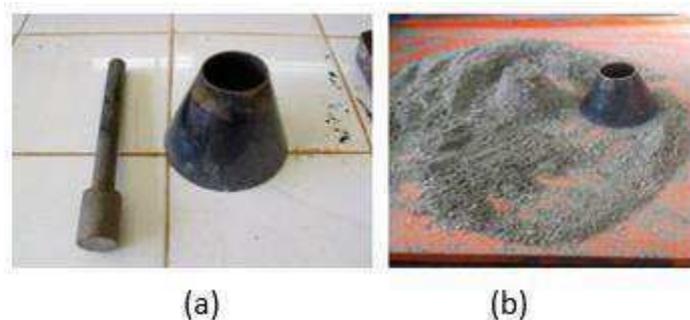
O ensaio de massa específica do agregado miúdo foi realizado com a areia e o pó de pedra seguindo a norma NM 52/2002, a qual determina a massa específica real e aparente do agregado miúdo.

Foram selecionadas duas amostras, cada uma apresentando 500 gramas de areia e pó de pedra. Foi utilizado o material passante na peneira 4,8mm e retido na peneira 0,075mm.

O pó de pedra e a areia foram colocados imersos em água e em repouso por 24 horas. Logo após, foi colocado os materiais em uma superfície plana e sob uma corrente de ar, com o objetivo de secar o material (Figura 26).

Figura 26 - Secagens do material

Para a verificação do estado do agregado como saturado superfície seca, fez-se a secagem até perceber que os agregados não estão mais fortemente unidos. Coloca o agregado miúdo no interior de um tronco-cônico e faz a compactação de forma suave com 25 golpes (Figura 27 – a). Ao levantar o cone e observar que o material conserva-se na forma do molde, isto significa que ainda existe umidade superficial na amostra (Figura 27 – b).

Figura 27 – (a) Tronco-cônico e haste de compactação (b) Agregado miúdo com forma de molde

Fonte: GAMA (2013)

Foi repetido o procedimento de secagem até que o cone de agregado desmoronou quando retirado o molde. Nesse instante o agregado miúdo chegou à condição de saturado superfície seca (Figura 28).

Figura 28 – Materiais miúdos na condição de saturado superfície seca



Foi colocado 500 gramas de agregado miúdo em um picnômetro, com cuidado para determinar a massa do conjunto. Preencheu-se a amostra com água destilada (Figura 29 – a e b).

O picnômetro foi mantido durante uma 1 hora em banho a temperatura constante (Figura 30). Em seguida, foi completado o picnômetro com água destilada e foi determinada a massa do conjunto, isto é, a massa do picnômetro mais água e amostra (Figura 31 – a e b).

Figura 29 - (a) Picnômetro mais amostra. (b) Amostra submersa com água destilada

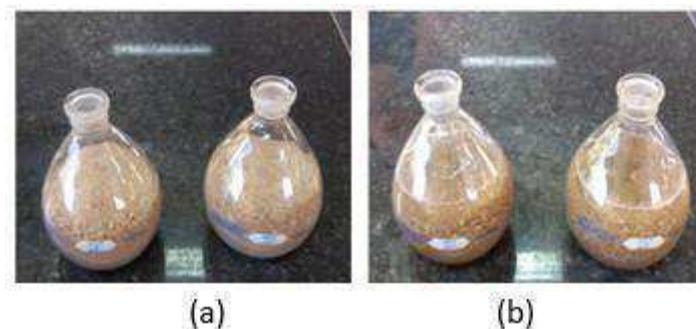
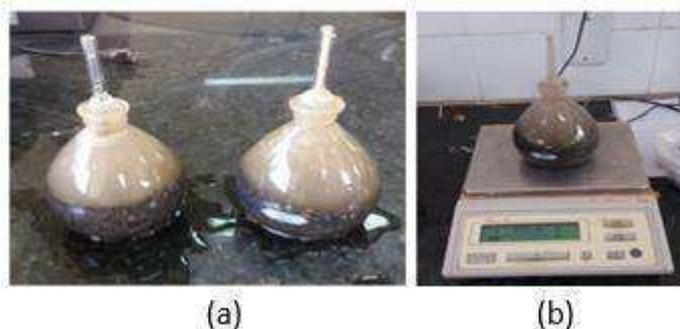


Figura 30- Picnômetro mais amostra em banho à temperatura constante



Figura 31 – (a) Conjunto Picnômetro, água e amostra. (b) Conjunto sendo pesado



Logo após a pesagem, o material foi retirado do picnômetro e levado para ser sevado em estufa (105 ± 5) °C até que ficou na consistência de uma massa. Assim, foi determinada a massa específica aparente do agregado miúdo.

3.2.1.3.1 Resultados dos ensaios de Massa Específica dos agregados miúdos e graúdos

A tabela 9 apresenta os resultados dos ensaios de massa específica dos agregados graúdos e miúdos.

Tabela 9 - Resultados do ensaio de massa específica com agregados graúdos e miúdos

Agregados	Massa Específica Real (g/cm^3)	Massa Específica Aparente (g/cm^3)	Absorção
Brita 19mm	2,82	2,85	0,44%
Brita 12,5mm	2,75	2,79	0,85%
Areia	2,52	2,47	0,16%
Pó de Pedra	2,43	2,42	0,74%

Os valores de massa específica real e aparente dos agregados foram realizados com duas repetições e se encaixaram dentro do esperado para cada tipo de material. Estes dados foram utilizados para a determinação do teor inicial de CAP na dosagem SUPERPAVE (*Superior Performing Pavements*).

A absorção da brita 19mm foi de 0,44% e a da brita 12,5mm foi de 0,85%. A norma 031/2006 ES do DNIT não especifica para pavimentos flexíveis valores para a absorção dos agregados.

3.2.1.4 Abrasão Los Angeles

O ensaio de Abrasão Los Angeles segue a norma DNER – ME 035/98, a qual consiste em obter uma quantidade de material, de cinco a dez quilos, de acordo com a granulometria, e assim submeter o material a desgastes. A amostra foi colocada em um tambor metálico de 80 centímetros de diâmetro a uma velocidade de 30 a 33 rpm.

Figura 32 – Equipamento utilizado no ensaio de Abrasão Los Angeles



Fonte: Autora (2018)

Um número variado de esferas foi adicionado no tambor conforme a granulometria da amostra, com objetivo de ocorrer impactos nas partículas durante as revoluções. O ensaio é concluído após 500 ou 1000 rotações dependendo da faixa granulométrica. O material retirado do tambor é peneirado e o desgaste é determinado pela razão, quantidade de amostra passante na peneira 1,7mm depois do ensaio e a quantidade total de material colocado no tambor.

A brita 19mm apresentou um desgaste Los Angeles de 26,05% e a brita 12,5mm um valor de 25,4% (Tabela 10). De acordo com a norma do DNIT 031/2006 ES, a qual recomenda um valor máximo de 50% de desgaste; sendo assim, as britas utilizadas nesta pesquisa atenderam ao critério estabelecido em norma.

Tabela 10 - Resultado do ensaio de Los Angeles

Ensaio	Requisito	Agregados Graúdos	
		Brita 19mm	Brita 12,5mm
Los Angeles	50,00%	26,05%	25,40%

3.2.2 Caracterização da Cera de Carnaúba

Para se obter um melhor conhecimento da cera de carnaúba, em relação à estrutura e características físicas e químicas, foram executados alguns ensaios de caracterização, são eles: Análise Termogravimétrica (TG) e Análise Térmica Diferencial (DTA).

3.2.2.1 Análise Termogravimétrica

A termogravimetria é uma técnica de análise térmica em que a variação de massa da amostra é determinada como uma função da temperatura, ou tempo de aquecimento, utilizando um programa controlado de temperatura (FARMACOPÉIA BRASILEIRA, 2010; PEREIRA, 2013).

Nas curvas obtidas a partir do ensaio de TG, a perda de massa que é expressa em porcentagem é definida por duas temperaturas que estão localizadas no eixo horizontal T_i (Temperatura inicial de decomposição) e T_f (Temperatura final). A T_i é aquela em que a temperatura na qual ocorre a variação de massa acumulada atinge o valor que a termobalança é capaz de detectar. A T_f é a temperatura na qual a variação de massa acumulada atinge seu valor máximo de degradação, correspondendo ao término da reação, a diferença entre essas duas temperaturas é chamada de intervalo de reação (PEREIRA, 2013).

De acordo com Matos et al. (2009), a temperatura que se inicia a perda de massa é a temperatura inicial do evento, ou seja, o ponto onde a amostra deixou de ser instável termicamente e iniciou a liberação de substâncias voláteis. A temperatura onset (T_{onset}) corresponde ao início extrapolado do evento térmico, e na prática é utilizada nas análises das curvas, pois é mais fácil de ser determinada que a temperatura inicial. Já a temperatura de pico (ponto de inflexão da curva TG) é o momento em que a massa está variando mais rapidamente. A temperatura final indica o final da etapa de perda de massa (liberação

total de substâncias voláteis), e a temperatura endset (T_{endset}) será o final do evento térmico extrapolado. A TG é uma técnica analítica quantitativa e qualitativa, apresentando resultados rápidos.

3.2.2.2 Análise Térmica Diferencial

A DTA é uma técnica onde a diferença de temperatura entre a substância de referência (termicamente estável) é medida em função da temperatura da referência (forno), enquanto a substância e o material de referência são submetidos a uma programação controlada de temperatura. O registro é a curva DTA, e as diferenças de temperatura devem ser colocadas em ordenadas, com as reações endotérmicas voltadas para baixo e o tempo ou temperaturas em abscissas, com valores crescentes da direita para a esquerda (PEREIRA, 2013).

A análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) da cera de carnaúba foram realizadas em equipamento BP Engenharia, Modelo RB 3000, operando a 12,5°C/min. A temperatura máxima utilizada nas análises térmicas foi de 400°C e o padrão utilizado nos ensaios de DTA foi o óxido de alumínio (Al_2O_3) calcinado. A Figura 33 ilustra o equipamento de análise térmica utilizado para realização do ensaio.

Figura 33 - Equipamento utilizado para realização de ensaios de análises térmicas.



3.2.2.2.1 Resultados dos ensaios de Análise Térmica Diferencial (DTA) e Análise Termogravimétrica (TG)

Os ligantes asfálticos, independentemente de serem modificados (por adição de polímeros, óleos, cera, etc.) ou não, são classificados como fluido visco elástico, ou seja, em dadas temperaturas se comportam como fluidos viscosos, em temperatura ambiente

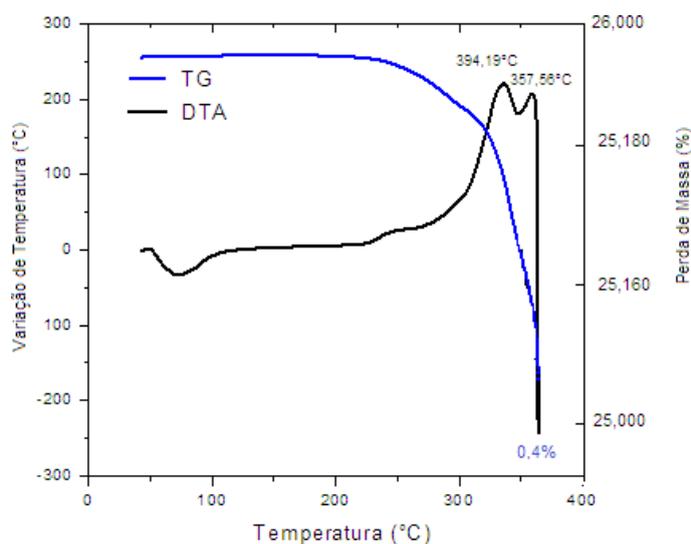
apresentam comportamento elástico. Diante das características intrínsecas desses materiais, faz-se necessário o emprego de temperaturas elevadas para a utilização deles.

Assim, de acordo com os resultados obtidos para a análise termodiferencial (Figura 34), verifica-se que a cera de carnaúba apresenta estabilidade térmica até aproximadamente 285°C, indicando que a esta temperatura as propriedades químicas e físicas se mantêm inalteradas e que sua utilização em misturas asfálticas contribuirá para a redução das temperaturas de usinagem e compactação, indicando ainda através da curva termogravimétrica que apresenta perda de massa reduzida, contribuindo para conservação das propriedades físicas do ligante.

Os resultados também apresentam duas etapas de decomposição térmica, a primeira ocorre entre 285°C e 347°C e a segunda etapa de decomposição ocorre entre 347°C e 360°C. Estudos realizados por Feitosa (2015) mostram uma estabilidade térmica até temperaturas próximas de 250°C e também mostram a decomposição em duas etapas principais, a primeira de 250°C a 450°C e a segunda de 450°C a 550°C.

A curva termogravimétrica indica uma perda de massa total de 0,4%, correspondente a 0,104g referente ao processo de decomposição térmica da cera de carnaúba. A partir dos ensaios de Análise termogravimétrica e Análise Térmica Diferencial, realizados no Departamento de Engenharia de Materiais Avançados – LAM, determinaram-se os resultados ilustrados na (Figura 34).

Figura 34 – Curvas TG e DTA



A adição de diferentes tipos de cera ao ligante asfáltico deve ser feita de forma cuidadosa, pois podem aparecer complicações como fragilidade a baixas temperaturas (EUPA, 2010; GAPA, 2009). As ceras são utilizadas acima de seu ponto de fusão, o que causa uma diminuição na viscosidade do ligante (ZAUMANIS, 2010). No momento da produção, a cera adicionada ao ligante asfáltico encontra-se no estado líquido, logo após a produção temperatura é reduzida fazendo com que a cera solidifique em partículas microscópicas uniformemente distribuídas, aumentando assim a dureza do ligante, de forma semelhante a adição de uma fibra reforçada (BUTZ, 2009). Contudo, se forem adicionadas ceras com ponto de fusão muito baixo, o asfalto modificado produzido será frágil e quebradiço a baixas temperaturas, enquanto que, uma cera com ponto de fusão muito alto deixará o asfalto produzido muito duro (EUPA, 2010).

3.2.3 Cimento Asfáltico de Petróleo

3.2.3.1 Mistura do CAP com a cera de carnaúba

Inicialmente, o CAP foi aquecido a uma temperatura de 130°C, adicionado teores de cera de carnaúba de 1%, 2% e 3%, sendo a mistura agitada a uma rotação de 1015 rotações por minuto por um tempo de 40 minutos, com adição lenta do material durante os sete primeiros minutos. Foram realizados os ensaios abaixo, com objetivo de caracterizar a mistura e o CAP puro (Tabela 11).

Figura 35 – Misturadores do CAP a Cera de Carnaúba



Tabela 11 - Normas dos ensaios de caracterização física das amostras de CAP

Ensaio	Métodos
Viscosidade Rotacional	NBR 15184/2007

Ponto de Amolecimento	DNIT - ME 131/2010
Penetração	DNIT - ME 155/2010
RTFOT	ASTM D 2872-97

3.2.3.2 Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT)

O ensaio de RTFOT tem como objetivo medir o efeito do envelhecimento acelerado nas modificações de características de penetração, ductibilidade ou viscosidade do ligante envelhecido em relação ao ligante original. Esse ensaio também mede o envelhecimento por oxidação e evaporação, porém de forma mais severa por estar continuamente expondo nova porção do ligante ao efeito do ar (BERNUCCI, 2008).

O ensaio segue a norma ASTM D 2872-97, na qual uma película de asfalto de 35 gramas e continuamente girada dentro de um recipiente de vidro a uma temperatura de 163°C por um tempo de 85 minutos, apresentando injeção de ar.

Figura 36 – Aparelho de RTFO



3.2.3.3 Ensaio de Penetração

Segundo Bernucci (2008), a penetração é a profundidade em décimos de milímetros que uma agulha de massa padronizada (100g) penetra numa amostra de volume padronizado de cimento asfáltico, por cinco segundos à temperatura de 25°C. Em cada ensaio, três medidas individuais de penetração são realizadas. A média dos três valores é anotada e aceita se a diferença entre as três medidas não exceder um limite especificado em norma. A consistência do CAP é tanto maior quanto menor for a penetração da agulha.

O ensaio de penetração segue a norma do DNIT 155/2010, no qual classifica o CAP quanto a sua dureza. O equipamento utilizado para tal ensaio foi o penetrômetro (Figura 37), o qual apresenta uma haste de $47 \pm 0,05\text{g}$ que fixa a agulha, já o conjunto que apresenta a haste mais agulha deve apresentar $100 \pm 0,05\text{g}$.

Figura 37 – Penetrômetro



3.2.3.4 Ponto de Amolecimento

O ensaio de ponto de amolecimento é definido pela norma DNIT ME 131/2010. O ponto de amolecimento é a menor temperatura na qual esferas metálicas padronizadas (3,50g) percorrem um anel padronizado que contém a mistura asfáltica, movendo-se numa distância de 25,4mm.

O CAP deve ser aquecido em estufa a temperatura de 130°C ; duas amostras foram colocadas no interior dos anéis de molde e ficaram em repouso por um período de 30 minutos. Os anéis juntamente com as esferas de aço e a mistura são colocadas em um Becker e cobertas por água, os quais foram aquecidos gradativamente a uma taxa de $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (Figura 33).

Figura 38 – Amostras no banho d'água



O ensaio finalizou no momento em que as esferas deslocaram-se para baixo e tocaram a placa de fundo (Figura 39). O ponto de amolecimento refere à média das duas temperaturas determinadas.

Figura 39 – Ensaio de Ponto de amolecimento



3.2.3.5 Viscosidade Rotacional

Para a determinação da viscosidade dos ligantes asfálticos foi utilizado o equipamento de viscosidade rotacional do tipo Brookfield, modelo DVII+, o qual é acoplado a um controlador de temperatura, THERMOSEL (Figura 40).

Figura 40 – Viscosímetros rotacional tipo Brookfield



O ensaio foi realizado seguindo a norma NBR 15184/2007. O mesmo consiste em determinar a viscosidade medida através do torque necessário para a rotação de uma haste de prova (spindle) imersa em uma amostra de ligante, considerando as temperaturas de 130, 150 e 177°C e as velocidades de 20,50 e 10rpm.

3.2.4 Dosagem SUPERPAVE

O SHRP foi estabelecido nos Estados Unidos como um plano de estudos para melhorar o desempenho, a durabilidade e a segurança das estradas e um dos principais resultados foi o SUPERPAVE. A dosagem SUPERPAVE trabalha com duas ferramentas

principais que são o sistema de 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 et al., 2015).

Em relação à compactação Marshall, a metodologia SUPERPAVE se diferencia por sua compactação ser feita através de amassamento (giros), diferentemente da compactação Marshall, na qual a compactação é feita por impacto (golpe). Outra diferença entre as duas técnicas é que a metodologia SUPERPAVE utiliza os conceitos de pontos de controle e zona de restrição.

Segundo “SUPERPAVE MIX DESIGN - ASPHALT INSTITUTE”, os pontos de controle funcionam como faixas através do qual as gradações devem passar e variam dependendo do tamanho nominal da composição de agregados (GAMA, 2013). Já a zona de restrição, segundo Bernucci et al (2007), é uma medida empírica que forma uma região em que aconselha-se que a curva não deveria passar, pois podem fazer com que a mistura se torne bastante frágil e dependa do ligante para ter resistência ao cisalhamento.

Segundo Bernucci (2008), vários investigadores propuseram faixas granulométricas para a densidade máxima, a mais conhecida é a curva de Fuller. Graficamente, a granulometria é mostrada num eixo cuja ordenada é a porcentagem que passa e a abscissa é uma escala numérica da razão “tamanhos de peneira/tamanho máximo do agregado”, elevada a potência de 0,45. A granulometria de densidade máxima é uma linha reta que parte da origem e vai até o ponto do tamanho máximo do agregado.

O processo de mistura foi todo realizado no Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS). É considerado um equipamento prático com uma boa repetibilidade e reprodutibilidade (Figura 41).

Figura 41 – Compactador Giratório Superpave (CGS)

A primeira etapa para a realização da dosagem SUPERPAVE consiste na escolha de três composições granulométricas a partir dos agregados disponíveis (Brita 19 mm, Brita 12,5mm, Pó de Pedra, Areia e Filer). Foi elaborada três curvas Fuller, uma graúda (superior), uma intermediária e uma miúda (inferior). Utilizando-se a faixa C especificada pelo DNIT, como também os Pontos de Controle e Zonas de restrição. Segundo Bernucci (2008), o tamanho nominal máximo escolhido em cada tabela de Pontos de Controle e Zonas de Restrição é definido como sendo um tamanho maior do que o primeiro tamanho de peneira que retém mais de 10%.

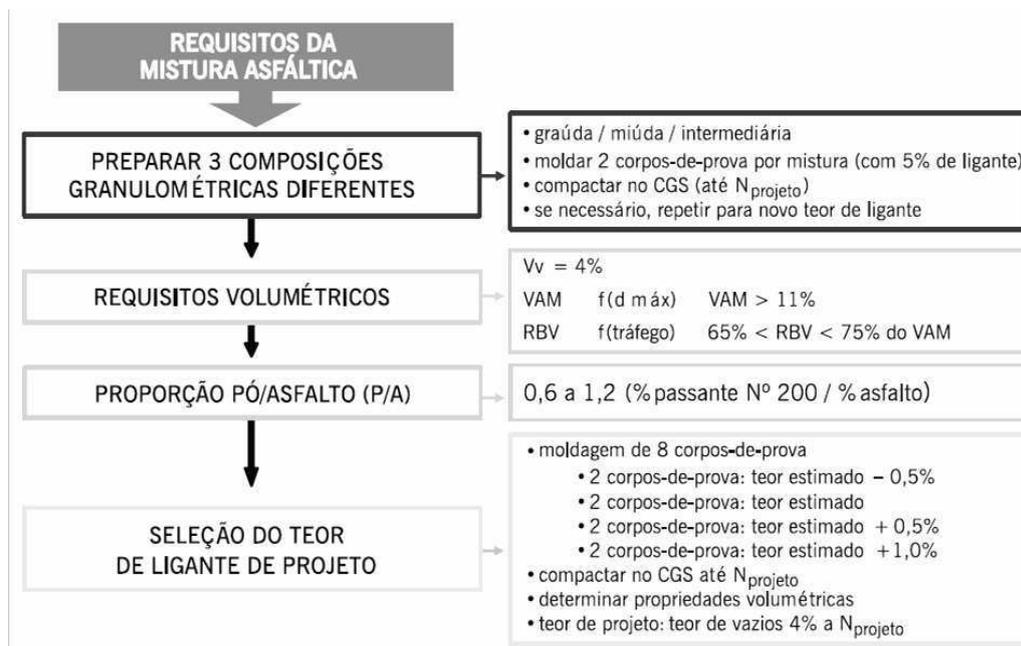
A próxima etapa foi a compactação dos corpos-de-prova a partir do Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS), com um teor de tentativa para cada mistura. Em tal pesquisa foi utilizado um teor inicial de ligante de 5%. A partir dessas misturas experimentais é possível obter as propriedades volumétricas (V_v , VAM e RBV). Também foi possível a determinação da proporção pó/asfalto que, segundo Bernucci (2008) corresponde a razão entre o teor do material passante na peneira n°200 e o teor de ligante, parâmetro que deve estar entre 0,6 e 1,2. A ideia principal do SUPERPAVE é que a quantidade de ligante utilizada deve ser tal que a amostra atinja 4% de vazios no número de giros de projeto. O procedimento SUPERPAVE faculta ao projetista escolher qual das misturas testadas, entre as três composições granulométricas, melhor atende às exigências volumétricas especificadas para o projeto.

A última etapa da dosagem SUPERPAVE realiza a seleção do teor de ligante asfáltico de projeto. Para essa determinação, foram confeccionados dois corpos de prova.

Devem ser confeccionados também outros corpos-de-prova com teor estimado $\pm 0,5$ e $+1\%$. Assim, são compactados novos corpos de prova no $N_{projeto}$ e determinadas as propriedades volumétricas.

O fluxograma abaixo (Figura 42) apresenta todas as etapas para a realização da dosagem SUPERPAVE.

Figura 42 – Fluxogramas da Dosagem Superpave



Abaixo estão representadas as curvas superior, intermediária e inferior (Figuras 43, 44 e 45), como também na Tabela 12 as proporções dos agregados utilizados em tal pesquisa.

Tabela 12 - Proporções dos agregados nas granulometrias

Curva	Brita 19mm	Brita 12,5mm	Areia	Pó de Pedra	Filer
Superior	0%	35%	29%	34%	2%
Intermediária	34%	21%	9%	35%	1%
Inferior	35%	30%	0%	35%	0%

Figura 43: Curva granulométrica Inferior

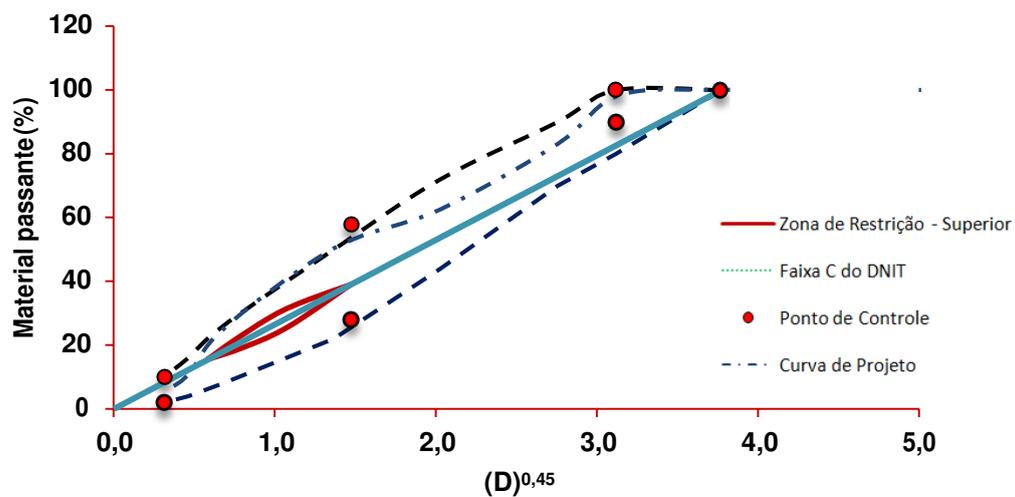


Figura 44 – Curva granulométrica Intermediária

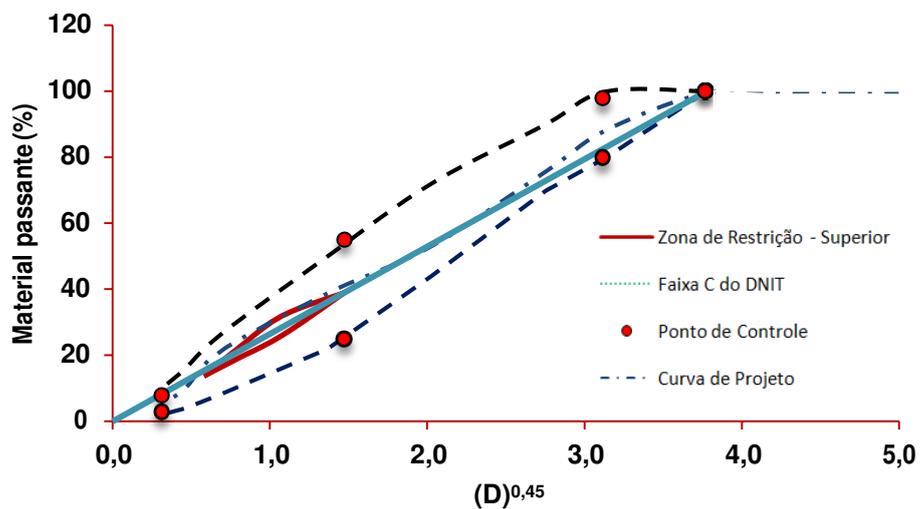
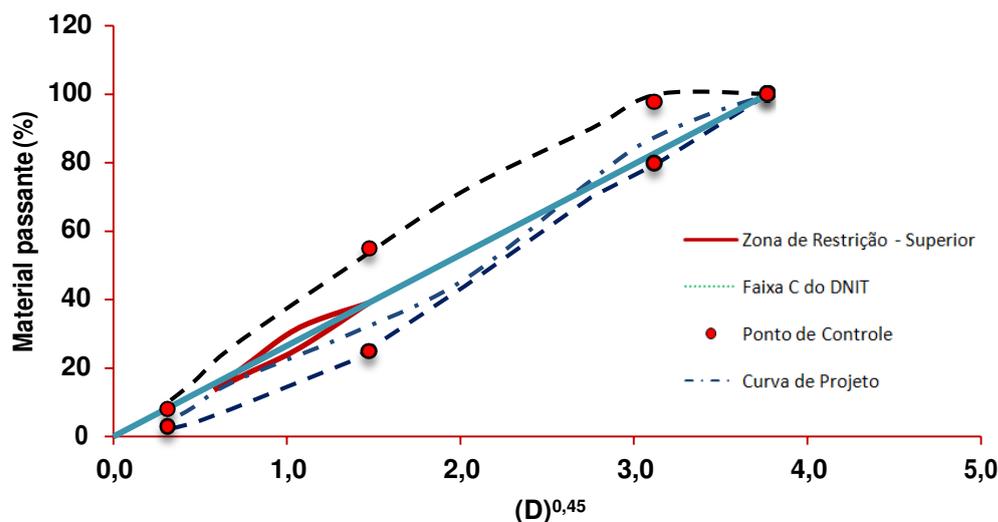


Figura 45 – Curva granulométrica Inferior



3.2.4.1 Determinação da Temperatura de Usinagem e Compactação

Os cálculos que se referem à temperatura de usinagem e compactação são determinados a partir dos dados obtidos pelo ensaio de viscosidade rotacional. Estes dados foram retirados a partir de um gráfico que correlaciona por meio de uma curva logarítmica a viscosidade versus a temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

Segundo Bernucci (2008), a temperatura do ligante na hora de ser misturado ao agregado deve ser tal que a sua viscosidade esteja situada entre 75 e 150SSF (segundos Saybolt-Furol), de preferência entre 75 e 95SSF ou $0,17 \pm 0,02$ Pa.s. A temperatura do ligante não deve ser inferior a 107°C nem superior a 177°C . A temperatura dos agregados deve ser de 10 a 15°C acima da temperatura definida para o ligante, sem ultrapassar 177°C . A temperatura de compactação deve ser tal que o ligante apresente viscosidades na faixa de 125 a 150SSF ou $0,28 \pm 0,03$ Pa.s.

Realizada a caracterização do CAP puro, a partir do ensaio de viscosidade rotacional, conseguiu determinar tais temperaturas (Tabela 13). Assim, o ligante foi aquecido a 157°C e os agregados foram aquecidos a 172°C seguindo as recomendações mostradas acima. A temperatura de compactação também pode ser determinada a partir do ensaio de viscosidade e foi de 143°C .

Tabela 13 - Temperaturas de Usinagem e Compactação

Temperatura do Ligante (°C)	157
Temperatura de Usinagem (°C)	143
Temperatura dos Agregados (°C)	172

3.2.4.2 Compactação dos Corpos de Prova

A dosagem SUPERPAVE foi realizada a partir da norma *ASTM D 6925-08 (Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor)*.

Para determinar o volume de vazios da amostra é preciso realizar o cálculo da densidade máxima teórica da mistura ou DMT e também da densidade aparente do corpo de prova compactado. Segundo Bernucci (2007), a densidade máxima é utilizada nos cálculos de volume de vazios, absorção de ligante pelos agregados, massa específica efetiva do agregado e teor de asfalto efetivo da mistura asfáltica. Este parâmetro pode ser calculado através de uma ponderação das densidades reais dos materiais constituintes, método teórico definido pela NBR 12891 (ABNT, 1993) ou determinado em laboratório utilizando uma bomba de vácuo, método Rice apresentado na norma americana ASTM D 2041 (*American Society for Testing and Materials - ASTM, 2000*) (ANTUNES E NIENOV, 2012).

Abaixo são apresentados os dois métodos para a determinação da densidade máxima teórica das misturas (DMT), são eles: Método Teórico e Método Rice.

3.2.4.2.1 Método Teórico

Segundo Bernucci (2007), a densidade máxima teórica da mistura asfáltica no método teórico é obtida através de uma ponderação das densidades de todos os materiais constituintes, agregados e ligantes e suas respectivas proporções.

O valor da DMT leva em consideração os materiais constituintes da mistura asfáltica na proporção que eles ocupam dentro da mistura, porém de forma separada, ou seja, não leva em conta a penetração de parte do ligante nos agregados. Segundo esta

concepção, o ligante apenas envolveria os agregados, não penetrando nos seus poros (MARQUES, 2004; ANTUNES E NIENOV, 2012).

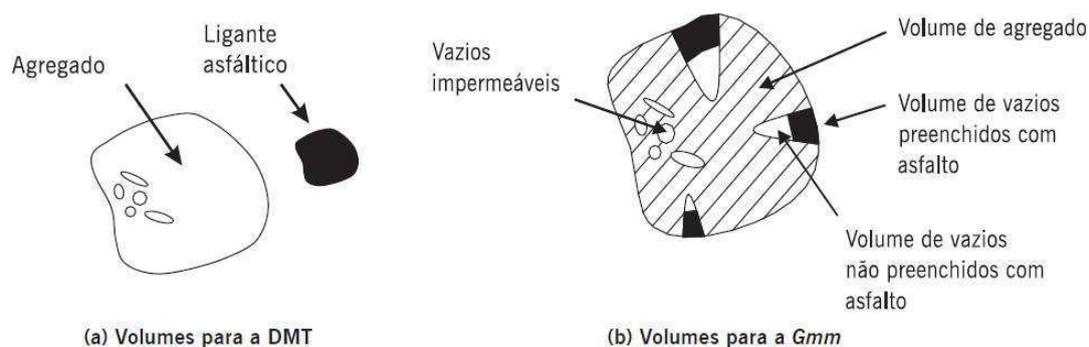
3.2.4.2.2 Método Rice

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

Este tipo de ensaio é realizado a temperatura ambiente. Segundo Bernucci (2007), a vantagem do método Rice seria obter a massa específica da mistura sem ter a necessidade de se obter as massas específicas dos seus constituintes separadamente, além de já considerar a absorção de ligante pelos agregados.

A DMM, que significa massa máxima medida, é expressa pela relação entre a massa do agregado mais ligante asfáltico e a soma dos volumes dos agregados, vazios impermeáveis, vazios permeáveis não preenchidos com asfalto (Figura 46). É utilizada a terminologia Gmm para o parâmetro de massa máxima medida, sendo a Gmm também chamada de densidade específica Rice, parâmetro esse que pode ser determinado em laboratório seguindo as normas ASTM 2041 (2000) ou a AASHTO T 209 (1999).

Figura 46 – Volumes considerados na determinação da DMT e da Gmm



Fonte: Bernucci (2008)

3.2.4.2.3 Ponderação das massas específicas reais

Para a determinação do DMT é feita uma ponderação das massas específicas reais dos materiais que estão presentes na mistura asfáltica. Tendo em mãos os valores das massas específicas reais de todos os materiais e também as suas respectivas proporções,

realiza-se uma ponderação da DMT da mistura com os diferentes percentuais de ligantes. A Equação 1 apresenta o cálculo da DMT, sendo em função das massas (M_i) e das massas específicas reais (G_i) dos materiais presentes na mistura.

O teor inicial de CAP pode ser estimado ou determinado a partir dos cálculos utilizando a massa específica de cada agregado, como também as curvas de Fuller.

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%a}{G_a} + \frac{\%Ag}{G_{Ag}} + \frac{\%Am}{G_{Am}} + \frac{\%f}{G_f}} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

$\%a$ =percentagem de asfalto, expressa em relação à massa total da mistura asfáltica (por exemplo, no caso de um teor de asfalto de 5%, utiliza-se o número 5 na variável $\%a$ no denominador da expressão);

$\%Ag$, $\%Am$ e $\%f$ =percentagens do agregado graúdo, agregado miúdo e fíler, respectivamente, expressa em relação à massa total da mistura asfáltica;

G_a , G_{Ag} , G_{Am} e G_f = massas específicas reais do asfalto, do agregado graúdo, do agregado miúdo e do fíler, respectivamente.

3.2.4.2.4 Massa específica máxima medida – Procedimento com vácuo

A determinação da massa específica máxima medida (G_{mm}) pode ser feita através das seguintes normas; métodos norte-americanos ASTM D 2041 (2000), AASHTO T 209 (1999) ou o método europeu EM 12697-5.

Figura 47 – Equipamentos para ensaio de determinação do Gmm

O ensaio Rice Test (Figura 47) foi realizado com as três curvas granulométricas determinadas a partir das curvas de Fuller. Foi separado 2500g de material (para tamanho nominal de até 19mm) para cada curva de Fuller. Na sequência, os agregados foram colocados em estufa a uma temperatura de 172°C, como também o ligante foi colocado a uma temperatura de 157°C. Os agregados e o ligante passaram duas horas na estufa e logo após foram feitas as misturas manualmente. Realizadas as misturas, as mesmas ficaram esfriando, até atingir a temperatura ambiente.

Em seguida, o recipiente utilizado no ensaio de Rice Test foi preenchido com água a 25°C até que toda a mistura fique submersa. É então aplicada uma pressão de vácuo residual de 30mmHg (aplicação de 730mmHg), por um período de 15 minutos, a fim de expulsar o ar existente entre os agregados recobertos pelo filme de ligante. Após o período de vácuo, é restabelecida a pressão ambiente no recipiente. Completa-se então com água o volume do recipiente. Pesa-se o conjunto (Recipiente, mistura asfáltica e água) (Figura 43) (BERNUCCI, 2008).

Figura 48 – Exemplo de procedimento para a determinação da Gmm em laboratório



A massa específica máxima medida (Gmm) é determinada a partir da expressão abaixo:

$$G_{mm} = \frac{A}{A - (B - C)} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

A = massa da amostra seca ao ar (g);

B = massa do recipiente metálico imerso em água (g);

C = massa do recipiente + amostra imerso em água (g).

Assim, foram determinados em tal ensaio os pesos da mistura asfáltica, do recipiente com água e o peso final do conjunto (recipiente, mistura asfáltica e água).

3.2.4.2.5 Determinação do teor de ligante de projeto

Inicialmente foi realizada a compactação de dois corpos de prova com o teor inicial de ligante, como também com os três teores (+0,5, -0,5 e 1,0% em relação ao teor

inicial de ligante). Assim, a compactação foi realizada no CGS, com uma pressão aplicada de 600KPa e o ângulo de rotação de 1,25°. A mistura não compactada permaneceu em estufa à temperatura de compactação por um período de 2 horas antes da compactação, de modo a simular o envelhecimento a curto prazo durante a usinagem do material.

Logo depois de feita a compactação de um corpo de prova, foi realizada as pesagens a seco, submersa e superfície saturada seca para a determinação do volume de vazios da mistura compactada para os três esforços de compactação, os números de giros:

- $N_{inicial}$: Esforço de compactação inicial;
- $N_{projeto}$: Esforço de compactação de projeto (no qual volume de vazios deve ser igual a 4%);
- $N_{máximo}$: Esforço de compactação máximo (representa a condição de compactação da mistura ao fim da sua vida de serviço).

Conhecendo-se as temperaturas de usinagem e compactação e as porcentagens de agregados oriundas das curvas de Fuller, iniciou-se a compactação dos corpos de prova. Foram calculadas as porcentagens de materiais a partir das curvas de Fuller.

Segundo Bernucci (2008), os esforços de compactação $N_{inicial}$ e $N_{máximo}$ são usados para se avaliar a compactabilidade da mistura. O $N_{projeto}$ é usado para selecionar o teor de ligante de projeto, esses valores são função do tráfego, como indicado na tabela 14.

Tabela 14 - Número e giros especificados na norma de dosagem SUPERPAVE

Parâmetros de Compactação			Tráfego
$N_{inicial}$	$N_{projeto}$	$N_{máximo}$	
	50	75	Leve
7	75	115	Médio
8	100	160	Médio a Alto
9	125	205	Alto

Nesta pesquisa, foi realizada a compactação dos corpos de prova para um tráfego de médio a alto tráfego, utilizando os parâmetros de compactação $N_{inicial} = 8$ giros, $N_{projeto} = 100$ giros e $N_{máximo} = 160$ giros (Figuras 49 e 50).

Figura 49 – Procedimento para a compactação dos corpos de prova a partir do Superpave

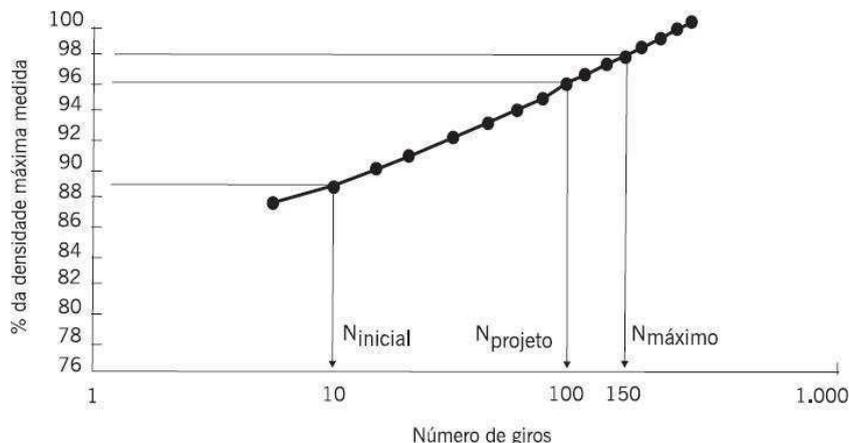


Figura 50 – Corpos de prova compactados com teor inicial de CAP de 5%



Durante a compactação do tipo SUPERPAVE a massa específica dos corpos de prova foi monitorada em função da altura dos mesmos. A massa específica também referida como porcentagem da G_{mm} pode ser plotada a partir de um gráfico (Curva de compactação típica obtida no CGS), o qual relaciona a G_{mm} e o logaritmo do número de giros, assim foi possível avaliar a trabalhabilidade da mistura, como também seu potencial de densificação, o qual depende do seu esqueleto mineral.

Figura 51 – Curva de compactação típica obtida no CGS



Fonte: Bernucci et al. 2008

Sabe-se que as massas específicas estimadas da mistura ou G_{mb} , que correspondem aos esforços de compactação, são: $G_{inicial}$, $G_{projeto}$ e $G_{máximo}$ que são expressos em porcentagem da massa específica máxima G_{mm} .

Para que se possa garantir uma estrutura de esqueleto mineral adequada, foi necessário seguir as especificações apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15- Critérios volumétricos para a determinação do teor de projeto

Esforços de Compactação	Massa Específica X G_{mm} (%)	Vv (%)
$N_{inicial}$	<89%	>11%
$N_{projeto}$	96%	4%
$N_{máximo}$	<98%	>2%

Além do volume de vazios (V_v), como vimos na Tabela 15, também foram avaliados G_{mb} e o volume de agregado mineral (%VAM), o qual tem um valor mínimo de 13,0. O volume de agregado mineral também pode ser calculado a partir da Equação 3.

$$V_v = 100 - \frac{\% \text{ de } G_{mb} \text{ @ } G_{mm} \times G_{mm} \times G_{mb}}{G_{mb}} \quad \text{Equação (3)}$$

Foram pesados os corpos de prova secos e submersos como também foram retiradas as medidas de altura e diâmetro dos mesmos, para assim determinar as suas propriedades volumétricas.

Com os parâmetros volumétricos determinados em cada corpo de prova, foi possível determinar as propriedades volumétricas que estão expostas na Tabela 16. O valor normativo para o volume de vazios é de 4%, assim de acordo com a Tabela 16, foi escolhida a curva inferior.

Tabela 16 - Resumo da compactação das misturas asfálticas

Misturas	% Ligante	% G _{mm} N _{inicial}	% G _{mm} N _{projeto}	% G _{mm} N _{máximo}	V _v (%)	VAM(%)
Inferior	5,00	92,83	96,12	95,73	4,27	14,82
Intermediária	5,00	93,12	97,37	97,89	2,63	13,70
Superior	5,00	88,66	94,24	95,21	5,76	13,37
Limites		<89,00	96,00	<98,00	4,00	13,0 (min)

Não sendo encontrado o volume de vazios de 4% com o teor inicial de CAP de 5%, variamos o teor de inicial de 5% para $\pm 0,5\%$ e $+ 1\%$, isto quer dizer, novos teores: 4,5%, 5,5% e 6,0%, foram moldados dois corpos de prova para cada teor (Figura 52).

Figura 52 – Compactação com os teores de 4,5%, 5,5% e 6,0% no N_p



A partir da moldagem dos corpos de prova com os teores acima informados, determinamos o peso seco e submerso dos corpos de prova, como também a altura e o diâmetro dos mesmos. Nesta etapa realizamos também o ensaio de Rice Test com intuito de determinar o novo valor de G_{mm} para as porcentagens de 4,5%, 5,5% e 6,0% de teor de CAP.

A partir dos parâmetros volumétricos determinados em cada corpo de prova, foi possível determinar as propriedades volumétricas para os novos teores de CAP que estão expostas na tabela 17.

Tabela 17 - Tabela de resumo dos critérios volumétricos para cada teor de CAP

	4,50%	5,00%	5,50%	6,00%	Valores Normalizados
V_v (%)	5,06	4,27	3,36	2,41	4,00%
VAM (%)	14,52	14,82	14,75	14,29	13,00 mín
G_{mm} (%)	94,94	95,73	96,64	97,59	96,00
RBV (%)	72,04	72,91	73,09	72,60	65 a 75%

Na etapa acima, ainda não foi possível a determinação do teor de projeto de CAP com volume de vazios de 4%, como é possível ver na Tabela 17. Então, foi utilizado o gráfico que relaciona os teores de CAP utilizados nas dosagens versus o volume de vazios (Figura 53), no qual foi estimado um novo teor de CAP, também chamado teor de projeto com valor de 5,10%, que atendesse ao critério de 4% de volume de vazios.

Assim, foram moldados mais três corpos de prova com 100 giros ou N_p, para a verificação das propriedades volumétricas da mistura compactada e a partir desta dosagem ter a certeza dos 4% de volume de vazios (Figura 54).

Figura 53 – Determinação do teor de projeto

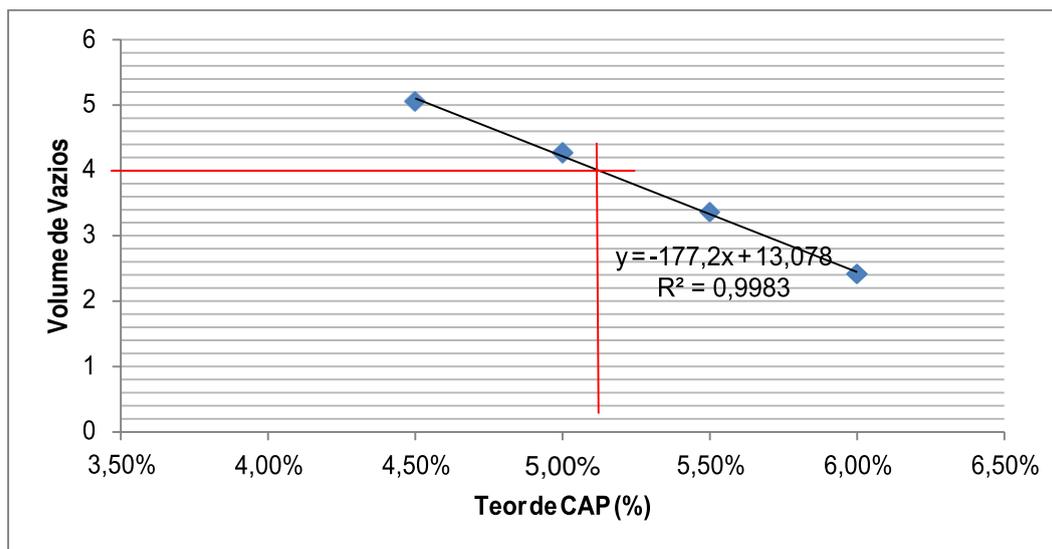


Figura 54 – Corpos de prova moldados com teor ótimo de 5,10% com 4% de volume de vazios



Realizada a dosagem dos três corpos de prova com o teor de CAP de 5,10% e realizando o ensaio de Rice Test para o mesmo teor de CAP, foi possível a determinação das propriedades volumétricas dos mesmos, com objetivo de determinar o volume de vazios de 4%. A tabela 18 apresenta os resultados obtidos na dosagem.

Tabela 18 - Tabela de resumo dos parâmetros volumétricos para o teor de CAP de 5,10%

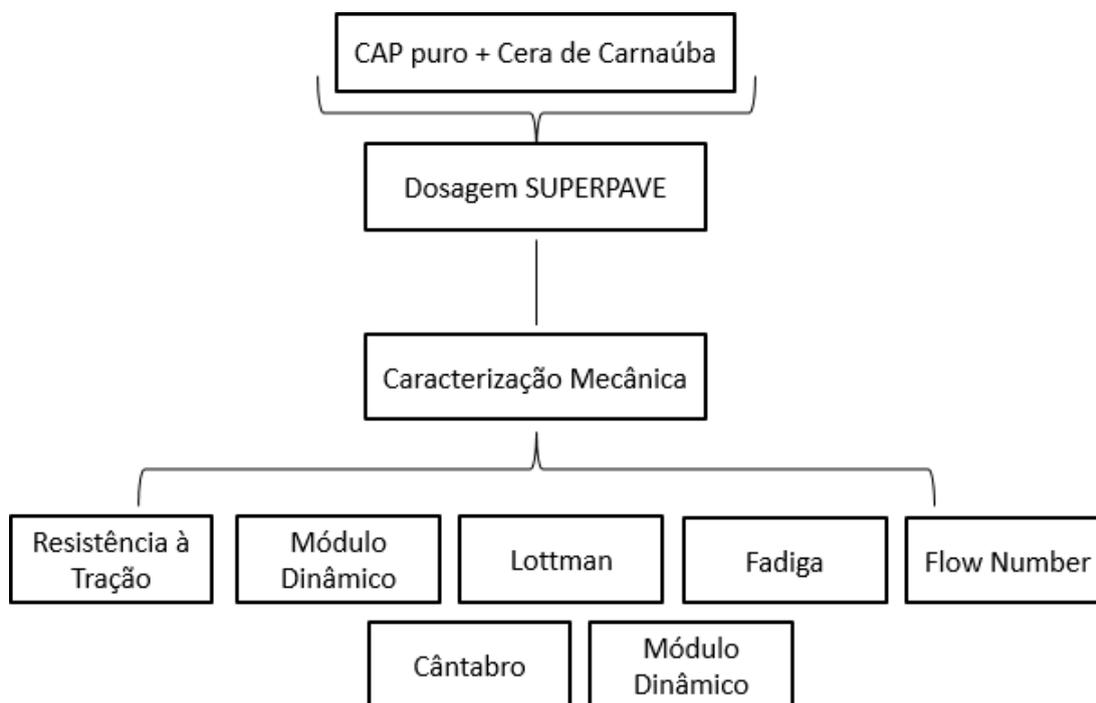
	5,10%	Valores Normalizados
Vv (%)	3,93	4,00%
VAM (%)	14,70	13,00 mín
G_{mm} (%)	96,07	96,00
RBV (%)	72,81	65 a 75%

Realizou-se os cálculos para a determinação do volume de vazios. Foi encontrado um teor de projeto de 5,10% de CAP, com um volume de vazios próximo ao estabelecido por norma (3,93%). Portanto, o teor de projeto é igual a 5,10% de CAP. Assim, sabendo o valor do teor de projeto, seguiu-se a pesquisa para a compactação dos corpos de prova que serão utilizados para os ensaios mecânicos.

3.2.5 Propriedades Mecânicas das Misturas Asfálticas

Diversos são os fatores relacionados ao comportamento de misturas asfálticas. Para a determinação do comportamento de tais misturas, fez-se necessário a investigação das propriedades mecânicas acerca das variáveis envolvidas. O fluxograma da Figura 55 apresenta os ensaios mecânicos realizados nesta pesquisa.

Figura 55 – Caracterização Mecânica da Mistura Asfáltica



3.2.5.1 Ensaio de Tração Indireta por Compressão Diametral

Ensaio de Tração Indireta por Compressão Diametral ou também denominado de *Brazilian Test* (Figura 56), foi desenvolvido pelo professor da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Luís Fernando Lobo Carneiro, o qual é constituído de um arranjo simples que permite a imposição de um plano de ruptura semelhante ao plano de aplicação da carga.

O ensaio é realizado segundo a norma DNIT 136 (2010) com a moldagem dos corpos de prova realizada no compactador giratório, utilizando o teor ótimo de projeto determinado na dosagem feita através do SUPERPAVE. Assim, o ensaio consiste em inicialmente, medir a altura do corpo de prova com o paquímetro em quatro posições diametralmente opostas, além de medir o diâmetro do corpo de prova em três posições paralelas, fazendo a média desses valores obtidos. Deve-se manter o corpo de prova a uma temperatura controlada de 25°C e então colocá-lo em uma superfície cilíndrica entre dois frisos metálicos.

Logo após, aplicou-se uma carga progressivamente, a uma velocidade de deslocamento de $0,8 \pm 0,1\text{mm/s}$, até que se dê a ruptura por separação de duas metades do corpo de prova, segundo o plano diametral vertical.

Figura 56 – Equipamento utilizado no ensaio de RT



Figura 57: Realização do ensaio de RT em corpos de prova com teores de Cera de Carnaúba



3.2.5.2 Módulo de Resiliência

O ensaio de MR em misturas asfálticas é realizado aplicando-se uma carga repetidamente no plano diametral vertical de um corpo de prova cilindro regular. Essa carga gera uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação da carga. Mede-se então o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada, numa dada temperatura (T) (BERNUCCI, 2008).

O ensaio para a determinação do módulo de resiliência foi realizado segundo Método de Ensaio (ME 135/10) que é normatizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), o qual foi obtido diretamente com o auxílio do software UTS003 1.39 *Indirect Tensile Modulus Test*, utilizando a prensa UTM-25 (Figura 58).

Figura 58 – Equipamento utilizado para a determinação do Módulo de Resiliência



O MR é dado pela relação entre a tensão de tração aplicada repetidamente no plano diametral vertical e a sua deformação recuperável correspondente à tensão aplicada. O corpo de prova foi colocado na base da prensa preso a um suporte e conectado a dois transdutores mecanoelétricos tipo LVDT (*linearvariable differential transformer*) de contato (Figura 59). O princípio de funcionamento dos transdutores LVDT consiste em transformar as deformações, durante o carregamento repetido, em potencial elétrico, cujo valor foi registrado no microcomputador. Uma pré-calibração é necessária, a fim de correlacionar as deformações com os valores dos registros.

Figura 59- Execução do ensaio de Módulo de Resiliência

3.2.5.3 Ensaio de resistência ao dano por umidade induzida – Lottman Modificado

O ensaio Lottman Modificado é utilizado para avaliar as propriedades de adesividade em mistura asfálticas, em termos de Resistência à Tração (RT), considerando o efeito deletério da água em diferentes ciclos de temperaturas, em amostras moldadas com o volume de vazios de aproximadamente $7\% \pm 0,5\%$ (SANTOS, 2012).

O ensaio de Lottman Modificado teve como objetivo a avaliação de misturas asfálticas em relação a sua suscetibilidade à água. Segundo Lucena (2009), a suscetibilidade de misturas asfálticas à presença de água ocorre pela perda de adesão entre o CAP e os agregados causada pela sua infiltração ou pelo vapor dela. O desempenho das misturas asfálticas está relacionado às propriedades de adesão e coesão com o sistema asfalto-agregado.

O ensaio de dano por umidade induzida – Lottman Modificado, foi realizado de acordo com a norma AASHTO T 283/89, com o objetivo de avaliar os danos causados na mistura asfáltica e consiste em submeter as amostras à ação da água e a ciclos de gelo-degelo (COSTA, 2017).

Para a realização do ensaio, foi moldado para cada teor de cera de carnaúba como também para o CAP puro, quatro corpos de prova, dividindo-os em dois grupos (condicionado e não condicionado). Para o ensaio, os corpos de prova apresentaram um volume de vazios de $7\% \pm 0,5\%$. Para a obtenção desse volume de vazios foram

realizadas tentativas com mudanças no número de giros no compactador giratório, até se obter o parâmetro aqui exposto. Os corpos de prova condicionados foram colocados em um recipiente com água, onde foi aplicado um vácuo até a saturação entre 70 e 80% (Figura 60).

Figura 60 – Aplicação do vácuo até a saturação das amostras



Após o corpo de prova passar de 5 a 10 minutos sem o vácuo de pressão, o mesmo foi envolto em um saco plástico, adicionando-se 10ml de água levando o corpo de prova envolto com saco plástico para a geladeira a uma temperatura de -18°C durante 16 horas. Logo após o congelamento, pegou-se o conjunto (corpo de prova envolto por um saco plástico) e colocou-se a uma temperatura de 60°C durante $24 \pm 1\text{h}$. Ao retirar, colocou-se imerso em água a uma temperatura de 25°C , com o objetivo de estabilizar a temperatura do conjunto. Em seguida, os corpos de prova foram retirados das sacolas plásticas e submetidos ao ensaio de resistência à tração (RTu).

Os corpos de prova não condicionados foram colocados em banho a uma temperatura de 25°C , apenas para estabilizar sua temperatura e logo após foram submetidos ao ensaio de resistência à tração (RT).

Fazendo-se a relação entre a RT e a RTu, pode-se calcular a resistência à tração por umidade induzida (RRT), valor este expresso em porcentagem. O critério de aceitação de uma mistura asfáltica segunda a AASHTO T 283 (1989) é de 80% e para DNIT 031/2006 é de 70%.

Figura 61 - Passo a passo do ensaio de Lottman Modificado



3.2.5.4 Vida de Fadiga

Enquanto cargas monotônicas produzem um dano (trincas) continuamente crescente nos materiais, cargas cíclicas produzem danos intermitentes, ou seja, na fase de carregamento o dano cresce, enquanto na fase de descarregamento o dano mantém-se constante, desconsiderando o fenômeno de “reselagem” das trincas. Cargas cíclicas produzem falhas nos materiais para valores de tensões mais baixos do que aqueles obtidos na ruptura em ensaios estáticos, porém a mesma carga é aplicada diversas vezes. Esse fenômeno é chamado de fadiga e é definido como (ASTM, 1979): “o processo da mudança estrutural permanente, progressiva e localizada que ocorre em um ponto do material sujeito a tensões de amplitudes variáveis que produzem as fissuras que conduzem para totalizar a falha após um determinado número de ciclos” (BERNUCCI, 2008).

Sabe-se que a fadiga de uma mistura asfáltica é definida em relação à vida da fratura (N_f), referente ao número total de aplicações de certa carga que é necessária à fratura de uma amostra, ou vida de serviço (N_s), referente ao número total de aplicações dessa mesma carga a qual reduz o desempenho da amostra a um nível preestabelecido.

As leis de fadiga, que são consideradas como a relação entre o estado de tensão-deformação e o número de ciclos até atingir a ruptura, são aplicadas através de ensaios feitos em laboratórios com cargas repetidas que são conduzidos a diversos níveis de tensão ou de deformação e visam reproduzir as condições das misturas asfálticas em camadas de pavimentos em campo (FONTES, 2009; ARAO, 2014).

O ensaio de Fadiga convencional para a determinação do número de repetições de cargas pode assim ser executado por compressão diametral (Figura 57) à tensão controlada (TC), com carga aplicada no valor de 1Hz, com o equipamento pneumático. Assim, durante a realização do ensaio de fadiga, a deformação de tração aumenta até o rompimento do corpo de prova. Segundo Bernucci et al. (2008), este tipo de ensaio é compatível com a caracterização de materiais de revestimento asfálticos mais espessos em decorrência da predominância de absorção das tensões pelo revestimento com relação às camadas subjacentes.

No Brasil, o ensaio de fadiga comumente utilizado é à compressão diametral sob tensão e temperatura controladas, não apresentando, até o momento, norma específica para realizá-lo. Porém foi adotada a realização do ensaio da forma relatada a seguir.

O ensaio ocorreu na câmara da prensa UTM-25, por compressão diametral à tensão controlada, em uma frequência de pulso de 1Hz, senso 0,1s para a aplicação de uma carga senoidal e 0,9s para a aplicação de uma carga de repouso (Figura 62). O ensaio foi realizado a temperatura de 25°C, com níveis de tensões de 50% a 20% da resistência à tração da mistura.

A vida de fadiga pode ser representada por várias expressões que indicam o N, expressando o número de solicitações de carga; em termos das tensões ou deformações iniciais, sendo K e n parâmetros de fadiga determinados nos ensaios (BUDNY, 2012). Dentre as formas de representação usuais destacam-se as equações 4 e 5.

$$N = K_1 \left(\frac{1}{\sigma} \right)^{n_1} \quad \text{Equação 4}$$

$$N = K_2 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_2} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

ΔQ = diferença algébrica entre tensão horizontal de tração e vertical de compressão no centro da amostra;

ΔR = diferença algébrica entre deformação horizontal de tração e vertical de compressão no centro da amostra;

K, n = constantes obtidas através da regressão dos resultados experimentais (em escala log).

Figura 62 - Compressão diametral de corpos de prova cilíndricos

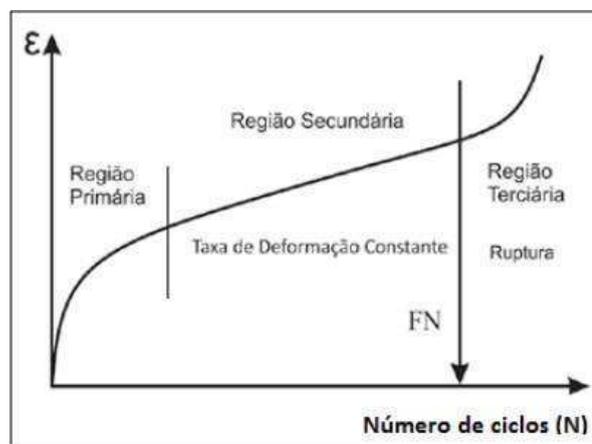


3.2.5.5 *Flow Number*

O ensaio de *Flow Number* tem como objetivo a simulação de passadas de veículos repetidamente sobre a estrutura do pavimento, que nada mais é do que, o número de ciclos de carga o qual o pavimento pode resistir antes que aconteça a fluência. Realizando tal ensaio, temos como resultado um gráfico que correlaciona a deformação permanente com o número de ciclos aplicados.

Segundo Costa (2017), a curva gerada pode ser subdividida em três zonas de deformação: a região primária (côncavo para baixo), a região secundária (reta) e a região terciária (côncavo para cima), conforme mostrado na Figura 63.

Figura 63 - Subdivisões de regiões oriundas do ensaio de *Flow Number*



Fonte: Costa (2017)

Observa-se que na região primária, a densificação da amostra acontece a uma taxa elevada, ao passar para a região secundária, a deformação é constante e na região terciária a deformação apresenta um crescimento exponencial, apontando o rompimento da amostra. Sendo assim, *Flow Number* é definido como o número de ciclos que ocorre na transição entre as zonas secundárias e terciárias.

O ensaio foi realizado no laboratório de engenharia de pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Para realizá-lo utilizou-se o equipamento AMPT (Figura 64), em uma temperatura de 60°C, com ciclos de carga uniaxial de compressão de 200KPa, sendo aplicados em corpos de prova com dimensões de 150mm de altura e 100mm de diâmetro, utilizando a dosagem do tipo SUPERPAVE, com volume de vazios de $7 \pm 0,5$. Para a obtenção de tal volume de vazios, foram feitas tentativas de mudanças de número de giros no SUPERPAVE, até que o critério fosse alcançado. Sendo assim, o número de giros necessário para se obter um volume de vazios de $7 \pm 0,5$ foi igual a 35 giros.

Figura 64 - Ensaio de *Flow Number*



Cada carregamento tem uma duração de 0,10 segundo e intervalos entre as aplicações de carga de 0,90 segundo, tendo como critério de parada ou o alcance de 10.000 ciclos ou uma deformação de 50.000 *microstrains*. Atingindo umas das duas deformações, o ensaio é encerrado (Figura 65).

Figura 65- Ensaio de *Flow Number*

3.2.5.6 Cântabro

Segundo Santana (1993), o arrancamento progressivo de agregados da capa de rolamento por efeito do atrito pneu-pavimento é denominado desgaste. O ensaio de cântabro é utilizado para a determinação da resistência à degradação no pavimento. Tal ensaio foi criado com objetivo de avaliar o desempenho de misturas asfálticas em relação à perda de material.

O ensaio foi realizado seguindo a norma DNIT – ME 383/99, e consiste na perda por desgaste de misturas asfálticas utilizando o aparelho de abrasão Los Angeles.

Para a realização do ensaio, pesou-se cada corpo de prova (P) e foram colocados separadamente no aparelho de Abrasão Los Angeles, sem a utilização de nenhuma carga abrasiva, onde foi efetuada 300 revoluções, em uma velocidade angular de 30 rpm. Após o término desta etapa, cada corpo de prova foi retirado do aparelho e novamente pesado (P').

O aspecto dos corpos de prova após o ensaio de cântabro, pode ser observado na figura 66.

Figura 66 - Aspecto dos corpos de prova após o ensaio de Cântabro



O percentual de desgaste se dá a partir de uma relação entre os pesos antes e após a realização do ensaio, portanto, o percentual de desgaste da mistura asfáltica (A) é calculado utilizando a expressão abaixo:

$$W (\%) = \frac{(W - W')}{W} \cdot 100 \quad \text{Equação 3.4}$$

3.2.5.7 Módulo Dinâmico

O módulo dinâmico é um ensaio que tem como objetivo caracterizar a rigidez e as propriedades visco elásticas das misturas asfálticas. Segundo Queiroz (2016), o ensaio de MD consiste na aplicação de uma carga uniaxial compressiva senoidal em um corpo de prova cilíndrico em diferentes faixas de temperatura e de frequências de carregamento. As interpretações dos resultados oriundos do ensaio de MD são feitas a partir de curvas mestras, as quais permitem a comparação para uma faixa de temperatura e frequências.

A realização do ensaio seguiu a norma da AASHTO TP-62/2009. O mesmo ocorre através do emprego de uma tensão de compressão senoidal, em corpos de prova com 150mm de altura e 100mm de diâmetro, com temperaturas e frequências estabelecidas em norma. Para a obtenção da curva mestra foi efetuada nas temperaturas de 4,4°C, 21°C e 37,4°C durante o carregamento com frequências de 0,1; 0,5; 1; 5; 10 e 25Hz. A partir da realização do ensaio (Figura 67), foi possível fazer comparações entre as curvas mestras das misturas avaliadas, de acordo com suas inclinações.

Figura 67 – Realização do ensaio MD



CAPÍTULO 4

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados oriundos da fase experimental desta pesquisa. Serão mostrados os resultados da caracterização reológica do CAP puro e modificado e os resultados da caracterização mecânica das misturas asfálticas.

4.1 Caracterização reológica do CAP puro e CAP mais cera de carnaúba

Nesta seção serão apresentados os resultados da caracterização reológica do ligante asfáltico, realizou-se uma comparação entre as propriedades verificadas no CAP puro e dos teores de cera de carnaúba incorporados ao CAP.

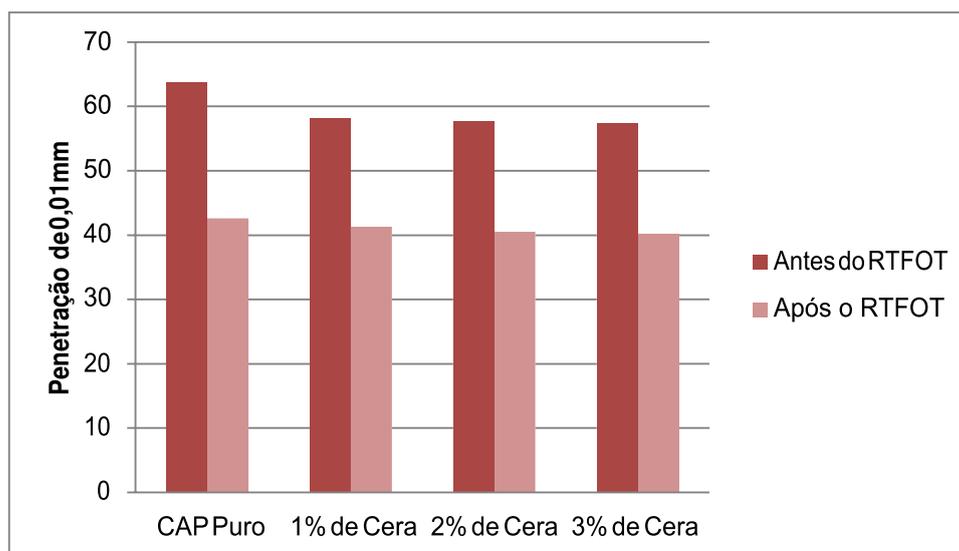
4.1.1 Resultados do ensaio de Penetração

Com a adição da cera de carnaúba ao CAP puro o comportamento esperado, em termos de ensaio de penetração, seria um aumento da penetração com os acréscimos de teores de cera, já que em misturas asfálticas mornas ocorre a diminuição da viscosidade do ligante. Entretanto, conforme pode ser observado na Tabela 19 e Figura 68 ocorre o inverso.

Tabela 19 - Resultados do ensaio de Penetração

Amostra	CAP PURO	1% de Cera	2% de Cera	3% de Cera
Antes do RTFOT (0,1mm)	63,80	58,20	57,70	57,50
Após do RTFOT (0,1mm)	42,60	41,30	40,50	40,20

Figura 68 - Resultados do ensaio de Penetração



A justificativa plausível foi que na temperatura de realização do ensaio, 25°C, a cera estaria atuando apenas como carga particular, portanto, reduzindo o valor da penetração, tornando a mistura CAP+cera mais consistente. Essa diminuição da penetração já foi observada em outros estudos, como por exemplo, por Silva (2016) no qual utilizou teores de cera de carnaúba de 1, 1,5, 2 e 2,5%, foi visto uma diminuição na penetração de 15,5%. Também foi observado nos estudos realizado por Feitosa (2015), o qual adicionou ao ligante asfáltico teores de 3 e 5% de cera de carnaúba. Em sua pesquisa ocorreu uma diminuição de 19% na penetração da amostra de referência em relação à amostra com incorporação de cera de carnaúba. No estudo feito por Filho (2013), o mesmo adicionou ao ligante asfáltico 5% de cera de carnaúba, havendo uma diminuição da penetração foi de 8,20%.

Como pode-se perceber na Figura 68 o acréscimo de diferentes teores de cera de carnaúba ao ligante asfáltico não apresentou uma mudança significativa na penetração das amostras, tanto antes como após o envelhecimento do material. Observou-se uma redução maior de penetração com a adição de 3% de cera de carnaúba, uma diminuição de aproximadamente, 10% em relação ao CAP puro. A redução na penetração pode expressar como um aumento na rigidez do material, presumindo uma provável resistência à deformação permanente, assim como observado em trabalhos publicados com ligante asfáltico (penetração 50/70) modificado com cera sintética FT (IWÁNSKI *et al*, 2015).

A norma DNIT 095/2006 – EM determina que a penetração retida mínima deve ser de 55%. Na tabela abaixo (Tabela 20), observou-se que o resultado foi satisfatório tanto para o CAP puro como para o CAP modificado com os teores de cera de carnaúba.

Tabela 20 - Penetração Retida

Característica	CAP PURO	1% de Cera	2% de Cera	3% de Cera
Penetração Retida (%)	66,80	70,90	70,20	69,90

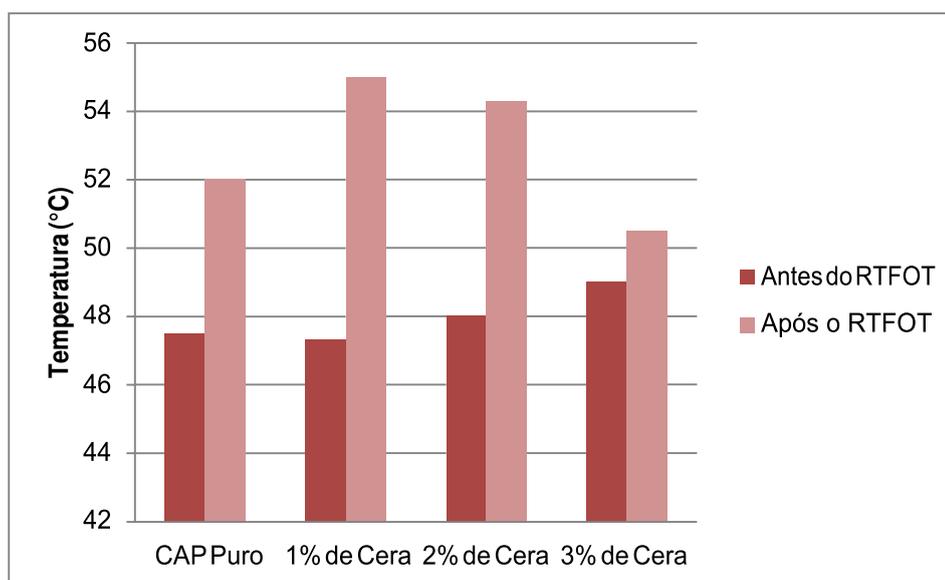
4.1.2 Resultados do ensaio de Ponto de Amolecimento

A Tabela 21 apresenta os resultados do ensaio de ponto de amolecimento ou também denominado de Método do Anel e Bola. A Figura 69 apresenta o efeito da incorporação da cera de carnaúba no ligante asfáltico.

Tabela 21 - Resultados do ensaio de Ponto de Amolecimento

Amostra	CAP PURO	1% de Cera	2% de Cera	3% de Cera
Antes do RTFOT (0,1mm)	47,50	47,30	48,00	49,00
Após do RTFOT (0,1mm)	52,00	55,00	54,30	50,50

Figura 69 -- Resultados do ensaio de Ponto de Amolecimento



Os dados relativos ao ponto de amolecimento do ligante asfáltico modificado e não modificado são importantes, segundo Feitosa (2015), pois permitem um ensaio das misturas em condições de serviço com temperaturas mais elevadas, sem que haja perda das propriedades mecânicas. O dado obtido por esse ensaio relaciona o ponto de amolecimento do ligante asfáltico com a resistência à deformação permanente, onde, quanto maior o ponto de amolecimento maior será a resistência a deformação.

De acordo com as especificações do DNIT (2006), o ponto de amolecimento mínimo para o ligante asfáltico 50-70 é de 46°C, observou-se que todos os ligantes asfálticos modificados com os teores de cera de carnaúba mostraram-se satisfatórios.

A adição de teores de cera de carnaúba ocasionou um aumento no ponto de amolecimento, essa elevação pode ser interpretada como um aumento da rigidez do material, o qual tornou-se um benefício em relação a longevidade na utilização em campo. A adição dos teores de cera de carnaúba nas proporções, elevou o ponto de amolecimento da amostra em relação a mistura com CAP puro. Foi possível observar que dentre os ligantes modificados com os vários teores de cera de carnaúba, o ligante asfáltico modificado com 1% da cera, apresentou o maior ponto de amolecimento.

Na pesquisa realizada por Silva (2016), também foi possível perceber um aumento do ponto de amolecimento ao adicionar a mistura 1% de cera de carnaúba, aumento esse de aproximadamente 6% em relação a mistura com CAP puro. Em sua pesquisa à medida que o teor de cera aumenta o ponto de amolecimento decresce. Nos ensaios reológicos realizados por Silva (2016) os resultados de PG mostram uma diminuição das temperaturas nos teores de 2 e 2,5%, resultado semelhante em relação a diminuição da temperatura observada nesta pesquisa, na qual a adição de 2 e 3% de cera de carnaúba ocasionaram uma redução do ponto de amolecimento. O mesmo comportamento acontece nas pesquisas realizadas por Feitosa (2015) e Filho (2013), no qual a adição de teores de cera de carnaúba aumentou em aproximadamente 7,5% o ponto de amolecimento.

Observou-se que houve uma diminuição na penetração e um aumento do ponto de amolecimento, quando comparado ao ligante asfáltico puro. A partir deste comportamento, pode-se fazer uma relação entre a dureza do material e a resistência à deformação permanente. Sendo assim, um asfalto que apresenta-se mais duro e com maior resistência a deformação, implica em um asfalto que pode ser usado em rodovias com maior frequência de veículos, em locais de clima mais quente (FEITOSA, 2015).

4.1.3 Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional

Os resultados dos ensaios de viscosidade rotacional, com CAP puro e modificado nos teores de cera de carnaúba estão mostrados nas Tabelas 22 e 23 e nos gráficos das Figuras 70 e 71 antes e após o RTFOT.

Tabela 22 - Resultados do ensaio de viscosidade rotacional antes do RTFOT

Viscosidade Rotacional				
	CAP Puro	1% de Cera	2% de Cera	3% de Cera
135°C	457,50	370,00	361,30	326,30
150°C	223,50	196,00	184,50	169,00
177°C	80,80	70,80	70,30	65,30

Tabela 23 - Resultados do ensaio de viscosidade rotacional após o RTFOT

Viscosidade Rotacional				
	CAP Puro	1% de Cera	2% de Cera	3% de Cera
135°C	626,30	582,50	490,00	460,00
150°C	298,00	280,50	242,00	230,50
177°C	105,50	97,00	86,80	83,30

Figura 70 - Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional antes o RTFOT

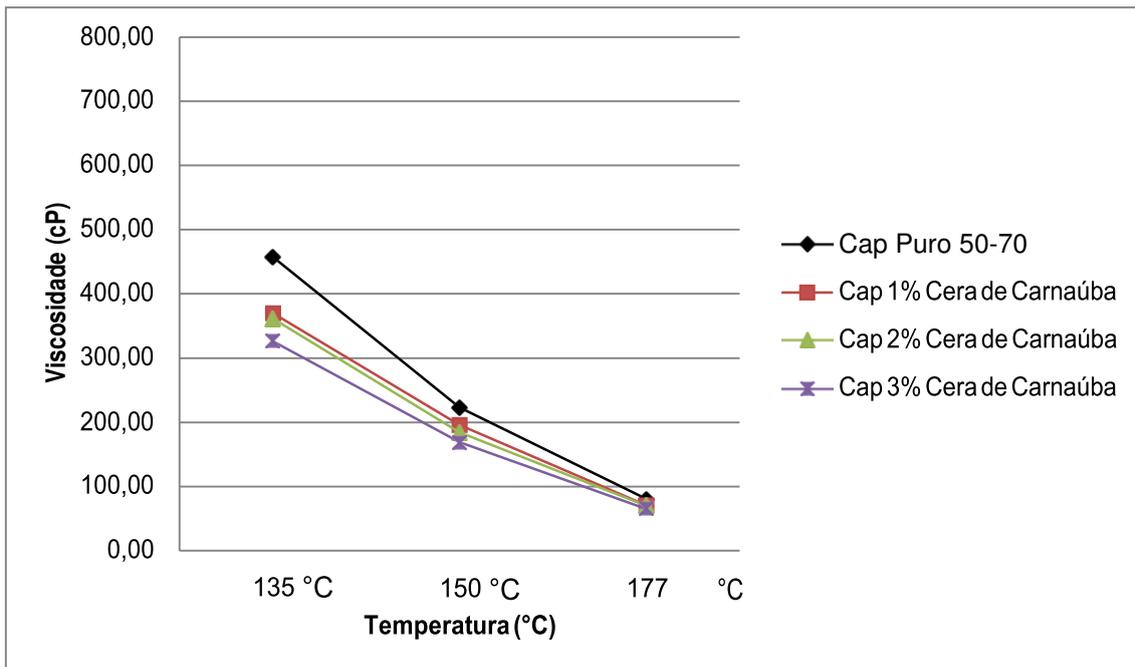
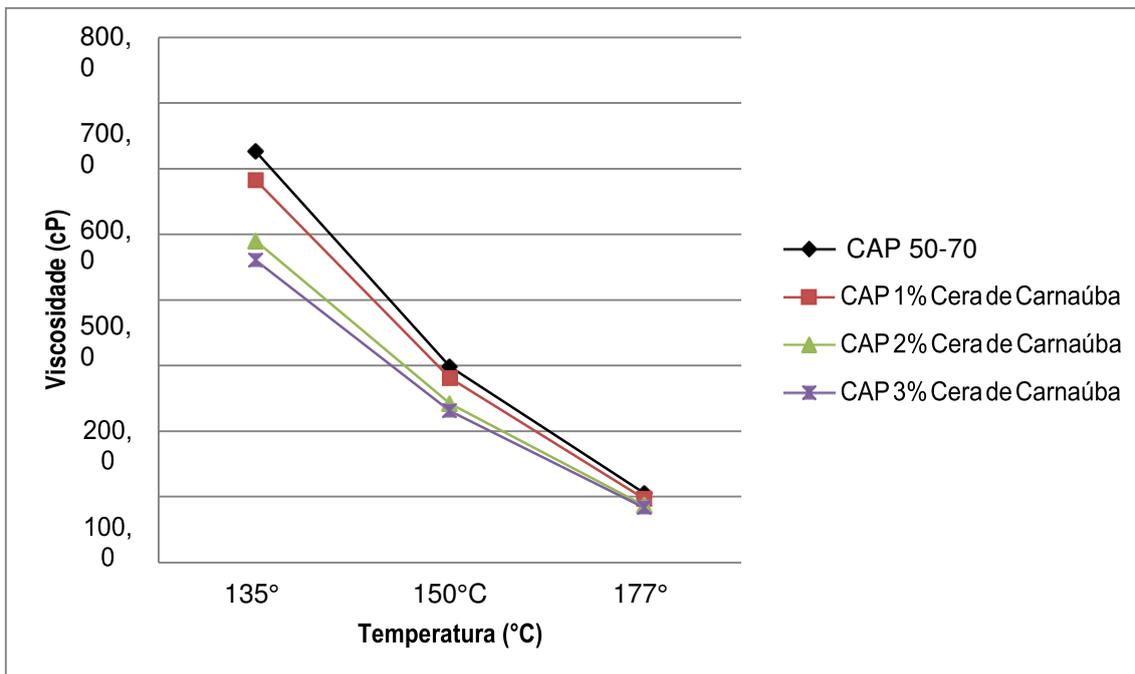


Figura 71- Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional após o RTFOT



Foi possível observar uma redução expressiva da viscosidade em todas as temperaturas se comparado ao CAP puro. A menor viscosidade em relação ao CAP puro é obtida com a incorporação de 3% de cera de carnaúba. Isto representa uma menor temperatura de produção e compactação de misturas asfálticas.

A redução da viscosidade ao adicionar-se teores de cera é observado também nos ensaios de viscosidade rotacional e Curva Mestre realizados por Silva (2016). A adição de teores de cera de carnaúba ocasionou a redução das temperaturas de trabalhabilidade das misturas. Silva (2016) obteve uma diminuição de 30% da viscosidade adicionando 3% de cera de carnaúba a mistura asfáltica se comparado a mistura com CAP puro, nesta pesquisa ocorreu uma redução de 28% ao adicionar 3% de cera de carnaúba. Em Filho (2013), observou-se uma redução expressiva na viscosidade ao adicionar a cera de carnaúba, uma diminuição de 50% na viscosidade comparando-se a mistura com CAP puro.

Houve uma diminuição nas temperaturas de Usinagem e Compactação, como foi possível verificar na Tabela 24. Conseguiu-se uma redução das temperaturas de usinagem e compactação de 6% em relação ao CAP puro, mesma redução apresentada por Silva (2016) nos ensaios de Viscosidade Rotacional e MSCR e Filho (2013) no ensaio de Viscosidade Rotacional, os quais apresentaram uma redução de aproximadamente 8% nas temperaturas. Porém, as temperaturas de Usinagem e Compactação encontradas em nesta pesquisa (Tabela 24), não são classificadas como temperaturas usuais de misturas asfálticas mornas (temperaturas entre 100 a 120°C).

Tabela 24 - Temperatura de Usinagem e Compactação

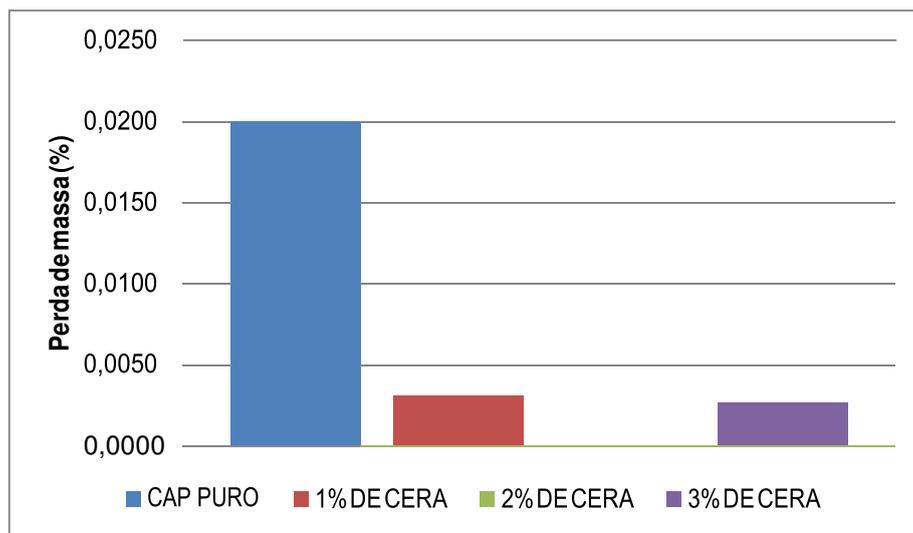
Amostra	CAP PURO	1% de Cera	2% de Cera	3% de Cera
Temperatura de Usinagem (°C)	157,00	152,50	148,00	148,00
Temperatura de Compactação (°C)	143,00	139,00	137,00	136,00

4.1.4 Resultados da Perda de Massa

A perda de massa determina a capacidade de envelhecimento do ligante. A Tabela 25 e a Figura 72 apresentam os resultados da perda de massa das misturas asfálticas. Como se pode perceber no gráfico, o teor de 2% de cera de carnaúba apresentou a menor perda de massa dentre as amostras estudadas.

Tabela 25 - Perda de Massa

	CAP PURO	1% de Cera	2% de Cera	3% de Cera
Amostras	0,0203	0,0031	0,0005	0,0026

Figura 72 - Resultados da perda de massa após o ensaio RTFO

A norma do DNIT 095/2006, especifica que o limite de perda de massa é de até 0,5%. A partir de então, percebeu-se pelos resultados expostos acima, que o CAP puro e os CAPs modificados com cera de carnaúba, estão dentro da tolerância de envelhecimento do material, sem interferir na qualidade do pavimento.

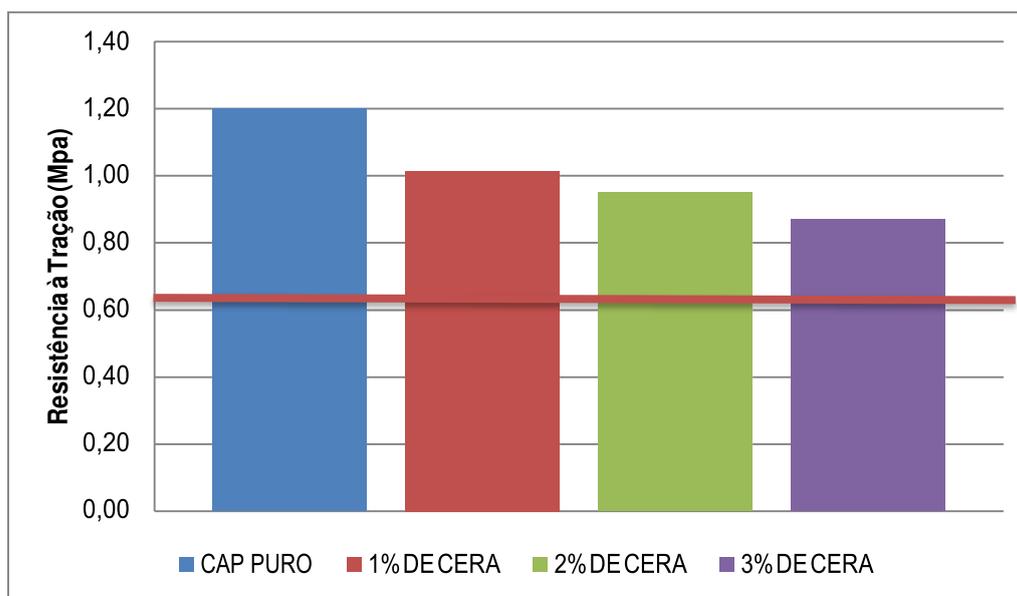
4.2 Caracterização mecânica das misturas asfálticas

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

A Tabela 26 e a Figura 73 apresentam os resultados oriundos do ensaio de Resistência à Tração por compressão diametral para as misturas asfálticas com e sem a cera de carnaúba. Foram utilizados na realização do ensaio no mínimo três corpos de prova para cada teor de cera de carnaúba, como também para o CAP puro.

Tabela 26 - Resultados do ensaio de RT

	CAP PURO	1% de Cera	2% de Cera	3% de Cera
Amostras	1,20	1,02	0,95	0,87

Figura 73 - Resultados do ensaio de RT

Segundo a norma do DNIT 031/2010 – ME, o valor médio da RT deve ser de no mínimo 0,65MPa (25°C), em misturas asfálticas utilizadas em camadas de rolamento. Observou-se que todas as misturas apresentaram-se dentro do especificado pela norma.

A mistura com CAP puro foi a que apresentou maiores resultados deste parâmetro, e a partir do aumento do teor de cera de carnaúba, percebeu-se uma diminuição da resistência à tração das amostras. Isto já seria esperado, por conta da redução da rigidez do material com a incorporação de teores de cera de carnaúba, por serem produzidos e compactados a temperaturas menores.

No estudo realizado por Filho (2013), ao incorporar 3% e 5% de cera de carnaúba ao ligante asfáltico, também foi possível observar uma diminuição da resistência à tração em relação à mistura com CAP puro, esta redução foi de aproximadamente 4%. Nesta pesquisa, ao comparar a mistura com CAP puro e as porcentagens de cera de carnaúba, tivemos uma redução de 15% na amostra com 1% de cera, 21% na amostra com 2% de cera e de 27,5% na amostra com 3% de cera de carnaúba.

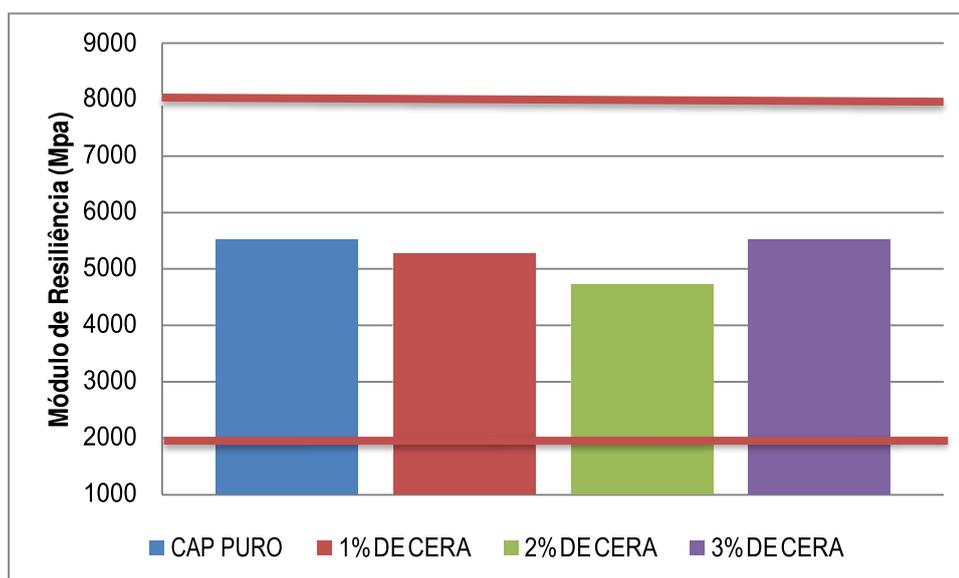
4.2.2 Resultados do ensaio de módulo de resiliência

Os ensaios de módulo de resiliência foram executados de acordo com o item 3.2.5.2. Na Tabela 27 e na Figura 74 são apresentados os resultados oriundos dos ensaios de MR médios realizados em três corpos de provas de cada mistura analisadas.

Tabela 27 - Resultados do ensaio de MR

	CAP PURO	1% de Cera	2% de Cera	3% de Cera
Amostras	5517	5276	4723	5508

Figura 74 - Resultados do ensaio de MR



Bernucci (2008), afirma que os valores típicos do módulo de resiliência estão na faixa entre 2.000 a 8.000Mpa a temperatura de 25°C, como observou-se que todas as misturas asfálticas, modificadas ou não, apresentaram-se dentro desta faixa. Todas as misturas asfálticas apresentaram resultados compatíveis com os diversos estudos realizados com cera de carnaúba, como por exemplo, o estudo realizado por Filho (2013), no qual a adição de cera de carnaúba na mistura asfáltica reduziu 17% o módulo de resiliência em relação a mistura com CAP puro.

A mistura com CAP puro foi a que obteve valores de MR mais elevados. Resultado bastante similar foi encontrado na mistura asfáltica contendo 3% de cera de carnaúba. Observou-se que a mistura contendo CAP puro, em virtude de ser produzida e

compactada a uma temperatura mais elevada, apresentou-se com um maior envelhecimento, deixando-a mais rígida e com valores maiores de MR. Em relação às misturas com adição de cera de carnaúba, observou-se uma redução mais significativa do MR no teor de 2% de cera, voltando a subir no teor de 3%, ou seja, na menor temperatura de usinagem e compactação conseguimos alcançar valores de MR similar a amostra de CAP puro, isto quer dizer, que o comportamento esperado de uma maior temperatura de usinagem e compactação proporcionando uma maior rigidez ao material e envelhecimento não se comprovou. O MR da mistura com 3% de cera ficou 0,16% inferior se comparado a mistura com CAP puro, enquanto que, as amostras de 1% e 2% de cera ficaram 4,4% e 14,4%, respectivamente, menores.

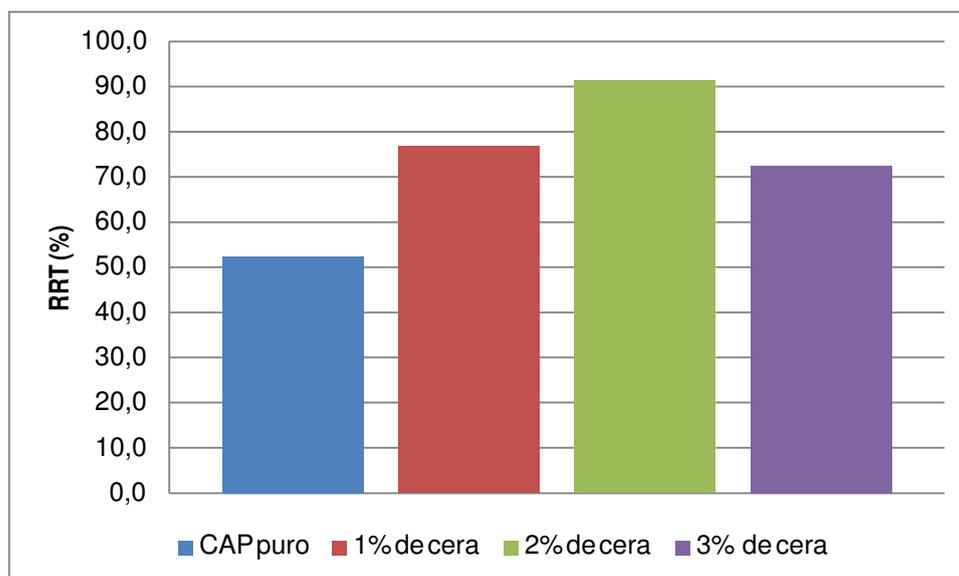
4.2.3 Resultados do ensaio de dano por umidade induzida – Lottman Modificado

A Tabela 28 e Figura 75 apresenta os resultados do ensaio de Lottman modificado para as misturas asfálticas com e sem a adição de cera de carnaúba.

Tabela 28 - Resultados do ensaio de Lottman Modificado

	CAP PURO	1% de Cera	2% de Cera	3% de Cera
Amostras	52,40	76,90	91,40	72,50

Figura 75 - Resultados do ensaio de Lottman modificado



De acordo com a norma AASHTO T 283 (2007), os valores admitidos para as misturas asfálticas devem ser maiores que 80%. A especificação do DNIT 031/2006 preconiza que este valor deve ser de 70%. Observou-se na Tabela 26 e na Figura 70, que apenas a mistura com CAP puro não atingiu o critério estabelecido por tais normas, apresentando um RRT(%) de apenas 52,4%. Esta mistura apresentou-se mais propensa ao dano por umidade, podendo ocorrer maiores problemas de desagregação dos agregados.

A adição de cera de carnaúba ocasionou um aumento expressivo da resistência retida à tração. As misturas com 1 e 3% de cera enquadraram-se no estabelecido pela norma do DNIT 031/2006, apresentando um RRT(%) de 76,9% e 72,5%, respectivamente. Já a amostra com 2% de cera de carnaúba enquadrou-se tanto na norma do DNIT 031/2006, como também na norma da AASHTO T 283 (2007), apresentando um RRT(%) de 91,4%, um aumento de aproximadamente 43% em relação a amostra com CAP puro, não apresentando perda significativa de Resistência à Tração após o condicionamento. Isto significa que, a adição dos teores de cera de carnaúba ao ligante asfáltico aumentou o índice de resistência retida à tração, apresentando uma maior adesão entre o agregado e o ligante nas condições da amostra parcialmente saturada.

Observou-se que no ensaio de módulo de resiliência (MR), a mistura asfáltica com 2% de cera de carnaúba apresentou o menor valor de MR, e as outras misturas (1 e 3% de cera) apresentaram comportamento bastante semelhantes. No ensaio de Lottman modificado ocorre o oposto com a mistura com 2% de cera, a qual apresentou valores superiores aos observados nos teores de 1 e 3% (teores com comportamentos similares). Pode-se concluir que o teor de 2% de cera apresenta-se como um ponto de inflexão, ou seja, uma mudança de comportamento ao avaliar os ensaios de MR e Lottman.

Filho (2013) realizou pesquisa incorporando ao ligante asfáltico a cera de carnaúba e obteve valores de RRT(%) de 75%, bastante próximo ao encontrado nesta pesquisa. As pesquisas de Filho (2013), Feitosa (2015) e Silva (2016), realizaram o ensaio de adesividade com objetivo de comprovar a melhoria da ligação entre agregado e ligante. Os três autores citados observaram uma melhoria significativa, isto pode ser considerado um ponto positivo em relação a utilização de tal aditivo já que além de reduzir as temperaturas de usinagem e compactação, estaria também eliminando ou diminuindo o

uso de aditivos conhecidos por dopes, os quais tem por objetivo melhorar a adesividade entre agregado e ligante.

4.2.4 Resultados do ensaio de Vida de Fadiga

O ensaio de fadiga foi executado com seis níveis de tensões, variando de 25% a 50% da RT. As curvas de vida de fadiga estão mostradas na Figura 76 e Figura 77. Para cada uma das curvas foi possível gerar equações que melhor se adequaram as possíveis linhas de tendência. A Tabela 29, mostra o coeficiente de determinação R^2 para cada linha de tendência, que corresponde a qualidade do ajuste do modelo.

Figura 76 - Vida de Fadiga X Diferença de Tensões

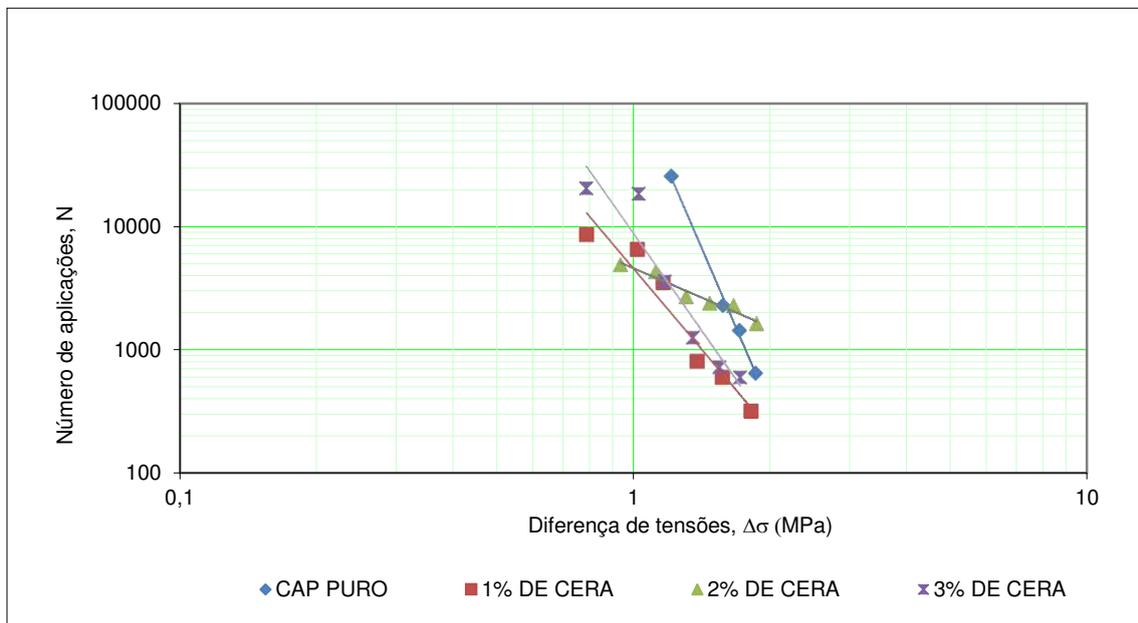


Figura 77 - Vida de Fadiga X Deformação específica resiliente

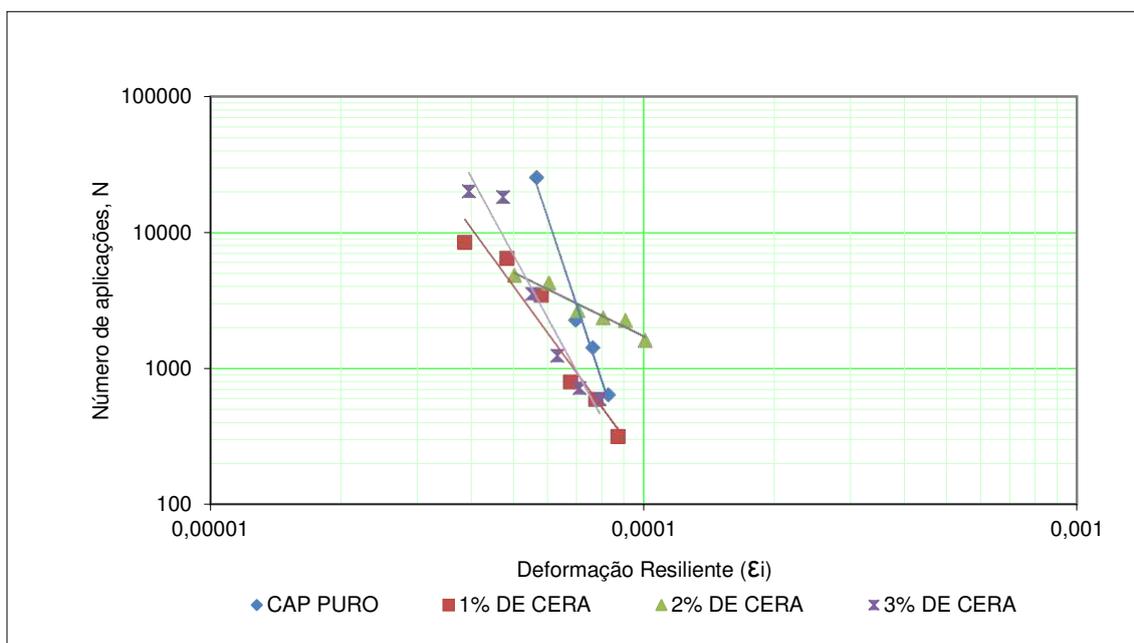


Tabela 29 - Parâmetros das curvas de fadiga para as amostras analisadas

Amostras	Equação: $N = K_1 \cdot \Delta\sigma^{n_1}$ ou $N = K_2 \cdot \epsilon_r^{n_2}$				
	K_1	K_2	n_1	n_2	R^2
CAP Puro	247740	4^{-37}	-9,60	-8,54	0,99
1% de Cera	4604,80	7^{-16}	-4,36	-4,36	0,93
2% de Cera	4588,50	4^{-4}	-1,59	-1,67	0,95
3% de Cera	8886,00	4^{-22}	-5,25	-5,87	0,91

Por meio da Tabela 29, observou-se que o modelo que apresentou menor dispersão de resultados, isto é, R^2 mais próximo de 1, foi a mistura asfáltica com CAP puro. A mistura com incorporação de 3% de cera de carnaúba exibiu o menor R^2 . Porém, todas as misturas asfálticas estudadas apresentaram bons resultados de coeficientes de determinação.

A mistura com 2% de cera de carnaúba, para níveis de tensões iniciais (50 a 40%) apresentaram um N (vida de fadiga) maior se comparados com as amostras de CAP puro, 1 e 3% de cera de carnaúba. Para os menores níveis de tensões utilizadas no ensaio (de

30 a 20%), a mistura com CAP puro ficou muito próxima da mistura com 3% de cera de carnaúba e apresentaram N (vida de fadiga) bastante elevado. As misturas com 1 e 2% de cera de carnaúba apresentaram comportamento semelhante entre si, porém, um baixo valor de N .

Foi possível observar que a mistura com 2% de cera de carnaúba foi a que obteve maiores danos por fadiga, pois levando em consideração um shift fator de laboratório para campo de 10^4 (Pinto & Preussler, 2002), para um nível de deformação de 100 microstrains, teria-se um N_f de 2×10^7 para tal mistura, nenhuma outra mistura chegaria perto disso. Porém segundo Merighi (2015), não se pode julgar isoladamente o desempenho da mistura apenas considerando a vida da fadiga, pois a mistura também sofrerá influência de outros fatores que impactarão diretamente neste parâmetro tais como: volume de vazios e disposição da matriz de agregados.

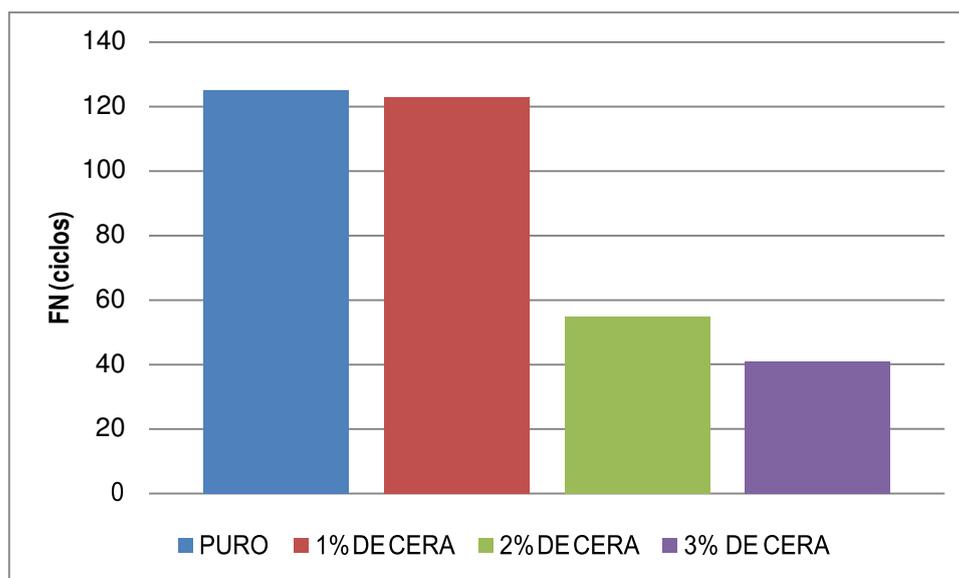
Com relação a curva vida de fadiga versus diferença de tensões, a inclinação é indicada pelo coeficiente n_1 . Bundy (2012) encontrou valores variando de 1 a 8, para misturas produzidas com CAP 50/70 puro e com adição de aditivos como, AD-Warm, CCBit 13 AD e processo de espuma de asfalto. Nesta pesquisa foram encontrados valores que variam 1,59 a 9,60, isto revela que algumas misturas apresentam curvas com baixa declividade e outras com alta declividade para a vida de fadiga em função da diferença de tensões (Figura 76).

Na Figura 77 são mostrados os resultados em relação a deformação específica. Por meio da inclinação (n_2) das curvas, percebeu-se comportamento semelhante ao analisado nas curvas de vida de fadiga x diferença de tensões.

4.2.5 Resultados do ensaio de *Flow Number*

A Figura 78 apresenta os resultados do ensaio de *Flow Number* para as misturas asfálticas com adição de cera de carnaúba e para as misturas com CAP puro.

Figura 78 - Resultados do ensaio de *Flow Number*



Observou-se que todas as misturas, inclusive a mistura com CAP puro apresentaram valores baixos de *Flow Number*, quando se considera o valor recomendado por Nascimento (2008) que é de 300 ciclos para tráfego médio (Tabela 30). A mistura com CAP puro apresentou comportamento similar a mistura com 1% de cera de cera, isto quer dizer, que suportou um número maior de ciclos de carregamento, indicando assim maior resistência à deformação permanente. Já as misturas com teores de 2 e 3% de cera de carnaúba ocorreu diminuição dos valores de FN.

Na Tabela 30 estão expostos valores de *Flow Number*, recomendados por Nascimento (2008), para tráfegos considerados leve, médio, pesado e extremamente pesados. De acordo com os valores obtidos neste trabalho, segundo a Tabela 28, todas as misturas avaliadas nesta pesquisa podem ser submetidas a tráfego de intensidade médio, inclusive a mistura com CAP puro. Isto quer dizer, que a adição de tais teores de cera de carnaúba não mudaria o tipo de tráfego que a mistura poderia ser submetida, o que significaria que se houvesse uma mistura asfáltica de CAP puro que suportasse um tráfego pesado, as misturas com teores de cera de carnaúba também suportaria tal tráfego. Provavelmente, um dos fatores que pode ter contribuído para a mistura com CAP puro e com teores de cera não terem se enquadrados em um tráfego considerado pesado ou extremamente pesado, foi à ausência do fíler na sua composição.

Silva (2016) realizou o ensaio de MSCR, no qual em seus resultados apenas a mistura com 2% de cera de carnaúba poderia ser utilizada para um tráfego do tipo pesado.

Nesta pesquisa como foi possível observar na Figura 78 a mistura com 2% de cera poderia ser usada para um tráfego do tipo médio. Provavelmente, essa diferença está relacionada com o tipo de mistura, já que a utilizada nesta pesquisa não apresenta em sua composição filier. Outro ensaio reológico realizado por Silva (2016) foi o de Módulo Complexo, no qual ele observou que a adição de teores de cera de carnaúba reduziu a resistência à deformação. Este resultado poderá explicar a diminuição dos resultados de FN em relação as misturas com 2 e 3% de cera, misturas essas susceptíveis a deformação permanente.

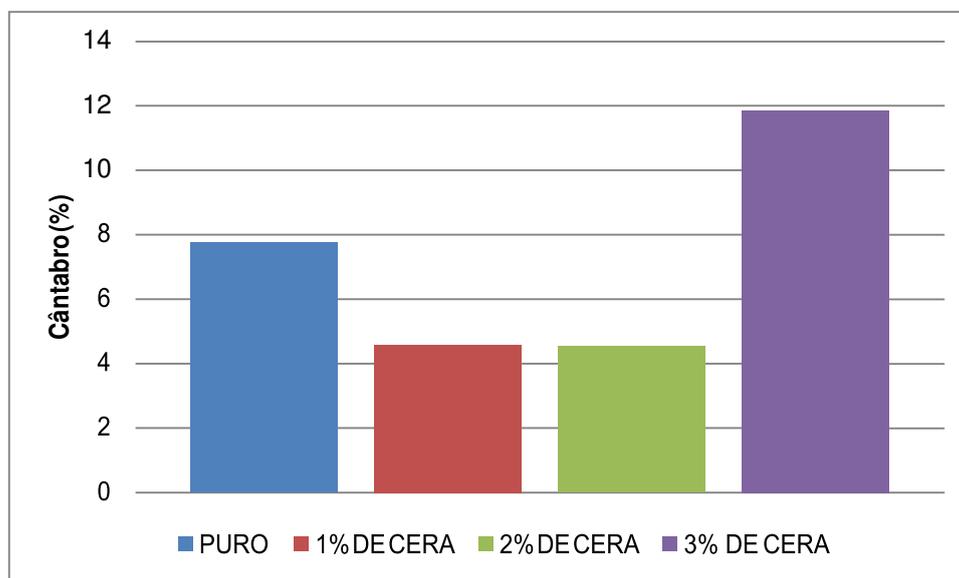
Tabela 30 - Valores mínimos de *Flow Number* para diferentes níveis de tráfegos

Pesquisas	Leve	Médio	Pesado	Extremamente Pesado
Nascimento (2008)	-	300	700	-

4.2.6 Resultados do ensaio de Cântabro

A Figura 79 apresenta os resultados do ensaio de Cântabro para as misturas asfálticas com e sem teores de cera de carnaúba.

Figura 79 - Resultados do ensaio de Cântabro



Nos resultados observados acima, percebe-se que a mistura asfáltica com CAP puro apresentou um maior desgaste, porém, no momento em que adiciona-se 1 e 2% de

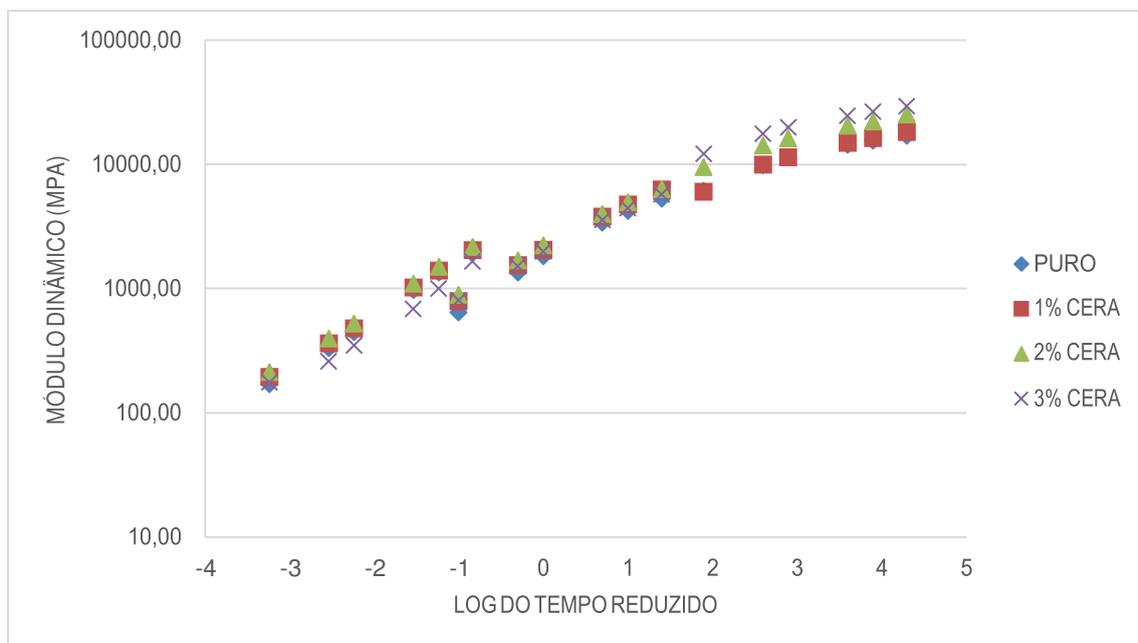
cera de carnaúba, é possível observar uma redução no desgaste da ordem de 41% e 41,5%, respectivamente.

Além do mais, ocorre uma mudança de padrão inesperada para o teor de 3% de cera de carnaúba, já que os teores de 1 e 2% apresentaram uma queda no desgaste. Provavelmente, essa alteração no teor de 3% de cera pode ser oriunda de algum erro na execução do ensaio.

4.2.7 Resultados do ensaio de Módulo dinâmico

A Figura 80 mostra as curvas mestras reunidas em um único gráfico das misturas asfálticas com e sem os teores de cera de carnaúba.

Figura 80 - Curvas mestras de todas as misturas asfálticas avaliadas



Percebeu-se que todas as misturas asfálticas com ou sem a adição de cera de carnaúba, apresentaram comportamentos bastante semelhantes quando se estuda a relação entre a queda de rigidez da amostra, à medida que a temperatura vai aumentando. Também foi possível perceber que a rigidez de todas as misturas estudadas diminuiu à medida que ocorre a redução da frequência de aplicação de carga.

Estão representadas nas Figuras 81, 82 e 83 os resultados do ensaio de módulo dinâmico de todas as amostras para cada temperatura do ensaio. Percebeu-se que a introdução dos teores de cera de carnaúba influenciou no parâmetro de rigidez das

amostras avaliadas. As amostras que apresentaram 2% de cera de carnaúba foram as que obtiveram maiores valores de módulo dinâmico nas temperaturas mais altas (21,1°C e 37,8°C).

Figura 81 - Módulo dinâmico das misturas asfálticas (4,4°C)

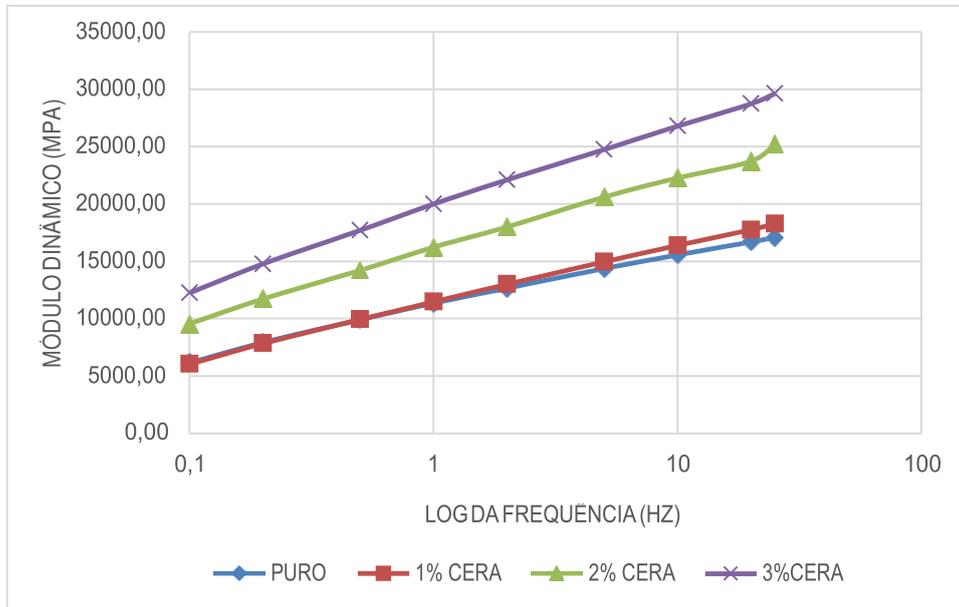


Figura 82 - Módulo dinâmico das misturas asfálticas (21,1°C)

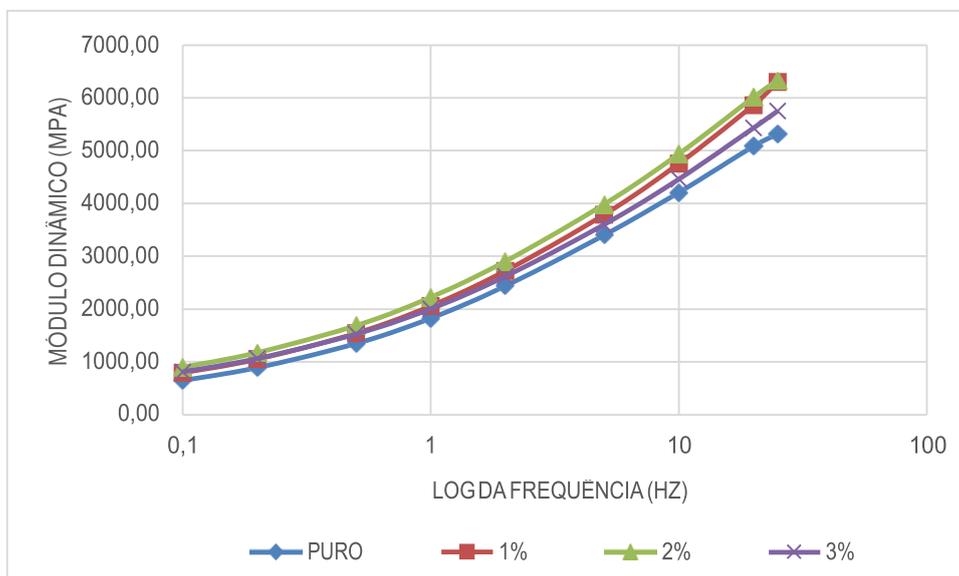
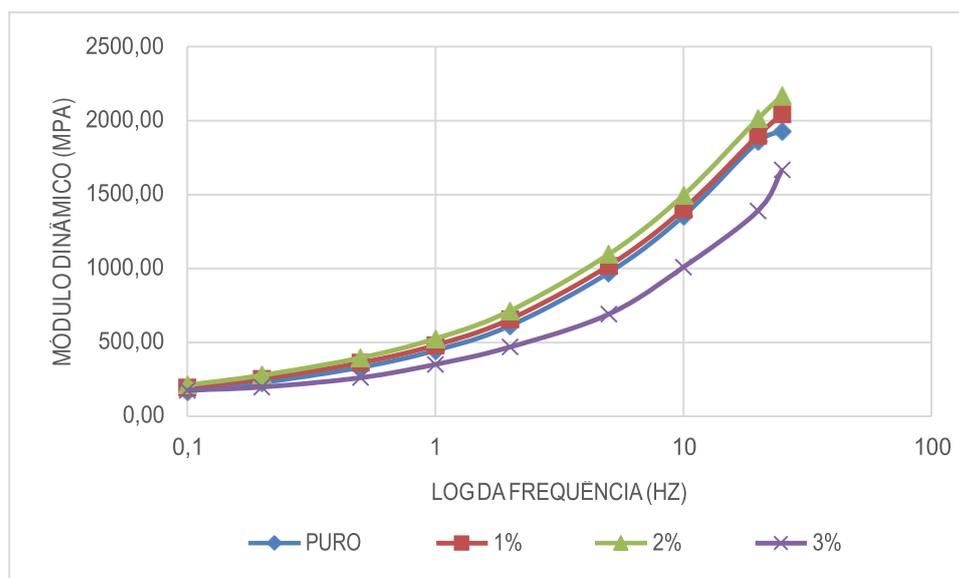


Figura 83 - Módulo dinâmico das misturas asfálticas (37,8°C)



Sabe-se que o módulo dinâmico e o ângulo de fase compõem as propriedades viscoelásticas lineares fundamentais, contabilizando os efeitos de diferentes temperaturas e frequências de carregamento neste comportamento. As Figuras 84, 85 e 86 apresentaram os resultados em relação aos ângulos de fase relativos às frequências de todas as misturas asfálticas estudadas.

Figura 84 - Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (4,4°C)

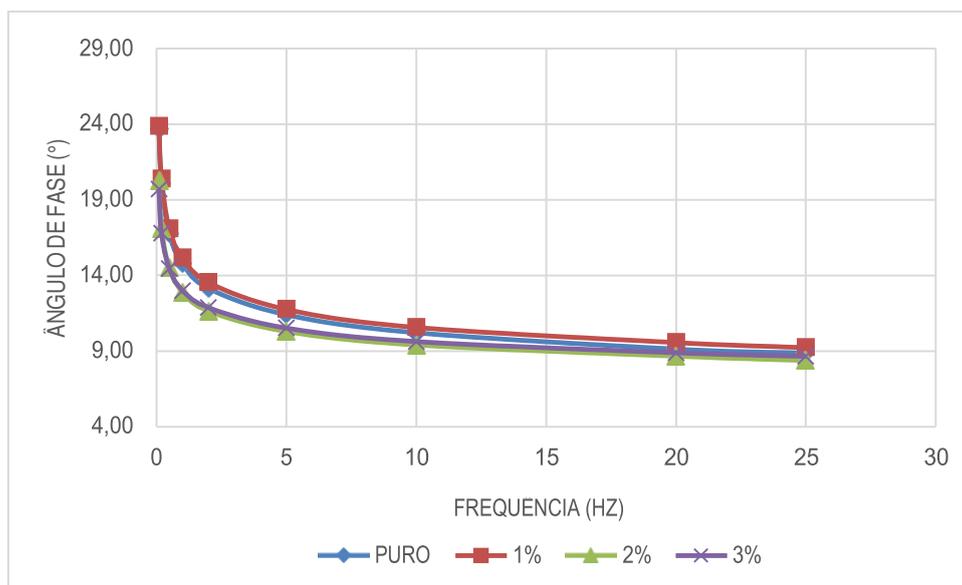
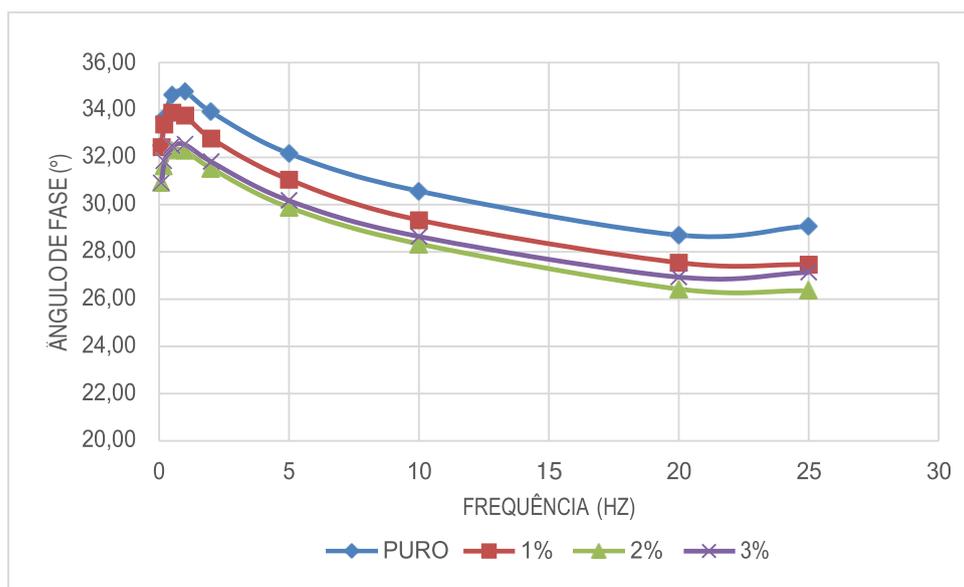
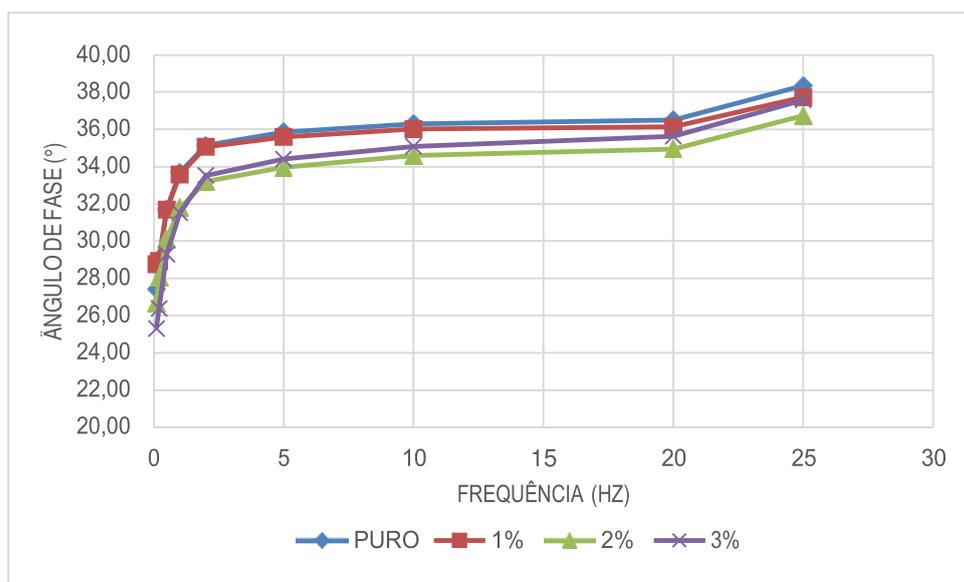


Figura 85 - Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (21,1°C)**Figura 86 - Ângulos de fase relativos às frequências de carregamento (37,8°C)**

Observou-se que o ângulo de fase aumenta à medida que a temperatura aumenta e reduz com o aumento da frequência. Na temperatura de 37,8°C, para baixas frequências o ângulo de fase diminui, o contrário foi observado para frequências maiores, onde percebeu-se um aumento no ângulo de fase.

Esse mesmo comportamento foi observado no estudo realizado por Costa (2017), a qual explica que em menor temperatura, o ângulo de fase aumenta o que sugere que a maior parte da energia é dissipada no comportamento viscoelástico da mistura, o que implica dizer que a relação entre o ângulo de fase em baixa temperatura e baixa frequência

é atribuída ao ligante. O ângulo de fase a alta temperatura e baixa frequência é afetado pelo agregado e a maior parte da energia é atribuída à interação ligante-agregado que tende a diminuir o ângulo de fase.

5.0 CONCLUSÕES

Apresentou-se uma pesquisa que visa a utilização de uma nova técnica de mistura asfáltica com temperaturas de usinagem e compactação inferior as utilizadas nas misturas convencionais, utilizando a cera de carnaúba como aditivo incorporado ao cimento asfáltico de petróleo, analisando os efeitos químicos e reológicos do ligante asfáltico puro e modificado; e análises das mistura com diferentes teores de cera e tempos de envelhecimento.

A partir dos ensaios realizados em laboratório, foi possível extrair as seguintes análises:

Ensaio de Penetração e Ponto de Amolecimento

A incorporação de teores de cera de carnaúba proporcionou uma diminuição da penetração do CAP. A justificativa plausível é que na temperatura de realização do ensaio, 25°C, a cera estaria atuando apenas como carga particular, portanto, reduzindo o valor da penetração, tornando a mistura CAP+cera mais consistente. Em relação ao ensaio de Ponto de Amolecimento, a adição de teores de cera de carnaúba ocasionou um aumento no ponto de amolecimento, essa elevação pode ser interpretada como um aumento da rigidez do material. Portanto, a adição dos teores de cera de carnaúba proporcionou uma melhora na durabilidade do pavimento.

Viscosidade Rotacional

A adição de cera de carnaúba ao ligante asfáltico, proporcionou uma redução expressiva da viscosidade em todas as temperaturas se comparado ao CAP puro. Observou-se que a menor viscosidade em relação ao CAP puro é obtida com a incorporação de 2% e 3% de cera de carnaúba. Isto pode representar uma menor temperatura de produção e compactação de misturas asfálticas.

Todas as misturas apresentaram redução das temperaturas de usinagem e compactação, porém, essa redução foi de aproximadamente, 6%, não se comportando como uma mistura morna.

Classificação da Cera de Carnaúba

De acordo com os ensaios químicos realizados na cera de carnaúba, foi possível observar uma estabilidade térmica, indicando que a temperatura de 285°C, as propriedades físicas e químicas se mantêm e que a sua utilização em misturas asfálticas contribui para a redução das temperaturas de usinagem e compactação. Indica ainda através da curva termogravimétrica que apresenta perda massa reduzida, contribuindo para conservação das propriedades físicas do ligante.

Ensaio Mecânicos

- **Ensaio de Resistência à Tração Diametral:**

Todas as misturas asfálticas estudadas (modificadas ou não) apresentaram-se dentro do especificado na norma. A adição dos teores de cera de carnaúba ocasionaram uma diminuição da resistência à tração das misturas asfálticas.

- **Ensaio de Módulo de Resiliência:**

Em relação aos resultados do ensaio de Módulo de Resiliência (MR), observou-se que as misturas que apresentaram maior MR foram as com CAP puro e 3% de cera de carnaúba. Observou-se que a mistura que apresenta 3% de cera apresentou parâmetros similares a mistura com CAP puro. Conseguiu-se com a incorporação de 3% de cera de carnaúba, um maior MR mesmo a temperaturas de usinagem e compactação mais baixas.

O MR da mistura com 3% de cera ficou 0,16% inferior se comparado a mistura com CAP puro, enquanto que, as amostras de 1% e 2% de cera ficaram 4,4% e 14,4%, respectivamente, menores.

- **Ensaio de Lottman**

A adição dos teores de cera de carnaúba ao ligante asfáltico, aumentou significativamente, o índice de resistência retida à tração, apresentando uma maior adesão entre o agregado e o ligante nas condições da amostra parcialmente saturada. A adição de 2% de cera de carnaúba, ocasionou os melhores resultados, enquadrando-se nos parâmetros estabelecidos pela AASHTO T 283 (2007), como também pelo DNIT 031/2006.

- **Ensaio Vida de Fadiga**

O teor de 2% de cera de carnaúba, apresentou maiores valores de resistência ao dano por fadiga, levando-se em consideração o shift factor de laboratório para campo de 10^4 , no qual a mistura de 2% de cera teria um Nf de 2×10^7 , onde nenhuma outra mistura chegaria perto desse valor.

- **Ensaio de *Flow Number***

Todas as misturas apresentaram valores baixos de *Flow Number*. Observou-se que a adição de teores de cera de carnaúba não mudaria o tipo de tráfego que a mistura poderia ser submetida. Vale salientar que, um dos motivos para que a mistura com CAP puro e, conseqüentemente, com teores de cera não terem se enquadrados em um tráfego considerado pesado ou extremamente pesado, foi à ausência do filler na sua composição.

- **Módulo Dinâmico**

Observou-se que todas as misturas estudadas (com e sem teores de cera de carnaúba), apresentaram comportamentos bastantes similares quando se estuda a relação entre a queda de rigidez da amostra, à medida que a temperatura vai aumentando. A rigidez do material diminui à medida que ocorre a redução da frequência de aplicação da carga. As amostras que apresentaram 2% de cera de carnaúba foram as que obtiveram maiores valores de módulo dinâmico nas temperaturas mais altas (21,1°C e 37,8°C).

5.1 Considerações Finais

Foi possível observar que a adição de teores de cera de carnaúba aferiu boas propriedades a 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.

Conclui-se que o teor de 2% de cera de carnaúba 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. Portanto, o teor ideal para a incorporação ao ligante asfáltico. Logo, a utilização da cera

de carnaúba pode ser considerada uma alternativa para apresentar melhorias nas propriedades físicas e mecânicas do ligante asfáltico.

5.2 Sugestões para Pesquisas Futuras

Baseados nos resultados mostrados em tal pesquisa, listaram-se algumas sugestões para serem exploradas em pesquisas futuras:

- Pesquisas realizadas pela IBGE (2016), mostram que a maior porcentagem de produção brasileira é do pó oriundo da carnaúba, pois é a partir do beneficiamento do pó que forma-se a cera de carnaúba. Poderia ser realizados estudos os quais fizessem a incorporação do pó da carnaúba nas misturas asfálticas, buscando propriedades semelhantes as encontradas nesta pesquisa. Assim, a indústria de pavimentação teria mais matéria-prima, para a produção em larga escala;

- A redução das temperaturas de usinagem e compactação encontradas nesta pesquisa, não se enquadram nas chamadas misturas asfálticas mornas. Portanto, a partir da adição de teores de cera de carnaúba, essas temperaturas poderiam ter uma maior redução (por exemplo, -10 a -20°C), observando suas propriedades físicas e mecânicas, para que a partir de então possam ser classificadas em misturas mornas;

- A utilização de trechos experimentais no sentido de validar os resultados encontrados em laboratório, proporcionando assim, uma relação campo-laboratório;

- A verificação de outras faixas granulométricas e agregados poderiam ser investigados para verificar especialmente o dano por umidade;

- O estudo das porcentagens de gases emitidas a partir das misturas asfálticas convencionais e mornas. Assim, poderia comprovar a diminuição dos fumos ao utilizar-se das misturas asfálticas mornas;

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.

ABNT, 2000, Materiais betuminosos - Determinação do ponto de amolecimento Método do anel e bola. Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 6560.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO TP 62**: Determining modulus of hot mix asphalt (HMA). Estados Unidos, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2041**: Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures. Estados Unidos, 2011.

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 4402**: Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer, EUA, 2007.

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

ARAO, M. – **Análise da vida de fadiga de pavimentos flexíveis em diferentes misturas**. Projeto de graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 11 p., 2014.

BARTHEL, W.; MARCHAND, J.-P.; DEVIVERE, M., **Warm Asphalt Mixes by Adding a Synthetic Zeolite**. In: Eurasphalt & Eurobitume Congress, Vienna, Austria, 2004.

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.

BONAQUIST, R. **Mix design practices for warm mix Asphalt**. NCHRP report 691. National Cooperative Highway Research Program. Transportation Research Board. Washington D.C. 2011

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

BUTTON, J. W.; ESTAKHRI, C.; WIMSATT, A. **A Synthesis of Warm-Mix Asphalt**, Texas A&M University System, EUA, 2007.

BUTZ, T. **Warm Asphalt Mix – Technologies, Research and Experience**. Sasol Wax GmbH, 2009.

CARVALHO, J. B. M, **Ensaio sobre a carnaubeira**. EMPARN; Natal, 1982.

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

Construction and Building Materials <
<https://www.journals.elsevier.com/construction-and-building-materials>> acessado em
maio de 2016.

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

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 095**:. Cimento Asfáltico de Petróleo – Especificações de material. 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 195/97** - Agregados - determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1997.

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

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 095/2006. Cimento asfáltico de petróleo – Especificação do material. Rio de Janeiro,
2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
DNIT - ME 383: Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero –
ensaio Cântabro: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA E TRANSPORTE. **DNIT**
- **ME 138/94** - Misturas betuminosas - determinação da resistência à tração por
compressão diametral. Rio de Janeiro, 1994.

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.

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

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

_____ **DNIT 031 ES** Pavimentos Flexíveis - Concreto Asfáltico. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2006.

_____ **DNIT** Manual de Pavimentação, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2006.

_____ **DNIT 136 ME** Pavimentação Asfáltica - Misturas Asfálticas –Determinação da resistência à tração por Compressão Diametral. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2010.

EAPA. European Asphalt Pavement Association. **The use of warm mix asphalt** – EAPA position paper. Brussels. 2010.

Farmacopéia Brasileira <[http:// www.anvisa.gov.br/farmacopeiabrasileira/index.htm](http://www.anvisa.gov.br/farmacopeiabrasileira/index.htm)->. Acessado em junho de 2016

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

Fenix Ceras Abelha <<http://www.fenixceras.com.br/>> Acessado em maio de 2016.

FILHO, W. M.; SOARES, J. B.; BRANCO, V. T. F. C.; SOARES, S. A. **Influência da Redução das Temperaturas de Usinagem e de Compactação no Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas**, p. 1-3.

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

FONTES, L. P. T. L. **Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos**. Tese de Doutorado. Universidade do Minho. Universidade Federal de Santa. 545 p., 2009.

GAMA, D. A. **Utilização do Etileno Acetato de Vinila (EVA) descartado pela indústria calçadista em misturas asfálticas**. 2013. Dissertação, Universidade Federal de Campina Grande, Brasil.

GERMAN ASPHALT PAVING ASSOCIATION (GAPA). **Warm Mix Asphalts**. Elke Schlüter communication agency, Alfter, 2009.

IWÁNSKI, M.; MAZUREK, G. **The influence of rheological properties of bitumen with synthetic wax on changing resilient modulus of elasticity of asphalt concrete**, Proc. of 5-th Euroasphalt & Eurobitume Congress (on USB stick), 13-15th June 2012, Istanbul, 0353, 8, 2012.

LEITE, L. F. M. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímero**. Tese de Doutorado, IMA/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 1999.

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.

LUCENA, L. C. F. L. - **Verificação da influência do uso de resíduos industriais como filler em misturas asfálticas sob o efeito da presença d'água.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, 2009.

MANUAL DE ASFALTO. Instituto de Asfalto. Série do Manual N° 4 (MS-4), 1989.
MEDINA, J; & MOTTA, L. M. Mecânica dos Pavimentos. Rio de Janeiro, Editora UFRJ, 2005.

MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO. Rio de Janeiro: DNER, 1996.

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. 490 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

MATOS, J. R.; MERCURI, L.; BARROS, G. **Análise térmica aplicada a fármacos e medicamentos.** In: STORPIRTIS, S. et al. Biofarmacotécnica. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2009.

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.

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.

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.

OLIVEIRA, F. F. **Contribuição da análise térmica no desenvolvimento de formulações de batons**. Instituto de Química – USP (Dissertação de Mestrado), 2002.

PEREIRA, T. M. M., **Caracterização Térmica (TG/DTG, DTA, DSC-fotovisual) de Hormônios Bioidênticos (Estríol e Estradiol)**. Dissertação de mestrado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciências Farmacêuticas da UFRN, Natal, RN, 2013.

PROWELL, B.D., **Warm Mix Asphalt – The International Technology Scanning Program – Summary Report**, FHWA, AASHTO, EUA, 2007.

PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C.; FRANK, B. **Warm-mix asphalt: best practices**. 3^a ed. Lanham: National Asphalt Pavement Association, 2012. Quality Improvement Series 125.

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.

RISCH NETO, O. A. **A carnaubeira**. Disponível em: < <http://www.floresta.ufpr.br/>> Acesso em: 10 de janeiro de 2018.

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.

RUBIO, M. C.; MORENO, F.; MARTINEZ-ECHEVARRÍA, M. J.; MARTÍNEZ, G.; VÁZQUEZ, J, M. **Comparative analysis of emissions from the manufacture and use of hot and half-warm mix asphalt**. Journal of cleaner production, 41, 2013.

SALES, P. M. **Avaliação das Características Físicas e Mecânicas de Misturas Asfálticas Modificadas com Adição de CCBIt**, 2015. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.

SANTANA, H. **Manual de pré-misturados a frio**. Rio de Janeiro: IBP/Comissão de Asfalto, 1993.

SANTOS, K.P. – **Estudo da incorporação de argilas montmorilonitas como modificador em cimentos asfálticos de petróleo**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, 2012.

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.

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

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

