

**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

**AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DE MISTURAS
ASFÁLTICAS MODIFICADAS COM ADIÇÃO DO CCBit**

Patrícia de Macedo Sales

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

Campina Grande – Paraíba

Agosto de 2015

**AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DE MISTURAS
ASFÁLTICAS MODIFICADAS COM ADIÇÃO DO CCBIt**

Patrícia de Macedo Sales

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

Área de Concentração – Geotécnica

Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena

Orientador

Profa. Dra. Lêda Chistine de Figueiredo Lopes Lucena

Co-Orientadora

Campina Grande – Paraíba

Agosto de 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autora: Patrícia de Macedo Sales

Título: AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS COM ADIÇÃO DO CCBIt

Dissertação defendida e aprovada em: __/__/____

Banca Examinadora

(Assinatura): _____

Prof. D.Sc. (Orientador) Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura): _____

Profa. D.Sc. (Co-Orientadora) Lêda Chistine de Figueiredo Lopes Lucena

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura): _____

Prof. Ph.D. (Examinador Externo) Lélío Antônio Teixeira Brito

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS

(Assinatura): _____

Prof. D.Sc. (Examinador Interno) John Kennedy Guedes Rodrigues

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

DEDICATÓRIA

À Deus e, principalmente, aos meus pais, que com muito amor e esforço me prepararam para a vida, mostrando que nada é fácil, mas que com determinação conquistamos nossos objetivos. Obrigado pelo amor e todo o apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por tudo o que Ele proporciona em minha vida.

Aos meus pais, Maria das Graças e Paulo Sales, por toda dedicação e esforço para conclusão dos meus estudos e dos meus irmãos.

Aos meus irmãos, Paulo Júnior e Daniella, e a minha cunhada Fernanda presentes em todos os momentos, me apoiando e incentivando sempre.

Ao meu melhor amigo, companheiro e esposo, Romney Silva, por tornar meus dias mais alegres e por toda ajuda direta e indireta na realização deste trabalho.

Aos meus orientadores, Adriano e Lêda, por todo ensinamento, dedicação, e por fornecerem ferramentas para meu crescimento profissional e pessoal, muito obrigado.

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

Aos demais amigos do LEP, Ana, Arimatéia, Daniel, Dennyele e Jonny por toda ajuda nas diferentes etapas, obrigado pelo apoio e amizade.

Às minhas 'alunas', Jeovanesa e Thalita pela ajuda e disposição, espero que também possa ter contribuído um pouco na formação de cada uma.

À minha amiga Alice, por me incentivar a fazer o mestrado e pelo apoio e companheirismo durante a jornada.

Aos meus familiares, pela torcida e confiança.

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

À todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, meus mais sinceros agradecimentos.

RESUMO

As misturas asfálticas convencionais satisfazem às necessidades de durabilidade e resistência das rodovias sob a ação do tráfego e as distintas condições climáticas. Pesquisas em pavimentação têm buscado alternativas para reduzir o consumo de combustíveis e a emissão de gases causadores do efeito estufa gerados durante a usinagem do ligante e aplicação deste. As misturas mornas vêm sendo estudadas como tal alternativa, pois, além disso, são capazes de minimizar o desconforto aos trabalhadores, em virtude do elevado calor e excessiva fumaça proveniente da aplicação e compactação da mistura asfáltica quando nas rodovias. Diante disto, as misturas mornas têm recebido atenção crescente por utilizar aditivos ou modificadores das propriedades físicas e reológicas dos asfaltos. Estes são capazes de diminuir as temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas, sem, comprometer as características mecânicas das misturas asfálticas. Neste contexto o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da incorporação do aditivo CCBIt a partir da caracterização, física e mecânica de misturas asfálticas. Para isso, foram realizados ensaios reológicos de Penetração, Ponto de Amolecimento, Viscosidade Brookfield e Perda de massa (RTFO) com o ligante com e sem o aditivo; foram dosadas misturas asfálticas com três diferentes concentrações do aditivo: 2,0; 2,5 e 3,0%, e analisado o comportamento mecânico das misturas por meio dos ensaios de Resistência à Tração, Módulo de Resiliência e Lottman Modificado. A partir dos resultados verificou-se que as misturas asfálticas com uso do *CAP+CCBit-113AD* possuem a vantagem de reduzir as temperaturas de usinagem e compactação em até 10,8 °C, com 3% de CCBIt, sem prejuízo ao comportamento mecânico, indicando que tais misturas podem ser usadas como alternativas a misturas asfálticas convencionais.

Palavras Chave: ligante asfáltico, misturas mornas, CCBIt, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Conventional asphalt mixtures meet durability requirements and resistance of roads under traffic and different climatic conditions. Research in paving have sought alternatives to reduce fuel consumption and the emission of gases causing the greenhouse effect generated during fabrication of the binder and application of this. Warm mixtures have been studied as such alternative because, in addition, are able to minimize discomfort to workers, because of the high heat and excessive smoke from the application and compaction of the asphalt mixture when the roads. In addition, to minimizing the discomfort to workers, because of the high heat and excessive smoke from the application and compaction of the asphalt mixture when the highways. Given this, the warm mixtures have received increasing attention by using additives or modifiers of the physical and rheological properties of asphalt. These are capable of reducing the fabrication and compaction temperatures of asphalt mixtures, without altering their characteristics. The objective of this study was to evaluate the physical characteristics of the asphalt binder CAP 50/70 and their behavior in asphalt mixtures with and without the additive CCBit-113AD. For this, rheological Penetration tests were performed as well as Softening Point, Brookfield viscosity and mass loss (RTFO) with the binder with and without the additive; asphalt mixtures were measured with three different additive concentrations: 2.0; 2.5 and 3.0%, and analyzed the mechanical behavior of the mixtures through the tests of Tensile Strength, Resilience Modulus and Lottman Modified. From the results it was found that the asphalt mixtures with use of CAP + CCBit-113AD have the advantage of reducing the fabrication and compaction temperatures up to 10.8 ° C, with 3% CCBit, without prejudice to the mechanical behavior, indicating that such mixtures may be used as alternative to conventional asphalt mixtures.

Palavras Chave: asphalt, war mix asphalt, CCBit-113AD, mechanical characteristics.

SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 Objetivos	20
1.1.1 Objetivo Geral	20
1.1.2 Objetivos Específicos.....	20
1.2 Justificativa	21
2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1 Misturas Asfálticas.....	22
2.1.1 Influência da temperatura nas misturas	25
2.2 Misturas Mornas	28
2.2.1 Breve Histórico	29
2.2.2 Classificação das misturas mornas.....	31
2.2.2.1 Aditivos orgânicos ou ceras	31
2.2.2.1.1 CCBit.....	32
2.2.2.1.2 Sasobit	33
2.2.2.1.3 Óleo de Mamona	34
2.2.2.2 Aditivos surfactantes	34
2.2.2.2.1 Rediset WMX.....	35
2.2.2.2.2 CECABASE RT.....	36
2.2.2.3 Asfalto espumado.....	37
2.2.2.3.1 Zeólitas	38
2.2.2.3.2 Aspha Min	39
2.2.2.3.3 WAM Foam.....	40
2.2.3 Vantagens e Desvantagens	41

2.3 Considerações Finais	42
3.0 MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
3.1 Materiais	45
3.1.1 Ligante asfáltico	45
3.1.2 Agregados.....	46
3.1.3 CCBIt 113AD.....	46
3.2 Métodos.....	47
3.2.1 Propriedades físicas e mecânicas dos materiais	47
3.2.1.1 Agregados.....	47
3.2.1.1.1 Granulometria.....	47
3.2.1.1.2 Absorção e Massa Específica dos Agregados Graúdos	48
3.2.1.1.3 Massa Específica do Agregado Miúdo.....	49
3.2.1.1.4 Abrasão Los Angeles	50
3.2.2 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).....	50
3.2.2.1 Mistura do CAP com o CCBIt 113 AD.....	50
3.2.2.2 Ensaio de Penetração.....	53
3.2.2.3 Ponto de Amolecimento	54
3.2.2.4 Viscosidade Rotacional.....	54
3.2.2.5 RTFO (Estufa de Filme Fino Rotativo).....	55
3.3 Caracterização mecânica.....	56
3.3.1. Dosagem Superpave	56
3.3.2 Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral	59
3.3.3 Módulo de Resiliência.....	59
3.3.4 Lottman Modificado.....	60
4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	62
4.1 Caracterização Física do CCBIt	62

4.2 Caracterização Física dos Agregados	63
4.2.1 Granulometria.....	63
4.2.2 Massa Específica	64
4.2.3 Abrasão Los Angeles	64
4.2.4 Índice de Forma.....	65
4.2.5 Curvas de Fuller	65
4.3 Caracterização do CAP	69
4.3.1 Ensaio de Penetração.....	69
4.3.2 Ponto de Amolecimento	70
4.3.3 Viscosidade Rotacional	71
4.3.4 Perda de Massa.....	75
4.4 Dosagem das Misturas Asfálticas	76
4.5 Caracterização Mecânica	78
4.5.1 Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral	78
4.5.2 Módulo de Resiliência.....	80
4.5.3 Lottman Modificado.....	82
4.6 Considerações Finais	83
5.0 CONCLUSÕES	84
5.1 Sugestões para Futuras Pesquisas	85
6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Aditivos orgânicos.....	32
Tabela 02 – Aditivos Surfactantes.....	35
Tabela 03 – Asfalto Espumado.....	37
Tabela 04 – Caracterização do CAP.....	45
Tabela 05 – Ensaio e normas utilizadas para caracterização dos agregados.....	47
Tabela 06 – Normas dos ensaios de caracterização física do CAP.....	53
Tabela 07 – Substâncias presentes na composição do CCBit.....	62
Tabela 08 – Granulometria dos agregados.....	63
Tabela 09 – Massa específica dos agregados.....	64
Tabela 10 – Resultados de Índice de Forma dos agregados graúdos.....	65
Tabela 11 – Composição dos agregados estabelecida com a aproximação do Limite Inferior.....	66
Tabela 12 – Composição dos agregados estabelecida com a aproximação do Limite Intermediário.....	67
Tabela 13 – Composição dos agregados estabelecida com a aproximação do Limite Superior.....	68
Tabela 14 – Resultados do ensaio de penetração antes e após o RTFO.....	69
Tabela 15 – Penetração retida.....	70
Tabela 16 – Resultados do ensaio de ponto de amolecimento antes e após o RTFO.....	70
Tabela 17 – Aumento de temperatura após o RTFO.....	71
Tabela 18 – Resultados de viscosidade do CAP Puro e com incorporação do CCBit.....	72
Tabela 19 – Temperaturas de mistura e compactação.....	75

Tabela 20 – Resultados da perda de massa após o ensaio RTFO.....	75
Tabela 21 – Parâmetros volumétricos obtidos em função dos Teores de CAPs iniciais calculados.....	77
Tabela 22 – Parâmetros volumétricos obtidos em função dos teores de CAPs estimados.....	78
Tabela 23 – Resultados do ensaio de Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral.....	78
Tabela 24 – Resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência.....	80
Tabela 25 – Resultados da Relação da Resistência Retida à Tração.....	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Curva granulométrica com os tipos de graduação: a) Representação convencional de curvas granulométricas; b) Representação de curvas granulométricas pelo SHRP – Superpave (BERNUCCI <i>et al.</i> 2008).....	23/24
Figura 02 – Classificação de misturas de acordo com a temperatura e consumo de combustível para produção (D´ANGELO ET AL., 2008).....	25
Figura 03 – Comparação entre misturas quente e morna recém produzidas (PROWELL E HURLEY, 2007).....	26
Figura 04 – Imagens infravermelho de pavimentos em construção: a) mistura quente à esquerda; b) mistura morna à direita (PROWELL E HURLEY, 2007).....	27
Figura 05 – Sasobit, em flocos e pastilha, respectivamente. (PROWELL E HURLEY, 2005).....	33
Figura 06 – Amostra de Rediset WMX (PEREIRA, 2010).....	35
Figura 07 – Amostra de CECABASE RT (PEREIRA, 2010).....	36
Figura 08 – a) Estrutura de uma zeólita; b) Átomos de oxigênio e alumínio; e c) Representação simplificada.....	38
Figura 09 – Amostra de Aspha Min.....	40
Figura 10 – Esquema de produção e aplicação WMA Foam. (MOTTA, 2011).....	40
Figura 11 – Fluxograma de Caracterização dos Materiais.....	44
Figura 12 – CAP 50/70 utilizado na pesquisa.....	45
Figura 13 – Agregados: areia, pó de pedra, brita 12.5mm e brita 19mm.....	46
Figura 14 – CCBIt 13AD.....	47
Figura 15 – Brita 12,5 em imersão.....	48
Figura 16 – Verificação da massa submersa da brita 19mm.....	48

Figura 17 – Secagem do material.....	49
Figura 18 – Picnômetro com amostra e água.....	50
Figura 19 – Fluxograma da incorporação do CCBit ao CAP e posterior caracterização física.....	51
Figura 20 – Misturador (FISATOM, Modelo 72) com CAP e CCBit.....	52
Figura 21 – Inserção do CCBit no misturador com CAP.....	52
Figura 22 – Penetrômetro.....	53
Figura 23 – Realização do ensaio (início, durante e fim, respectivamente).....	54
Figura 24 – Viscosímetro Brookfield.....	55
Figura 25 – Aparelho de RTFO.....	55
Figura 26 – Fluxograma da Caracterização Mecânica.....	56
Figura 27 – Fluxograma de dosagem Superpave.....	58
Figura 28 – Compactador Giratório Superpave.....	58
Figura 29 – Prensa do ensaio de Resistência à Tração.....	59
Figura 30 – Prensa UTM-25 utilizada para o ensaio de Módulo de Resiliência.....	60
Figura 31 – Ensaio Lottman.....	61
Figura 32 – Difratoograma de Raios-X.....	63
Figura 33 – Curva granulométrica dos agregados.....	64
Figura 34 – Curva Granulométrica Inferior.....	66
Figura 35 – Curva Granulométrica Intermediária.....	67
Figura 36 – Curva Granulométrica Superior.....	68
Figura 37 – Resultados do ensaio de penetração antes e após o RTFO.....	69
Figura 38 – Resultados do ensaio de ponto de amolecimento antes e após o RTFO.....	71

Figura 39 – Viscosidade do CAP Puro e com incorporação do CCBit.....	72
Figura 40 – Curvas Variação da Viscosidade Brookfield em função da temperatura [CAP Puro].....	73
Figura 41 – Curvas Variação da Viscosidade Brookfield em função da temperatura [CAP com 2,0% de CCBit].....	73
Figura 42 – Curvas Variação da Viscosidade Brookfield em função da temperatura [CAP com 2,5% de CCBit].....	74
Figura 43 – Curvas Variação da Viscosidade Brookfield em função da temperatura [CAP com 3,0% de CCBit].....	74
Figura 44 – Resultados da perda de massa após o ensaio RTFO.....	75
Figura 45 – Compactação com os teores de 3,5%, 4,0%, 4,5% e 5,0% em Ni, Np e Nm.....	77
Figura 46 – Resultados do ensaio de Resistência à Tração.....	79
Figura 47 – Resultados do ensaio de Resistência à Tração (OLIVEIRA, 2014).....	80
Figura 48 – Resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência.....	80
Figura 49 – Resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência (SOUZA, 2012).....	81
Figura 50 – Resultados da Resistência Retida à Tração.....	82

LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEMA	Asphalt Emulsion Manufacturers Association
ASTM	American Society for Testing Materials
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CP	Corpo de Prova
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EDX	Energy Dispersive X-ray
EPI's	Equipamentos de Proteção Individual
EUA	Estados Unidos da América
FHWA	Federal Highway Administration
GI	Massa Específica do Ligante
Gmm	Massa Específica Máxima Medida da Mistura
HMA	Hot Mix Asphalt
HPAs	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
LEA	Low Energy Asphalt
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
LVDTs	Linear Variable Differential Transducer
Mag	Massa de agregado
ME	Método de Ensaio
MR	Módulo de Resiliência
N	Número
NBR	Norma Brasileira Registrada
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
NM	Norma Mercosul
Pag	Percentual de Agregado na Mistura
PB	Paráiba
PI	Teor de Ligante
Pli	Teor de Ligante Inicial

RBV	Relação Betume x Vazios
RRT	Relação de Resistência Retida à Tração
RT	Resistência à Tração
RTFO	Rolling Thin-Film Oven
SHRP	Strategic Highway Research Program
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavements
TCU	Temperatura de Compactação e Usinagem
TNM	Tamanho Nominal Máximo
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
VAM	Vazios do Agregado Mineral
V _{la}	Volume de Ligante Absorvido
V _{le}	Volume de Ligante Efetivo
V _v	Volume de vazios
WAM	

CAPÍTULO 1

1.0 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas aliadas ao crescimento da população têm levado a procura do uso de novas tecnologias com as premissas da sustentabilidade, tentando, basicamente, garantir uma vida com qualidade para as atuais e futuras gerações, juntamente com o desenvolvimento da nação.

O crescente número de veículos em circulação e as condições climáticas impulsionam a busca de materiais e tecnologias capazes de possibilitarem a construção de rodovias com melhor qualidade. Inúmeras pesquisas vêm sendo realizadas neste âmbito, tanto no cenário nacional como internacional.

A produção de misturas asfálticas ocorre, tradicionalmente, a temperaturas entre 140 e 180°C. Apesar de serem temperaturas elevadas, estas garantem maior estabilidade e durabilidade quando comparadas às misturas asfálticas a frio, que são executadas entre 20 e 50°C (BUDNY, 2012). Para a execução das misturas asfálticas à quente faz-se necessário a queima de combustíveis durante a usinagem da mistura. Uma alternativa, que vem sendo amplamente estudada, é reduzir o consumo de combustíveis diminuindo assim a emissão dos gases causadores do efeito estufa e contribuindo com o meio ambiente.

As misturas asfálticas mornas ou “Warm Mix Asphalt” surgiram com o intuito de preparar misturas asfálticas à temperaturas intermediárias,. Estas são as misturas asfálticas fabricados com alguma tecnologia diferencial, como uso de aditivos, asfalto espumado, zeólitas, entre outros, de modo a gerar melhores condições de trabalho, maiores lucros e menores danos ambientais, entre outros aspectos de qualidade e durabilidade, como a trabalhabilidade da mistura a menores temperaturas (BUDNY, 2012). Contudo, toda modificação introduzida na preparação das misturas asfálticas acarreta alteração no comportamento mecânico do material, e estes efeitos devem ser cuidadosamente estudados para avaliar a sua viabilidade técnica e econômica.

No início de 1990, países da Europa já utilizavam alguma técnica ou produto para produzir misturas mornas e emprega-las em obras. Desde o ano 2000, os Estados

Unidos mostraram interesse em iniciar estudos e aplicações desta tecnologia visando à diminuição das temperaturas nas quais as misturas asfálticas são processadas e compactadas, em relação às temperaturas usuais das misturas asfálticas (MOTTA, 2011).

No Brasil, estudos sobre a utilização de misturas mornas estão sendo desenvolvidos com mais frequência nos últimos cinco anos. O CCbit, aditivo utilizado nesta pesquisa, mostra-se promissor para reduzir a viscosidade dos ligantes asfálticos, reduzindo gastos no processo de usinagem e melhores condições de trabalho para os operários. Nesse contexto, o CCBit apresenta potencial para ser empregado como aditivo na produção de misturas asfálticas mornas. Este trabalho contribuirá para a ampliação da base de dados sobre este tipo de mistura no país, colaborando portanto com a consolidação desta nova tecnologia.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o efeito da incorporação do aditivo CCBit a partir da caracterização, física e mecânica em misturas asfálticas.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são os seguintes:

- verificar e quantificar a redução da temperatura com a incorporação de três teores de aditivo à mistura asfáltica;
- realizar a caracterização física dos materiais: CAP(Cimento Asfáltico de Petróleo), CCBit e agregados;
- avaliar as misturas modificadas, com o aditivo, em comparação às de referência, por meio de ensaios mecânicos de: resistência à tração, módulo de resiliência e ensaio de Lottman;

1.2 Justificativa

No desenvolver da pesquisa, identificou-se ainda incipiente a quantidade de estudos realizados sobre misturas asfálticas mornas em detrimento a relevância que estas podem ter no cenário da pavimentação. Entre os variados produtos presentes no mercado, que possibilitam a fabricação destas misturas, detectou-se o CCBit como foco da pesquisa por ser um material ainda pouco estudado no Brasil.

A redução de energia na produção de misturas asfálticas, necessária para alcançar temperaturas que permitam atingir a viscosidade ideal do ligante para envolver adequadamente os agregados, boa trabalhabilidade e fácil compactação são benefícios diretos e imediatos das misturas asfálticas mornas. Com a redução da temperatura em todas, ou em pelo menos uma destas fases, há redução de fumos e emissões de gases causadores do efeito estufa, nas usinas e nas obras, além de menor envelhecimento do ligante, preservando suas características de flexibilidade por mais tempo (MOTTA, 2011).

O principal objetivo das misturas asfálticas mornas é alcançar resistência e durabilidade equivalentes ou superiores às das misturas asfálticas a quente, mas em temperaturas que não degradem o ligante asfáltico, diminuindo as emissões de gases e os impactos sobre os operários (NEWCOMB, 2007).

Na última década, tanto na Europa quanto nos EUA foram desenvolvidas técnicas para se obter a redução da temperatura nas misturas, como o uso de zeólitas, naturais ou sintéticas, parafinas, ceras e produtos orgânicos, que resultaram em vários produtos de marca comercial registrada e técnicas de processamento. Algumas destas técnicas exigem mudanças de equipamentos e usinas (BUDNY, 2012).

Neste contexto e diante do potencial que o Brasil possui para pavimentação houve motivação para estudar o comportamento de misturas asfálticas mornas oriundas do processo de incorporação do aditivo CCBit. Esta adição tem o intuito de proporcionar: redução da exposição dos trabalhadores aos fumos e odores tanto na usina como na aplicação, redução do consumo de combustível na usina, menor emissão de gases causadores do efeito estufa, melhoria na trabalhabilidade da mistura asfáltica, redução do envelhecimento do ligante asfáltico por oxidação, entre outras.

CAPÍTULO 2

2.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo estão apresentados os dados bibliográficos relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa, tais como misturas asfálticas convencionais, com modificadores e misturas mornas; contemplando suas definições, as principais características, e diversos tipos de modificadores.

2.1 Misturas Asfálticas

As rodovias no Brasil apresentam desde 2001 um progressivo aumento no tráfego de veículos, e conseqüentemente, necessidade de suportar esforços mais constantes e, cada vez, de maior intensidade. A camada de revestimento é a responsável por absorver a maior parte do esforço. Estabilidade, durabilidade e flexibilidade estão entre as principais características para um bom desempenho da camada de revestimento (BERNUCCI *et al.* 2008).

A associação de materiais granulares com ligantes asfálticos resulta em misturas asfálticas. Esta deve ter composição granulométrica definida de acordo com a função e utilização do pavimento, assim como o tipo de ligante asfáltico, que tem como função assegurar as propriedades visco-elástica e proporcionar agregação dos materiais granulares. As misturas asfálticas podem ainda ter a presença de um ou mais aditivos, que serão incorporados dependendo das características desejadas a serem adquiridas ou melhoradas.

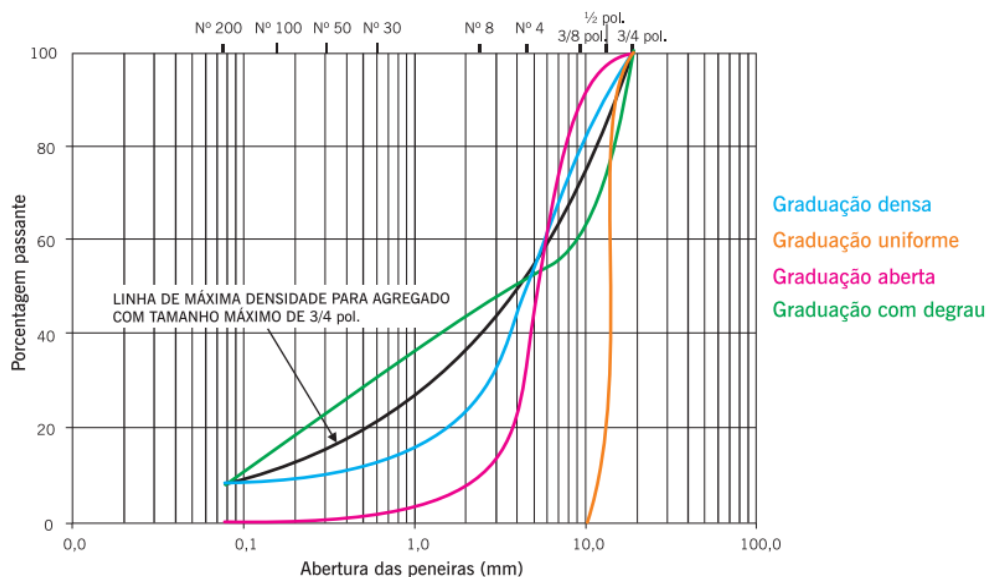
Existem vários métodos de produção e tipos de misturas asfálticas que são utilizadas nas camadas de revestimento do pavimento, e podem ser preparadas na própria pista ou em usinas móveis. As misturas asfálticas são produzidas conforme um projeto, que pode ser elaborado de acordo com o método Marshall, o mais utilizado no Brasil atualmente, ou o método SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements), em fase inicial de uso no Brasil, mas bastante conhecido nos Estados Unidos, onde foi desenvolvido.

No Brasil as misturas asfálticas betuminosas à quente são mais conhecidas como CBUQ (Concreto Betuminoso Usinado a Quente). Inúmeros projetos preveem o uso destes em obras de pavimentação de rodovias e estacionamentos.

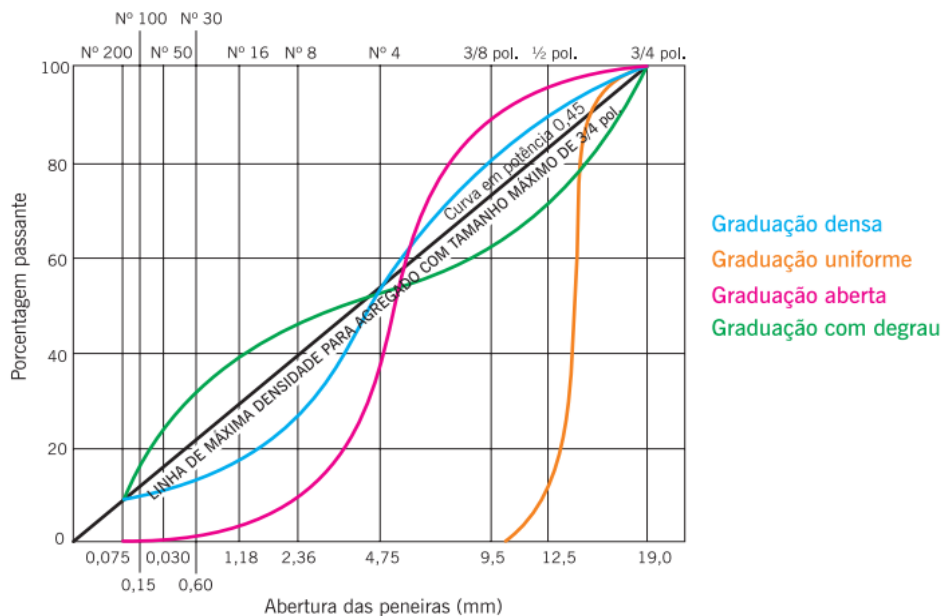
Segundo Bernucci et. al. (2008) as misturas asfálticas à quente possuem subdivisões de acordo com a graduação dos agregados e fíler, como ilustrado na Figura 01:

- graduação densa: apresenta poucos vazios, visto que sua curva granulométrica é contínua e bem graduada;
- graduação aberta: possui característica drenante, devido à presença de muitos vazios, tem curva granulométrica uniforme e agregados com dimensões parecidas;
- graduação uniforme: curva granulométrica com faixa estreita, há pequena diferença de tamanho entre as partículas; e
- graduação descontínua ou com degrau: curva granulométrica descontínua, maior presença de grãos com dimensões maiores e menores e menor presença de grãos com dimensões intermediárias.

Figura 01 – Curva granulométrica com os tipos de graduação: a) Representação convencional de curvas granulométricas; b) Representação de curvas granulométricas pelo SHRP – Superpave (BERNUCCI *et al.* 2008)



(a) Representação convencional de curvas granulométricas



(b) Representação de curvas granulométricas pelo SHRP-Superpave

As misturas asfálticas à quente são bastante utilizadas como revestimento de rodovias por possuírem boa resistência. Estas geralmente apresentam disposição de partículas com granulometria bem graduada, além de quantidade ideal de ligante asfáltico e sua temperatura de produção varia entre 145°C e 180°C (BERNUCCI *et al.*, 2008).

As propriedades mecânicas das misturas asfálticas são analisadas por meio dos ensaios, que são realizados em laboratório, e tentam reproduzir as condições de campo. Entretanto, às vezes é necessário o uso de fatores de ajuste campo-laboratório.

Firma-se, cada vez mais, a ideia de que para o pavimento atingir com eficácia a sua função estrutural e funcional é necessário um permanente controle tecnológico dos materiais no momento da construção do pavimento. Fundamentalmente, a temperatura de usinagem (temperatura de mistura) e de compactação devem estar de acordo com os projetos das misturas asfálticas. A temperatura não pode estar acima da chamada “queima da mistura”, nem abaixo da temperatura de projeto, visto que muitas de suas propriedades, como viscosidade, por exemplo, estão diretamente relacionadas à temperatura da mistura asfáltica.

A qualidade do ligante asfáltico diminui em função do tempo desde sua fabricação na refinaria até o final de sua vida útil em uma rodovia. Esta evolução é traduzida pela perda de suas propriedades mecânicas e é conhecida como

envelhecimento. Este é o principal fator que ocasiona problemas nas misturas asfálticas a quente (CEZARO JUNIOR et al. 2008).

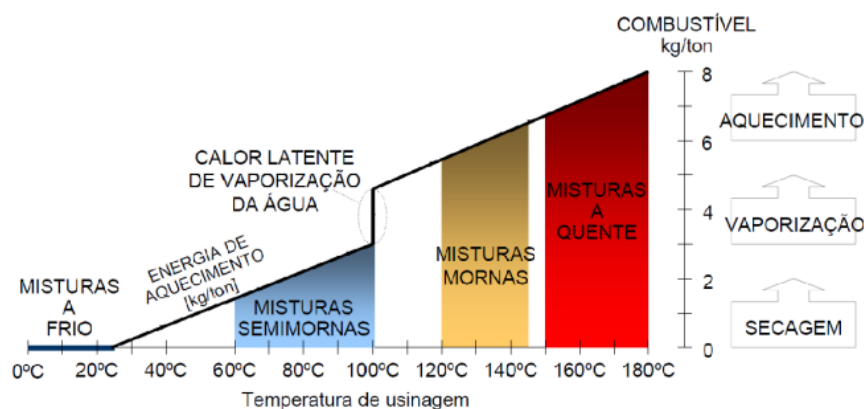
A durabilidade de uma mistura asfáltica pode ser definida como a sua habilidade em manter as propriedades reológicas, coesão e a adesão ao longo do tempo de uso. Entre os principais fatores que afetam a durabilidade de um revestimento asfáltico, podemos citar os endurecimentos oxidativo, evaporativo e exsudativo.

Segundo Lima (2003) o endurecimento oxidativo é considerado como a principal causa do envelhecimento dos asfaltos, embora a evaporação dos componentes mais voláteis dos betumes possa ser também significativa. Tal fato inicialmente ocorre durante a usinagem, onde os agregados aquecidos são misturados com o ligante asfáltico aumentando a sua viscosidade e diminuindo a penetração, devido à oxidação pelo contato com o ar, e a perda de voláteis (Roberts et al., 1996). Isto persiste durante as fases de estocagem, aplicação e compactação da mistura asfáltica, pois está em constante contato com o oxigênio e sob altas temperaturas, embora com menos intensidade. Depois disso se processa lentamente ao longo da vida útil do revestimento, até que o mesmo adquira uma rigidez excessiva, que facilita o trincamento por fadiga.

2.1.1 Influência da temperatura nas misturas

As misturas asfálticas podem ser classificadas quanto à temperatura de usinagem em quatro tipos: misturas a quente, misturas mornas, misturas semimornas e misturas a frio, como mostra a Figura 02.

Figura 02 – Classificação de misturas de acordo com a temperatura e consumo de combustível para produção (D'ANGELO *et al.*, 2008)



As misturas a quente são produzidas a partir do aquecimento dos materiais granulares e do ligante asfáltico com temperaturas entre 150 e 180°C. Essas misturas são bastante utilizadas nos serviços de pavimentação por apresentarem boa resistência e durabilidade.

As misturas a frio são produzidas em temperatura ambiente, entre 20 e 50°C, geralmente com o uso de emulsões e sem a necessidade de aquecer os materiais granulares, mas possuem resistência e durabilidade inferiores às misturas a quente.

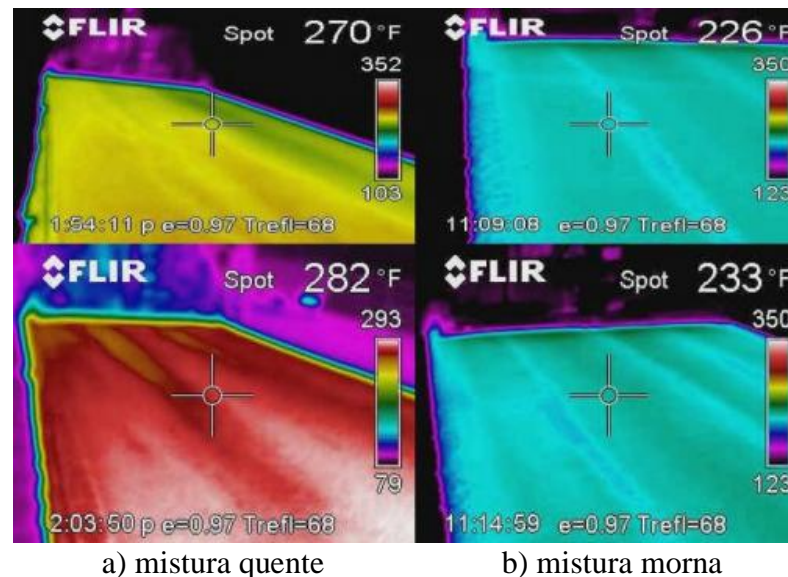
As misturas mornas e as semimornas são produzidas a temperaturas intermediárias às das misturas a quente e a frio, diferenciam-se pelo tipo de tecnologia utilizada e pela temperatura de compactação que nas semimornas é inferior a 100 °C e nas mornas superior a esta temperatura.

A Figura 03 ilustra a diferença do processo a quente e morno, durante o carregamento dos caminhões. Observa-se uma diminuição dos fumos produzidos no caso da mistura morna. A Figura 04 apresenta a diferença de temperatura entre a mistura a quente e morna durante a construção do pavimento.

Figura 03 – Comparação entre misturas quente e morna recém produzidas (PROWELL E HURLEY, 2007)



Figura 04 – Imagens infravermelho de pavimentos em construção: a) mistura quente à esquerda; b) mistura morna à direita (PROWELL E HURLEY, 2007)



Os ligantes asfálticos possuem propriedades físicas caracterizadas de acordo com a penetração, o ponto de amolecimento, a susceptibilidade térmica, a viscosidade e a ductilidade. A susceptibilidade térmica possui grande importância, sendo a temperatura um fator determinante, pois define seus estados físicos e de consistência (GAMA, *et al* 2013). Então se for possível manter as propriedades físicas destes materiais à temperaturas intermediárias, correspondentes das misturas mornas, a qualidade permanecerá a mesma das misturas convencionais.

A temperatura influencia diretamente na qualidade do asfalto, portanto a temperatura do manuseio à aplicação deve ser a mais baixa possível para minimizar o efeito do envelhecimento na qualidade do asfalto. Este quando exposto a altas temperaturas libera 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 (BUDNY, *et al.* 2012)

O asfalto encontra-se em estado semi-sólido em temperatura ambiente e à medida que é aquecido muda de estado chegando à forma líquida à altas temperaturas. Portanto faz-se necessário o seu aquecimento para que seja possível ocorrer o

recobrimento dos grãos do material granular, e por consequência uma mistura mais homogênea e de melhor trabalhabilidade.

Um ponto importante na qualidade das misturas a quente é o aquecimento do material granular, necessário para que quando ocorra à mistura, o ligante não perca temperatura e torne-se menos viscoso, dificultando a homogeneidade da mistura. Além de que, o aquecimento dos materiais granulares faz com que toda água adsorvida nos grãos seja expulsa evitando problemas com o efeito *stripping*, que se dá pela fragilidade ou perda da ligação adesiva devida à presença de água no sistema. Mas ao mesmo tempo torna-se um questionamento na qualidade das misturas mornas por, provavelmente, não secar adequadamente os grãos do material granular e aumentar as chances de ocorrer o efeito *stripping* (MOTTA *et al.* 2011).

2.2 Misturas Mornas

No processo de fabricação de misturas asfálticas convencionais tanto os materiais granulares quanto o ligante asfáltico devem ser aquecidos à 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 a necessidade de diminuir, cada vez mais, os agentes causadores do efeito estufa, e suas consequências aos meio ambiente (PÉREZ *et al.* 2013).

Com o intuito de preparar as misturas asfálticas à temperaturas intermediárias surgiram as misturas asfálticas mornas ou “Warm Mix Asphalt”, que basicamente são as misturas asfálticas fabricadas com alguma tecnologia diferencial de modo a gerar melhores condições de trabalho, maiores lucros e menores danos ambientais, entre outros aspectos de qualidade e durabilidade, com a trabalhabilidade da mistura a menores temperaturas (BUDNY, 2012). Contudo, toda modificação introduzida na preparação das misturas asfálticas acarreta alteração no comportamento mecânico do material, e estes efeitos devem ser cuidadosamente estudados para avaliar a sua viabilidade técnica e econômica.

Existem diversos métodos possíveis para a produção de misturas asfálticas mornas podendo haver modificação tanto no processo produtivo como no ligante asfáltico utilizado. Cada tecnologia deve ter sua análise de viabilidade considerando os benefícios adquiridos e a eficácia de sua utilização.

Técnicas de processamento e produtos de marca comercial registrada foram desenvolvidos para se obter a produção das misturas asfálticas mornas, como o uso de zeólitas, naturais ou sintéticas, parafinas, ceras e produtos orgânicos, que resultaram em vários produtos. Algumas destas técnicas exigem modificações na planta das usinas (BUDNY, *et al.* 2012).

2.2.1 Breve Histórico

Em 1956 o Professor Dr. H. Landis Csanyi, da Universidade do Iowa nos Estados Unidos, avaliou o potencial da espuma de asfalto, formada por meio da introdução de vapor de água no asfalto quente e que poderia ser utilizada como um ligante para solos e na busca por economia de energia e redução da emissão de gases (CHOWDHURY e BUTTON, 2008). A empresa Mobil Oil na Austrália, detentora da patente da descoberta de Csanyi, em 1968, passou a injetar água fria no lugar do vapor d'água dando uma agilidade maior ao processo de produção do betume-espuma (KRISTJANSDOTTIR *et al.*, 2007). Posteriormente, em 1977, a empresa Chevron publica o manual Bituminous Mix com informações sobre a metodologia de dimensionamento, a formulação e a produção de misturas betuminosas estabilizadas com emulsões. Em seguida, surgem os manuais sobre o assunto: A Federal Highway Administration (FHWA) em 1979 e a Asphalt Emulsion Manufacturers Association (AEMA) em 1981. (CHOWDHURY e BUTTON, 2008).

Posteriormente, Maccarone *et al.* (1994) estudou as misturas betuminosas com elevada quantidade de emulsão. Os autores concluíram que a aceitação mundial deste tipo de mistura ocorre devido à eficiência energética e às baixas emissões geradas. Entretanto, os mesmos autores concluíram que apesar das misturas asfálticas frias causarem menor impacto ao meio ambiente que as misturas asfálticas quentes não possuem o mesmo desempenho mecânico (CHOWDHURY e BUTTON, 2008). Em 1995 a empresa Shell patenteou uma técnica que utiliza dois componentes, a qual resultaria anos mais tarde no desenvolvimento da tecnologia WAM-Foam. Ainda em 1995 são executadas as primeiras rodovias com revestimento composto por mistura

morna, na Alemanha, por meio da adição de Aspha-Min®, um zeólito sintético. Posteriormente esta tecnologia foi aplicada também na Noruega e na Dinamarca (PROWELL e HURLEY, 2007);

Em 1996 foi criado o Fórum de Asfalto da Alemanha, após o ministro do Trabalho e das Relações Sociais da Alemanha questionar sobre os limites de exposição dos trabalhadores aos fumos de asfalto. O Fórum buscava estudar e debater sobre: os constituintes do asfalto, emissões de fumos, uso de equipamentos de proteção individual (EPI's), incidência de câncer nos operários do setor, tecnologias que propiciassem baixar a temperatura do processo de produção das misturas asfálticas e a redução da emissão de gases (NASCIMENTO et al. 2008). No ano seguinte o aditivo Sasobit® passou a ser comercializado na Europa, pela empresa Sasol Wax International AG (CHOWDHURY e BUTTON, 2008).

O Protocolo Quioto, com estabelecimento de metas para a redução da emissão de gases que agravam o efeito estufa, e o Fórum de Asfalto da Alemanha impulsionaram a busca por tecnologias capazes de produzir misturas asfálticas a temperaturas mais baixas. A partir de tal fato, na 1ª Conferência Internacional de Pavimentos Asfálticos em Sidney no ano de 2000 Harrison e Christodulaki apresentaram um método de produção de misturas mornas com espuma de asfalto. Este método foi testado em laboratório e em campo na Noruega, no Reino Unido e na Holanda, com tráfego de média intensidade entre os anos de 1996 e 1999, e foi apresentado no Congresso Eurobitume também no ano de 2000. Os resultados foram satisfatórios, pois contribuíram para a redução das emissões de fumos, CO₂ e poeira, além de economia de energia de 20 a 30% e de apresentarem bom desempenho mecânico (OLIVEIRA et al., 2014) .

Durante o “*World of Asphalt 2004*” em Nashville- EUA foram apresentados projetos e desenvolvimentos nesta área por diversas empresas e entidades rodoviárias. A partir de então, os Estados Unidos e a Europa, não mais pararam de estudar as vantagens da tecnologia de produção de misturas mornas (FERREIRA, 2009).

Um dos primeiros trabalhos a respeito de misturas mornas é publicado no Brasil por Souza Filho (2006), na dissertação de Mestrado deste autor na Universidade Federal do Ceará (UFC), tendo como título “Produção de Misturas Asfálticas Mornas pela

Inserção de Zeólitas”. Em 2007 os Estados Unidos enviam à Europa uma equipe de especialistas para avaliação e conhecimento da tecnologia de Misturas Mornas.

Cavalcanti (2010) realizou um estudo com diversos aditivos em misturas asfálticas, inclusive àqueles que possibilitam a redução de temperatura de produção e compactação e avaliou o efeito destes aditivos na vida de fadiga e na resistência à deformação permanente das misturas asfálticas. O autor concluiu que há melhoria na trabalhabilidade e na compactação, redução da permeabilidade e do endurecimento do ligante e conseqüente melhoria no desempenho em termos de resistência a formação de trincas

O relatório NCHRP 691 foi concluído em 2011 com o objetivo de apresentar métodos e procedimentos a serem utilizados em misturas mornas. 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) elaborou um estudo visando avaliar a diminuição do consumo energético e da emissão de poluentes gerados pela mistura morna em comparação com as misturas produzidas a temperaturas convencionais e concluiu que houve redução em cerca de três vezes da concentração total de HPAs (Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos) relativos ao material particulado dos ambientes de mistura morna, em relação à quente. Budny (2012) realizou estudo para avaliar o comportamento mecânico das misturas mornas, adotou como aditivos o CCBt113AD e o AD-WARM, e comprovou que todas as misturas têm boa perspectiva de resistir aos esforços do tráfego.

2.2.2 Classificação das misturas mornas

As misturas asfálticas mornas podem ser diferenciadas pelo tipo de tecnologia utilizada para reduzir a temperatura de trabalho. Os aditivos mais utilizados são: aditivos orgânicos ou ceras, aditivos surfactantes e asfalto espumado.

2.2.2.1 Aditivos orgânicos ou ceras

Os aditivos orgânicos são misturados ao ligante e têm a capacidade de modificar as propriedades reológicas deste, principalmente reduzindo sua viscosidade. Isso ocorre porque quando o aditivo é submetido a temperaturas superiores ao seu ponto de amolecimento. O tipo e quantidade de aditivo utilizado nas misturas devem ser estudados, prevendo também a temperatura que o pavimento será submetido na vida de

serviço. Isto para evitar problemas com deformação permanente e trincamento por baixas temperaturas, pois a baixa viscosidade e o excesso de aditivo podem enrijecer a mistura.

Os aditivos orgânicos podem ser incorporados isoladamente ao ligante ou diretamente na mistura permitindo a redução da temperatura em cerca de 30 a 40°C. Dentre alguns tipos de aditivos orgânicos estão: Asphaltan B[®], CCBit 113AD e Sasobit[®]. A Tabela 01 apresenta alguns produtos, do tipo orgânico, utilizados para a produção de misturas asfálticas mornas, encontrados no mercado.

Tabela 01 – Aditivos orgânicos

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

2.2.2.1.1 CCBit

Segundo Hutschenreuther (2010) o CCBit é um éster metílico de ácido graxo, fornecido na forma de pó, pode também ser encontrado na forma de grânulos ou flocos. Possui cor amarela esbranquiçada e não possui odor. Seu ponto de liquefação é de aproximadamente 139°C e ponto de fulgor de 279°C. Sendo insolúvel em água à 20°C e com densidade variando entre 0,99 – 1,01 g/cm³ (23°C). Seu pH é 9 (10g diluídos em 100 ml de água) e sua viscosidade dinâmica é de aproximadamente 15mPa.s (150°C).

Estudo realizado por Oliveira (2014) analisou o efeito do CCBit 113AD no comportamento mecânico de misturas asfálticas e constatou que a adição de 2,5% de aditivo pode reduzir a temperatura de usinagem e compactação em até 40°C, em referência a estas temperaturas do CAP puro. Este fato ocorre, contudo, sem haver perda significativa das características mecânicas das misturas originais, acarretando num

ganho de tempo de transporte e melhoria nas condições de trabalho dos trabalhadores. As misturas asfálticas modificadas produzidas nas menores temperaturas foram as que mais obtiveram ganhos de resistência à tração pós-ensaio de módulo de resiliência, aproximadamente 18%, contra apenas 3% das misturas puras produzidas em temperaturas mais elevadas.

2.2.2.1.2 Sasobit

O Sasobit é basicamente uma cera parafínica capaz de reduzir a viscosidade do asfalto durante o processo de produção de misturas asfálticas, consequentemente reduzindo as temperaturas de trabalho de 18 a 54 °C. A cera Sasobit é obtida a partir da gaseificação do carvão na presença de um catalizador e caracteriza-se por uma longa cadeia de hidrocarbonetos alifáticos de polimetileno (HURLEY e PROWELL, *et al.* 2005).

O Sasobit é produzido pela empresa alemã Sasol Wax GmbH fornecido na forma de flocos, recomendado para incorporar ao ligante, e na forma de pastilhas, recomendado para adicionar na mistura asfáltica (Figura 05).

Figura 05 – Sasobit, em flocos e pastilha, respectivamente. (PROWELL E HURLEY, 2005)



Segundo Prowell e Hurley (2007) os projetos de mistura asfáltica utilizando o Sasobit não necessitam de mudanças para produção e aplicação. Estes são realizados da mesma maneira que as misturas convencionais, apenas adicionando o produto na mistura e reduzindo a temperatura de usinagem. A adição do produto pode ser feita tanto na usinagem, junto ao ligante, como durante a mistura, ao ligante. A taxa do

produto adicionado ao ligante ou a mistura variam entre 0,8 a 4% em massa de ligante, não superior a isto por possível enrijecimento do asfalto à baixas temperaturas.

A temperatura final da mistura morna com Sasobit é 30 °C menor do que de uma mistura convencional (MOTTA, *et al.* 2011).

Hurley e Prowell (2005) observaram que a adição de Sasobit® à mistura asfáltica reduz os vazios de ar em até 0,87%, medidos no compactador giratório, e o teor ótimo de ligante asfáltico. Perceberam-se também melhoras na compactação das misturas a temperatura consideravelmente baixa de 88°C.

2.2.2.1.3 Óleo de Mamona

Assim como o CCBt, o óleo de mamona também é um éster metílico com uma utilização bastante difundida como biodiesel.

Souza (2012) estudou as propriedades mecânicas de misturas asfálticas com cimento asfáltico de petróleo modificado com óleo de mamona. Para as temperaturas de usinagem e de compactação, o óleo de Mamona reduziu a viscosidade do CAP, o que reflete em melhoria da trabalhabilidade das misturas asfálticas, garantido assim, um teor especificado de adição deste óleo sobre as propriedades mecânicas das misturas asfálticas. A presença do aditivo gerou uma diminuição destas temperaturas em média de oito graus centígrados (8 °C). Os resultados indicaram que o óleo de mamona pode ser utilizado como aditivo verde, promovendo um menor impacto sobre o meio ambiente e uma diminuição dos custos de nove por cento (9%) no quantitativo de óleo BPF utilizado na confecção da mistura convencional

2.2.2.2 Aditivos surfactantes

Os aditivos surfactantes agem na interface agregado/ligante com a capacidade de melhorar o cobrimento, a adesividade e a trabalhabilidade do ligante asfáltico a menores temperaturas. Diferentemente dos aditivos orgânicos, estes não alteram as propriedades reológicas do ligante e segundo Hanz (2010) foram realizados ensaios que comprovam tal fato, mas foram verificadas diferenças nas propriedades de lubrificação do asfalto.

Os aditivos surfactantes podem ser introduzidos previamente no ligante ou junto ao mesmo ligante na usinagem. Eles podem reduzir a temperatura da mistura em até 40 °C, a depender da tecnologia utilizada (Cecabase RT[®], Evotherm[™] e Rediset[™] WMX).

A Tabela 02 apresenta alguns produtos, aditivos surfactantes, utilizados para a produção de misturas asfálticas mornas encontrados no mercado.

Tabela 02 – Aditivos Surfactantes

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

2.2.2.2.1 Rediset WMX

O Rediset WMX é um aditivo surfactante desenvolvido pela empresa holandesa Akzo Nobel, fornecido na forma granular, como ilustra a Figura 06. O uso em misturas asfálticas permite uma redução superior a 30°C na temperatura de produção, reduzindo o consumo de combustível em cerca de 20% e, por consequência, a emissão de gases durante as fases de mistura e compactação (PEREIRA *et al.* 2010).

O Rediset WMX possui características anti-oxidante que permitem menor envelhecimento do ligante asfáltico e, conseqüentemente, possibilita alongar o tempo de vida útil do pavimento. Além de melhorar o recobrimento do ligante sobre a superfície dos agregados atuando como melhorador de adesividade. A utilização deste produto não requer alteração na planta usina.

Figura 06 – Amostra de Rediset WMX (PEREIRA, 2010)



Pereira (2010) verificou que o uso de Rediset apresentou melhor desempenho para redução de temperatura chegando a 114 °C e 124 °C de temperatura de compactação e de mistura, respectivamente, utilizando apenas 1% de aditivo na mistura asfáltica. O autor concluiu que com o aumento da percentagem de aditivo as misturas apresentaram menor estabilidade.

2.2.2.2.2 CECABASE RT

O CECABASE RT é um aditivo surfactante composto por agentes tensoativos, que agem na superfície, e pouco interferem na viscosidade do ligante, dificultando o uso da curva de viscosidade/temperatura para a obtenção das temperaturas de usinagem e de compactação. Cavalcanti e Ferreira (2009) relatam que a incorporação deste aditivo à mistura pode reduzir a temperatura de trabalho em até 50 °C.

Este produto é fornecido na forma líquida (Figura 07), é insolúvel em água e não inflamável, e é produzido pela empresa francesa CECA do grupo Arkema. O CECABASE RT atua também como melhorador de adesividade. Geralmente é utilizado em taxa de 0,2 a 0,5% da massa de ligante, podendo ser adicionado ao ligante, separadamente da mistura, ou juntamente durante a usinagem, não necessitando de mudanças na planta da usina.

Figura 07 – Amostra de CECABASE RT (PEREIRA, 2010)



Estudos laboratoriais realizados por Yader (2013) utilizando os ensaios de Prensa por Compactação por Cisalhamento Geratório, Duriez e Deformação Permanente, verificou-se que não houve mudança significativa nos resultados das misturas asfálticas mornas com o aditivo CECABASE RT quando comparados com a mistura asfáltica convencional.

O uso de CECABASE RT apresentou os melhores desempenhos (maior redução de temperatura) para percentagem de aditivo relativamente baixa, 0,15%, assim como com o Rediset, ambos analisados por Pereira (2010). O autor verificou que a recuperação elástica dos ligantes não sofrem grandes diferenças comparados à estes sem aditivo.

2.2.2.3 Asfalto espumado

Existem diferentes técnicas aptas a espumar o asfalto que, resumidamente, consistem em injetar uma pequena quantidade de água, agregado úmido ou material hidrofílico, como as zeólitas, no processo de usinagem. A água fria em contato com o asfalto aquecido passa para a forma de vapor que, por consequência, expande o ligante, diminuindo a viscosidade da mistura. A Tabela 03 apresenta algumas zeólitas e tecnologias, utilizados para a produção de misturas asfálticas mornas com asfalto espumado, encontrados no mercado.

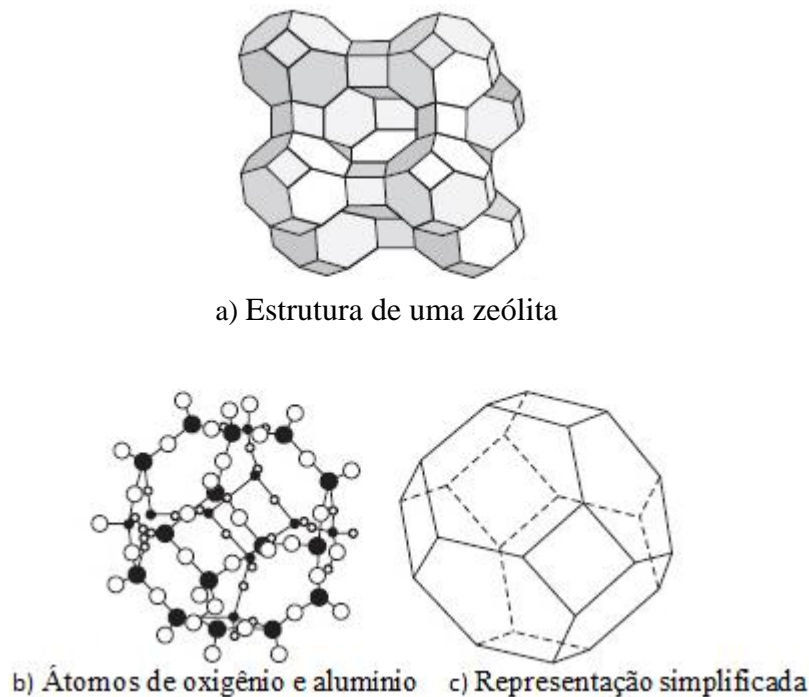
Tabela 03 – Asfalto Espumado

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

2.2.2.3.1 Zeólitas

As zeólitas são aluminosilicatos hidratados com estrutura porosa (cerca de 20% de vazios) e estrutura molecular (Figura 08) aberta que permitem a liberação e absorção de água. As zeólitas são bastante utilizadas na produção de misturas asfálticas mornas por sua capacidade de liberar a água gradativamente a temperaturas crescentes a 100 °C causando o efeito de espuma, além de possuírem as seguintes características: alto valor de umidade de saturação, estabilidade da sua estrutura cristalina quando se desidrata, propriedades de intercâmbio, canais moleculares uniformes, habilidade de absorver gases e água e propriedades catalíticas.

Figura 08 – a) Estrutura de uma zeólita; b) Átomos de oxigênio e alumínio; e c) Representação simplificada



As zeólitas podem ser naturais ou sintéticas. As zeólitas naturais são formadas em regiões onde rochas e cinzas vulcânicas reagem com água alcalina, geralmente apresentam certo grau de impureza devido à presença de outros minerais, metais e quartzo. Por esse motivo o seu uso é mais restrito para comercialização, mas mesmo assim são utilizadas pela facilidade com que são encontradas. As zeólitas sintéticas podem ser fabricadas ou por via úmida (hidrotérmico) ou por via seca (higrogel), ambos

são semelhantes aos processos de formação natural das zeólitas, havendo uma pequena variação entre o hidrotérmico e hidrogel (PÉREZ et al. 2013).

O estudo da produção e caracterização mecânica de misturas asfálticas obtidas a temperaturas intermediárias pela adição de zeólitas feito por Ayres (2006) chegou a conclusão que a zeólita sintética garantiu uma diminuição de 20°C na temperatura de usinagem e compactação das misturas betuminosas confeccionadas. Isto ocorre sem comprometer as propriedades mecânicas desejáveis para uma mistura asfáltica, tanto no que diz respeito a resistência à tração quanto com relação ao módulo de resiliência.

Ayres (2006) explica que tal fato foi atribuído à propriedade da zeólita de armazenar água no interior de seus poros. Com a adição do material zeolítico ao ligante, a temperatura faz com que a água contida em suas cavidades forme uma micro-espuma com o ligante, causando uma expansão do volume e conseqüente redução da viscosidade, propiciando a produção das misturas a uma TCU (Temperatura de Compactação e Usinagem) abaixo daquela determinada pela curva de viscosidade versus temperatura.

2.2.2.3.2 Aspha Min

O Aspha Min (Figura 09) é um tipo de zeólita sintética, na forma de pó, que propicia a produção de misturas mornas, é fabricado pela empresa alemã Eurovia Services GmbH. A taxa de incorporação desta zeólita é de 0,3% em massa de mistura, proporcionando uma redução da temperatura final da mistura de cerca de 30 °C se comparada as misturas convencionais.

Tanto a usinagem quanto o lançamento e compactação das misturas com Aspha Min são executados da mesma maneira que as misturas convencionais, com a liberação gradual da água. O tempo com boa trabalhabilidade destas misturas pode chegar de seis a sete horas. Existem diversas experiências com a utilização deste produto nos Estados Unidos e na Europa.

Figura 09 – Amostra de Aspha Min

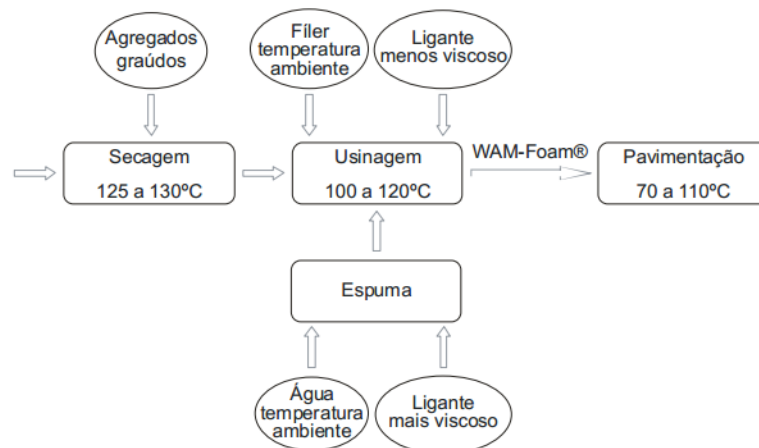


2.2.2.3.3 WAM Foam

A WAM Foam é uma tecnologia de produção de misturas mornas por formação de espuma, que consiste em adicionar dois tipos de ligantes asfálticos à mistura, sendo um asfalto de baixa e outro de alta viscosidade. Esta tecnologia é desenvolvida pela empresa inglesa Shell Bitumen juntamente com a empresa norueguesa Kolo-Veidekke.

O processo de produção WAM Foam é iniciado pela secagem dos agregados pétreos graúdos à temperaturas entre 125 e 130°C e em seguida são cobertos pelo ligante menos viscoso, como ilustrado no esquema da Figura 10. Posteriormente, o ligante de maior consistência, que é espumado com água separadamente, é misturado ao restante junto com a parcela de filler, assim a viscosidade da mistura diminui e a usinagem ocorre a temperaturas de cerca de 100 a 120°C e a mistura será compactada entre 70 e 110°C.

Figura 10 – Layout de produção e aplicação WAM Foam. (MOTTA, 2011)



Os projetos de misturas com a tecnologia WAM Foam requerem mudanças tanto em laboratório, com a instalação de um equipamento de espumejo, quanto na usina, com modificação na planta. Deve-se também determinar a temperatura “ótima” para que o asfalto de maior consistência possa ser espumado de maneira satisfatória e o ligante menos viscoso é que define a temperatura de aquecimento dos agregados.

2.2.3 Vantagens e Desvantagens

Estudos realizados nos últimos anos apresentam inúmeras vantagens da utilização de misturas mornas em comparação com as misturas convencionais, a quente, e a frio, como as relacionadas por Budny (2012):

- redução no envelhecimento do ligante asfáltico por oxidação – as temperaturas de usinagem e compactação mais baixas reduzem a perda de componentes nobres do ligante (como os maltenos) reduzindo o risco de oxidação do ligante e por consequente retarda o processo de fissuramento do mesmo;
- melhoria na trabalhabilidade da mistura asfáltica e facilidade da compactação;
- redução do consumo de combustível da usina em até 30% - devido a queda do consumo de energia necessária para o processo de produção da mistura;
- diminuição considerável da emissão de gases – a menor quantidade de combustível queimado para a produção das misturas faz com que melhore a qualidade do ar durante a produção e aplicação da mistura asfáltica;
- redução da exposição dos trabalhadores aos fumos e odores tanto na usina quanto na aplicação – proporcionando melhores condições de trabalho;
- possibilidade de aplicação em regiões mais frias;
- aumento na distância de transporte de mistura asfáltica, além de remendos e aplicações de camadas mais delgadas com melhor qualidade, devido ao menor potencial de resfriamento – isso se dá por estas apresentarem menor taxa de esfriamento e consequente menor gradiente térmico;

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

As misturas mornas também podem apresentar alguns problemas, como:

- trincamento precoce – o uso de temperaturas mais baixas pode ocorrer de o agregado não expulsar toda a água presente na sua estrutura, assim a umidade residual na interface ligante-agregado prejudica o potencial adesivo do ligante sobre a superfície do agregado;
- insuficiência de dados – algumas técnicas e produtos que vêm sendo testadas são muito recentes para aprovar ou rejeitar seu uso;
- redução de custos – é necessário verificar se a redução no consumo de energia é suficiente para diminuir os custos de produção, á depender do valor do aditivo utilizado talvez não haja compensação, em termos de custos;
- normas – por ainda serem produtos e tecnologias, relativamente, recentes a falta de normas dificulta a comparação entre estudos por não haver um procedimento e controle de execução padronizado.

2.3 Considerações Finais

Nesta fundamentação teórica foi possível inferir a importância dada aos estudos de novas tecnologias para a produção de misturas asfálticas mornas visando minimizar os efeitos negativos ao meio ambiente que as misturas asfálticas convencionais ocasionam.

Diversos são os produtos e tecnologias utilizados na pavimentação asfáltica e com diferentes formas de aplicação. Destaca-se a capacidade que estes produtos possuem em diminuir a temperatura de produção e aplicação das misturas asfálticas, gerando economia nos custos de produção e melhores condições de trabalho aos operários. O CCbit foi escolhido, como foco da pesquisa, por ser um tipo de aditivo

orgânico capaz de reduzir a viscosidade do ligante asfáltico além de, provavelmente, proporcionar melhoria na durabilidade do asfalto.

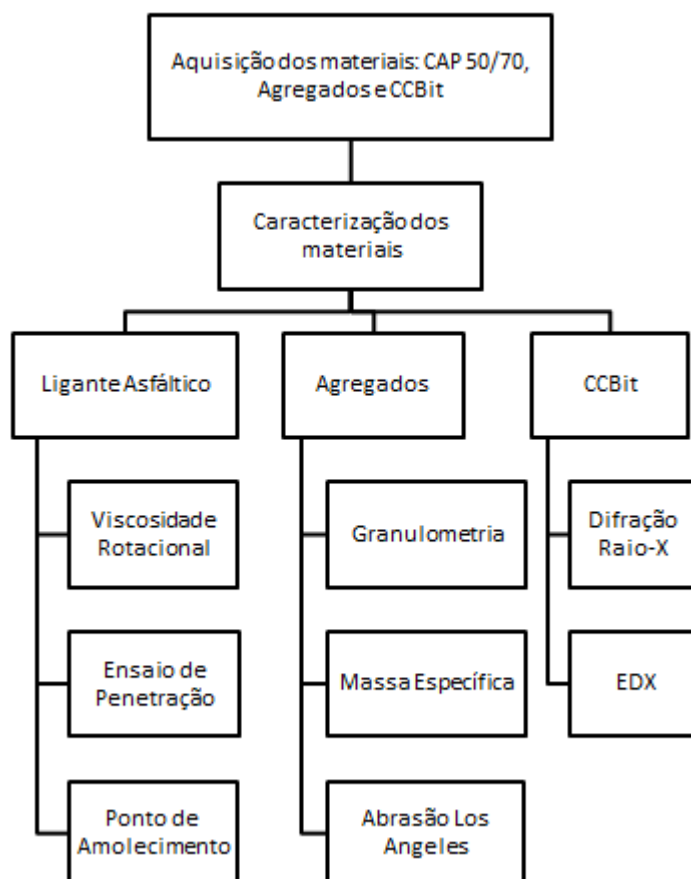
Estudos realizados mostram que o uso destas tecnologias é viável e, além da redução das temperaturas de compactação e aplicação reduzem o envelhecimento do ligante asfáltico e algumas podem ainda melhorar propriedades mecânicas das misturas asfálticas. Mas, observa-se também que há a necessidade de regulamentar/normatizar tais produtos e tecnologias para estabelecer um procedimento padrão para utilização destes e finalidade de cada um.

CAPÍTULO 3

3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais utilizados e as especificações para a obtenção das propriedades físicas dos agregados e dos ligantes asfálticos, assim como os procedimentos utilizados para estudar o comportamento mecânico das misturas asfálticas. A metodologia adotada está apresentada no Fluxograma da Figura 11.

Figura 11 - Fluxograma de Caracterização dos Materiais



O programa experimental dessa pesquisa foi dividido em etapas. A primeira parte da pesquisa teve o intuito de obter, preparar e classificar os materiais utilizados (ligante asfáltico, agregados e aditivo CCBit). Essa fase é importante para a exploração

e reconhecimento dos materiais para a realização da caracterização mecânica, em que os ensaios serão detalhados posteriormente.

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

3.1 Materiais

3.1.1 Ligante asfáltico

O ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa foi CAP 50/70 fornecido pela empresa JBR Engenharia (Figura 12), com caracterização física apresentada na Tabela 04.

Figura 12 – CAP 50/70 utilizado na pesquisa



Tabela 04 – Caracterização do CAP

Característica	CAP PURO	Limites	Norma
Penetração(0,1mm)	60	50 -70	NBR-6576
Ponto de amolecimento(°C)	46	46	NBR-6560
Viscosidade Brookfield 135 °C (cp)	450	274 (mín.)	NBR-15184
Viscosidade Brookfield 150 °C (cp)	221,5	112 (mín.)	NBR-15184
Viscosidade Brookfield 177 °C (cp)	80,3	57 – 285	NBR-15184

3.1.2 Agregados

Os agregados utilizados nesta pesquisa foram fornecidos pelo 1º Grupamento de Engenharia, com sede em João Pessoa-PB. As amostras fornecidas foram brita 19mm, brita 12,5mm, areia e pó de pedra (Figura 13), o fíler utilizado foi a cal hidratada.

Figura 13 – Agregados: areia, pó de pedra, brita 12.5mm e brita 19mm



3.1.3 CCBit 113AD

O aditivo CCBit-113AD (Figura 14) utilizado nesta pesquisa foi fornecido na forma de pó, com cor amarelo esbranquiçada e não possui odor, produzido na Alemanha por Dr. Hutschenreuther. Como ainda é um material pouco estudado no Brasil, foram seguidas as recomendações de uso indicadas pelo fabricante.

Conforme dados do fabricante, a temperatura ideal para misturar em laboratório o CAP e o CCBit é de 190 °C. Essa temperatura de mistura deve ser constante. O tempo de mistura deve ser entre 25 e 40min. Sugere-se que a quantidade de CCbit a ser adicionada ao ligante comum deve estar entre 2,0 a 3,5% do peso do ligante. A mistura deve ser feita com equipamento de alta rotação, e o aditivo deve ser adicionado lentamente, em frações pequenas.

Figura 14 – CCBit 13AD



3.2 Métodos

3.2.1 Propriedades físicas e mecânicas dos materiais

3.2.1.1 Agregados

Os ensaios utilizados para caracterização dos agregados estão listados na Tabela 05:

Tabela 05 – Ensaio e normas utilizadas para caracterização dos agregados

Ensaio	Métodos
Determinação da massa específica dos agregados miúdos	DNIT ME 084/95
Determinação da massa específica dos agregados graúdos	DNIT ME 195/97
Distribuição dos tamanhos das partículas dos agregados	DNIT ME 083/98
Abrásão Los Angeles	DNIT ME 035/98

3.2.1.1.1 Granulometria

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

3.2.1.1.2 Absorção e Massa Específica dos Agregados Graúdos

O ensaio de absorção e de massa específica dos agregados graúdos foi realizado segundo o método do DNIT-ME 081/98.

As amostras separadas foram 3.000g de brita 19mm e 2.000g de brita 9,5mm sendo desprezado todo o material passante na peneira 4,8mm através do peneiramento a seco. Cada amostra foi lavada para retirada de pó e impurezas e colocadas em estufa a 110°C por 4 horas. Após ser resfriada à temperatura ambiente, cada amostra foi colocada em imersão à temperatura ambiente por 24 horas (Figura 15).

Figura 15 – Brita 12,5 em imersão



Após este tempo o material foi retirado e seco superficialmente para verificar a massa saturada com superfície seca. Em seguida colocado em um recipiente para verificação da massa submersa (Figura 16).

Figura 16 - Verificação da massa submersa da brita 19mm



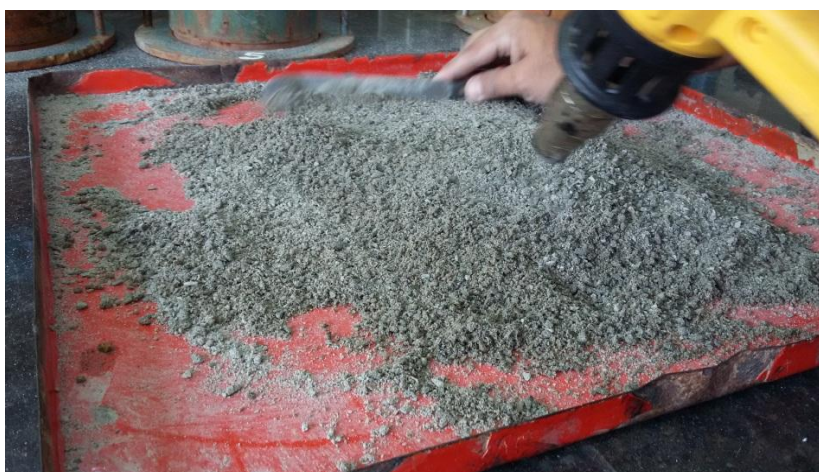
Em seguida, o material foi colocado novamente em estufa por 4 horas, resfriado à temperatura ambiente e verificada sua massa seca, para obter a densidade aparente e a absorção dos agregados.

3.2.1.1.3 Massa Específica do Agregado Miúdo

A determinação da massa específica da areia e o pó de pedra foi realizada segundo a norma NM 52/2002 que estabelece o método para determinação da massa específica real e aparente dos agregados miúdos.

Utilizaram-se duas amostras de 500g de agregado miúdo que passa na peneira de 4,8mm e fica retido na peneira de 0,074mm. O material foi colocado imerso em água e deixado em repouso por um período de 24 horas. Em seguida, foi colocado em uma superfície plana submetendo-o à ação de uma corrente de ar, secando-o de maneira uniforme (Figura 17).

Figura 17 – Secagem do material



Para verificação do estado do agregado como saturado superfície seca, faz-se a secagem até que os agregados não fiquem fortemente unidos entre si, colocando o agregado miúdo num molde tronco-cônico e compactando sua superfície suavemente com a haste de compactação com 25 golpes. Ao retirar o molde, observa-se se o agregado conserva a forma do molde, isso acontece se ainda houver umidade superficial. Continua-se a secagem e repete-se o procedimento até que o cone de agregado miúdo desmorone ao se retirar o molde. Neste momento, o agregado terá chegado à condição de saturado superfície seca.

Pesou-se 500g de amostra e em seguida colocou-se no picnômetro cuidadosamente, registrando a massa do conjunto. Colocou-se, então, água destilada no picnômetro até cobrir a amostra de agregado. O picnômetro foi mantido durante 1 hora em um banho a temperatura constante de $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$. Em seguida, completou-se o picnômetro com água (Figura 18) e então foi determinada a massa do picnômetro mais amostra mais água.

Figura 18 – Picnômetro com amostra e água



O agregado miúdo foi retirado do frasco e seco em estufa a $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ até a constância de sua massa. Após esse processo, foi realizada a determinação da massa específica aparente do agregado miúdo.

3.2.1.1.4 Abrasão Los Angeles

Esse ensaio, conforme norma DNIT-ME 035/98, consiste em submeter certa quantidade de amostra à choques e desgastes durante a rotação de tambor metálico de 80 centímetros de diâmetro a uma velocidade de 30 a 33 rpm, com a presença de doze bola de aço. O ensaio é concluído após 500 ou 1.000 rotações a depender da faixa granulométrica. Em seguida o material é peneirado e o desgaste é determinado pela razão entre a quantidade de material que passou na peneira de 1,7mm após o ensaio e a quantidade total colocada inicialmente no tambor.

3.2.2 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

3.2.2.1 Mistura do CAP com o CCBIt 113 AD

O Fluxograma da Figura 19 demonstra a sequência utilizada para caracterização do CAP após incorporação do aditivo. O processo de produção do CAP modificado com

CCBit foi realizado seguindo as instruções do fabricante, citadas anteriormente, e foi utilizado um agitador mecânico FISATOM, Modelo 72 (Figura 20). O CAP foi inicialmente aquecido a uma temperatura de 190°C. Adicionou-se o CCBIt em teores de 2,0; 2,5 e 3,0% e a mistura foi agitada em 544 rotações por minuto (rpm), por 40 minutos, com adição lenta e fracionada do material nos primeiros 20 minutos. Os componentes foram misturados com agitação frequente, tomando-se cuidado para não exceder a temperatura e o tempo de reação.

Figura 19 - Fluxograma da incorporação do CCBIt ao CAP e posterior caracterização física

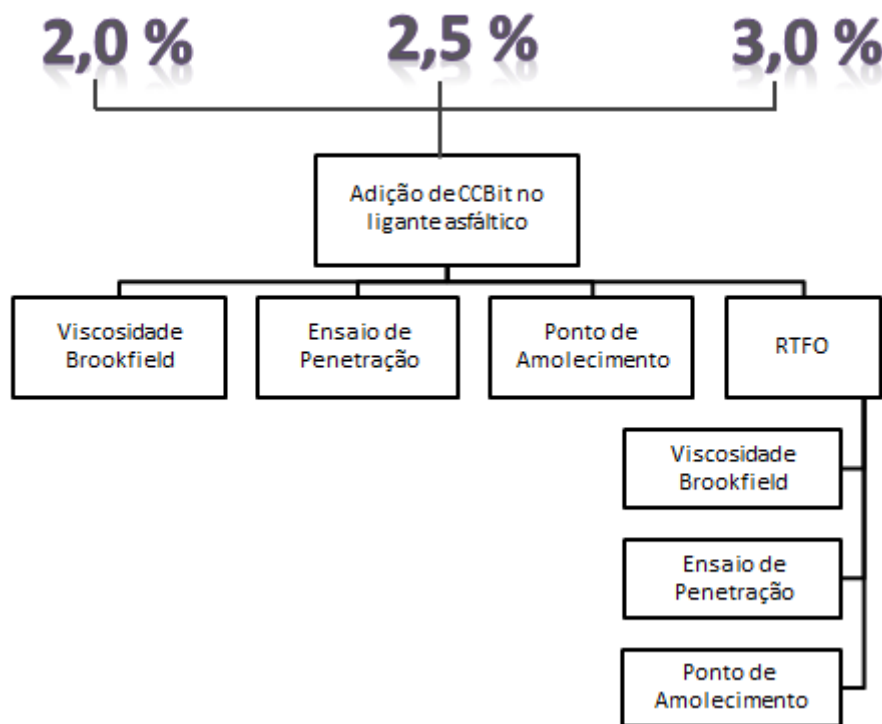


Figura 20 - Misturador (FISATOM, Modelo 72) com CAP e CCBIt



Para a inserção do aditivo no misturador com o CAP, manteve-se a tampa do misturador entreaberta, pois o CAP 50/70 à temperatura de 190 °C fica muito fluido e isto poderia causar respingos e prováveis acidentes, como queimaduras. A Figura 21 ilustra o modo que foi inserido o CCBIt no misturador.

Figura 21 – Inserção do CCBIt no misturador com CAP



Novamente foram realizados os ensaios de caracterização física das amostras de CAP em laboratório com o intuito de verificar as propriedades tanto para o CAP 50/70 puro quanto para o modificado com diferentes teores de CCBIt. Na Tabela 06 estão as normas utilizadas para a realização dos ensaios.

Tabela 06 – Normas dos ensaios de caracterização física do CAP

Ensaio	Métodos
Viscosidade Brookfield	NBR 15184/04
Ponto de Amolecimento	DNIT ME 131/2010
Penetração	DNIT ME 155/2010
RTFO	ASTM D 2872-97

3.2.2.2 Ensaio de Penetração

O ensaio de penetração determina a consistência do ligante asfáltico no estado semi-sólido, quanto menor o valor da penetração mais duro é o ligante. A norma que regulamenta o ensaio é a DNIT-ME 155 (2010), e 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. O aparelho utilizado para a realização do ensaio é o Penetrômetro (Figura 22).

Figura 22 – Penetrômetro



3.2.2.3 Ponto de Amolecimento

O ensaio de ponto de amolecimento mede a temperatura que o CAP amolece, como na Figura 23, que tem ligação com o ponto de fusão do mesmo, não sendo muito bem definido pelo fato de que os CAPs amolecem gradualmente. O ensaio é regulamentado pela norma DNIT ME 131/201, e consiste em uma esfera metálica atravessar um anel com material betuminoso até encontrar uma base metálica, todo o material utilizado é padronizado.

Figura 23 – Realização do ensaio (início, durante e fim, respectivamente).



3.2.2.4 Viscosidade Rotacional

Uma medida importante na caracterização dos CAPs puros e modificados é a viscosidade, pois contém informações sobre processamento, mistura e lançamento do CAP, incluindo utilização nos serviços de pavimentação. O ensaio foi realizado em viscosímetro Brookfield, modelo DVII+ (Figura 24) com controlador de temperatura THERMOSEL. O ensaio tem como finalidade determinar as propriedades reológicas dos ligantes asfálticos convencionais e modificados durante o manuseio e a usinagem da mistura asfáltica a altas temperaturas.

O ensaio foi realizado segundo a norma NBR 15184/2007 considerando as temperaturas de 135, 150 e 177°C e velocidades de 20, 50 e 100rpm, respectivamente.

Figura 24 – Viscosímetro Brookfield

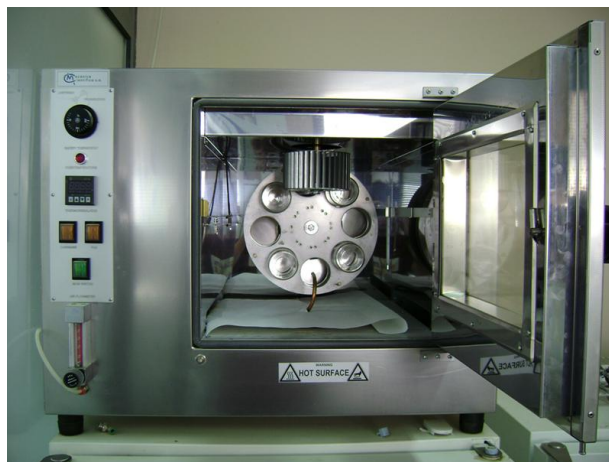


3.2.2.5 RTFO (Estufa de Filme Fino Rotativo)

O procedimento RTFO permite avaliar o envelhecimento do ligante asfáltico por oxidação e evaporação pelo efeito de calor e ar sobre uma película de material asfáltico em movimento. Uma fina película de asfalto de 35g é continuamente girada dentro de um recipiente de vidro a 163°C por 85 minutos, com injeção de ar. Os efeitos do calor e do ar são determinados a partir de alterações nos valores das análises físicas como medidos antes e depois do tratamento no forno (Figura 25).

O procedimento serve para identificar mudanças nas propriedades do asfalto que podem ocorrer durante a usinagem a 150 °C, verificadas por variações nas propriedades de constância. Também pode ser usado para se determinar a variação de massa indicando assim a volatilidade do asfalto.

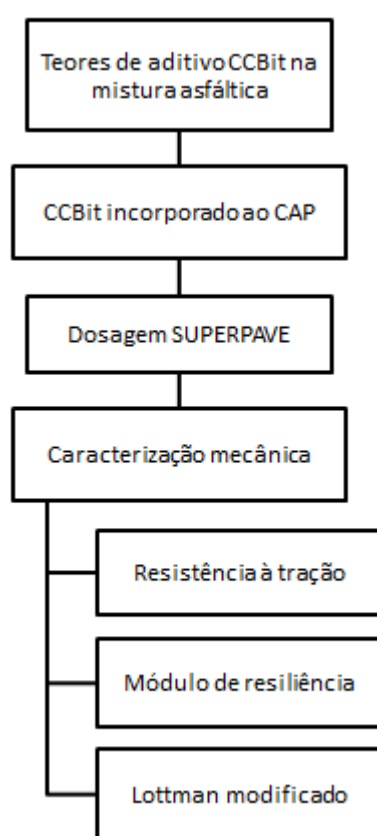
Figura 25 – Aparelho de RTFO



3.3 Caracterização mecânica

A caracterização mecânica tem por finalidade minimizar a deformação permanente, trincas por fadiga e variação de temperatura, além de analisar os efeitos do envelhecimento e danos de umidade. A Figura 26 apresenta o fluxograma dos ensaios realizados a partir da mistura do CAP com o aditivo CCBit. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) do Unidade Acadêmica de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Figura 26 - Fluxograma da Caracterização Mecânica



3.3.1. Dosagem Superpave

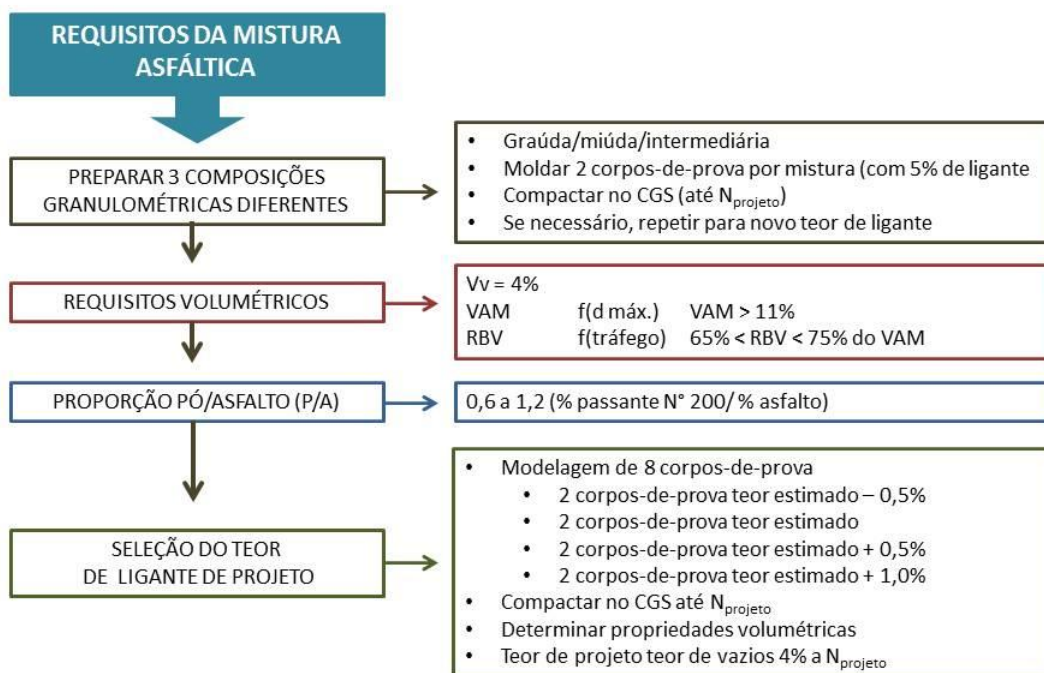
O *Strategic Highway Research Program* (SHRP), programa de pesquisa dos Estados Unidos desenvolveu o método de dosagem Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavements*) para minimizar a deformação permanente, trincas por fadiga e variação de temperatura, além de analisar os efeitos do envelhecimento e danos de umidade devido às evidentes deformações permanentes prematuras presentes em várias rodovias americanas na década de 80 (KENNEDY *et al.*, 1994).

A aplicação do método de dosagem SUPERPAVE depende do volume de tráfego ou de outra forma de classificação funcional da rodovia. Durante o desenvolvimento do programa SHRP foram propostos três níveis de projeto para dosagem de misturas asfálticas. Estes níveis foram numerados de um a três em ordem crescente de complexidade de acordo com a importância do pavimento projetado (Kennedy et al., 1993).

No Brasil o método de dosagem de misturas asfálticas mais utilizado é a dosagem Marshall, já o Superpave vem sendo bastante estudada no campo acadêmico. Existem algumas diferenças importantes entre seus métodos, a principal delas é a forma de compactação. Na dosagem Marshall a compactação é realizada por impacto, enquanto que na Superpave esta é por amassamento. Quanto a granulometria, a metodologia SUPERPAVE usa uma modificação da maneira tradicional do Marshall, por meio dos conceitos de pontos de controle e zonas de restrição para a curva granulométrica. As zonas de restrições servem como recomendações e não como especificações a serem seguidas. Alguns pesquisadores questionam a necessidade da zona de restrição, quando a mistura asfáltica atende as propriedades volumétricas nos seus três níveis de compactação: inicial, projeto e máximo; (LIMA *et al.*, 2003). Segundo Bernucci *et al.* (2007), a zona de restrição é uma medida empírica que forma uma região em que aconselha-se que a curva granulométrica não deveria passar, pois pode fazer com que a mistura se torne bastante frágil e dependa do ligante para ter resistência ao cisalhamento.

O Fluxograma da Figura 27 (BERNUCCI *et al.*, 2007) ilustra o processo da dosagem Superpave.

Figura 27 – Fluxograma de dosagem Superpave



A compactação dos corpos de provas foi realizada por amassamento com o auxílio do compactador giratório (Figura 28), segundo a norma ASTM D 6925-09 (*Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor*).

Figura 28 – Compactador Giratório Superpave



3.3.2 Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral

O ensaio de compressão diametral permite simular um plano de ruptura idêntico ao plano de aplicação da carga, e tem por objetivo determinar a resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de misturas betuminosas. A norma que regulamenta o ensaio é a ME 138/94 do DNIT. Para a realização do ensaio foram moldados corpos-de-prova no compactador giratório SUPERPAVE com teor de CAP obtido através da dosagem Superpave e com incorporação do CCBit nos teores definidos: 2,0; 2,5 e 3,0%.

O ensaio é feito colocando-se o corpo de prova em uma prensa (Figura 29), ajustando-se os pratos desta prensa para dar uma ligeira compressão e para segurar o corpo-de-prova na posição. Aplica-se um deslocamento progressivamente a uma razão de $0,8 \pm 0,1$ mm/s até que se dê a ruptura do corpo-de-prova segundo um plano diametral vertical.

Figura 29 – Prensa do ensaio de Resistência à Tração



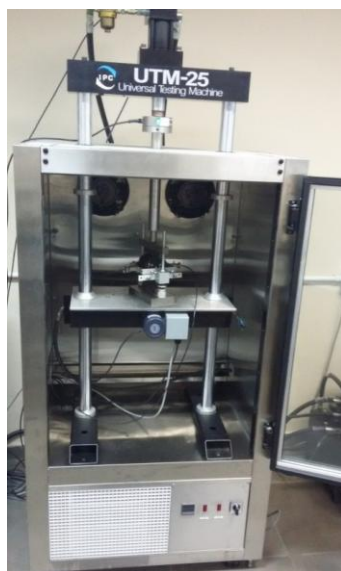
3.3.3 Módulo de Resiliência

Os ensaios de carga repetida em que a força aplicada atua sempre no mesmo sentido de compressão, de zero a um máximo e depois diminui até anular-se, ou atingir um patamar inferior, para atuar novamente após pequeno intervalo de repouso procuram reproduzir as condições de campo. A amplitude e o tempo de pulso dependem da velocidade do veículo e da profundidade em que se calculam as tensões de deformações produzidas. A frequência remete o fluxo de veículos (MOURÃO, *et al.* 2003). O ensaio para a determinação do módulo de resiliência, ensaio de tração indireta com carregamento repetido, simula o comportamento mecânico da mistura asfáltica, na zona

onde ocorrem as deformações específicas de tração, responsáveis pela fadiga da camada.

O ensaio do Módulo de Resiliência (MR) foi realizado segundo Norma (ME 135/10) do DNIT. Os resultados foram obtidos com auxílio do *software* UTS0031.39 *Indirect Tensile Modulus Test*, utilizando a prensa UTM-25 (Figura 30), que obtém o módulo instantâneo. Condicionamentos de 50 ciclos são utilizados, e os LVDTs (*Linear Variable Differential Transducer*) e medem a deformação elástica do CP durante o carregamento cíclico com frequência de 1Hz, sendo que 0,1segundo é utilizado para aplicação de carga e 0,9segundo para descanso. O equipamento é automatizado e um *software* é utilizado para cálculo do MR, sendo que este valor é uma média dos resultados em 5 leituras após os ciclos de condicionamento a que o CP é submetido.

Figura 30 – Prensa UTM-25 utilizada para o ensaio de Módulo de Resiliência



3.3.4 Lottman Modificado

O ensaio de Lottman Modificado também é conhecido como Ensaio de Resistência ao Dano por Umidade Induzida e avalia a adesividade das misturas asfálticas. O ensaio é realizado em CPs cilíndricos moldados, com volume de vazios de $7 \pm 1\%$, segundo as metodologias Marshall, Hveen ou Superpave. O ensaio consiste na avaliação de misturas asfálticas quanto a sua suscetibilidade à água, já que este afeta o desempenho e a vida de serviço dos pavimentos. O ensaio foi realizado segundo a norma da AASHTO T 283 baseado no trabalho de R. P. Lottman e um trabalho

posterior de D. G. Tunnicliff e R. R. Root (BERNUCCI, *et al.*, 2007) para os corpos de prova preparados segundo a dosagem Superpave.

O procedimento do ensaio ocorre da seguinte maneira:

- coloca-se o CP em um recipiente com água destilada e aplica-se o vácuo a uma pressão de 250-650mmHg por um período de 5 a 10 minutos (Figura 31). Finalizado o tempo, a mostra permanece em repouso na água por mais 5 a 10 minutos sem aplicação de vácuo.
- retira-se o CP e em seguida as amostras são colocadas dentro de sacos plásticos, adicionando 10ml de água e colocados em uma geladeira a -18 °C por um período de 16hrs.
- após esse período, coloca-se o CP em imersão a 60°C por um período de $24 \pm 1h$. Ao retirar, deixa-se o CP ainda envolto no saco plástico submerso em água a 25°C para estabilização da temperatura.
- realiza-se então, o ensaio de Resistência à Tração no CP, e encontra-se RTu e calcula-se a Resistência à Tração Retida por umidade induzida (RRT), que é a razão entre RT e RTu.

Figura 31 – Ensaio Lottman



CAPÍTULO 4

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na fase experimental desta pesquisa. Nestes encontram-se a caracterização física dos agregados, do CCBit, do CAP 50/70 e do CAP com incorporação do CCBit, além dos resultados da caracterização mecânica das misturas com CAP puro e modificado em diferentes porcentagens de CCBit.

4.1 Caracterização Física do CCBit

O CCBit é um produto pouco conhecido, em termos de composição mineralógicas. Diante disto resolveu-se realizar os ensaios Difração Raio-X (Figura 32) e análise química (EDX) para identificar as substâncias (Tabela 07) presentes na sua formulação.

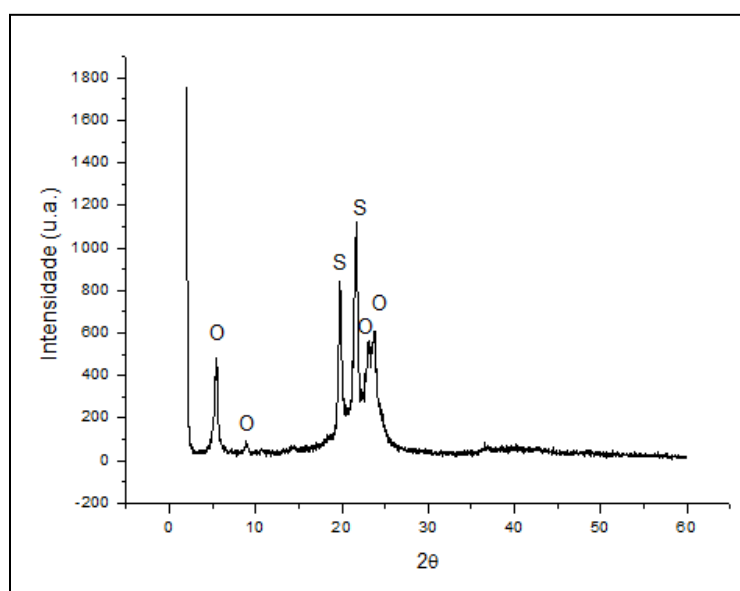
Tabela 07 –Composição química do CCBit – Análise EDX

Substância	Resultado (%)
SiO ₂	39,29
P ₂ O ₅	29,34
Fe ₂ O ₃	14,57
Al ₂ O ₃	11,82
CuO	2,39
Tm ₂ O ₃	1,46
ZnO	1,13
C	0

Os ensaios realizados para verificar a composição do CCbit detêm-se na análise da parte inorgânica do produto, por isso não são capazes de identificar a presença de hidrocarbonetos, que provavelmente estão presentes em sua parte orgânica. Para a identificação da parte orgânica seria necessário a realização de Cromatografia Gasosa.

A parte inorgânica do CCBit é composta basicamente por sílica, pentóxido de fósforo, óxido de ferro e óxido de alumínio. Este resultado era esperado pois o CCBit é um éster metílico de ácido graxo.

Figura 32 – Difratoograma de Raios-X



De acordo com o difratograma de raios-X, verifica-se a presença de picos cristalográficos, o que caracteriza um material cristalino. Os picos de maior intensidade correspondem a presença da sílica e do pentóxido de fósforo, corroborando os resultados encontrados no EDX.

4.2 Caracterização Física dos Agregados

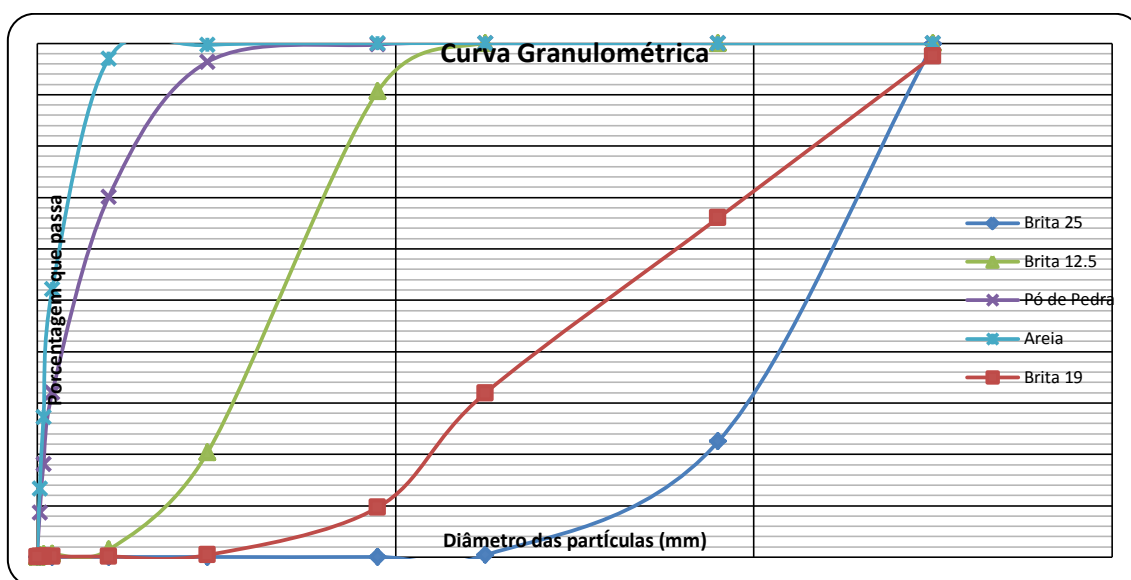
4.2.1 Granulometria

A Tabela 08 e a Figura 33 apresentam a distribuição dos tamanhos das partículas dos grãos dos materiais utilizados nesta pesquisa.

Tabela 08 – Granulometria dos agregados

Peneira (N)	Peneira (mm)	Quantidade passante (%)			
		Brita 19	Brita 12,5	Areia	Pó de Pedra
1 1/2"	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	25,4	97,49	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,1	66,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,7	31,90	100,00	100,00	100,00
3/8"	9,5	9,67	90,58	100,00	99,74
N ^o 4	4,8	0,42	20,30	99,66	96,34
N ^o 10	2,0	0,14	1,45	96,96	70,11
N ^o 40	0,42	0,13	0,59	52,15	32,01
N ^o 80	0,18	0,12	0,50	27,24	18,07
N ^o 200	0,074	0,07	0,33	13,25	8,61

Figura 33 - Curva granulométrica dos agregados



4.2.2 Massa Específica

A Tabela 09 apresenta as massas específica aparente e real dos agregados utilizados na pesquisa.

Tabela 09 – Massa específica dos agregados

Agregado	Massa específica real (g/cm ³)	Massa específica aparente (g/cm ³)
Brita 19mm	2,69	2,65
Brita 12,5mm	2,67	2,64
Pó de pedra	2,40	2,37
Areia	2,50	2,47

Os valores de massa específica real e aparente dos agregados estão dentro os valores previstos na literatura para cada tipo de material. Esses dados foram utilizados na determinação do teor de projeto de CAP na dosagem SUPERPAVE.

4.2.3 Abrasão Los Angeles

O agregado de *Diâmetro Nominal Máximo* de 19 mm apresentou 21,02% de resultado do ensaio de Abrasão “Los Angeles”, ficando dentro do valor estabelecido pela Norma brasileira (ME 035/98 do DNIT), deve ser menor que 40%, para os serviços de pavimentação, apto para utilização em misturas asfálticas.

4.2.4 Índice de Forma

Os resultados do ensaio de índice de forma encontram-se na Tabela 10. Este foi realizado segundo a norma DNIT-ME 086/94.

Tabela 10 – Resultados de Índice de Forma dos agregados graúdos

Agregado	Índice de Forma (%)
Brita 19 mm	0,85
Brita 12,5 mm	0,69

As misturas asfálticas são influenciadas pela forma dos agregados. Esta afeta a trabalhabilidade, modifica a energia utilizada para a compactação e altera a resistência ao cisalhamento, a deformação permanente e outras propriedades do revestimento. Portanto o indicado é o uso de agregados cúbicos e angulares. Na especificação do DNIT, o valor deste índice deve variar entre 0,5 e 1,0, sendo que quanto mais próximo do valor superior mais cúbico é o agregado (WARGHA FILHO *et al.* 2013).

4.2.5 Curvas de Fuller

As curvas de Fuller foram utilizadas para realização da dosagem SUPERPAVE. As curvas granulométricas inferior, intermediária e superior contêm as proporções de agregados mostradas na Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13, respectivamente. Estas encontram-se dentro da Faixa C de granulometria do DNIT, incluindo os conceitos de Pontos de Controle e Zonas de restrição (Figuras 34 a 36). O Tamanho Nominal Máximo (TNM) do agregado para as curvas foi de 19mm, para as três curvas.

Tabela 11 - Composição dos agregados estabelecida com a aproximação do Limite Inferior

PENEIRAS	DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA - (CURVA INFERIOR)												
	BRITA 19		BRITA 12,5		AREIA		PÓ DE PEDRA		FILLER		PROJ.	ESPECIFICAÇÃO	
	TOTAL	26%	TOTAL	34%	TOTAL	0%	TOTAL	40%	TOTAL	0%		PT. MED.	LIMITE
1 1/2"	100,00	26,00	100,00	34,00	100,00	0,00	100,00	40,00	100,00	0,00	100,00	-	-
1"	100,00	26,00	100,00	34,00	100,00	0,00	100,00	40,00	100,00	0,00	100,00	-	-
3/4"	98,24	25,54	100,00	34,00	100,00	0,00	100,00	40,00	100,00	0,00	99,54	100	100
1/2"	38,60	10,04	100,00	34,00	100,00	0,00	100,00	40,00	100,00	0,00	84,04	80	100
3/8"	6,15	1,60	85,86	29,19	99,76	0,00	100,00	40,00	100,00	0,00	70,79	70	90
Nº 4	0,33	0,09	21,86	7,43	99,09	0,00	94,52	37,81	100,00	0,00	45,33	44	72
Nº 10	0,11	0,03	12,82	4,36	93,40	0,00	63,75	25,50	100,00	0,00	29,89	22	50
Nº 40	0,11	0,03	6,80	2,31	61,45	0,00	29,88	11,95	100,00	0,00	14,29	8	26
Nº 80	0,09	0,02	3,56	1,21	22,29	0,00	16,38	6,55	100,00	0,00	7,78	4	16
Nº 200	0,06	0,02	1,71	0,58	5,50	0,00	7,87	3,15	100,00	0,00	3,74	2	10

Figura 34 - Curva Granulométrica Inferior

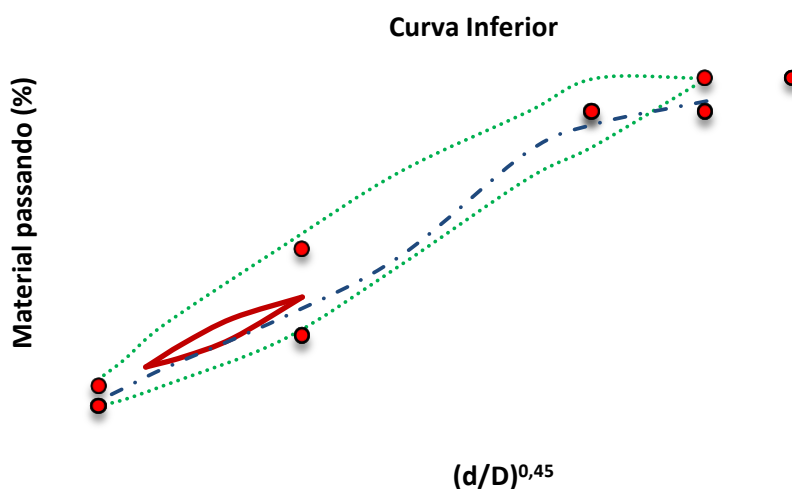


Tabela 12 - Composição dos agregados estabelecida com a aproximação do Limite Intermediário

PENEIRAS	DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA - (CURVA INTERMEDIÁRIA)												
	BRITA 19		BRITA 12,5		AREIA		PÓ DE PEDRA		FILLER		PROJ.	ESPECIFICAÇÃO	
	TOTAL	13%	TOTAL	33%	TOTAL	5%	TOTAL	47%	TOTAL	2%		PT. MED.	LIMITE
1 1/2"	100,00	13,00	100,00	33,00	100,00	5,00	100,00	47,00	100,00	2,00	100,00	-	-
1"	97,49	12,67	100,00	33,00	100,00	5,00	100,00	47,00	100,00	2,00	99,67	-	-
3/4"	66,00	8,58	100,00	33,00	100,00	5,00	100,00	47,00	100,00	2,00	95,58	100	100
1/2"	31,90	4,15	100,00	33,00	100,00	5,00	100,00	47,00	100,00	2,00	91,15	80	100
3/8"	9,67	1,26	90,58	29,89	100,00	5,00	99,74	46,88	100,00	2,00	85,03	70	90
Nº 4	0,42	0,05	20,30	6,70	99,66	4,98	96,34	45,28	100,00	2,00	59,02	44	72
Nº 10	0,14	0,02	1,45	0,48	96,96	4,85	70,11	32,95	100,00	2,00	40,30	22	50
Nº 40	0,13	0,02	0,59	0,19	52,15	2,61	32,01	15,04	100,00	2,00	19,86	8	26
Nº 80	0,12	0,02	0,50	0,17	27,24	1,36	18,07	8,49	100,00	2,00	12,04	4	16
Nº 200	0,07	0,01	0,33	0,11	13,25	0,66	8,61	4,05	100,00	2,00	6,83	2	10

Figura 35 - Curva Granulométrica Intermediária

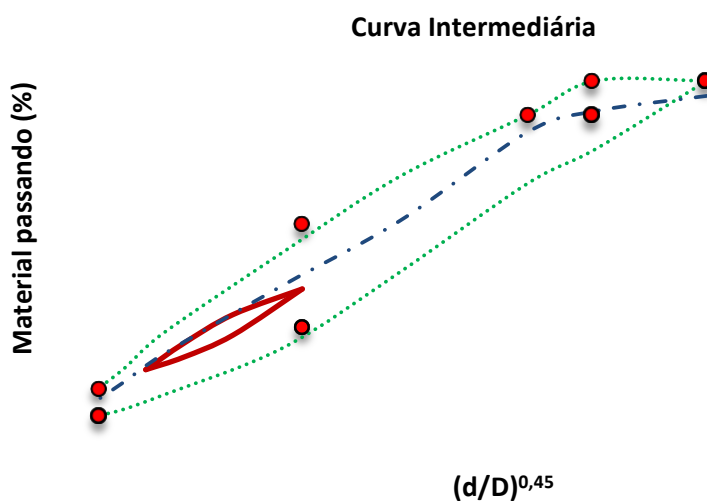
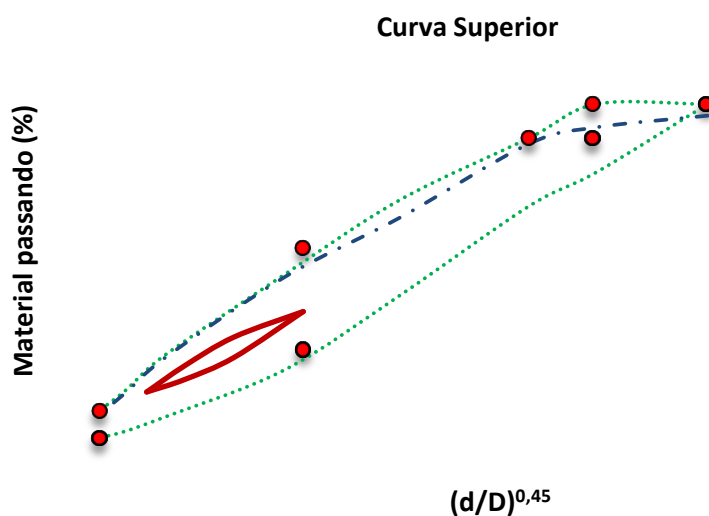


Tabela 13 - Composição dos agregados estabelecida com a aproximação do Limite Superior

PENEIRAS	DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA - (CURVA SUPERIOR)												
	BRITA 19		BRITA 12,5		AREIA		PÓ DE PEDRA		FILLER		PROJ.	ESPECIFICAÇÃO	
	TOTAL	6%	TOTAL	35%	TOTAL	14%	TOTAL	43%	TOTAL	2%		PT. MED.	LIMITE
1 1/2"	100,00	6,00	100,00	35,00	100,00	14,00	100,00	43,00	100,00	2,00	100,00	-	-
1"	100,00	6,00	100,00	35,00	100,00	14,00	100,00	43,00	100,00	2,00	100,00	-	-
3/4"	98,24	5,89	100,00	35,00	100,00	14,00	100,00	43,00	100,00	2,00	99,89	100	100
1/2"	38,60	2,32	99,95	34,98	100,00	14,00	100,00	43,00	100,00	2,00	96,30	80	100
3/8"	6,15	0,37	82,26	28,79	99,76	13,97	100,00	43,00	100,00	2,00	88,13	70	90
Nº 4	0,33	0,02	16,27	5,69	99,09	13,87	94,52	40,64	100,00	2,00	62,23	44	72
Nº 10	0,11	0,01	9,61	3,36	93,40	13,08	63,75	27,41	100,00	2,00	45,86	22	50
Nº 40	0,11	0,01	5,32	1,86	61,45	8,60	29,88	12,85	100,00	2,00	25,32	8	26
Nº 80	0,09	0,01	2,85	1,00	22,29	3,12	16,38	7,04	100,00	2,00	13,17	4	16
Nº 200	0,06	0,00	1,38	0,48	5,50	0,77	7,87	3,38	100,00	2,00	6,64	2	10

Figura 36 - Curva Granulométrica Superior



4.3 Caracterização do CAP

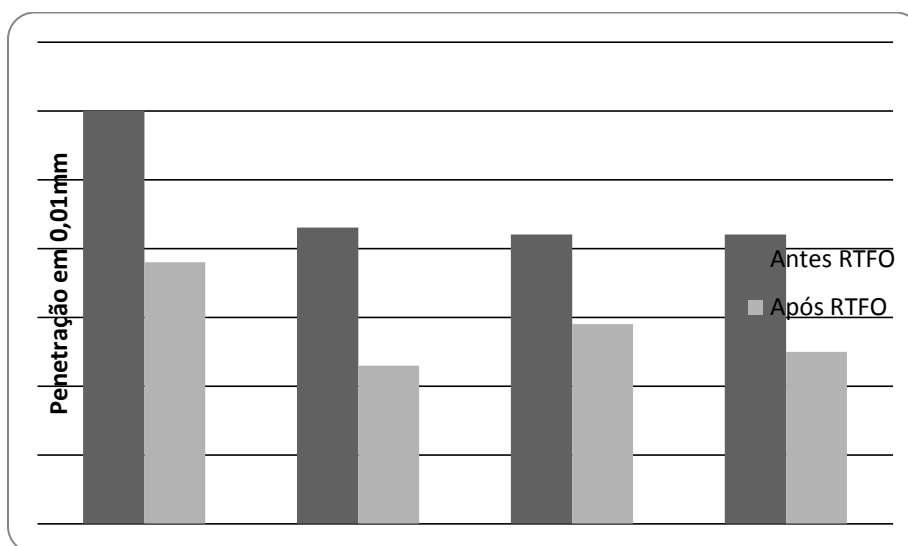
4.3.1 Ensaio de Penetração

O ensaio de penetração serve para determinar a consistência e classificar o ligante asfáltico. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 14 e no gráfico da Figura 37.

Tabela 14 – Resultados do ensaio de penetração antes e após o RTFO

Amostra	CAP PURO	+ 2,0% CCBIt	+ 2,5% CCBIt	+ 3,0% CCBIt
Penetração antes RTFO (0,1mm)	60	43	42	42
Penetração após RTFO (0,1mm)	38	23	29	25

Figura 37 - Resultados do ensaio de penetração antes e após o RTFO



Com a incorporação do CCBIt no ligante asfáltico ocorreu uma considerável redução da penetração, mas notou-se que esta praticamente permaneceu constante para os diferentes teores de CCBIt. Tal comportamento não é o previsível, já que o aditivo CCBIt tem a capacidade de reduzir a viscosidade do ligante asfáltico, tornando-o menos consistente. Entretanto, em estudo desenvolvido por Oliveira (2014) sobre o efeito do CCBIt-113AD no comportamento mecânico de misturas asfálticas pode-se perceber a mesma redução da penetração. No teor de 2,5% de CCBIt o autor encontrou uma

penetração média 42 décimos de milímetros, resultado semelhante ao encontrado na presente pesquisa.

Uma explicação para este fato pode ser que o CCBit incorporado ao ligante asfáltico em temperaturas inferiores a 100°C esteja atuando apenas como carga particular e não como redutor de viscosidade, tal fato só ocorreria em temperaturas mais elevadas.

A norma do DNIT 095/2006 –ME determina a penetração retida mínima de 55%. Na tabela 15 apenas o CAP com 2,0% de CCBit não atingiu o valor preconizado na norma, chegando próximo a este.

Tabela 15 – Penetração retida

Penetração	CAP PURO	+ 2,0% CCBit	+ 2,5% CCBit	+ 3,0% CCBit
Retida min (%)	63,33	53,49	69,05	59,52

4.3.2 Ponto de Amolecimento

A Tabela 16 e a Figura 38 apresentam o efeito do teor de CCBit no ponto de amolecimento do ligante asfáltico.

O ponto de amolecimento para a amostra de CAP puro foi de 46°C. A adição de CCbit promoveu aumento da temperatura do ligante atingindo 66°C para o teor de 2,5% de CCBit. Este valor foi o mesmo obtido por Pereira (2010) com mesmo teor de aditivo.

Tabela 16 - Resultados do ensaio de ponto de amolecimento antes e após o RTFO

Amostra	CAP PURO	+ 2,0% CCBit	+ 2,5% CCBit	+ 3,0% CCBit
Temperatura antes RTFO (°C)	46	63	66	52
Temperatura após RTFO (°C)	50	93	98	98

Figura 38 - Resultados do ensaio de ponto de amolecimento antes e após o RTFO

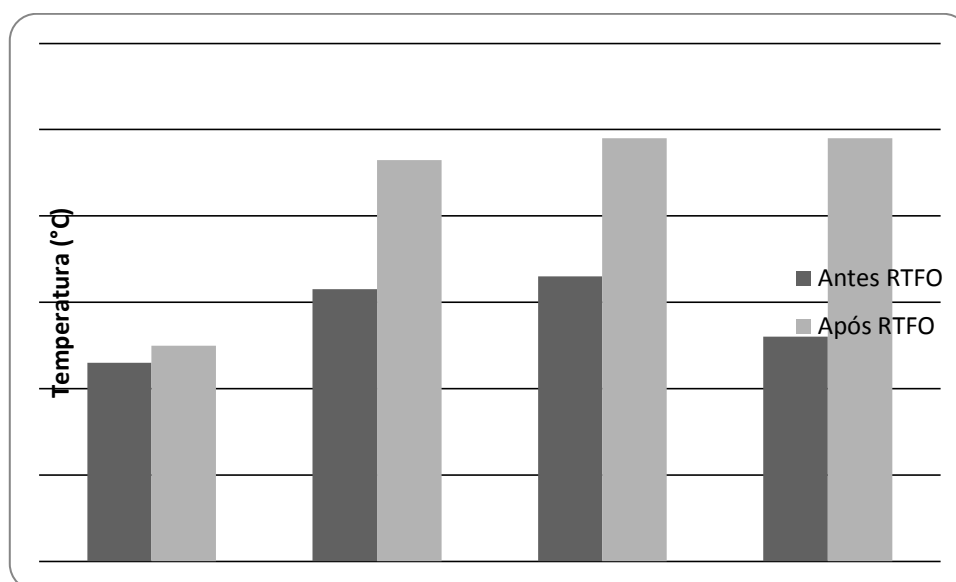


Tabela 17 – Aumento de temperatura após o RTFO

Amostra (após RTFO)	CAP PURO	+ 2,0% CCBIt	+ 2,5% CCBIt	+ 3,0% CCBIt
Aumento de temperatura (°C)	4	30	32	46

O CAP puro encontra-se dentro do limite da norma, DNIT 095/2006 – ME, com aumento de 4 °C do ponto de amolecimento após RTFO (Tabela 17). Os CAPs com aditivo ultrapassaram consideravelmente este limite (máx 8°C).

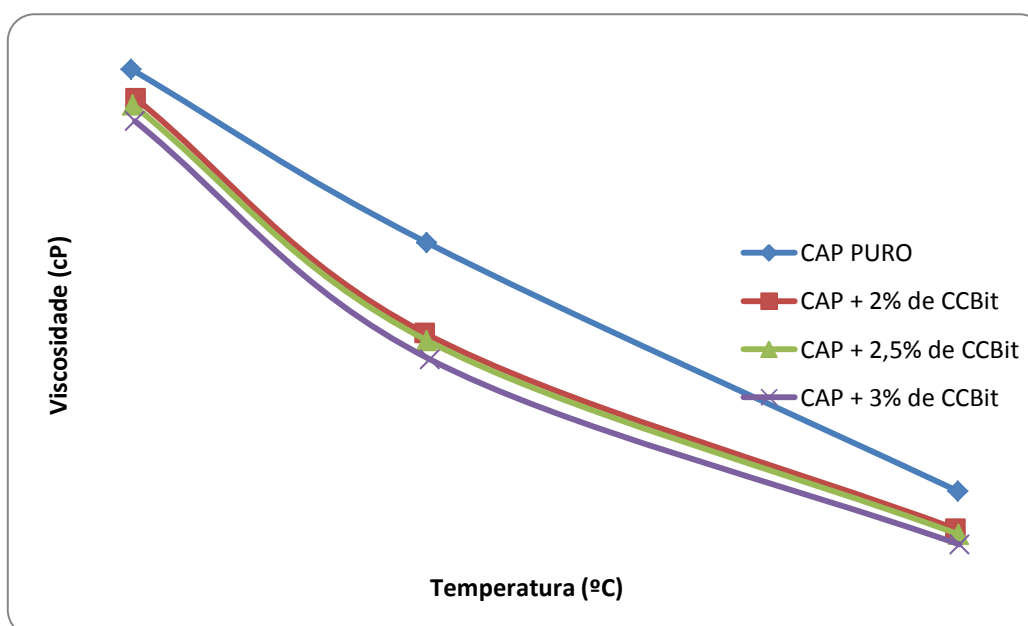
4.3.3 Viscosidade Rotacional

O ensaio de viscosidade Brookfield foi realizado para o CAP puro 50/70 e para o CAP com o CCBIt. A Tabela 18 apresenta os resultados do ensaio de viscosidade rotacional com CAP puro e com incorporação do CCBIt nos teores de 2,0; 2,5 e 3,0%. Observa-se no gráfico da Figura 39, a redução da viscosidade do CAP diante do aumento do teor de CCBIt. A menor viscosidade apresentada pelo CAP modificado ocorre com o maior teor de CCBIt (3,0%).

Tabela 18 – Resultados de viscosidade do CAP Puro e com incorporação do CCBit

Temperatura (°C)	Viscosidade (cP)			
	CAP PURO	+ 2,0% CCBit	+ 2,5% CCBit	+ 3,0% CCBit
135	450,00	408,75	398,75	373,75
150	221,50	203,00	198,50	187,50
177	80,25	73,75	72,25	69,50

Figura 39 - Viscosidade do CAP Puro e com incorporação do CCBit



À baixa temperatura (135°C), a adição do CCBit produz perceptível redução na viscosidade em relação ao CAP puro, tal qual previsto. De um modo geral, os resultados mostraram que os ligantes com CCBit apresentam valores de viscosidade menores em relação ao ligante puro.

Na temperatura de 177°C, o comportamento dos asfaltos são similares entre os diferentes teores, assim como em relação ao CAP puro. Os resultados mostraram que a 135°C o ligante puro tem a mais alta viscosidade e o asfalto com maior porcentagem de CCBit a menor.

Os gráficos das Figuras 40 a 43 apresentam a determinação da temperatura de usinagem para o CAP puro e com os diferentes teores de CCBit.

Figura 40 - Curvas Variação da Viscosidade Brookfield em função da temperatura
[CAP Puro]

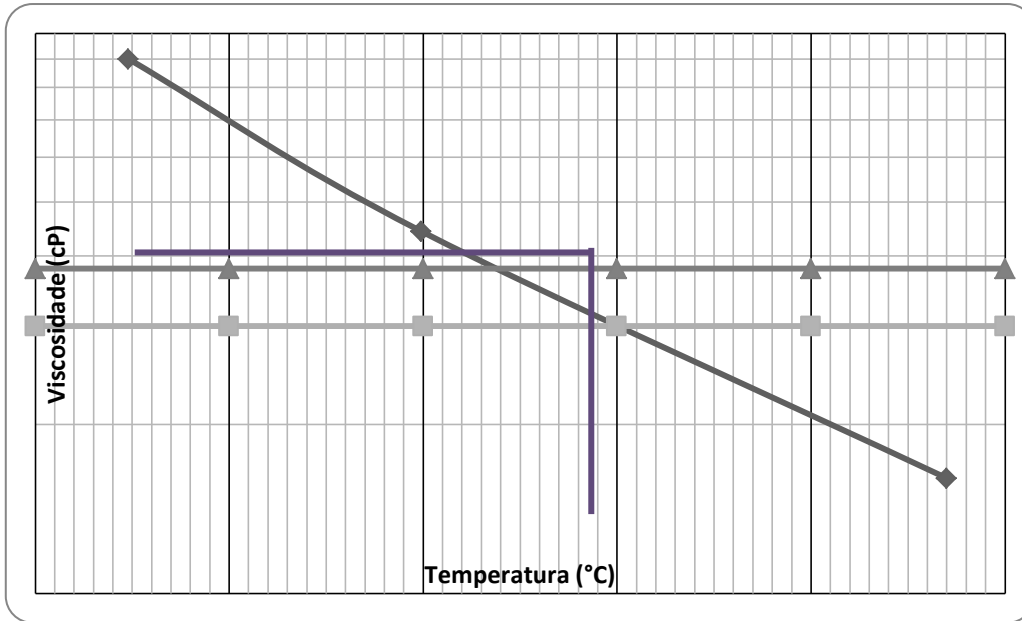


Figura 41 - Curvas Variação da Viscosidade Brookfield em função da temperatura
[CAP com 2,0% de CCBIt]

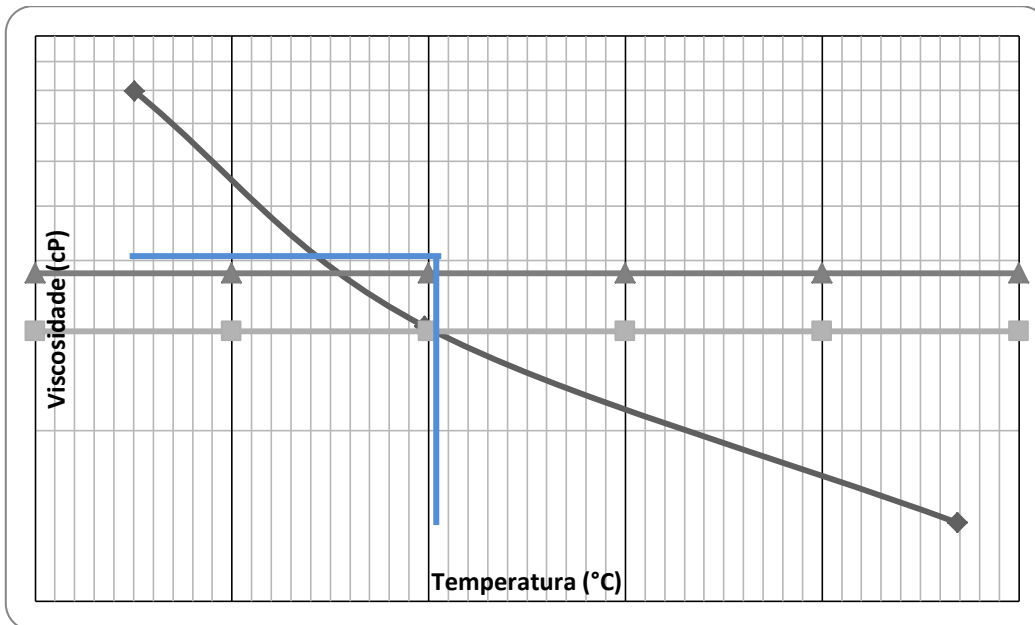


Figura 42 - Curvas Variação da Viscosidade Brookfield em função da temperatura
[CAP com 2,5% de CCBIt]

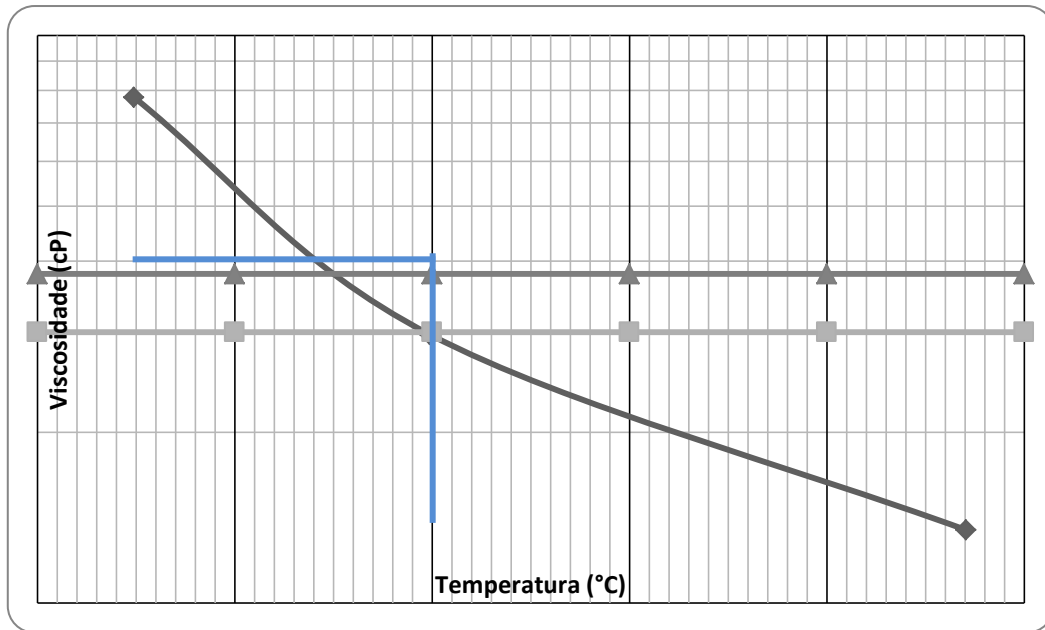
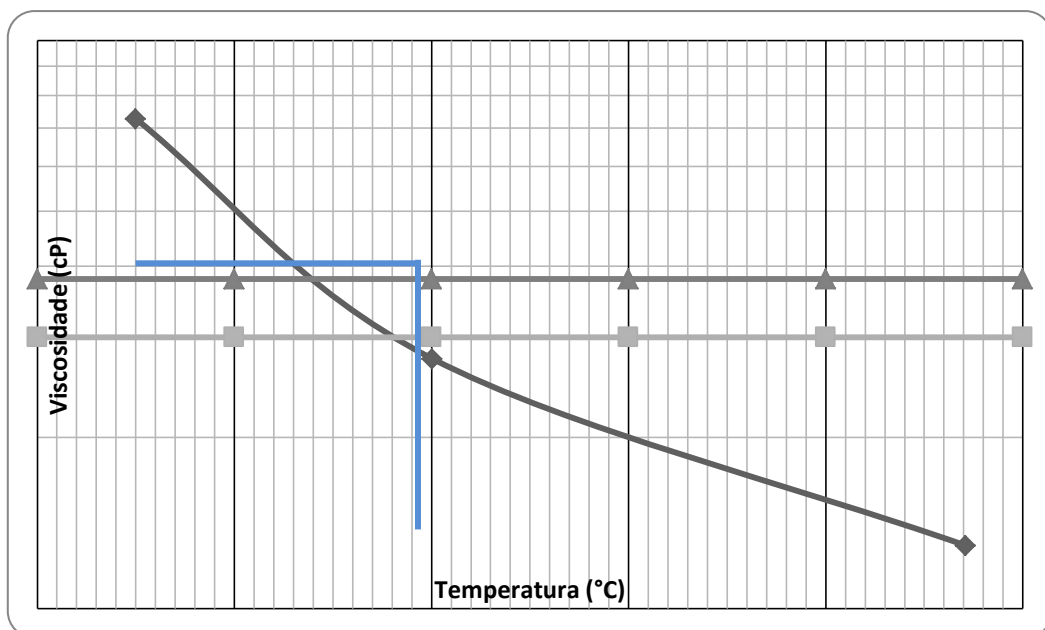


Figura 43 - Curvas Variação da Viscosidade Brookfield em função da temperatura
[CAP com 3,0% de CCBIt]



A maior variação de temperatura (Tabela 19) ocorreu entre o CAP puro e com 3,0% de CCBit chegando a 10,8 °C nas temperaturas de mistura e compactação. Na comparação entre os CAPs com diversos teores de CCBit não houve diferença significativa. Oliveira et al. (2014) obteve para o teor de 2,5% de CCbit uma redução de 20 °C da temperatura obtida do CAP puro, para usinagem e compactação.

Tabela 19 – Temperaturas de mistura e compactação

Temperatura	CAP PURO	+ 2,0% CCBit	+ 2,5% CCBit	+ 3,0% CCBit
Mistura (°C)	156,8	147,0	146,8	146,0
Compactação (°C)	144,8	135,0	134,8	134,0

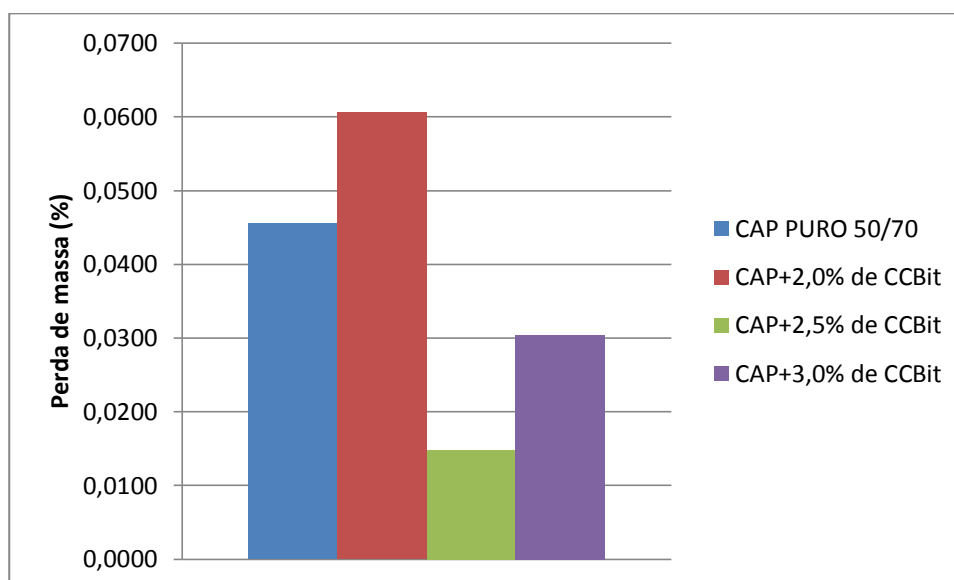
4.3.4 Perda de Massa

O ensaio de RTFO é necessário para realizar a caracterização física em ligantes, submetidos a algum tipo de condicionamento, que simule o nível de agressividade ao qual estarão sujeitos durante a vida útil. A perda de massa indica a capacidade de envelhecimento o ligante (Tabela 20 e Figura 44).

Tabela 20 – Resultados da perda de massa após o ensaio RTFO

Amostra	CAP PURO	+ 2,0% CCBit	+ 2,5% CCBit	+ 3,0% CCBit
Perda de massa (%)	0,0455	0,0606	0,0148	0,0304

Figura 44 – Resultados da perda de massa após o ensaio RTFO



A norma do DNIT 095/2006 especifica o limite da perda de massa em 0,5%. Isto posto, conclui-se que o CAP PURO e os CAPs com CCBit encontram-se dentro da tolerância de envelhecimento sem interferir na qualidade do pavimento.

4.4 Dosagem das Misturas Asfálticas

A dosagem Superpave teve início com a definição das composições granulométricas das três misturas (inferior, intermediária e superior), Figuras de 34 a 36, a partir destas proporções associado às características físicas dos agregados, obtém-se o teor inicial de ligante, segundo equação 01.

$$P_{li} = \left[\frac{G_l * (V_{le} + V_{la})}{G_l * (V_{le} + V_{la}) + M_{ag}} \right] \quad \text{Equação 01}$$

Onde:

M_{ag} = Massa de agregado (g);

G_l = Massa específica do ligante (g/cm^3);

P_l = teor de ligante (% em massa);

P_{ag} = percentual de agregado na mistura (% em massa);

P_{li} = teor de ligante inicial (% em massa);

V_{la} = volume de ligante absorvido (%);

V_{le} = volume de ligante efetivo (%).

Os corpos de prova podem ser compactados em diferentes números de giro conforme o volume de tráfego considerado (BERNUCCI et al. 2008). Na pesquisa foi considerado o tráfego médio a alto, portanto os valores do número de giros compreenderam em: 8 giros para $N_{inicial}$ (inicial), 100 giros para $N_{projeto}$ (projeto) e 160 giros para o $N_{máximo}$ (máximo).

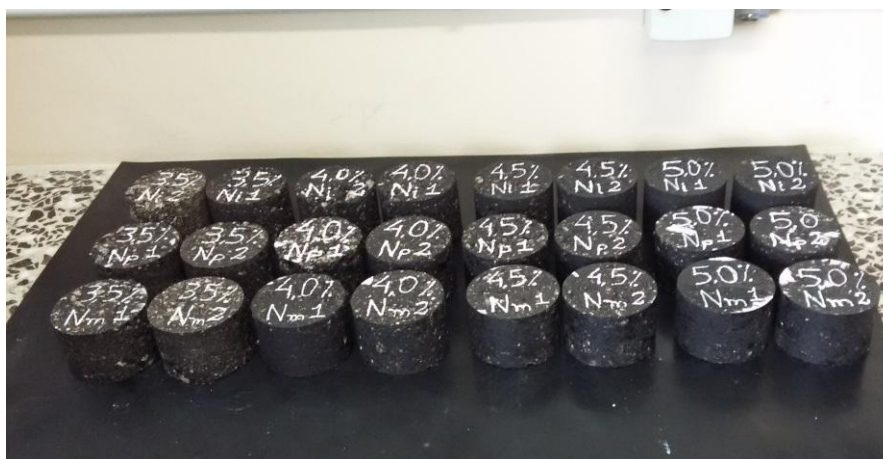
Na Tabela 21 estão listados os teores de CAP iniciais para a *Primeira Fase da Dosagem*, bem como uma síntese dos resultados iniciais, os quais foram essenciais para a definição da curva de projeto (Curva Intermediária, Figura 34), a qual teve os parâmetros volumétricos mais próximos dos critérios da dosagem Superpave.

Tabela 21 - Parâmetros volumétricos obtidos em função dos Teores de CAPs iniciais calculados.

Mistura	Ligante %	%Gmm N _{inicial}	%Gmm N _{projeto}	%Gmm N _{máximo}	VAM (%)	V _v (%)
Inferior	4,0	90,80	95,43	97,00	15,42	4,97
Intermediária	4,0	89,33	95,84	96,77	15,11	4,16
Superior	4,0	88,66	95,97	97,10	15,16	4,03

Na Segunda Fase foram compactados os corpos de prova (Curva Intermediária) com variação sobre teor inicial de 4,0 % nas seguintes proporções: $\pm 0,5\%$ e $+1\%$, ou seja: 3,5%; 4,0%; 4,5% e 5,0% (Figura 45). Em função destes, foram moldados vinte e quatro (24) corpos de prova, sendo seis (6) para cada teor, respectivamente.

Figura 45 - Compactação com os teores de 3,5%, 4,0%, 4,5% e 5,0% em Ni, Np e Nm



Na Tabela 22 são apresentados os resultados dos parâmetros volumétricos da *Segunda Fase da Dosagem*. Estes parâmetros permitiram a definição do teor de projeto, o qual foi usado na composição das misturas para a avaliação das propriedades mecânicas a partir dos ensaios de: Resistência à Tração por Compressão Diametral, Lottman Modificado e Módulo de Resiliência.

Tabela 22 - Parâmetros volumétricos obtidos em função dos Teores de CAPs estimados.

Ligante %	%Gmm N _{inicial}	%Gmm N _{projeto}	%Gmm N _{máximo}	VAM (%)	V _v (%)	RBV (%)	Massa específica (g/cm ³)
3,5	89,02	94,07	95,31	17,21	5,93	76,49	2,405
4,0	89,33	95,84	96,77	15,11	4,16	73,47	2,389
4,5	95,43	98,10	95,55	13,31	1,90	70,87	2,372
5,0	96,69	99,66	96,89	12,53	0,34	69,82	2,356

Para realização dos ensaios mecânicos ficou definido que a partir da dosagem encontrada para o CAP puro, esta também seria utilizada para a moldagem dos corpos de prova com os diferentes teores de aditivo nos ligantes, ou seja, que o teor de aditivo foi incorporado na porcentagem encontrada pela dosagem para o CAP puro. Assim pode-se comparar as características mecânicas do ligante puro e com a presença do aditivo para a mesma porcentagem de ligante na mistura. A compactação das misturas asfálticas foram realizadas segundo a metodologia Superpave, com energia de 100 giros.

4.5 Caracterização Mecânica

4.5.1 Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral

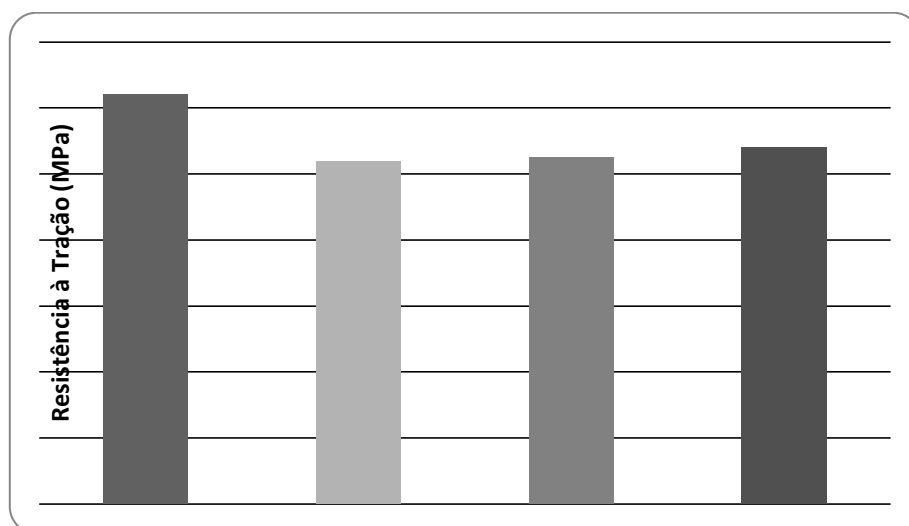
Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral foram realizados conforme descrito no item 3.3.1. Na Tabela 23 resumem-se os valores encontrados para uma média de três cps por teor analisado.

Tabela 23 - Resultados do ensaio de Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral

Amostra	CAP PURO	+ 2,0% CCBIt	+ 2,5% CCBIt	+ 3,0% CCBIt
RT (MPa)	1,24	1,04	1,05	1,08

O efeito da compactação por amassamento faz com que o valor médio da RT atenda ao limite mínimo preconizado pela Norma do DNIT ES031/2006, que deve ser de, no mínimo, 0,65 MPa (a 25°C) em misturas asfálticas destinadas a camadas de rolamento.

Figura 46 – Resultados do ensaio de Resistência à Tração

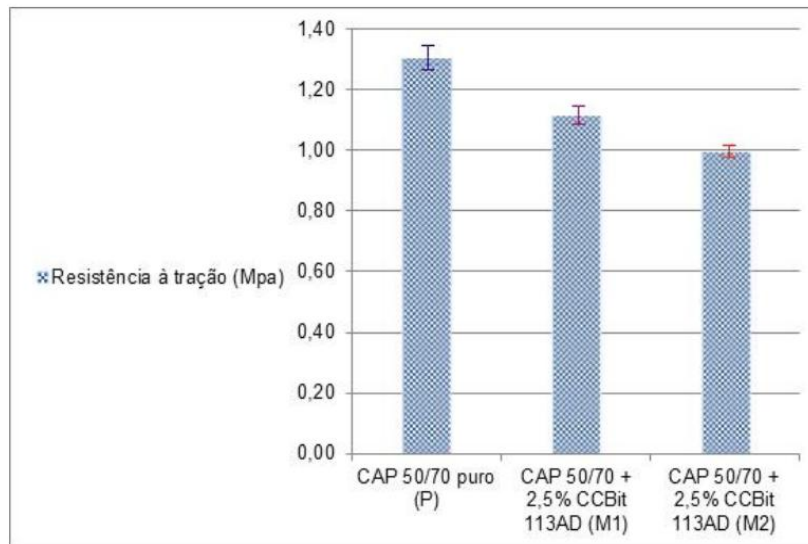


Pelo gráfico da Figura 46 é possível visualizar que a perda de resistência à tração dos corpos de prova está relacionada à diminuição da temperatura de moldagem. As amostras do CAP puro foram produzidas sob temperatura mais elevada demonstrando valores mais elevados de resistência à tração que pode ser atribuído à maior interação ligante/agregado.

Souza (2012) realizou estudo sobre propriedades mecânicas de misturas asfálticas com uso de óleo de mamona no ligante asfáltico. Este produto apresenta potencial capacidade de produção de misturas mornas. Os autores encontraram resultados similares ao desta pesquisa, com pequena redução da resistência à tração, permanecendo em torno de 1,00 MPa.

Fato semelhante foi observado no estudo de Oliveira (2014) que utilizou a dosagem Marshall. O autor encontrou resultados de RT para a mistura de CAP + 2,5% de CCBIt entre 1,00 e 1,12 MPa (Figura 47).

Figura 47 – Resultados do ensaio de Resistência à Tração (OLIVEIRA, 2014)



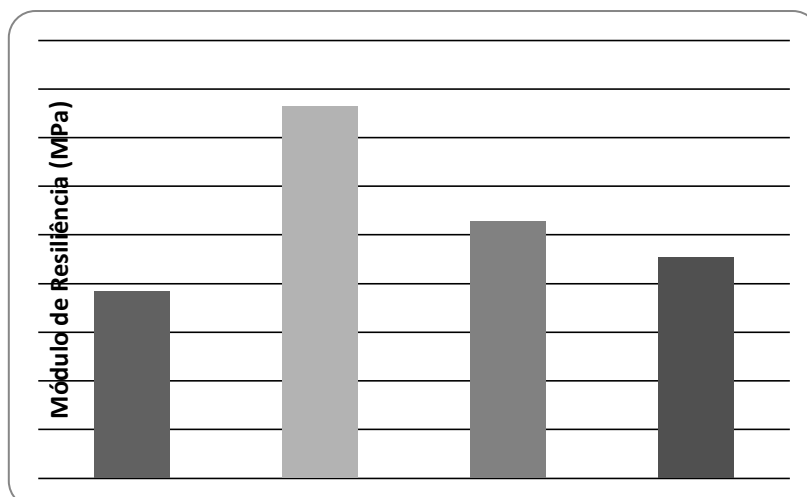
4.5.2 Módulo de Resiliência

Os ensaios de módulo de resiliência foram executados conforme item 3.3.2. Na Tabela 24 são apresentados os resultados dos módulos de resiliência médios de 3 cps das misturas analisadas. Na Figura 48 observa-se de forma gráfica o comportamento do MR das misturas com CAP puro e com CCBIt.

Tabela 24 – Resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência

Amostra	CAP PURO	+ 2,0% CCBIt	+ 2,5% CCBIt	+ 3,0% CCBIt
MR (MPa)	3832,0	7639,0	5269,5	4534,0

Figura 48 – Resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência

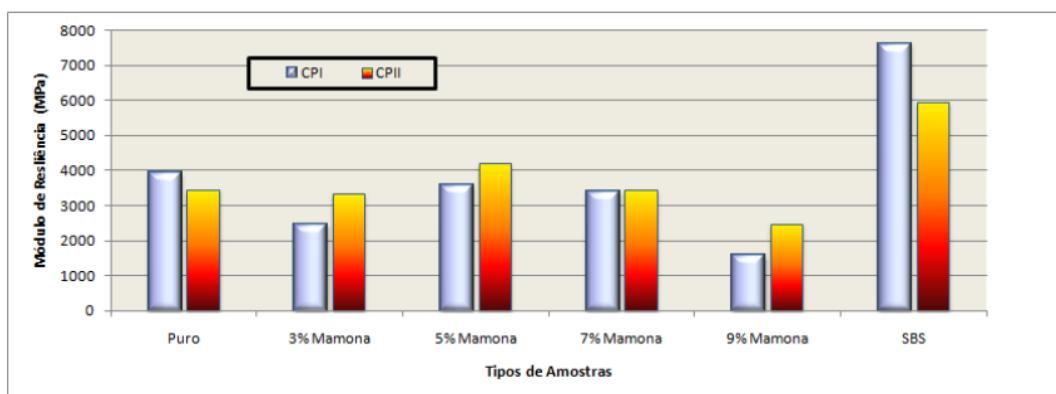


Os valores de módulo de resiliência sofreram alterações significativas para as misturas produzidas sob menores temperaturas, com aumento expressivo na mistura com 2,0% de CCBit, reduzindo à medida que o teor de CCBit aumenta, mas permanecendo com valores superiores aos da mistura com ligante puro. Segundo Bernucci (2007), os valores típicos de MR estão situados na faixa de 2.000 a 8.000 MPa para misturas asfálticas a 25°C. Para o ligante com 2,0% de CCBit o módulo encontrado foi de 7.639 MPa, semelhante a valor obtido por Budny et al (2012), de 7657 MPa, enquanto Oliveira (2014) obteve 3.741 MPa para o mesmo aditivo.

Os valores encontrados para as misturas asfálticas com ligante puro e com CCBit permaneceram dentro do intervalo citado. A falta de normatização para utilização do produto e da tecnologia em estudo pode ter ocasionado tais diferenças de valores.

Budny (2012) concluiu que com a diminuição de 20°C na temperatura de aquecimento dos agregados, os valores do MR aumentaram em cerca de 8% em misturas utilizando o CCBit. Constatou-se que o acréscimo de 1% do teor de CCBit fez diminuir cerca de 6% os valores de MR das misturas que passaram de 2% para 3% de aditivo, ou seja, mostrando que existe um teor ótimo de aditivo CCBit a ser acrescentado ao ligante asfáltico. Souza (2012) obteve um valor médio de MR de 2910 MPa com o teor de 3% de óleo de mamona (Figura 49). Na presente pesquisa para um teor de 3% de CCBit o valor encontrado foi de 4534 MPa. A comparação com os resultados obtidos por Souza (2012) é válida, pois tanto o óleo de mamona como o CCBit são ésteres metílicos.

Figura 49 – Resultados dos ensaios de Módulo de Resiliência (SOUZA, 2012)



O módulo de resiliência está associado à rigidez da mistura, portanto sua análise não pode ser feita de forma direta, permitindo, assim, valores menores ou maiores, mas que sejam compatíveis com a estrutura do pavimento e as deformações entre suas camadas (GAMA, *et al.* 2013).

4.5.3 Lottman Modificado

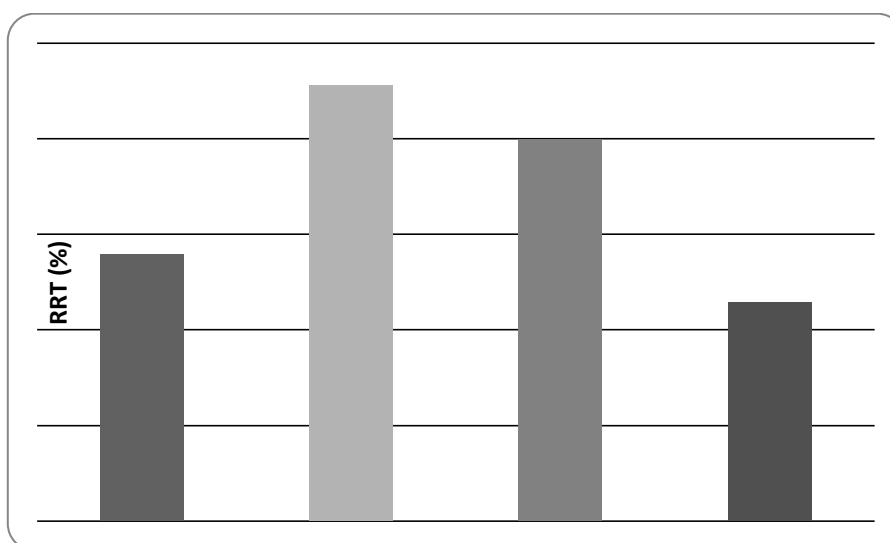
As resistências à tração de amostras com condicionamento (saturação, resfriamento e aquecimento em água) e amostras sem condicionamento se relacionam para obter perda da resistência por umidade, que é dada pela correlação (em percentagem) entre a RTu das amostras condicionadas e a RT das amostras não condicionadas, denominada Relação de Resistência Retida à Tração (RRT).

A Tabela 25 mostra os valores obtidos da relação da resistência retida à tração, assim como a Figura 48 ilustra em gráfico tais resultados.

Tabela 25 - Resultados da Relação da Resistência Retida à Tração

Amostra	CAP PURO	+ 2,0% CCBIt	+ 2,5% CCBIt	+ 3,0% CCBIt
RRT (%)	55,7	91,1	80,0	45,7

Figura 50 - Resultados da Resistência Retida à Tração



A AASHTO T283/89 sugere que o critério de definição da suscetibilidade de uma mistura é de 70% de RRT. Na versão da AASHTO T283/99, que compatibilizada para o método Superpave o critério é RRT 80%. O CAP puro e o CAP com 3,0% de

CCBit não atingiram o critério em nenhuma das versões da norma citada. Enquanto o CAP com 2,0 e 2,5% de CCBIt encontram-se dentro do limite de norma.

A mistura com o melhor desempenho ocorreu com 2,0% de CCBIt, que não apresentou perda significativa de Resistência à Tração após o condicionamento. As misturas com 2,5% de CCBIt também atenderam ao critério da RRT de 70% sugerida pela AASHTO. As misturas com CAP puro e com 3,0% de CCBIt caracterizam perda de resistência de mais de 30% quando submetidos ao condicionamento, portanto tais misturas possuem maior facilidade de apresentar dano por umidade, podendo causar problemas de desagregação dos agregados.

Motta et al. (2011) realizou pesquisa com misturas mornas e obteve valores de resistência retida à tração variando de 62 a 90% para misturas com Cecabase RT e Gemul XT14. Estes valores se assemelham aos encontrados nesta pesquisa para os teores de 2,0 e 2,5 % de CCBIt, que são 80 e 91,1%, respectivamente.

4.6 Considerações Finais

Inferese que os teores de 2 e 2,5% de CCBIt, adicionado à mistura asfáltica com 4,0% de CAP, resultou, para os corpos de prova submetidos aos ensaios, em propriedades volumétricas e mecânicas satisfatórias em relação aos critérios preconizados pelas normas adotadas. A mistura com estes teores, quando comparadas com as misturas de referência (CAP Puro), tiveram desempenho satisfatório e, em seu favor, a diminuição da temperatura em aproximadamente 10 graus centígrados (10,0°C).

CAPÍTULO 5

5.0 CONCLUSÕES

Os resultados experimentais deste trabalho fornecem conhecimento do comportamento das misturas asfálticas mornas produzidas com a incorporação do CCBit, em relação aos ensaios de caracterização física do ligante asfáltico (Penetração, Ponto de Amolecimento, Viscosidade Rotacional, etc) e aos ensaios mecânicos (Resistência à Tração por Compressão Diametral, Módulo de Resiliência e Lottman Modificado) com método de dosagem SUPERPAVE.

As temperaturas de usinagem e de compactação reduziram até 10,8 °C quando adicionado 3,0% de CCBit ao CAP puro. Entre os CAPs com diferentes teores de CCBit não houve diferença significativa destas temperaturas.

Para o ponto de amolecimento houve aumento da temperatura com a adição do CCBit, indicando que, diante de variações térmicas, o ligante asfáltico permanece mais flexível, aumentando a faixa de trabalhabilidade deste material, e uma maior resistência à deformação permanente. Para a Penetração ocorreu considerável redução, enquanto a Viscosidade Brookfield obteve resultados de temperatura inferiores ao CAP puro 50/70, o que reflete em melhoria da trabalhabilidade das misturas asfálticas.

O aumento do Módulo de Resiliência em relação ao CAP puro garante mais uma característica deste aditivo como um extensor, e mantendo o desempenho da mistura quanto às propriedades mecânicas do revestimento asfáltico, apresentando bom desempenho de resistência retida à tração e sem perda significativa na resistência à tração.

A utilização do aditivo CCBit proporcionou uma mistura em termos volumétricos e mecânicos satisfatória, podendo ser considerada uma alternativa promissora e interessante por apresentar boas propriedades ao ligante asfáltico, quanto ambiental por promover redução de emissão de gases causadores do efeito estufa com a redução da queima de combustíveis.

5.1 Sugestões para Futuras Pesquisas

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

- estudar outras faixas granulométricas para misturas asfálticas, para a verificação das propriedades volumétricas e mecânicas com o aditivo CCBit;
- realizar as dosagens baseadas em cada teor de aditivo tendo em vista que a dosagem realizada na presente pesquisa foi feita baseada no ligante puro, podendo esse teor de ligante não ser o ideal quando se tratar de ligante modificado;
- realizar ensaios de “Flow Number”, “Creep dinâmico” e de Fadiga para uma previsão de deformação permanente das misturas asfálticas com o aditivo CCBit;
- projetar e executar trechos experimentais numa mesma via utilizando as misturas asfálticas comuns e as modificadas com diferentes aditivos, para monitorar o desempenho de cada pavimento em campo; e
- realizar os ensaios mecânicos com outros teores de aditivo, tendo em vista que nem sempre os melhores resultados de ensaios reológicos dos ligantes produzem misturas com melhores resultados mecânicos.

CAPÍTULO 6

6.0 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.
- AASHTO, 2007, *Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture Induced Damage*. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T 283, Washington, D. C.
- ABNT, 2000, Materiais betuminosos - Determinação do ponto de amolecimento Método do anel e bola. Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 6560.
- ABNT, 2004, Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 15087.
- ASTM D6925 - 2009 Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor.
- AYRES C. S., DA SILVEIRA, L. E., DE SANT'ANA, H. B., SOARES, J. B. (2006). Produção e caracterização mecânica de misturas asfálticas obtidas a temperaturas intermediárias pela adição de zeólitas. 18º Encontro do Asfalto – Instituto Brasileiro de Petróleo e gás. Rio de Janeiro (RJ)
- BALBO, J. T. Pavimentação asfáltica: Materiais, projetos e restauração. Oficina de textos. São Paulo, 2007. 558p.
- BERNUCCI L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI J. A. P., SOARES J. B. Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros. 1ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2007. 501p.

- BUDNY, J. *Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas morna*. 2012. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. COPPE-Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- CAVALCANTI, L. S., “*Efeito de alguns modificadores de ligantes na vida de fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas*”. 2010. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- CEZARO JUNIOR, T. *Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas convencionais e modificadas*. 2008. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.
- CHOWDHURY, A., BUTTON, J. W. A review of warm mix asphalt. Technical Report. Texas Transportation Institute. 2008.
- D’Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowser, J., Harman, T., Jamshidi, M., Jones, W., Newcomb, D., Prowell, B., Sines, R. and Yeaton, B. (2008). Warm-Mix Asphalt: European Practice.
- DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 035/98. Agregados – Determinação da Abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 1998.
- DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 081/98. Agregados – Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1998.
- DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 083/98. Agregados – Análise Granulométrica . Rio de Janeiro, 1998.
- DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 131/2010. Determinação do Ponto de Amolecimento- método Anel e Bola. Rio de Janeiro, 1998.
- DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 135/2010. Determinação do Módulo de Resiliência . Rio de Janeiro, 1998.

- DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 138/2010. Misturas betuminosas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 1994.
- DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes, ME 155/2010. Determinação da Penetração . Rio de Janeiro, 1998.
- DNIT: Departamento Nacional de Infra-Estrutura e Transportes. Manual de Pavimentação. Rio de Janeiro, 1996.
- FERREIRA, C. I. G. “*Avaliação do desempenho de misturas betuminosas temperadas*”. 2009. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho. Portugal.
- GAMA, D. A. *Avaliação do potencial do uso do Etileno Acetato de Vinila (EVA) descartado pela indústria calçadista em misturas asfálticas*. 2013. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.
- HUTSCHENREUTHER, J. , “New technologies developed by the use of Warm Asphalt Technologies ” Reunião Anual de Pavimentação, Rio de Janeiro, Outubro, 2010.
- HURLEY, G. AND B. PROWELL, “Evaluation of Aspha-min® Zeolite for Use in Warm Asphalt Mixes,” NCAT Report No. 05-04, Auburn University, Auburn, AL, June 2005.
- HURLEY, G. AND B. PROWELL. *Warm-mix asphalt: best practices*. National Asphalt Pavement Association. 2007. Lanham.
- HURLEY, G. C.; PROWELL, B. D. Evaluation of potential processes for use in warm mix asphalt. In: Association of Asphalt Paving Technologists Annual Meeting, 81., Savannah, 2006. Annual Meeting and Technical Sessions. Savannah: AAPT, V.75, 2006.
- INSTITUTO DO ASFALTO, *Manual de Asfalto*. LEXINTON, KY E.U.A., 1989, rev. 2002, editora Petrobras, Brasil.

- KENNEDY, T.W.; MOULTHROP, J. S. e HUBER, G.A. Development of SHRP Mixture Specification and Design and Analysis System. 1993. Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists-AAPT. Vol. 62, USA.
- KRISTJANSDOTTIR, O. *Warm Mix Asphalt for cold weather paving*. 2006. Dissertação de Mestrado – University of Washington. Department of Transportation. Olympia, Washington, EUA.
- LIMA, A. T. (2003) Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.
- MACCARONE, S. *Cold Asphalt systems as an alternative to hot mix*. 9th AAPA International Asphalt Conference, November 1994.
- 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.
- NASCIMENTO, L. A. H. Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- NCHRP Report 691. *Mix Design Practices for War Mix Asphalt*, NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM.
- NEWCOMB, D. *“Innovations in hot mix asphalt” highway quality compendium, federal highway compendium*. United States Department of Transportation. 2007.
- OLIVEIRA, R. B. estudo sobre o efeito do ccbt-113ad no comportamento mecânico de misturas asfálticas. 2014. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil.
- OTTO, G. G. *Misturas asfálticas mornas: verificação da fadiga e do módulo complexo*. 2009. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, Brasil.

PÉREZ, Y. A. G. *Avaliação do desempenho mecânico e reológico de misturas asfálticas mornas*. 2013. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, Brasil.

SOUSA FILHO, A. C.; SILVEIRA, L. E. M.; SOARES, J. B.; SANTANA, H. B. Avaliação da Influência de Zeólitas Sobre as Propriedades Volumétricas de Misturas Asfálticas Prodizadas a Temperaturas Intermediárias. In: XX Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET, Brasília, 2006.

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