

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE JOINVILLE
ENGENHARIA DE INFRAESTRUTURA**

JÉSSICA LEMKE GUMIEL

**AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE REDISET E EVOTHERM NA ESTABILIDADE E
FLUÊNCIA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS EM LABORATÓRIO**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro de Joinville na
Universidade Federal de Santa Catarina,
como requisito parcial para obtenção
do título de Engenheiro de
Infraestrutura.**

Joinville - SC

2015

**AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE REDISET E EVOTHERM NA ESTABILIDADE E
FLUÊNCIA DAS MISTURAS ASFÁLTICAS EM LABORATÓRIO**

JÉSSICA LEMKE GUMIEL

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Joinville na
Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheiro de Infraestrutura.**

Orientador: Prof. Dr. Yader Alfonso Guerrero Pérez

Joinville - SC

2015

GUMIEL, Jéssica Lemke; GUMIEL, J. L.

Avaliação da Adição de Rediset e Evothem na Estabilidade e Fluência das Misturas de Concreto Asfáltico em Laboratório.

Joinville, 2015, volume único, 103p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura),

Curso de Graduação em Engenharia de Infraestrutura,

Centro de Joinville – Campus Joinville

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Orientador: Prof. Dr. Yader Alfonso Guerrero Pérez

Defesa: 07/12/2015

Palavras chave: estabilidade, fluência, misturas asfálticas, aditivo químico, Rediset, Evothem

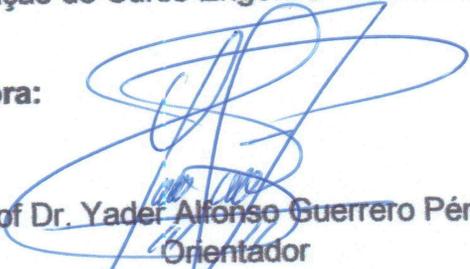
**AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE REDISET E EVOTHERM NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS EM
LABORATÓRIO**

Este trabalho foi julgado para obtenção do título de Graduado em Engenharia de Infraestrutura, e aprovado em sua forma final pela banca examinadora perante o curso de Engenharia de Infraestrutura da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Joinville.


Prof.ª Dr.ª Valéria Bennack.
UFSC – Campus Joinville

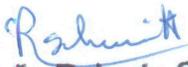
Centro de Engenharia da Mobilidade (CEM)
Coordenação do Curso Engenharia de Infraestrutura

Comissão Examinadora:


Prof. Dr. Yader Alfonso Guerrero Pérez
Orientador
UFSC – Campus Joinville
Centro de Engenharias da Mobilidade


Prof. Dr. Breno Salgado Barra
UFSC – Campus Joinville
Centro de Engenharia da Mobilidade (CEM)

Prof. Dr. Marcelo Heidemann
UFSC – Campus Joinville
Centro de Engenharia da Mobilidade (CEM)


Eng. João Roberto Schmitt
Consultoria em Engenharia

Joinville, 10 de Dezembro de 2015

AGRADEIMENTOS

Agradeço primeiramente meus pais Ismael e Eliane que desde sempre foram meus exemplos de vida e pessoas fundamentais, não somente neste processo, mas por todo caminho que percorri. Agradeço por sempre terem se esforçado para me proporcionar a melhor educação, pelos valores transmitidos, pelo amor e carinho, pelos intermináveis ensinamentos e conselhos e por sempre me apoiar e me orientar em minhas escolhas. Graças ao amor e dedicação de vocês tenho conquistado tantos sonhos e alcançado minhas metas. Frase alguma poderá expressar imenso amor e gratidão que sinto por vocês.

Ao meu amado namorado Vinícius Ariel, meu maior companheiro e amigo para todos os momentos, a quem agradeço por todo amor, paciência, compreensão e incentivo. Por sempre ter se mostrado pronto para me escutar nos meus momentos de fraqueza e por usar as palavras certas para me dar força nas muitas horas em que precisei. Agradeço sua paciência nos momentos de ausência. Serei eternamente grata.

A toda minha família Lemke e Gumiel, que sempre torceram pelo meu sucesso desde meus primeiros passos até minhas mais recentes conquistas.

Em especial minhas duas avós. À minha Oma, que sempre foi muito paciente me cuidando, e me entretendo com as mais diversas brincadeiras. Vó Zilda sempre preocupada com meu bem estar e em me ver feliz.

Às minhas tias queridas que desde meu nascimento me forneceram tanto carinho. A minha Tia Janete que mesmo longe sempre se mostrou presente nos momentos em que mais precisei, me passando palavras de incentivo e força. À minha Tia Tânia em quem me inspiro tanto por sua determinação e garra. À minha Tia Denise que me deu importantíssimos conselhos relacionados à graduação.

Aos meus queridos tios, Tio Washington, Tio George e Tio Emanuel, que sempre almejavam meu sucesso e felicidade. Sempre me recebendo de braços abertos.

Não poderia deixar de agradecer aos queridos Ilário e Saionir por cuidar das pessoas que mais amo. Pelos momentos de alegria e lazer, por me considerarem como família e se importarem tanto comigo, com minha felicidade e realizações.

Às minhas amigas Lais, Geovana e Elisa, por todos os dias e noites de estudo muito bem aproveitados, sem o companheirismo, amizade e ajuda de vocês não teria chego até aqui.

Ao companheiro de muitos dos dias de Laboratório, Rodrigo, obrigada por toda atenção, apoio e auxílio nas atividades.

Aos demais amigos que conquistei durante minha vida por todos momentos de diversão e risadas, pelo companheirismo.

À empresa CBB asfaltos, por fornecer os materiais betuminosos e aditivos indispensáveis à esta pesquisa.

À empresa Vogelsanger Britagem, por fornecer os agregados minerais também indispensáveis à esta pesquisa.

Ao meu professor orientador Yader, por ter me apresentado este tópico tão interessante, as misturas asfálticas mornas. Por ter se colocado à disposição de me orientar nesta pesquisa. Por toda sua ajuda, tempo e finais de semanas gastos no laboratório.

Ao meu professor de graduação Breno, também responsável pelo laboratório de pavimentação. Agradeço por ter me permitido utilizar as instalações, por me auxiliar nos ensaios e também pelas palavras de conforto quando precisei.

Ao superintendente engenheiro Antônio Carlos, por ter me permitido estagiar em um órgão tão importante como o DNIT. Por ter me proporcionado um estágio tão rico em conhecimentos e aprendizados. Agradeço também aos colegas de trabalho do DNIT pelos desejos de sucesso e momentos agradáveis de trabalho.

Ao engenheiro João Roberto Schmitt por aceitar o convite para ser meu avaliador, pelos diversos ensinamentos passados. Pela atenção e paciência durante meu período de estágio.

Ao meu chefe, engenheiro Afro, por sua compreensão e apoio, por ter me permitido me ausentar do meu estágio sempre que necessário, para que os ensaios pudessem ser realizados. Ao meu colega de trabalho Eduardo, por toda atenção e suporte oferecidos durante esta jornada.

Agradeço a todas pessoas que de algum modo foram importantes para que mais esse sonho se realizasse em minha vida.

“Conhecimento é poder”

(Francis Bacon)

“Adiciona a pouco e pouco que mais
tarde terás um grande monte”

(Ovídio)

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO	16
1.1. Considerações Iniciais	16
1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA	19
1.2.1 Objetivo Geral	19
1.2.2. Objetivos específicos	19
1.3. PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO	20
1.4. DELIMITAÇÃO DO ESPAÇO DE PESQUISA	23
1.5. IMPORTÂNCIA DO TEMA: JUSTIFICATIVAS	24
1.6. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	26

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1. Considerações Iniciais	27
2.1.1. Agregados	29
2.1.2. Ligantes	30
2.2. Classificação e tipos de misturas asfálticas	31
2.3. Misturas Asfálticas e a Temperatura	33
2.4. DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	35
2.4.1. Dosagem Marshall	36
2.4.2. Método Superpave	38
2.4.3. Método Francês	39

CAPÍTULO 3

AS MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS	43
3.1. Considerações Iniciais	43
3.1.1. Vantagens	45
3.1.2. Tecnologias das misturas asfálticas mornas	50
3.1.2.1. Aditivos Orgânicos	
3.1.2.2. Aditivos Químicos	
3.1.2.3. Formação de Espuma	

CAPÍTULO 4	
ESTUDOS LABORATORIAIS	59
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	59
4.2. MATERIAIS	60
4.2.1. Agregados Minerais	60
4.2.2. Ligante Betuminoso e Aditivos	66
4.2. SELEÇÃO DA CURVA GRANULOMÉTRICA	72
4.3. TEMPERATURA DE USINAGEM E COMPACTAÇÃO	74
4.4. ENSAIO MARSHALL	77
4.4.1. Preparação dos corpos de prova	77
4.4.2. Estabilidade e Fluência Marshall	84
4.5. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA	86
CAPÍTULO 5	
RESULTDOS E ANÁLISE DE RESULTADOS	87
5.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	87
5.2. RESULTADOS DO ENSAIO MARSHALL	88
5.3. RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA POR COMRESSÃO DIAMETRAL	96
CAPÍTULO 6	
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	98
REFERÊNCIAS	101

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP – Agência Nacional de Petróleo
CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo
CO – Monóxido de Carbono
CO₂ – Dióxido de Carbono
COV – Composto Orgânico Volátil
DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DOPE – Melhorador de adesividade
ES – Especificação de Serviço
FHWA – Federal Highway Administration
IP – Índice de Pfeiffer e Van Doormaal
LCPC – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LTI – Laboratório de Técnicas de Infraestrutura
M1 – Mistura 1
M2 – Mistura 2
M3 – Mistura 3
MAM – Misturas Asfálticas Mornas
ME – Método de Ensaio
NAPA – National Asphalt Pavement Association
NBR – Norma Brasileira
NCAT – National Center for Asphalt Technology
NIOSH – National Institute for Occupational Safety and Health
P – Penetração
PA – Ponto de Amolecimento
SC – Santa Catarina
sSF – Segundos Saybolt-Furol
TI – Tração Indireta

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

VAM – Vazios do Agregado Mineral

VCB – Vazios Cheio de Betume

%V – Percentagem de vazios

WAM – Warm Asphalt Mix

PCG – Prensa de Compactação por Cisalhamento Giratório

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Quantidades de corpos de prova	22
Figura 1.2 – Sequência do estudo	23
Figura 2.1 – Camadas do pavimento	27
Figura 2.2 – Classificação das misturas asfálticas quanto à temperatura	32
Figura 2.3 – Recobrimento do agregado pelo ligante com a elevação da temperatura	34
Figura 2.4 – Fluxograma método Superpave	39
Figura 2.5 – Fluxograma do procedimento do método Francês	42
Figura 3.1 – Comparação de emissão entre modo padrão de construção e das misturas asfálticas mornas	47
Figura 3.2 – Consumo de combustível por tipo de mistura	48
Figura 3.3 – Viscosidade do ligante modificado com aditivo orgânico	52
Figura 3.4 - Sasobit em flocos	53
Figura 3.5 – Redução ângulo de contato devido ao aditivo	53
Figura 3.6 – Produção asfalto espuma através de injeção direta	57
Figura 3.7 – Aditivo Adevra	58
Figura 3.8 – Aditivo Aspha-min	58
Figura 4.1 – Pedreira Vogelsanger	61
Figura 4.2 – Diferentes graduações de britas coletadas na pedreira	61
Figura 4.3 – Equipamento peneirador e acessórios de proteção	62
Figura 4.4 – Aparelho de Los Angeles	63
Figura 4.5 – Aditivos surfactantes	66
Figura 4.6 – Processo de mistura do aditivo ao ligante	67
Figura 4.7 – Ensaio de penetração	68
Figura 4.8 – Ensaio ponto de amolecimento	69
Figura 4.9 – Curva viscosidade para CAP convencional	71
Figura 4.10 – Curva granulométrica da curva utilizada	74
Figura 4.10 – Curva viscosidade Saybolt-Furol das misturas asfálticas	75
Figura 4.11 – Curva viscosidade Brookfield misturas	76
Figura 4.12 – Amostras de agregados separadas	76
Figura 4.13 – Amostras na estufa	78

Figura 4.14 – Processo de mistura manual	79
Figura 4.15 – Compactação utilizando soquete Marshall	80
Figura 4.16 – Extração manual do corpo de prova	80
Figura 4.17 – Pesagem do corpo de prova ao ar e submersa	82
Figura 4.18 – Mesa de rompimento	84
Figura 4.19 – Ensaio Marshall	85
Figura 5.1 – Gráfico do ensaio Marshall	88
Figura 5.2 – Comparação pelos gráficos obtidos através dos parâmetros Marshall (M1 e M2)	91
Figura 5.3 - Comparação pelos gráficos obtidos através dos parâmetros Marshall (M1 e M3)	94
Figura 5.4 – Gráfico carga de ruptura	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Requisitos de dosagem	37
Tabela 2.2 – Limites dos parâmetros analisados	38
Tabela 3.1 – Percentagem de redução de emissão de gases	46
Tabela 3.2 – Resumo de aditivos comercializados	51
Tabela 4.1 – Materiais utilizados nas misturas asfálticas	59
Tabela 4.2 – Pesos necessário de materiais	62
Tabela 4.3 – Resultado ensaio abrasão de Los Angeles	63
Tabela 4.4 – Resultado ensaio durabilidade	64
Tabela 4.5 – Densidade Real dos Granulares Graúdos	65
Tabela 4.6 – Densidade Real dos Granulares Miúdos	65
Tabela 4.7 – Dosagem de aditivos	67
Tabela 4.8 – Resultado ensaio de penetração	68
Tabela 4.9 – Resultados do índice de susceptibilidade térmica dos ligantes	70
Tabela 4.10 – Resumo resultados caracterização dos ligantes	72
Tabela 4.11 – Composição da curva granulométrica	73
Tabela 4.12 – Temperaturas de usinagem e compactação de cada mistura	76
Tabela 5.1- Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização do agregado	87
Tabela 5.2 – Resumo dos valores médios obtidos no ensaio Marshall em relação aos valores normativos	89
Tabela 5.3 – Resultados da resistência à tração indireta	97

RESUMO

Esta pesquisa tem por objetivo analisar os parâmetros volumétricos juntamente com a estabilidade e fluência Marshall de misturas asfálticas mornas para camadas de rolamento, como uma alternativa menos agressiva ao meio ambiente, sem comprometer o desempenho do pavimento. O uso de temperaturas reduzidas de usinagem e compactação resultam em menores níveis de consumo de energia, melhores condições de trabalho em campo e menores danos ambientais. Para o desenvolvimento desta pesquisa foram produzidos três tipos de misturas asfálticas, sendo uma mistura convencional (agregado mineral mais ligante betuminoso CAP50/70) e as misturas mornas com adição dos aditivos Rediset e Evotherm, que foram elaboradas a menores temperaturas de usinagem e compactação, total, foi aplicada uma redução de 30°C no processo de produção. A mistura convencional foi produzida a temperatura de 150°C, temperatura obtida através da análise da curva viscosidade - temperatura, em comparação as misturas mornas foram preparadas à temperaturas de 120°C. Os procedimentos para avaliação da estabilidade e fluência segundo a metodologia Marshall foram realizados em laboratório tendo seu início na caracterização dos três tipos de ligantes betuminosos utilizados, dois deles resultantes da mistura do cimento asfáltico convencional com os aditivos. A metodologia Marshall foi a metodologia escolhida para estabelecer o teor de trabalho de ligante e a determinação da resistência das misturas asfálticas. Após a determinação do teor de trabalho, foram realizados ensaios de tração indireta. Os resultados experimentais das misturas mornas foram comparados com os resultados obtidos com a mistura convencional, e indicaram que podem ser utilizadas como alternativa às misturas asfálticas convencionais.

Palavras-chave: estabilidade, fluência, aditivo químico, misturas asfálticas, Rediset, Evotherm,.

ABSTRACT

The aim of this research is to analyse the mechanical behaviour of Warm Asphalt Mixes (WAM) as environment less aggressive alternative, without lost of performance. The use of lower mixing and compaction temperatures results in lower levels of energy consumption, better working conditions on the field, and less environment damage. Three types of asphalt mixtures were prepared, one of them is the traditional (mineral aggregate plus bitumen class CAP 50/70) that was taken as reference. The two other was warm mixes with Rediset and another with Evotherm addition, which uses lower temperatures of mixing and compaction. The control mix was produced at temperatures around 150°C, in comparison the warm mixes were produced at temperatures around 120°C. The procedures to evaluate the mechanical behaviour of the asphalt mixes have begun at the laboratory with characterization tests using the three types of bitumen. For being, the official technical procedure adopted in Brazil, the Marshall Dosage method was chosen to determine the optimum asphalts binder content and to define the resistance of all three mixes. In addition, indirect tensile tests were realized to aid the final optimum content choice. The experimental results of the warm mixtures evaluated in this study were compared to the results obtained for the control mix and indicated that such mixtures can be successfully used as alternatives for conventional asphalt mixes.

Keywords: stability, fluency, chemical additives, asphalt mixes, Rediset, Evotherm.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

Ao passar dos anos a preocupação com o meio ambiente e, principalmente em relação ao aquecimento global, vem crescendo expressivamente. O crescimento acelerado da população, conseqüentemente gera um aumento nas emissões de gases agravantes do efeito estufa. Acredita-se que os gases julgados responsáveis por este fator estão relacionados à queima de combustíveis fósseis. A queima destas substâncias de origem mineral, derivados do petróleo, geram dentre outros gases, o dióxido e monóxido de carbono, que se concentram em regiões da atmosfera formando uma camada que impede a dissipação do calor proveniente da irradiação emitida pelo sol (FELGUEIRAS, 2013). A queima de combustíveis fósseis ocorre nos mais variados ramos da indústria e do cotidiano, por isto especialistas estão estudando maneiras de amenizá-las. Desde o momento da criação do Protocolo de Kyoto, que ocorreu no ano de 1997 em uma das Conferências para o Meio Ambiente, o desafio de reduzir as emissões destes gases prejudiciais vem sendo um próspero foco de estudos em diversas áreas (MOTTA, 2011). Porém, considerando que muitos atos do nosso dia a dia envolvem a queima destes combustíveis, reduzir este índice de emissão poder ser difícil.

No setor rodoviário novas tecnologias estão sendo desenvolvidas na área da pavimentação para uma tentativa de reduzir a emissão do gás carbônico e a utilização de recursos naturais, incorporando assim conceitos de sustentabilidade às atividades (GUERRERO, 2013). Com este intuito e o de proporcionar um comportamento similar ou superior dos revestimentos convencionais surgiram, entre outras, novas tecnologias que permitiram que os pavimentos fossem fabricados a temperaturas inferiores. A técnica, que deu origem à nomeada mistura asfáltica morna, foi desenvolvida primeiramente na Europa e testada em uma rodovia rural na Noruega no ano de 1996 (PROWELL, 2007; NEWCOMB, 2006).

O tipo de mistura mais frequentemente utilizado no Brasil é a Mistura Asfáltica a Quente, porém o uso de misturas que utilizam uma menor

temperatura vem crescendo progressivamente (PENZ, 2010). As misturas quentes ocorrem em temperaturas superiores à 150°C (NAKAHARA, 2010 *apud* GUERREO, 2013), a alta temperatura é essencial para a retirada de umidade dos agregados, pois a quantidade de água encontrada nos agregados tende a bloquear o processo de secagem, conseqüentemente aumentando o gasto de combustível e energia pela usina, afetando também a adesividade agregado ao ligante, no interstício granular/ligante (PROWELL & HURLEY, 2007). Além de proporcionar uma boa trabalhabilidade e tempo necessário para usinagem e compactação do material, a alta temperatura também é responsável por diminuir o ângulo de contato granular-ligante, pela redução da viscosidade (BUTTON, 2007; AL-RAWASHDEH, 2008).

Segundo Bernucci *et al* (2008), as misturas frias são recomendadas para baixo volume de tráfego, para camadas intermediárias do pavimento ou em operações de conservação e manutenção, enquanto no geral as misturas usinadas a quente com uma granulometria densa, quando dosadas e usinadas com o ligante adequado, possuem uma resistência mais elevada e tem sua utilização em revestimentos onde se espera um elevado volume de tráfego.

As misturas frias são obtidas a temperatura ambiente, 25°C a 55°C, resultante da combinação dos agregados com emulsão betuminosa ou asfalto diluído, permitindo a usinagem e compactação à temperatura ambiente, sem a necessidade do aquecimento dos agregados ou da emulsão (FELGUEIRAS, 2013 *apud* JÍMENEZ, 2010). A viscosidade desejada para que se possa usar e compactar a mistura a frio pode ser obtida através da adição de água ao betume, que é disperso na água com a utilização de agentes emulsionantes, cujas moléculas possuem parte que se atrai ao ligante betuminoso e parte pela água, de maneira que a garantir e facilitar a estabilidade da dispersão, quando utilizado com emulsão asfáltica (BARBOSA, 2012). Visto que o funcionamento do material não depende da temperatura, as misturas a frio são facilmente transportáveis, tornando este tipo de mistura ideal para o uso na manutenção e construção de estradas distantes de usinas de asfalto (FELGUEIRAS, 2013).

As misturas frias são menos prejudiciais ao meio ambiente e a saúde dos trabalhadores da área de pavimentação, porém não atendem o grau de resistência necessário para uma rodovia de alto volume de tráfego, de modo que a tecnologia das misturas asfálticas mornas se destaque quanto ao benefício

ambiental e econômico (AMONI, 2014). A Mistura Asfáltica Morna (MAM), por ser produzida a uma menor temperatura tem diversos benefícios. Sabe-se que temperaturas muito elevadas de usinagem e compactação podem acelerar o processo de envelhecimento do ligante, nesse aspecto as MAM tendem a ter um melhor desempenho em termos de resistência às trincas e susceptibilidade a umidade (D'ANGELO *et al*, 2008).

Dentre alguns benefícios que a utilização das misturas mornas pode trazer estão a diminuição da emissão de gases poluentes e prejudiciais ao efeito estufa, aliado a uma melhora no ambiente de trabalho no campo da pavimentação, a uma temperatura mais amena e menor toxicidade no ar. Pode-se citar ainda a redução do consumo de combustível, visto que é necessário menos combustível para se alcançar uma temperatura menor (WARGHA, 2013).

O princípio de funcionamento das MAM pode estar ligado a redução da viscosidade do ligante asfáltico, quando se utiliza aditivos orgânicos ou asfalto espuma. Ou ainda alterando as propriedades superficiais e interfaciais dos ligantes, ao utilizar um agente surfactante que modifica o ângulo de contato granular/ligante, de modo a permitir a redução das temperaturas para usinagem e compactação, sem alterar a curva viscosidade-temperatura do ligante (GUERRERO, 2013; MOTTA, 2011; OTTO, 2012; BARBOSA, 2012). Diversas são as tecnologias disponíveis que podem ser utilizadas, no entanto, a adição destes componentes pode acarretar em uma mudança no comportamento mecânico e reológico da mistura, assim as mudanças e suas causas devem ser estudadas e avaliadas quanto a sua viabilidade técnica e econômica (GUERRERO, 2013).

O problema da movimentação de cargas e passageiros é o predomínio do uso do modal rodoviário. Ambas quantidades de cargas são crescentes sendo um fator comum caminhões de carga com sobrepeso. Exigindo assim rodovias com maiores e melhores padrões de resistências às deformações, conforto e segurança. Para isto é necessário que novas técnicas de pavimentação sejam estudadas e implantadas de forma a reduzir custos e otimizar o modo de fabricação dos pavimentos (ROHDE, 2007). Uma das opções seria a escolha de novos materiais para compor as misturas asfálticas, materiais estes que ajudem as misturas a obterem um melhor desempenho. Para tanto, como comentado anteriormente, qualquer novo material adicionado pode causar uma mudança no

comportamento mecânico e reológico do produto. Este estudo, portanto, trata-se de avaliar as mudanças nos parâmetros volumétricos e de estabilidade e fluência e a resistência à tração indireta das misturas asfálticas afim de verificar a possibilidade de utilização dos aditivos surfactantes, como forma de reduzir à temperatura de usinagem e compactação.

1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo principal avaliar alguns parâmetros de comportamento, volumétricos, de estabilidade, fluência e a resistência à tração indireta, a partir da Metodologia Marshall, das misturas asfálticas mornas, com o uso dos aditivos Rediset e Evotherm. Estes parâmetros serão comparados com uma mistura asfáltica convencional, dosada segundo a ótica da metodologia Marshall para a formulação das misturas asfálticas. Em busca de uma avaliação mais aprimorada serão também analisados e comparados os ensaios de caracterização dos ligantes betuminosos.

1.2.2. Objetivos específicos

- Listar as vantagens de utilização das misturas asfálticas mornas;
- realizar ensaios de caracterização dos agregados utilizados;
- realizar ensaios de caracterização do ligante puro e modificados, verificando a diferença nos resultados;
- verificar a influência da adição do Rediset e do Evotherm nos parâmetros volumétricos e de estabilidade e fluência e a resistência à tração indireta das misturas asfálticas;
- analisar as mudanças na trabalhabilidade das misturas asfálticas mornas quando usinadas em temperaturas reduzidas;
- Comparar as características de estabilidade, fluência e resistência a tração indireta obtidas nos ensaios das misturas asfálticas mornas com a mistura convencional.

1.3. PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO

Para o desenvolvimento dos estudos laboratoriais e análise das propriedades de cada tipo de mistura estudado, foram produzidos três tipos de misturas asfálticas utilizando o CAP50/70. Em duas das misturas asfálticas foram utilizados os aditivos Rediset e Evotherm, respectivamente, e uma terceira mistura, denominada de mistura de controle, confeccionada do modo convencional para ser utilizada como referência na comparação dos resultados no manejo e trabalhabilidade desta com as misturas modificadas.

A escolha da curva granulométrica a ser utilizada levou em consideração o tipo de graduação mais comumente utilizada no Brasil, que seria uma curva com a graduação densa, que se encaixa dentro dos limites da Faixa C, recomendada pelo DNIT (DNIT-ES 031/2006). Contudo, a variação das curvas granulométrica que se encaixam dentro dos limites desta faixa são consideravelmente grandes, de modo que podem apresentar comportamentos diversos dependendo das suas características, correndo o risco de apresentar resultados fora dos padrões esperados. Portanto a curva granulométrica escolhida para o estudo é uma curva granulométrica densa obtida a partir da fórmula de Fuller-Talbot a qual foi utilizada inicialmente na pesquisa de Barra (2005), Guerrero (2013); Otto (2009); Búrigo (2015) por se tratar de uma curva granulométrica com base em uma metodologia racional, permitindo se obter uma curva granulométrica mais bem definida e contínua, com um maior controle em sua formulação.

O material granular empregado nas amostras é proveniente da pedreira da empresa Vogelsanger, localizada no município de Joinville em Santa Catarina. O material coletado foi levado ao Laboratório de Técnicas de Infraestrutura (LTI) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) no Campus de Joinville, onde foi caracterizado e separado nas frações utilizadas no estudo.

Os ensaios de caracterização foram realizados tanto nos granulares como no ligante asfáltico puro e modificados. Os resultados de caracterização obtidos a partir do ligantes modificados foram então comparados com os resultados do ligante convencional, puro.

Os agregados foram caracterizados a partir dos ensaios:

- 1) Los Angeles (DNER-ME 035/98);
- 2) Durabilidade (DNER-ME 089/94);
- 3) Adesividade (DNER-ME 078/94);
- 4) Índice de Forma (DNER-ME 086/94);
- 5) Massa específica real graúdo e miúdo (DNER-ME 084/95).

O ligante asfáltico, Cimento Asfáltico de Petróleo CAP 50/70, foi fornecido pela empresa CBB asfaltos, e caracterizado pelos ensaios:

- 1) Ponto de amolecimento Anel Bola (DNIT 131/2010-ME);
- 2) Penetração (DNIT 155/2010-ME);
- 3) Viscosidade Saybolt-Furol (ABNT NBR 14756/2001)
- 4) Viscosidade Brookfield (ABNT NBR 15184);

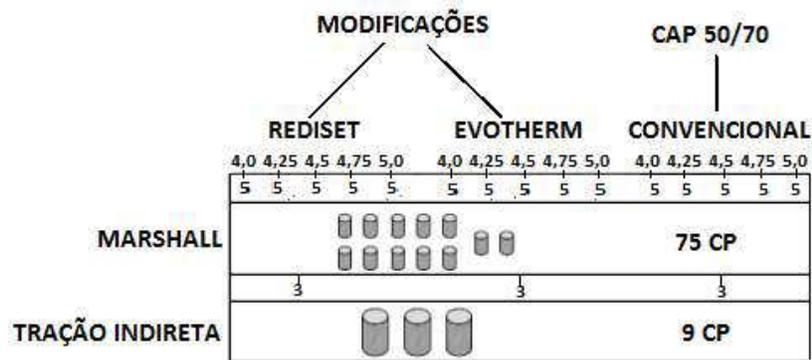
A mistura de controle, produzida sem a utilização de qualquer aditivo, foi empregada para se determinar o teor de trabalho do betume, com base nas especificações de dosagem Marshall. Foram encontrados os teores de trabalho para as misturas mornas a fim de se confirmar o que sugere OTTO (2009), que a dosagem das misturas asfálticas mornas pode ser considerada o mesmo valor do teor de trabalho das misturas convencionais. À determinação da quantidade de aditivo a ser utilizado para modificação do ligante betuminosos foi realizada tendo em conta às recomendações do fabricante do ligante e com base na literatura estudada.

O método de Dosagem Marshall permite estabelecer o teor de betume de trabalho, a partir dos parâmetros volumétricos, como o volume de vazios, valores de densidade aparente, relação betume e vazios para avaliação do desempenho, calculados com base no peso e dimensões dos corpos de prova. A partir do ensaio de compressão diametral, adquiriu-se os valores utilizados como parâmetros de resistência.

Os resultados obtidos para as misturas asfálticas mornas são então comparados com a mistura de controle, sendo analisadas as diferenças nos parâmetros volumétricos, nos resultados de estabilidade, fluência e resistência à tração indireta, a fim de gerar conclusões quanto a viabilidade de substituição das misturas asfálticas mornas em relação ao desempenho das misturas asfálticas convencionais.

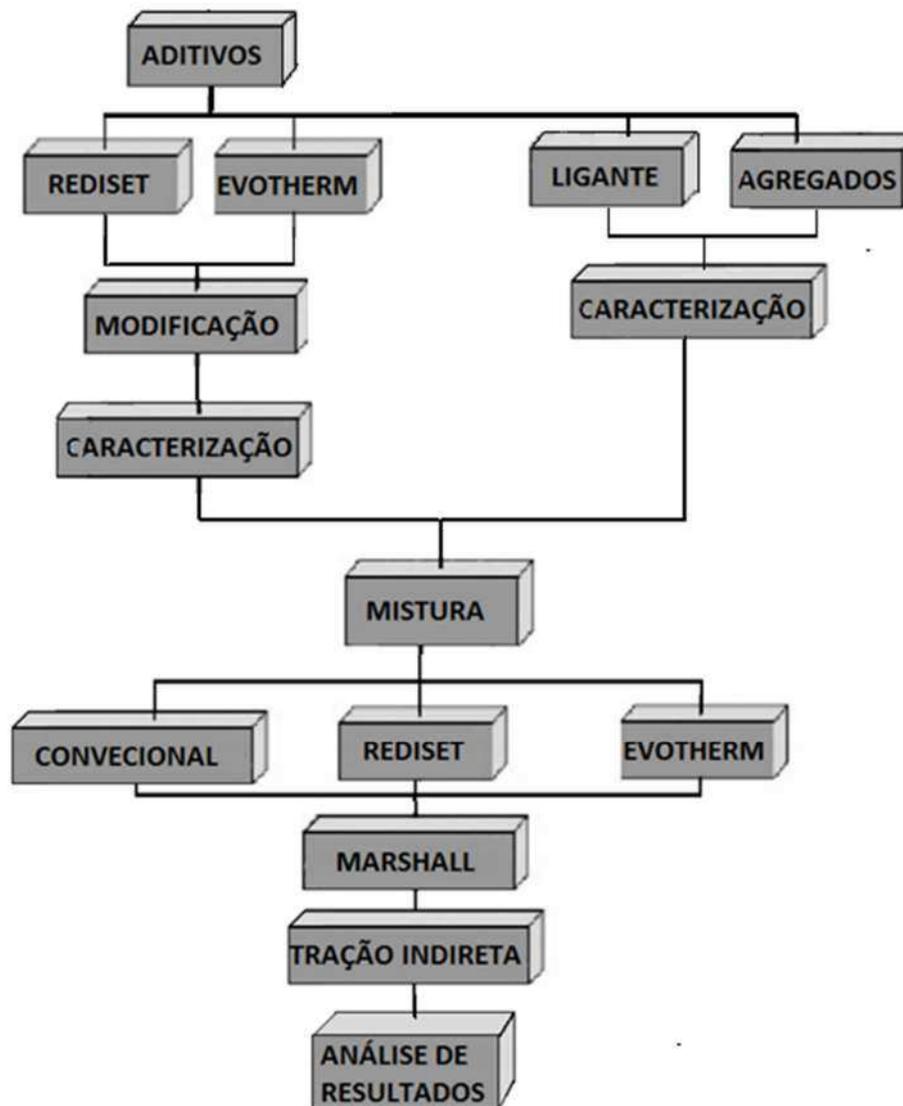
A sequência dos processos e as quantidades de corpos de prova produzidos conforme descrito anteriormente estão esquematizados na Figura 1.1 e Figura 1.2.

Figura 1.1 - Quantidades de corpos de prova



Fonte: Adaptado de Guerrero, 2012.

Figura 1.2 – Sequência do estudo



Fonte: Adaptado de Guerrero, 2012.

1.4. DELIMITAÇÃO DO ESPAÇO DE PESQUISA

O material pétreo utilizado para o desenvolvimento da pesquisa é oriundo da empresa Britagem Vogelsanger, localizada na cidade de Joinville/SC, mais precisamente na Estrada Piraí. O ligante betuminoso é proveniente da empresa CBB Asfaltos, no município de Curitiba, no Estado do Paraná.

O trabalho foi desenvolvido na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Joinville, mais precisamente no Laboratório de Técnicas em

Infraestrutura (LTI), onde foram executados ensaios de caracterização tanto dos agregados quanto dos ligantes, e também ensaios Marshall e de resistência à tração indireta por compressão diametral.

1.5. IMPORTÂNCIA DO TEMA: JUSTIFICATIVAS

O aquecimento global tem sido motivo de preocupação constante mundialmente. O aumento da frota de veículos, do número de indústrias e o crescimento da população contribuem para o aumento da emissão de gases que se acumulam na atmosfera. Estes gases, além de contribuir para efeito estufa acabam provocando a poluição do ar que se respira (ROHDE, 2007).

Como uma forma de prevenir e em uma tentativa de amenizar a ocorrência desta situação, em diversas cidades do mundo novas legislações relacionadas ao controle de emissão de gases ou ao aproveitamento dos recursos naturais vem sendo criadas. Como por exemplo na Califórnia, Alemanha e Japão são oferecidos financiamentos para a construção de sistemas de captação da água da chuva (OTTO, 2009). No Brasil, há aproximadamente um pouco mais de duas décadas foram instituídos pelo Governo Federal, programas de controle de emissão veicular englobando todas as categorias de veículos automotores (ROHDE, 2007).

Na área da pavimentação a produção do pavimento favorece a emissão de gases prejudiciais. Para tanto a tecnologia das misturas asfálticas mornas aparece como uma solução na área da pavimentação. A redução na temperatura de produção das misturas mornas mostra, além de vantagens técnicas, benefícios ambientais, como a redução na emissão de gases prejudiciais (BUDNY, 2012). Pelo fato da emissão de vapores e fumos de asfalto ser menor quando se trabalha com as misturas asfálticas mornas, o ambiente de trabalho também se torna mais agradável, com menos poluentes no ar e com uma temperaturas amenas, ajudando assim a preservar a saúde dos que trabalham em campo diariamente (D'ANGELO, 2008).

Aliado ao que foi citado anteriormente, a usinagem e compactação a temperaturas mais baixas reduz também a quantidade de combustível necessário para produção das misturas. De acordo com Olard (2008),

dependendo do processo, do tipo de usina e dos materiais empregados esta economia pode chegar na faixa de 35% a 60%.

Outro aspecto importante que acredita-se estar ligado com a diminuição da temperatura é a redução do envelhecimento do ligante asfáltico, causado pelo processo de aquecimento. Durante o processo de aquecimento, as altas temperaturas causam alterações reológicas substanciais nos ligantes, a perda de componentes aromáticos, restando em sua maioria apenas os asfaltenos que são responsáveis pela rigidez do ligante (BERNUCCI *et al.*, 2008).

No entanto para o uso de novas tecnologias é importante o estudo e conhecimento do comportamento das misturas asfálticas mornas. Por esta ser uma tecnologia ainda considerada recente no Brasil, pouco se entende sobre a sua influência nas características mecânicas e reológicas das misturas asfálticas. Desta forma, sendo este um material de alto custo é essencial tomar o conhecimento de suas características antes de aplica-lo em campo. Ter conhecimento sobre a influência nas características e qualidade do produto final, ao se adicionar qualquer aditivo. Desse modo pode-se alcançar uma dosagem ideal, sem desperdícios de material e obtendo um pavimento com condições técnicas apropriadas que garantam conforto e segurança para os usuários.

1.6. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A pesquisa está dividida em capítulos, onde:

Capítulo 1: introdução ao tema abordado na pesquisa, integrando o leitor sobre os objetivos de exploração dos assuntos abordados, as justificativas para se estudar o tema e os procedimentos utilizados.

Capítulo 2: apresenta uma revisão sobre os revestimentos asfálticos. Abordando assuntos relacionados a sua estrutura e características.

Capítulo 3: apresenta uma introdução sobre as Misturas Asfálticas Mornas, apresentando diversas tecnologias que tem sido testadas e estudas no Brasil, ou utilizadas em outros países.

Capítulo 4: descreve os materiais e métodos empregados para a execução dos procedimentos laboratoriais para fins de avaliação do comportamento mecânico das Misturas Asfálticas.

Capítulo 5: expõe os resultados obtidos através da execução dos ensaios de caracterização e dos ensaios para avaliação da mudança no comportamento das misturas asfálticas.

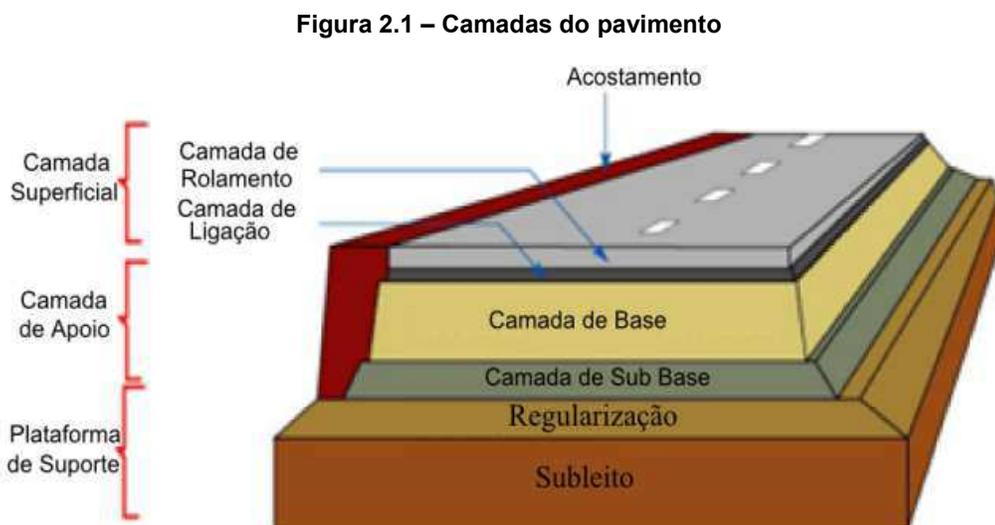
Capítulo 6: discorre as conclusões do trabalho e recomendações para as próximas pesquisas. Confrontando resultados de cada mistura, com procedência de um mesmo ensaio.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLOGRÁFICA

2.1. Considerações Iniciais

O pavimento rodoviário é uma estrutura constituída de diversas camadas finitas com a função de resistir aos esforços provenientes do tráfego de veículos e às intempéries, garantindo conforto e segurança aos usuários. (BERNUCCI *et al*, 2008). A estrutura é dividida em camadas para minimizar a espessura e consequentemente seus gastos e custos com materiais de qualidade elevada e onerosos. Caso o subleito apresente boas condições de impermeabilidade e resistência a camada de regularização pode não ser necessária. A estrutura do pavimento, é formada geralmente por quatro camadas principais (Figura 2.1): o revestimento asfáltico (camada de rolamento), a base, sub-base e por fim o reforço do subleito (caso necessário), podendo ainda conter uma camada de ligação, entre a camada de rolamento e a de base (PENZ, 2010). Dependendo do caso, o pavimento pode não possuir a camada de reforço ou sub-base, mas para que seja considerado um pavimento deve possuir as camadas de revestimento e subleito (BALBO, 2007).



Fonte: Almeida (2013)

A camada de rolamento, como o nome sugere, é a camada superior – em contato direto com as rodas dos veículos – destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmitir-las às camadas inferiores (BERNUCCI *et al.*, 2008). Recebe os maiores carregamentos, sendo sua principal função a de resistir aos esforços provenientes das solicitações dinâmicas vindas do tráfego. Além disso, a camada de revestimento deve possuir durabilidade e flexibilidade e conforto durante a trafegabilidade dos usuários. Quando se tratando de uma única camada de pavimento, por ser a camada exposta ao tempo deve ser impermeabilizante de modo que a água da chuva não atinja as camadas inferiores, a fim de não deteriorar as mesmas. Em outros casos pode-se encontrar pavimentos com duas camadas, onde a camada exposta é a camada drenante, porém abaixo desta camada existe então a camada impermeabilizante (BERNUCCI *et al.*, 2008). Devido aos materiais utilizados, a camada do pavimento asfáltico betuminoso é considerada como a mais nobre do pavimento, tornando necessários ensaios detalhados de dosagem e controle, com o intuito de evitar que pavimentos asfálticos de má qualidade sejam colocados no campo (BUDNY, 2012).

Para obter desempenho satisfatório em estruturas de pavimentos, as misturas asfálticas devem apresentar: habilidade à compactação, resistência ao efeito da presença da água, capacidade para distribuir tensões; estabilidade e resistência para resistir as solicitações impostas pelo tráfego (GUERRERO, 2013). Associados estes objetivos e aos citados anteriormente, o revestimento asfáltico deve ser projetado com a máxima qualidade e de modo econômico, ou seja, com características físicas capazes de resistir à fadiga sob ação do tráfego e suportar deformações em limites aceitáveis (MOOM, 1998).

Os revestimentos asfálticos são constituídos por associação de diferentes granulometrias de granulares minerais e pelo ligante asfáltico. Os granulares formam o esqueleto mineral que assegura a rigidez da mistura, enquanto o ligante é responsável por proporcionar a coesão entre os agregados e a flexibilidade de todo o conjunto (BERNUCCI *et al.*, 2008). A mistura asfáltica é produzida com as combinações necessárias, de acordo com a granulometria, definida em função das propriedades esperadas. Dependendo da escolha do

ligante betuminoso a ser utilizado, que prevê a coesão dos agregados. Podem ser classificados conforme suas características de penetrabilidade, amolecimento e viscosidade e devem escolhidos de acordo com as características desejadas.

Eventualmente, para otimizar as características químicas do ligante e as características mecânicas das misturas asfálticas, podem ser adicionados os aditivos (GUERRERO, 2013).

2.1.1. Agregados

O agregado deve ser um componente granular com composição mineral. Para originar estruturas de pavimentos duráveis, deve-se conhecer e selecioná-los conforme as propriedades almejadas para a mistura. Sua seleção é determinada pela identificação da graduação, da forma, da dureza, da sanidade, da afinidade ao CAP e da absorção de água pelas partículas. Representam em torno de 95% em peso e 70 a 85% em volume de toda mistura asfáltica contribuindo amplamente no comportamento das mesmas. Portanto na escolha dos agregados deve-se levar em consideração suas propriedades físicas e químicas, para que juntamente com o CAP escolhido suportem as tensões oriundas do tráfego e ao clima e também para que possuam uma boa afinidade elétrica (MAGALHÃES, 2004 *apud* ASPHALT INSTITUTE, 1989).

Os granulares podem ser classificados segundo sua origem, em naturais, quando provenientes de processo de degradação natural dos grãos da rocha mãe ou industrializados, quando obtidos por meio de processos de britagem. Os industrializados, ainda podem ser classificados quando provenientes de resíduos de processos industriais britados ou ainda produzidos artificialmente através de processos de britagem da rocha sã.

Para compor as misturas asfálticas, os tamanhos dos grãos são especificados conforme tamanhos médios passantes nas respectivas peneiras (DNIT 031/2006 – ES):

- Graúdos são os agregados retidos na peneira n°10: britas, cascalhos, seixos;
- Miúdos são os agregados passantes na peneira n°10 e retidos na peneira n°200: pó de pedra ou pó de brita;
- Material de enchimento (filler) é o que passa pelo menos 65% na peneira n°200: cal extinta, cimento Portland, pó de brita, pó de chaminé.

Suas especificações de tamanho e propriedades necessárias para compor as misturas asfálticas podem ser encontradas em (DNIT 031/2006- ES).

2.1.2. Ligantes

O Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) é um dos materiais mais antigos utilizados pela humanidade. Originado de um processo de destilação do petróleo, fração de destilação mais pesada do petróleo bruto, sendo constituído por um conjunto complexo de hidrocarbonetos (BERNUCCI *et al*, 2008). Há ainda asfaltos naturais, formados a partir de depósito de petróleo que migraram para a superfície, e após processos naturais de perda de outras frações, resultaram num produto contendo betume e outros minerais. Podem ocorrer em depressões da crosta terrestre constituindo lagos de asfalto, ou aparecendo impregnando os poros de algumas rochas asfálticas (MAGALHÃES, 2004)

A característica que destaca o ligante é a sua susceptibilidade térmica, o material tende a se comportar como elástico a baixas temperaturas, tornando-se um líquido viscoso a temperaturas elevadas, e viscoelástico a temperatura ambiente (BARRA, 2009). Seu uso se faz adequado para aplicação em pavimentação por conter propriedades aglutinantes e impermeabilizantes, além das características de flexibilidade, durabilidade e de resistência à ação da maioria dos ácidos, sais e álcalis (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Segundo a Agência Nacional de Petróleo, Gás e Energia (ANP) os cimentos asfálticos são classificados quando a sua consistência no estado semissólido pelo ensaio de penetração em:

- CAP 30/45 – duros;
- CAP 50/70 – médio;
- CAP 85/100 – médio;
- CAP 150/200 – moles.

Estes valores de penetração são muito empregados como forma de especificação. Valores baixos do ensaio de penetração são característicos de asfaltos com maior consistência, enquanto valores altos de asfaltos mais moles. Os cimentos asfálticos mais moles tendem a apresentar maior risco de deformação permanente, estes riscos podem ser controlados pela adição de aditivos, de modo a reduzir a sensibilidade à deformação permanente (BARRA, 2005).

2.2. Classificação e tipos de misturas asfálticas

As Misturas Asfálticas podem ser classificadas segundo diversos parâmetros, dentre eles, a granulometria dos agregados, a temperatura de trabalho e por fim conforme seus componentes.

De acordo com BERNUCCI *et al.* (2008) as misturas asfálticas podem ser classificadas conforme a graduação dos agregados:

- Graduação densa: o esqueleto mineral possui poucos vazios, sendo que os grãos menores preenchem os espaços entre os mais graúdos
- Graduação aberta: é formada quase que exclusivamente por grãos de praticamente do mesmo tamanho e com ausência de material fino, de modo que seu esqueleto estrutural possua muitos vazios, entre 18% a 25%. Formando uma estrutura drenante, possibilitando a percolação de água no interior da mistura.
- Graduação descontínua: a quantidade de agregados graúdos é dominante em relação aos agregados de tamanho intermediário,

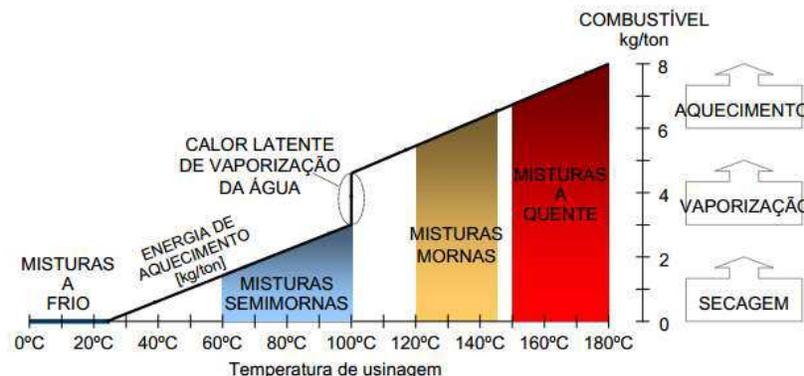
ainda composto por uma certa quantidade de finos, com objetivo de tornar o esqueleto mineral mais resistente à deformação permanente.

Segundo MOTTA (2011) as misturas asfálticas podem ser classificadas quanto a temperatura de produção:

- Misturas asfálticas usinadas a quente: tipo de mistura mais utilizada na pavimentação. Temperatura de usinagem normalmente superior a 150°C.
- Misturas asfálticas mornas: visto que é o foco deste trabalho, suas características serão abordadas a diante. Temperatura de produção entre 120°C e 145°C.
- Misturas asfálticas semi-mornas: do mesmo modo que as misturas mornas, possuem uma temperatura de produção intermediárias as da mistura quente e a frio. Porém, diferenciam na temperatura de compactação, quando tal temperatura é inferior a 100°C é denominada semi-morna, e quando superior é classificada como morna (D'ANGELO, 2008; PROWELL and HURLEY, 2007).
- Misturas a frio: fabricadas a temperaturas ambientes com o uso das emulsões asfálticas ou asfaltos diluídos sem o aquecimento dos agregados. Temperaturas entre 25°C e 50°C.

A Figura 2.2 apresenta a classificação das misturas asfálticas em relação à temperatura.

Figura 2.2 – Classificação das misturas asfálticas quanto à temperatura



Fonte: D'Angelo (2008) adaptador por Motta (2011)

Da mesma forma, as misturas podem ser classificadas quanto a sua composição (GUERRERO, 2013 *apud* NAKAHARA, *et al.*, 2010):

- Mistura asfáltica convencional: apenas faz uso dos componentes considerados tradicionais, agregados e ligante, sem uso de aditivos.
- Mistura asfáltica modificada: além dos componentes tradicionais é adicionado um aditivo a fim de melhorar alguma de suas propriedades, ou característica.
- Misturas recicladas: resultado final do reaproveitamento de misturas asfálticas envelhecidas ou deterioradas (BERNUCCI *et al.*, 2008).

2.3. Misturas Asfálticas e a Temperatura

Na usinagem e compactação das misturas asfálticas a quente, mornas e semi-mornas a escolha do intervalo de temperatura é importante para que a mistura possa ser usinada e compactada com maior facilidade e de maneira eficaz. Do mesmo modo, o controle da temperatura é fundamental para que a usinagem e compactação sejam realizadas na temperatura estipulada no projeto, para que o produto final se assemelhe ao máximo à mistura idealizada. Não somente o fator da temperatura garante uma compactação adequada, porém este parâmetro tem grande influência no processo, visto que muitas propriedades das misturas asfálticas estão diretamente relacionadas à temperatura.

Durante o processo de usinagem é necessário uma alta temperatura para o pré-aquecimento do ligante e dos agregados, com o objetivo de retirar a umidade dos agregados e facilitar o processo de envolvimento por parte do ligante. A secagem dos agregados pétreos também ajuda a evitar futuros problemas de trilha de roda. Visto que os agregados compõem a maior parte de

uma mistura asfáltica, sua temperatura controla a quantidade de calor da mistura como um todo. Quando misturados ao ligante, a temperatura do ligante se ajusta rapidamente à temperatura em que os agregados se encontram (MOTTA, 2011 *apud* ASPHALT INSTITUTE, 2007). Desta maneira os agregados devem estar a uma temperatura tal, aproximadamente de 10°C a 15°C acima da temperatura do ligante, mantendo o ligante em sua temperatura ideal, para que esteja fluído o suficiente a ponto de poder recobrir os agregados (MOTTA, 2007).

As altas temperaturas possuem um papel importante no que tange a distribuição do ligante betuminoso na mistura asfáltica à quente, e por consequência, na homogeneidade, ao diminuir a tensão superficial na interface agregado/ligante, como ilustra a Figura 2.3 a seguir (BERNUCCI *et al.*, 2008; MOTTA, 2007).

Figura 2.3 – Recobrimento do agregado pelo ligante com a elevação da temperatura



Fonte: Motta (2011)

O comportamento reológico e mecânico das misturas asfálticas está fortemente relacionado com a temperatura. No momento da usinagem a viscosidade deve ser tal que permita o recobrimento adequado dos agregados pelo ligante betuminoso. Enquanto que na compactação esta deve ser tal que mantenha o ligante fluído o suficiente permitindo que funcione como um lubrificante de modo a facilitar o movimento dos agregados durante o procedimento (BUDNY, 2012).

Quando a temperatura se mostra superior ao intervalo encontrado com base na curva viscosidade-temperatura, a viscosidade do asfalto se torna muito baixa permitindo que as partículas se movam facilmente durante a compactação, porém não promovem a coesão necessária para as manterem em suas devidas posições. De modo inverso, quando a temperatura está abaixo do seu limite

especificado, a viscosidade é alta, não permitindo o movimento desejado dos agregados. Para os ligantes modificados as temperaturas de compactação e usinagem dependem das recomendações do fabricante.

Temperaturas muito elevadas podem ocasionar o envelhecimento do ligante por oxidação, resultando em um enrijecimento da mistura asfáltica com o tempo. Este enrijecimento afeta a característica da mistura asfáltica de ser flexível, o que contribui para a suscetibilidade às trincas e desagregação (CAVALCANTI, 2010).

As etapas onde normalmente ocorrem as maiores taxas de envelhecimento são durante a usinagem e compactação. Momento conhecido como envelhecimento a curto prazo, o ligante é exposto à altas temperaturas, ocorrendo devido a oxidação e perda de seus componentes voláteis, mesmo que durante curtos períodos. Durante sua vida útil, como se encontra em temperaturas mais amenas o envelhecimento ocorre mais vagorosamente. Durante a estocagem apesar de estar submetido à altas temperaturas, o ligante produz um filme na superfície exposta, este filme reduz o efeito da oxidação retardando o processo de perda dos componentes nobres (BUDNY, 2012).

Quando a temperatura das misturas chega em torno de 150°C ou mais, vapores provenientes do aquecimento do ligante são emitidos. Estes quando resfriados se condensam na forma de fumo de asfalto. Ambos são constituídos de elementos poluentes na forma de material particulado e gases, como os Compostos Orgânicos Voláteis. Muitos dos gases emitidos são considerados tóxicos e cancerígenos. As MAM produzidas a temperaturas inferiores a 180°C emitem menos vapores tóxicos (MOTTA, 2011).

2.4. DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

O principal objetivo da dosagem de misturas asfálticas é produzir uma mistura que possua trabalhabilidade ideal e a melhor combinação possível de características como estabilidade, durabilidade, flexibilidade, impermeabilidade

e resistência ao atrito (ASPHALT INSTITUTE, 2007). O teor de ligante asfáltico de projeto pode variar de acordo com a escolha do método a ser utilizado.

2.4.1. Dosagem Marshall

No Brasil, por exemplo, o método de dosagem mais utilizado é o Método Marshall. Consiste na determinação do teor de trabalho de ligante asfáltico a ser utilizado em uma mistura com base num procedimento de compactação dos corpos de prova por impacto, levando em consideração valores empíricos de estabilidade e fluência, além dos parâmetros volumétricos. Estabilidade pode ser considerada como a carga máxima ao qual o corpo de prova resiste à ruptura. Fluência é entendida como o deslocamento vertical apresentado pelo corpo de prova em relação à carga máxima (BERNUCCI *et al*, 2008).

Para análise dos resultados é importante o conhecimento de alguns parâmetros (BERNUCCI *et al.*, 2008):

- Densidade aparente da mistura: densidade da mistura considerando os vazios com ar
- Densidade máxima teórica da mistura (DMT): densidade da mistura sem considerar os vazios
- Porcentagem de vazios da mistura (Vv): volume total de ar existente entre as partículas de agregado recobertos pelo ligante
- Porcentagem de vazios do agregado mineral (VAM): soma do volume ocupado pelo ar e pelo ligante do espaço intergranular de uma mistura, em relação ao volume total da mesma
- Relação betume vazios: porcentagem do volume de vazios do agregado mineral que é preenchido com cimento asfáltico

A escolha do teor pelo Método Marshall pode se basear apenas no valor de volume de vazios igual a 4%, porém no Brasil tem-se adotado este parâmetro juntamente com a estabilidade e fluência Marshall, a Relação Betume Vazios da mistura e a Resistência a Tração Indireta. Os requisitos de dosagem de concreto

asfáltico mais utilizados no país constam na especificação de serviço DNIT ES-031/04, e são apresentadas na Tabela 2.1 abaixo fonte.

Tabela 2.1 – Requisitos de dosagem

Características	Método de ensaio	Camada de Rolamento	Camada de Ligação (Binder)
Porcentagem de vazios, %	DNER-ME 043	3 a 5	4 a 6
Relação betume/vazios	DNER-ME 043	75 – 82	65 – 72
Estabilidade, mínima, (Kgf) (75 golpes)	DNER-ME 043	500	500
Resistência à Tração por Compressão Diametral estática a 25°C, mínima, MPa	DNER-ME 138	0,65	0,65

Fonte: DNIT

Por meios de outras metodologias, a dosagem pode levar em consideração os parâmetros volumétricos citados anteriormente ainda neste capítulo são obtidos a partir de fórmulas, que serão apresentadas no Capítulo 4. Com os resultados de cada parâmetro calculado, são confeccionados gráficos com valores das percentagens de betume, por peso, utilizadas no eixo das abcissas e os parâmetros no eixo das ordenadas.

Analisando os gráficos, pela avaliação conjunta destas propriedades, define-se o teor de betume de trabalho da mistura asfáltica. O teor de trabalho deve apresentar as melhores características dentre as existentes. Além desta análise de dados, deve-se levar em consideração aspectos observados durante o processo de mistura, tais como a trabalhabilidade, no que se refere a facilidade do ligante betuminoso envolver o agregado. A Tabela 2.2 apresenta os parâmetros a serem analisados juntamente com seus limites aceitáveis conforme a especificação de serviço DNIT ES-031/04.

Tabela 2.2 – Limites dos parâmetros analisados

Parâmetro Analisados	Limites para camada de Rolamento
Densidade Aparente	-
Vazios Cheio de Betume (%)	-
Volume de Vazios (%)	3,0 a 5,0
Vazios do Agregado Mineral (%)	min 16,0*
Relação Betume Vazios (%)	75,0 a 82,0
Estabilidade (kgf)	min 500
Fluência (mm)	2,0 a 4,6

Fonte: autor

2.4.2. Método Superpave

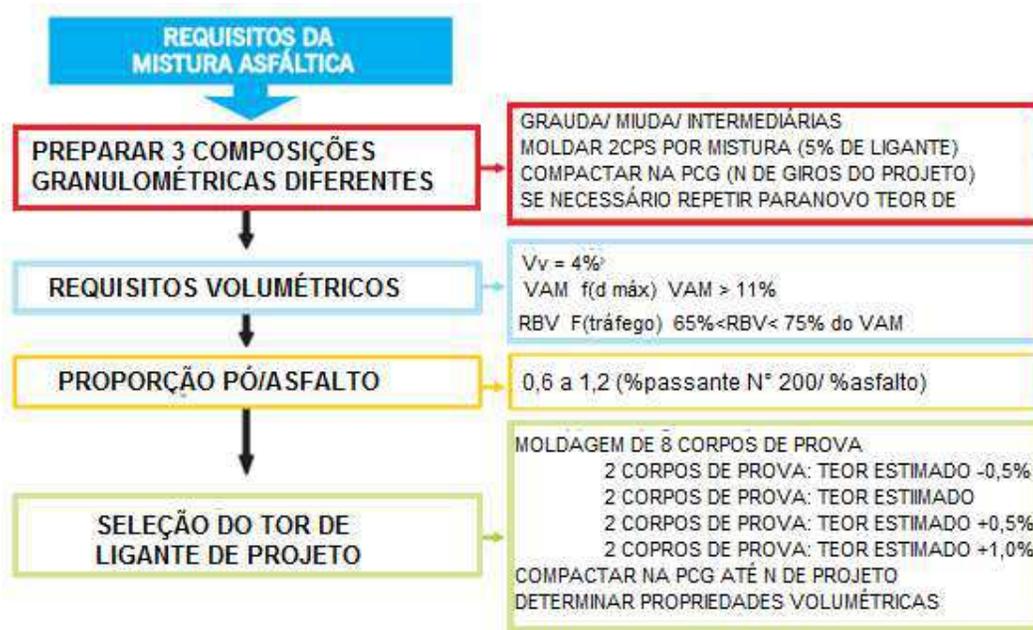
Nos Estados Unidos e em alguns países da Europa utiliza-se mais o método Superpave, criado no ano de 1980. O Método Superpave apresenta como maior diferença do método Marshall o tipo de compactação. Neste método a compactação ocorre por amassamento, onde uma prensa de compactação por cisalhamento giratório (PCG) aplica a energia de compactação por amassamento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

No procedimento existem três níveis de projeto da mistura dependendo do tráfego e da importância da rodovia. O primeiro momento consiste na escolha de três composições granulométricas diferentes seguido da compactação de dois corpos de prova, a partir da prensa PCG, ambos com teor de ligante de 5% do peso, para cada mistura. Após a compactação obtém-se os parâmetros volumétricos como, volume de vazios, relação betume/vazios e vazios do agregado mineral. Define-se a quantidade de ligante estimada para a mistura de acordo com os requisitos normativos dos parâmetros volumétricos e de maneira que a mistura atinja uma percentagem de vazios de 4% e conforme os requisitos.

Em seguida verifica-se a proporção pó/asfalto, razão entre o teor de material passante na peneira nº 200 e o teor de ligante, sendo que este parâmetro deve se encontrar entre 0,6 e 1,2 (MOTTA, 2000).

A próxima etapa é a seleção do teor de ligante de projeto. Para tal são confeccionados corpos de prova com o teor estimado, encontrado no passo anterior, devendo ser confeccionados corpos de prova considerando outros três teores (o teor estimado $\pm 0,5\%$ e $+1\%$). Estes são compactados pela PCG e definidos seus parâmetros volumétricos correspondentes. O teor final de projeto é aquele que proporcionar a mistura um teor de vazios de 4% (BERNUCCI *et al.*, 2008). O procedimento descrito é ilustrado na Figura 2.4 a seguir.

Figura 2.4 – Fluxograma método Superpave



Fonte: Bernucci *et al.*, 2008

2.4.3. Método Francês

O método Francês de dosagem e projeto para o pavimento é resultado de um longo período de desenvolvimento de materiais, equipamentos e métodos de projeto inovadores. Seu surgimento deve-se a necessidade de novos conceitos para o desenvolvimento de ensaios de laboratório que melhor se aproximassem dos esforços ocorridos em campo (MAGALHÃES, 2004).

Os procedimentos de avaliação e preparação das misturas podem ser divididos em dois conjuntos. Os que avaliam as propriedades consideradas empíricas, em relação a parâmetros que não são utilizados para o dimensionamento do pavimento, e os procedimentos que avaliam as propriedades ditas fundamentais ao dimensionamento (GUERRERO, 2013).

Os ensaios de dosagem seguem uma sequência bem definida, e são organizados em níveis, os níveis serão descritos a seguir:

- **Nível 0**

Neste nível são realizados procedimentos relacionados a escolha dos itens que compõem a mistura asfáltica, como a seleção e caracterização dos granulares, ligante e aditivos e a definição dos teores de ligantes (GUERRERO, 2013 apud MANUEL LPC, 2007).

- **Nível 1**

No nível 1 ocorre a avaliação da mistura asfáltica em relação a sua habilidade de compactação, através do ensaio de compactação por cisalhamento giratório, e a avaliação da resistência à ação da água, pelo ensaio de Duriez (NF 12697-12, método B em compressão) (GUERRERO, 2013).

As normas francesas definem um teor mínimo de ligante em função do tipo de mistura, este valor é expresso em termos do “módulo de riqueza” que é função da densidade e superfície específica dos agregados minerais. A fim de procurar garantir a durabilidade da mistura pelo correto recobrimento dos agregados (MAGALHÃES, 2004).

A compactação por cisalhamento giratório permite avaliar a trabalhabilidade da mistura no momento de sua distribuição no pavimento, serve também para determinar a porcentagem de vazios que deve ser alcançada em campo em função da espessura da camada e de sua posição na estrutura do pavimento. Como resultado do ensaio tem-se a curva de densidade aparente em função da variação da altura do corpo de prova e número de giros. A verificação da composição ótima determinada através da PCG é confirmada quanto à sua resistência ao dano induzido pela ação da água para estimar o descolamento do

ligante ao agregado pelo ensaio de Duriez (Magalhães, 2004 *apud* NF P 98-251-1).

- **Nível 2**

Os ensaios do nível 2 ao nível 4 somente são realizados após a mistura atender aos requisitos impostos no nível 1, pelos ensaios da PCG e de Duriez.

Este nível é empregado para as misturas utilizadas como camada de rolamento ou de ligação que estão sujeitas ao tráfego elevado de veículos pesados. Nesta etapa é feita a avaliação da resistência da mistura asfáltica à deformação permanente, ou seja, aos afundamentos de trilho de roda (GUERRERO, 2013).

O ensaio de resistência ao afundamento nas trilhas de roda consiste em submeter a mistura à passagem repetida (frequência de 1 Hz) de uma roda de superfície lisa, com pressão de inflação e temperaturas controladas (60°C) conforme descrito na norma francesa. O afundamento do trilho de roda é medido em função do número de ciclos. O valor máximo de afundamento é definido em função da natureza e classe de desempenho da mistura utilizadas. Este teste reproduz condições severas de carregamento com a finalidade de rejeitar ou corrigir misturas instáveis (MAGALHÃES, 2004 *apud* BROSSEAUD, 1993).

- **Nível 3**

Este nível determina o módulo complexo, parâmetro fundamental ao dimensionamento da estrutura do pavimento (GUERRERO, 2013).

Os corpos de prova possuem um formato trapezoidal e são solicitados a esforços de flexão em dois pontos. Realizados em diferentes frequências de solicitação (1Hz a 30Hz) e a temperaturas de condicionamento (-10°C a 40°C). Estas variações permitem construir uma curva para avaliar o comportamento das composições tanto a altas quanto baixas temperaturas. Na França o valor característico considerado para atingir o requisito segundo as normas para o módulo complexo é obtido a 15°C e 10Hz (OTTO, 2009).

- **Nível 4**

No nível 4, último nível, ocorrem os procedimentos de determinação da resistência à fadiga das misturas (GUERRERO, 2013 *apud* MANUEL LPC, 2007).

No ensaio de fadiga também se faz a utilização do corpo de prova trapezoidal à flexão repetida em dois pontos no modo de deformação controlada. O ensaio prossegue até que a rigidez inicial seja reduzida à metade, condição essa considerada como critério de ruptura. A curva de fadiga é então determinada a partir da execução do ensaio em três níveis de deformação. A Figura 2.5 ilustra um fluxograma do procedimento do método Francês.

Figura 2.5 – Fluxograma do procedimento do método Francês



Fonte: Guerrero, 2013

CAPÍTULO 3

AS MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS

3.1. Considerações Iniciais

Ainda que no Brasil as misturas asfálticas mornas sejam motivo de pesquisa recente, fora do país a redução da temperatura da mistura asfáltica, e consumo de energia e redução da emissão de gases, já tem sido estudada há muito tempo como um dos propósitos sendo a economia. Os primeiros relatos da possibilidade da redução da temperatura datam de 1956, quando Dr. H. Ladis Csanyi, professor de Iowa State University, estudou o potencial dos asfaltos espumados para serem utilizados como camada selante em solo. A partir destes estudos a tecnologia dos asfaltos espumados, que permitem a redução de temperatura, tem sido usada com sucesso em muitos países (KRISTJANSDOTTIR, 2006).

Em 1968, a empresa detentora da patente da invenção de Csanyi, Mobil Oil Australia, alterou o processo que consistia em adicionar vapor da água ao asfalto quente, e passou a injetar água fria, o que tornou o processo mais prático e rápido por não ser mais necessário transformar a água em vapor (AL-RAWASHDEH, 2008).

Em 1995, Maccarone estudou as misturas asfálticas frias, com o uso de emulsões e asfalto espumado, com elevado teor de ligante. A partir dos estudos os resultados mostraram uma redução no consumo de energia e das emissões de gases. Porém, apesar dos bons resultados e da boa aceitabilidade no mundo, as misturas frias não possuíam o mesmo desempenho das misturas quentes a longo prazo (CAVALCANTI, 2010).

Mais tarde em 1999, Jenkins estudou uma nova técnica, nomeada na língua inglesa em *half-warm foamed bitumen treatment*, que envolvia pré aquecer os agregados a uma temperatura superior a temperatura ambiente e abaixo de 100°C, antes da aplicação do asfalto espuma. A técnica mostrou um ganho nas propriedades mecânicas quando comparando com as misturas

produzidas com agregados a temperatura ambiente (KRISTJANSDOTTIR, 2006).

O processo de produção das Misturas Asfálticas Mornas (MAM) foi desenvolvido na Europa, e apresentado por Harrison and Christodulaki na 1ª Conferência Internacional de Pavimentos Asfálticos, em Sydney. Este mesmo processo foi relatado de forma mais completa por Koenders *et al*, em 2000, no Congresso Eurobitume. Também foi testado em laboratório, em particular na produção e aplicação da graduação densa, o que possibilitou uma extensa aplicação em campo na Noruega, Reino Unido e Finlândia (OTTO, 2009). Com os resultados foi possível desenvolver a mistura morna com asfalto espumado (KRISTJANSDOTTIR, 2006).

Em 2002, visando a avaliação das misturas asfálticas mornas utilizadas na Noruega, Alemanha e Dinamarca, a National Asphalt Pavement Association (NAPA) liderou visitas técnicas nestes países. Com bons resultados obtidos com a análise realizada nas visitas em campo, houve um crescente interesse em desenvolver esta tecnologia também nos Estados Unidos. Tal interesse levou a Federal Highway Administration (FHWA) a mencionar as misturas asfálticas mornas como área em foco, e juntamente com a NAPA, em 2003, organizaram uma conferência com o objetivo principal de explorar seu potencial de utilização nos Estados Unidos (MELLO, 2012).

No Congresso Eurobitume que ocorreu em 2004, Barthel *et al*. (2004) introduz o uso das zeólitas, que espumam o asfalto e permitem uma alta trabalhabilidade das misturas a temperaturas mais baixas (AL-RAWASHDEH, 2008). Desde o ano de 2000 as misturas asfálticas mornas ganharam atenção da Europa e Austrália. Na América do Norte, a indústria da pavimentação começou a dar maior interesse a esta tecnologia em meados de junho de 2005, quando a National Center for Asphalt Technology (NCAT) publicou dois estudos sobre o Sasobit, uma cera sintética, e sobre o Aspha-min, uma zeólita sintética, ambos considerados na época produtos promissores para a técnica (OTTO, 2009). Em 2006, outra pesquisa é publicada pela NCAT, sobre a utilização de Evotherm, um aditivo surfactante (AL-RAWASHDEH, 2008).

A principal motivação para o estudo e desenvolvimento da MAM é o alcance da sustentabilidade, de modo que a redução da temperatura não influencie na qualidade do produto, isto significa; sem sofrer mudanças nas propriedades mecânicas e reológicas. A princípio, as misturas asfálticas mornas são obtidas por um processo similar às convencionais. A partir do aquecimento dos agregados e como uso de asfalto ou emulsão, isto dependendo da escolha da tecnologia a ser utilizada.

3.1.1. Vantagens

A partir do primeiro momento em que se utilizou de uma técnica para reduzir a temperatura de usinagem e compactação das misturas asfálticas, notou-se que muitas vantagens podiam ser aproveitadas para diversas finalidades. Como o primeiro projeto de uma mistura asfáltica morna, comentado por Prowell and Hurley (2012), em que se fez o uso de um aditivo com objetivo de se reduzir a viscosidade do ligante, para que a compactação da mistura fosse facilitada. Na época, a empresa que realizou a pavimentação da pista de corrida não sabia que estava lidando com uma mistura morna, a redução da temperatura neste caso foi apenas um ocorrido e não o objetivo principal. Desde então, esta técnica vem sendo utilizada e aperfeiçoada na pavimentação de outras pistas de corrida pelo mundo (PROWELL AND HURLEY, 2012).

Outras vantagens relacionadas a redução na temperatura de produção podem ser listadas. Algumas se relacionam com o meio ambiente, outras à própria técnica e também em relação a sociedade.

- **Redução na emissão de gases poluentes e prejudiciais**

As misturas asfálticas mornas reduzem significativamente as emissões de gases como o dióxido de carbono (CO_2), hidrocarbonetos e poliaromáticos, provenientes principalmente da queima de combustíveis fósseis. Isto, devido a necessidade de temperaturas menores e quantidades de combustível utilizada na produção, sofrendo uma redução do nível de vapores e fumos gerados durante a mistura nas centrais e na aplicação em campo (BUTTON, 2007).

De acordo com D'Angelo (2012), as reduções de CO₂ podem chegar de 30 a 40% em alguns países, enquanto os compostos orgânicos voláteis (COV) podem chegar a uma redução de até 50%, redução de 10% a 30% para o monóxido de carbono (CO) e de 60% a 70% de óxidos nitrogenados (NO_x) e por fim de 25% a 55% para as poeiras, como ilustrado na Tabela 3..

Tabela 3.1 – Percentagem de redução de emissão de gases

Emissão	Noruega	Itália	Países Baixos	França
CO2	31,5	30-40	15-30	23
SO2	NA	35	NA	18
COV	NA	50	NA	19
CO	28,5	out/30	NA	NA
NO_x	61,5	60-70	NA	18
Poeira	54	25-55	NA	NA

Fonte: D'Angelo (2012)

Outro fator importante a ser observado é em relação a saúde dos trabalhadores que possuem contato direto com as obras de pavimentação. Em 1977, o Instituto Nacional de Saúde e Segurança dos Estados Unidos (NIOSH), realizou um estudo sobre a exposição ocupacional aos fumos de asfalto e observou que os principais efeitos maléficos foram irritações das membranas do revestimento ocular e das mucosas respiratórias (MELLO, 2012).

Reduzir à exposição dos trabalhadores aos fumos, pode também proporcionar condições de trabalho mais cômodas, existindo inclusive evidências de que a melhora na condição de trabalho pode ajudar a aumentar a produtividade (FERREIRA, 2009, PROWELL and HURLEY, 2008). Tal condição pode ser observada na Figura 3.1 a seguir. Notavelmente ocorre uma considerável redução na fumaça tóxica.

Figura 3.1 – Comparação de emissão entre modo padrão de construção e das misturas asfálticas mornas



Fonte: Barthel (2004), adaptado pelo autor

Outra vantagem obtida é a redução do odor se comparada ao verificado na mistura convencional. Barthel *et al.* (2004) afirma que foram encontradas reduções expressivas do odor em avaliações realizadas em campo em obras com misturas mornas (WARGHA, 2013).

- **Diminuição do consumo energético**

A redução no consumo de combustível é considerado um dos maiores benefícios para os produtores de misturas asfálticas, o que tornou-se mais evidente com a elevação dos preços de petróleo nos últimos anos. (MOTTA, 2011).

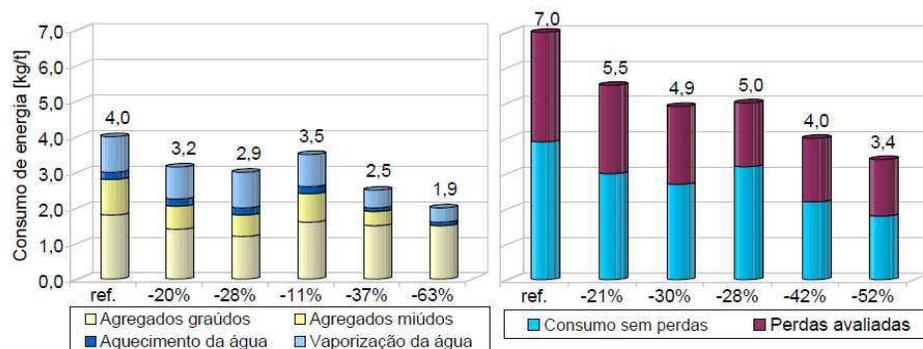
Segundo D'Angelo (2012), pesquisas demonstram que cerca de 25 a 30% de combustível pode ser economizado quando se trabalha com misturas mornas. Estes níveis podiam ser ainda maiores se os queimadores fossem ajustados para trabalharem em níveis mais baixos de temperatura.

A secagem dos agregados também demanda uma grande quantidade de energia, especialmente se o agregado conter um elevado teor de umidade, podendo o gasto com o combustível aumentar em 10% para cada 1% a mais de água contida nos agregados (PROWELL and HURLEY, 2007).

Em uma pesquisa relatada por Barthel (2004), sobre a implantação de um trecho de rodovia produzido por misturas mornas com a utilização do Aspha-min, na França, ouve uma constatação de uma redução energética de 30%. Na maioria dos testes realizados, a redução de energia se fez equivalente a 14 KWh por tonelada de mistura asfáltica obtida. Assim se uma usina utiliza 8 litros de óleo por tonelada de mistura asfáltica, geraria uma economia de 2,4 litros de óleo por tonelada de mistura.

Harder *et al.* (2008), realizou uma pesquisa onde avaliou o consumo de energia de diferentes meios de obtenção da mistura morna. Seu diferencial foi considerar as perdas térmicas a que cada sistema está sujeito. Sabe-se que as perdas térmicas dependem da diferença de temperatura ambiente e de trabalho, então, por exemplo, analisando uma temperatura de trabalho de 160°C, quando a temperatura ambiente era de 15°C, o resultado obtido foi de que o consumo de energia atribuído a tais perdas era de cerca de 3 kg de combustível por tonelada de mistura. No estudo foram avaliados seis tipos de mistura asfáltica: (1) mistura quente de referência, (2) mistura morna com adição de cera ou agente de espumejo, (3) mistura morna com duplo recobrimento (WAM-Foam), (4) mistura semimorna com emulsão, (5) mistura semimorna com asfalto espumado e (6) mistura semimorna preparada a partir da separação das frações graúda e miúda, onde a fração miúda se encontra úmida. Os resultados obtidos foram apresentados na forma de gráfico que relaciona o consumo de combustível com o tipo de mistura sem perdas e em seguida considerando as perdas térmicas, como mostra a Figura 3.2 (MOTTA, 2011).

Figura 3.2 – Consumo de combustível por tipo de mistura



Fonte: Motta (2011)

Kristjándottir *et al.* (2007), verifica que caso seja incluído material fresado a mistura morna, o custo de produção deve ser ainda menor. Isto devido ao reaproveitamento do material agregado e a consequente diminuição de material virgem. Nesta avaliação enquanto uma mistura contendo 50% de material reciclado e 50% de material virgem, custaria o equivalente a U\$ 45,63 por tonelada, o gasto com uma mistura tradicional com 100% de agregados virgens seria em torno de U\$ 60,25. O que resultaria em uma economia de cerca de 24%.

- **Transporte da massa asfáltica a maiores distâncias**

Maiores distâncias de transporte podem ser alcançadas pela redução da taxa de resfriamento da mistura. Tendo que quanto menor o gradiente de temperatura entre a mistura e o ambiente menor será essa taxa (PROWELL and HURLEY, 2012; D'ANGELO, 2012).

Motta (2011) menciona um exemplo de aplicação de uma mistura morna com um longo tempo de espera entre a produção e aplicação. A mistura permaneceu armazenada durante 17 horas após sua produção e por fim ainda pode ser compactada adequadamente a 96°C

- **Menor tempo de abertura de tráfego**

Com temperaturas de produção reduzidas, menores tempos de abertura de tráfego são esperados, devido ao menor tempo necessário para a mistura alcançar a cura. Este pode ser um tópico importante quando se prevê a restauração de alguma pista que precisa ser liberada rapidamente, como pistas importantes, ou pistas de aeroportos, por exemplo (BARBOSA, 2012).

- **Pavimentação em baixas temperaturas**

Apesar de não ser um cenário muito comum em nosso país, para países com ocorrência de neve temperaturas abaixo de 10°C, esta pode ser uma vantagem muito importante que esta tecnologia fornece. A possibilidade de estender a temporada de pavimentação torna esta técnica conveniente. Visto

que a mistura convencional ao ser produzida a baixas temperaturas pode apresentar problemas relacionados a compactação, visto que a acelerada queda de temperatura causada pelo gradiente de temperatura entre mistura e ambiente, pode gerar problemas no momento da compactação da mesma, por precisar de altas temperaturas para que a compactação obtenha o volume de vazios satisfatórios (PROWELL AND HURLEY, 2007; NEWCOMB, 2006).

3.1.2. Tecnologias das misturas asfálticas mornas

Diversas tecnologias podem ser utilizadas para redução de temperatura de produção das misturas asfálticas mornas. Estas podem ser classificadas conforme o tipo de tecnologia empregada, sendo possível agrupá-las em três grupos (BARBOSA, 2012):

- Aditivos orgânicos
- Aditivos químicos
- Formação de espuma

As misturas modificadas a partir de orgânicos, geralmente possuem o princípio de reduzir a viscosidade do ligante, assim como as misturas de asfalto espumado, que a partir da adição de água. A temperatura ambiente, quando em contato com asfalto aquecido, aquece rapidamente gerando um aumento expressivo do volume de ligante. As misturas que utilizam aditivos químicos possuem um princípio diferente das citadas anteriormente, já que alteram as propriedades superficiais e interfaciais, reduzindo a tensão superficial na interface líquido/superfície.

A Tabela 3.2 abaixo apresenta um resumo de alguns aditivos presentes no mercado e que podem ser utilizados para obtenção das misturas asfálticas mornas.

Tabela 3.2 – Resumo de aditivos comercializados

TECNOLOGIA	EMPRESA RESPONSÁVEL DA PATENTE	TEMPERATURAS DE USINAGEM
ADITIVOS ORGÂNICOS		
Sasobit*(Ficher-Tropschwax)	Sasol WaxGmbH, Alemanha	Depende da gama de penetração do ligante, mas habitualmente entre os 130 e os 170 °C
Asphaltan B* (Cera de Montana, estéril de baixo peso molecular)	RomontaGmbH, Alemanha	
Licomont BS 100*	Clariant, Suíça	
ADITIVOS QUÍMICOS		
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
ESPUMA DE BETUME COM MINERAIS SINTÉTICOS OU NATURAIS		
Aspha-Min* (Zeólito sintético)	MHI Group e Eurovia Services GmbH, Alemanha	Depende da gama de penetração do ligante, mas habitualmente entre os 130 e 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 (EBT* e EBT*)	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	

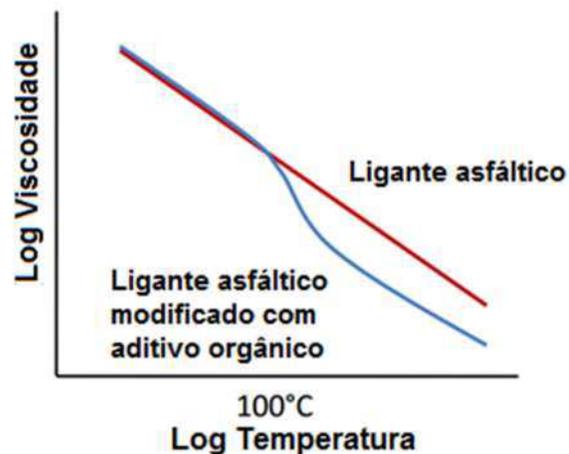
Fonte: Guerrero, 2012 *apud* Ferreira, 2009

3.2.1.1. Aditivos Orgânicos

Os aditivos orgânicos ao serem adicionados ao ligante ou a mistura, reduzem a viscosidade do betume a temperaturas acima do ponto de amolecimento da cera, cerca de 90°C (PROWELL and HURLEY, 2007). Assim

a importância da escolha do aditivo orgânico correto, que tenha seu ponto de amolecimento acima da temperatura de serviço prevista, de modo a evitar risco de ocorrência das deformações permanentes e reduzir também a fragilidade das misturas às baixas temperaturas, que causam as fissurações no asfalto (BARBOSA, 2012). Em temperaturas acima ao ponto de amolecimento do ligante modificado com o aditivo orgânico, a viscosidade é reduzida e em temperaturas inferiores ao ponto de amolecimento a viscosidade não se altera.

Figura 3.3 – Viscosidade do ligante modificado com aditivo orgânico



Fonte: Brown(2009)

A cera Sasobit® de acordo com a FHWA (2008), é a mais utilizada no mundo. Trata-se de uma cera sintética que é produzida através do processo Fischer-Tropsch, que se dá pelo aquecimento do carvão ou gás natural com vapor da água na presença de um catalisador (PROWELL *et al*, 2012). Possuem uma longa cadeia química de carbono, que ajudam a manter a cera misturada a solução reduzindo sua viscosidade (BUTTON, 2007).

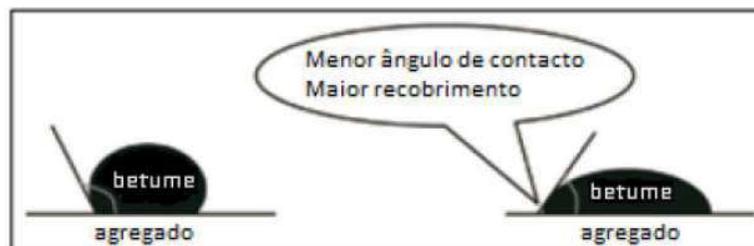
À temperatura ambiente possui uma coloração branca, podendo ser comercializado em flocos ou em pastilhas, quando em flocos deve ser adicionado diretamente ao ligante, e sob forma de pastilha deve ser inserido na mistura asfáltica (MELLO, 2012).

Figura 3.4 - Sasobit em flocos

Fonte: Motta(2011)

3.2.1.2. Aditivos químicos

Os aditivos químicos diferentemente dos orgânicos não alteram as propriedades reológicas do ligante, mas contém agentes surfactantes que são compostos tenso ativos que agem microscopicamente alterando as propriedades superficiais e interfaciais do ligante, reduzindo assim a tensão superficial, e o ângulo de contato, entre o ligante e a superfície do agregado. A Figura 3.5 ilustra a redução do ângulo de contato ligante betuminoso/agregado (GUERRERO, 2012).

Figura 3.5 – Redução ângulo de contato devido ao aditivo

Fonte: Alves, 2012

Os agentes surfactantes são compostos químicos com uma cabeça polar e uma cauda não polar, que tendem a atrair para si materiais semelhantes. O ligante tem uma característica predominante não polar, logo atrairá para si e será

atraído pela parte não polar do elemento surfactante, enquanto que o agregado que tem uma característica mais polar será ligado à parte polar do aditivo (WARGHA, 2013).

Os aditivos químicos podem reduzir as temperaturas de mistura e compactação em até 30°C (MARTINHO, 2014).

O Rediset® WMX é um aditivo da empresa *Azko Nobel*, composto por agentes surfactantes químicos e orgânicos, que modifica a reologia dos ligantes. Sem adição de água em sua formulação, os agentes surfactantes reduzem a tensão superficial do ligante, de modo que melhora sua adesividade, conferindo uma capacidade *antistripping*, ou seja, uma capacidade de antidescasque. O restante dos componentes do aditivo reduz a viscosidade do ligante. Deste modo a utilização deste produto permite reduções na temperatura de produção das misturas em torno de 30°C (PROWELL e HUREY, 2012; BARBOSA, 2012).

Segundo a empresa fabricante, Azko Nobel, a utilização do Rediset® WMX possibilita:

- A modificação da mistura, fornecendo uma trabalhabilidade e habilidade de compactação superiores a outras tecnologias;
- Aumento da adesividade e efeito *antistripping*, reduzindo qualquer preocupação com elevados níveis de água presentes no agregado.
- Utilizar maiores dosagens do aditivo, sem comprometer as propriedades do ligante.
- Boa estabilidade, possibilitando o armazenamento do ligante por duas semanas, sem efeitos negativos a sua performance;
- Utilização em uma grande gama de tipos de ligante, agregados e misturas;
- Abertura do tráfego em menor tempo do que outras misturas modificadas ou misturas convencionais.

A utilização deste produto não implica em modificações no processo de formulação, e visto que este aditivo melhora as propriedades de adesividade entre betume e ligante, pode-se dispensar o uso de outro aditivo para melhorar esta propriedade (DOPE). Normalmente o aditivo é pré-misturado com o betume,

porém pode ser adicionado diretamente na mistura, de preferência logo após a adição do ligante (PROWELL e HUREY, 2012).

O Evotherm é um produto desenvolvido nos Estados Unidos pela Mead Westvaco Asphalt Innovations. Utiliza uma tecnologia baseada em um pacote químico que inclui aditivos para melhorar a recobrimento dos agregados, a trabalhabilidade da mistura, compatibilidade e adesividade para que possam ser preparadas a baixo da temperatura convencional (D'ANGELO, 2008).

O Evotherm sofreu alterações desde seus primórdios e hoje se encontra em sua terceira geração, como pode-se acompanhar a seguir:

Evotherm Emulsion Technology (ET): Em sua primeira versão era formado por um pacote químico que era adicionado a uma emulsão asfáltica com alto teor de asfalto (70%), e em seguida armazenado a 80°C. Sua temperatura de usinagem se encontra entre 85 e 115°C, aí grande parte da emulsão se transforma em vapor quando em contato com os agregados quentes, proporcionando assim a cobertura completa das superfícies dos agregados. Devida a grande quantidade de vapor, não é possível se diferenciar visualmente esta mistura da convencional em seu processo de usinagem e compactação (PROWELL and HURLEY, 2007).

Evotherm Dispersed Asphalt Technology (DAT): nesta versão, diferentemente da primeira, pacote químico é vendido separadamente da emulsão. Também, ao invés de ser adicionado diretamente a emulsão asfáltica, este é dissolvido em uma pequena quantidade de água e então injetado no ligante asfáltico durante a usinagem (D'ANGELO *et al*, 2008).

Evotherm 3G: em sua terceira geração o seu princípio de funcionamento deixa de ser função da água ou vapor da água e passa a atuar no atrito interno das partículas de agregados. Os agentes tensoativos ou surfactantes trabalham de forma a diminuir o grau de atrito entre as partículas facilitando o recobrimento dos agregados, inclusive melhorando a trabalhabilidade da mistura devido ao ganho na lubrificação. Segundo o fabricante as moléculas que atuam como agentes tensoativos são provenientes de óleos naturais das plantas. Apresenta uma melhora na adesividade entre os agregados e ligante asfáltico,

incrementando a resistência ao dano da água na mistura asfáltica (KUANG, 2012).

Este aditivo pode ser fabricado de acordo com o tipo de ligante a ser modificado, seja convencional ou modificado. Por ter consistência líquida este aditivo pode ser adicionado e misturado nos tanques das distribuidoras ou no próprio tanque das usinas de mistura asfáltica. Recomenda-se adicionar o Evotherm3G de 0,25% á 0,75% em peso no ligante asfáltico.

A adição de Evotherm não modifica as propriedades de caracterização do ligante, assim o teor de ligante determinado em projeto para mistura convencional pode ser considerado o mesmo para a mistura modificada (D'ANGELO *et al.*, 2008).

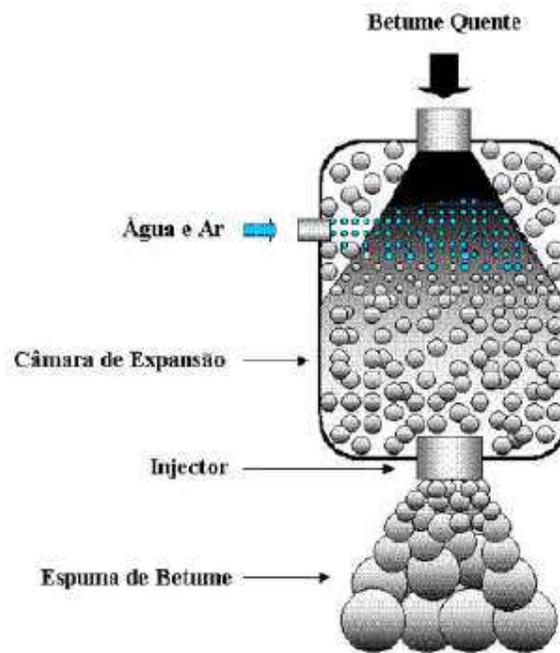
3.2.1.3. Formação de espuma

A técnica de formação de espuma pode ser alcançada por métodos distintos. No entanto, todas possuem o mesmo objetivo de obter o asfalto espumado, que irá auxiliar no recobrimento do agregado e favorecer a trabalhabilidade da massa asfáltica, com a redução da viscosidade do ligante.

A tecnologia de adição de água ao ligante para a formação de espuma pode ser considerada uma técnica antiga, porém no passado ao invés da utilização de água a temperatura ambiente, era utilizado o vapor da água. Uma pequena quantidade de água a temperatura ambiente (cerca de 2 a 3% sobre a massa do betume) é adicionada ao betume quente, ao entrar em contato com o ligante, a água passa do estado líquido para vapor, expandindo rapidamente. Neste processo, são geradas bolhas de filme de betume preenchidas com vapor da água, denominadas espuma de betume. Deste modo a viscosidade do betume é reduzida, permitindo o recobrimento dos agregados a temperaturas de mistura reduzida (FERREIRA, 2009 *apud* CROTEAU and TESSIER, 2008). A quantidade de água a ser adicionada deve ser escolhida cuidadosamente, uma vez que, em excesso, pode gerar fenômenos de *stripping*, desprendimento do ligante ao agregado, e quando em quantidade insuficiente não causa a ação espumante. Para garantir que não ocorra este descasque, recomenda-se o uso

de aditivos que garantam a coesão e adesão, para melhorar o envolvimento dos agregados pelo betume assim diminuindo a susceptibilidade à umidade da mistura (ZAUMANIS, 2010).

Figura 3.6 – Produção asfalto espuma através de injeção direta



Fonte: Barbosa(2012)

Nas tecnologias que se baseiam em espumar o asfalto, pelo contato da água com o ligante quente, a água pode ser inserida no processo de usinagem por injeção direta (Figura 3.6), por agregados miúdos ou ainda pela adição de material hidrofílico, como as zeólitas.

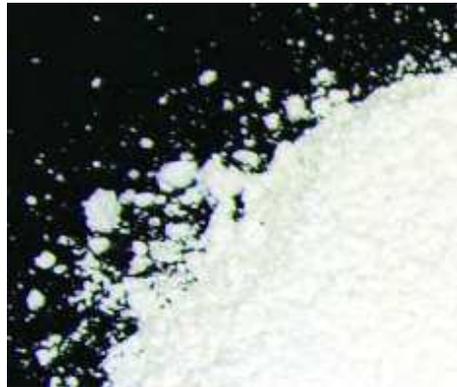
As zeólitas são silicatos cristalinos alumino-hidratados, podendo ser naturais ou sintéticos, que contém cerca de 20% de água em sua estrutura. Possui em sua estrutura canais ou concavidades interconectadas, onde se encontram as moléculas de água (OTTO, 2009). Quando uma zeólita é aquecido acima de 85°C a água é liberada em forma de vapor, gerando espuma de betume (MARTINHO, 2014). A grande maioria é caracterizada pela capacidade de

absorver ou perder água, reversivelmente, sem danificar sua estrutura mineral (FERREIRA, 2009).

Os dois processos citados anteriormente podem ser subdivididos em processos à base de água e que contem água. Os processos à base de água geram uma menor liberação de vapor, devido a menor quantidade de água, se comparado ao processo de injetar água diretamente (ZAUMANIS, 2010).

Nos processos onde se utiliza zeólitos, pode-se citar o Advera WMA (Figura 3.7) e Aspha-Min (Figura 3.8), duas zeólitas sintéticas em pó que permitem a produção de asfalto espuma. Possuem uma granulometria entre a peneira n°50 e a n°200, podem ser inseridos diretamente no interior do misturados, ou por um alimentador pneumático especialmente construído, que alimente o tambor alimentador.

Figura 3.7 – Aditivo Adevra



Fonte: www.adverawma.com

Figura 3.8 – Aditivo Aspha-min



Fonte: www.aspha-min.com

CAPÍTULO 4

ESTUDOS LABORATORIAIS

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo são tratados assuntos relacionados à coleta e origem dos materiais pétreos e ligantes betuminosos. Os ensaios de caracterização, tanto dos agregados como dos ligantes betuminosos, o processo de modificação dos ligantes, a produção dos corpos de prova, desde a preparação dos mesmos até o momento da determinação de suas características físicas, volumétricas e gravimétricas. Ainda descrito neste capítulo o processo obtenção da estabilidade e fluência Marshall, e posteriormente do ensaio complementar de tração indireta.

Nesta etapa foram realizados ensaios com três tipos de misturas asfálticas, denominadas Mistura 1 (M1), Mistura 2 (M2) e Mistura 3 (M3). O primeiro tipo de mistura (M1) é utilizada como referência, por ser uma mistura convencional, sem qualquer tipo de aditivo. As duas misturas seguintes (M2 e M3) foram preparadas com aditivos surfactantes, cada qual com sua percentagem estipulada de acordo com o respectivo aditivo, Rediset e Evotherm. Cabe mencionar que as únicas variáveis entre as misturas mornas e de referência são o uso do surfactante e a redução da temperatura de usinagem e compactação. Os dois tipos de misturas mornas estudadas, diferem-se entre si apenas pelo aditivo e seu teor utilizado, que foi definido a partir da literatura estudada juntamente com recomendações de seus fabricantes.

Tabela 4.1 – Materiais utilizados nas misturas asfálticas

Misturas	Origem Agregados	Ligante asfáltico	Aditivo	Curva granulométrica
MR	Vogelsanger	CAP 50/70	-	Curva Teórica*
M1	Vogelsanger	CAP 50/70	Rediset	Curva Teórica*
M2	Vogelsanger	CAP 50/70	Evotherm	Curva Teórica*

*curva teórica obtida da pesquisa de Barra (2005).

Fonte: autor

Nos três tipos de misturas foram utilizadas as mesmas curvas granulométricas assim como o mesmo agregado mineral. Na Tabela 4.1 mostra os materiais utilizados para cada mistura.

Os materiais utilizados passaram por ensaios de caracterização para avaliação de suas propriedades. Os ensaios de caracterização dos agregados foram realizados a fim de conhecer suas propriedades e garantir que o material utilizado possuía os requisitos mínimos para garantir uma boa mistura asfáltica, de modo que sua qualidade não prejudicasse os resultados finais.

Os ensaios de caracterização dos ligantes foram realizados com os três tipos de ligantes utilizados no estudo, de referência e modificados, afim de comparar os resultados analisando possíveis variações.

4.2. MATERIAIS

Nos seguintes subcapítulos encontram-se descritos a procedência dos materiais utilizados nesta pesquisa, os quais: agregados pétreos, ligantes betuminosos e aditivos. Em seguida descrevem-se os ensaios de caracterização realizados com cada material.

4.2.1. Agregados Minerais

O agregado mineral utilizado nesta pesquisa foi fornecido pela empresa Britagem Vogelsanger, o material extraído pela empresa se encontra na localidade da Estrada Pirai no bairro Vila Nova na cidade de Joinville/SC.

Figura 4.1 – Pedreira Vogelsanger

Fonte: Google Maps

Na visita a pedreira para coleta do material, foi fornecido filler, pó de brita, brita 1(3/16" a 3/8") e brita 2(3/8 a 3/4"), descrição conforme fornecedor. O material foi coletado diretamente das pilhas de estocagem e transportado até o Laboratório de Técnicas Infraestrutura da Universidade Federal de Santa Catarina no campus de Joinville (Figura 4.2). A Figura 4.3 ilustra o peneirador utilizado para o processo.

Figura 4.2 – Diferentes graduações de britas coletadas na pedreira

Fonte: autor

Figura 4.3 – Equipamento peneirador e acessórios de proteção



Fonte: autor

No laboratório as quatro diferentes graduações do agregado mineral foram separadas nas frações e quantidades necessárias (Tabela 4.2) para a produção de 84 corpos de prova assim como para os ensaios de caracterização, que serão descritos nos próximos parágrafos.

Tabela 4.2 – Pesos necessário de materiais

Peneiras	Peso necessário (kg)
19,1	-
12,7	20,894445
9,5	12,51432
4,76	23,129145
2,2	17,8776
1,2	9,944415
0,6	8,156655
0,3	5,698485
0,15	4,02246
0,075	2,793375
FUNDO	6,7041
LIGANTE	6075

Fonte: autor

O ensaio de abrasão de Los Angeles (DNER-ME 035/98) é utilizado para medir a resistência à abrasão das cargas abrasivas aplicadas por intermédio de esferas metálicas. A amostra de material é colocada no aparelho (Figura 4.4),

juntamente com as esferas abrasivas, que posteriormente são submetidos a um determinado número de rotações a uma velocidade específica.

Figura 4.4 – Aparelho de Los Angeles



Fonte: autor

O desgaste é avaliado pela redução da massa de agregados retidos na peneira n°12 (1,7mm) em relação à massa inicial da amostra especificada. O resultado obtido neste ensaio está apresentado na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Resultado ensaio abrasão de Los Angeles

Fração	Peso antes (g)	Peso depois (g)
19,10 - 12,70	2500	1241,9
12,70 - 9,50	2500	1259,6
Retido 1,70	-	1871,4
TOTAL	5000	4372,9
PERDA (%)		12,542

Fonte: autor

O ensaio de durabilidade (DNER-ME 089/94, 1994) simula o processo de degradação dos agregados. O material ensaiado é submetido a ação de sais em solução saturada de sulfato de sódio ou magnésio, de modo a simular a exposição dos agregados às intempéries nos pavimentos, de modo acelerado (BERNUCCI et al., 2010). Os resultados são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Resultado do ensaio de durabilidade

Peneira	Peso
19,10 - 12,7	670,0
12,70 - 9,50	330,0
Após 5 ciclos	
Peneira	Peso
19,10 - 12,7	620,0
12,70 - 9,50	349,2
TOTAL	969,2
Percentual	96,92%
Perda	3,08%

Fonte: autor

O ensaio de índice de forma (ABNT NBR 7809/87, 1987) avalia a forma dos granulares produzida pelo processo de britagem. Foram tomadas três medidas de uma amostra de agregados, comprimento(a), largura(b) e espessura(c). Para a classificação segundo a forma são determinadas e relacionadas entre si as razões b/a e c/b . As amostras ensaiadas se encaixaram na classificação de forma cúbica, entretanto partículas lamelares foram encontradas nas amostras.

No ensaio de adesividade (DNER-ME 078/94), é testada a eficiência da resistência à ação da água entre o granular e o ligante, objetivando testar a afinidade eletroquímica entre o granular e o ligante. Para o estudo foi testado apenas o ligante puro. O resultado obtido foi satisfatório para os ligantes modificados, não apresentando descolamento de película de ligante betuminoso que envolve as partículas de agregado. Porém, houve desprendimento para o ligante puro.

Além destes ensaios também foram feitos ensaios de densidade real dos agregados graúdos (DNER-ME 81/98) e miúdos (DNER-ME 84/95), conforme descrito na especificação de serviço (DNIT-ES 031/2006). A densidade dos agregados graúdos é calculada a partir do peso seco, peso submerso e peso com a superfície saturada seca. Neste caso foram feitas duas amostras, sendo montadas proporcionais a curva granulométrica. Os resultados são obtidos a partir de fórmulas para se encontrar a densidade real, e os resultados foram obtidos a partir da média das duas amostras. A densidade dos agregados miúdos consiste na pesagem do picnômetro seco, picnômetro seco com água,

picnômetro seco com amostra e picnômetro com água e amostra. Sendo feita a utilização do vácuo quando o picnômetro está com água e amostra para a retirada de vazios de ar. Então os dados são calculados a partir de fórmulas para determinação das massas. Os resultados são apresentados nas tabelas 4.5 e 4.6 ilustradas a seguir.

Tabela 4.5 – Densidade Real dos Granulares Graúdos

Média das amostras montada proporcional			
Densidade aparente (g/cm ³)		2,765	
Absorção (%)		0,356	
Densidade real (g/cm ³)		2,792	
Amostra 1 (Montada proporcional)		Amostra 2 (Montada proporcional)	
Data	28/07/2015	Data	28/07/2015
Peso da amostra seca (g)	499,1	Peso da amostra seca (g)	499,4
Peso da amostra imersa (g)	320,6	Peso da amostra imersa (g)	320,4
Peso de superfície saturada seca (g)	501,2	Peso de superfície saturada seca (g)	500,7
Densidade aparente (g/cm ³)	2,764	Densidade aparente (g/cm ³)	2,770
Absorção (%)	0,42	Absorção (%)	0,26
Densidade real (g/cm ³)	2,796	Densidade real (g/cm ³)	2,790
Amostra 1 (Montada proporcional)		Amostra 2 (Montada proporcional)	
Data	30/07/2015	Data	30/07/2015
Peso da amostra seca (g)	498,9	Peso da amostra seca (g)	498,8
Peso da amostra imersa (g)	320,2	Peso da amostra imersa (g)	320,1
Peso de superfície saturada seca (g)	500,9	Peso de superfície saturada seca (g)	500,5
Densidade aparente (g/cm ³)	2,761	Densidade aparente (g/cm ³)	2,765
Absorção (%)	0,40	Absorção (%)	0,34
Densidade real (g/cm ³)	2,792	Densidade real (g/cm ³)	2,791

Fonte: autor

Tabela 4.6 – Densidade Real dos Granulares Miúdos

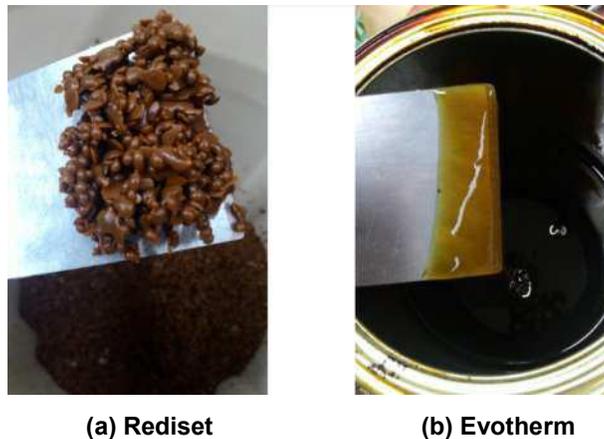
Agregado Miúdo	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Peso da amostra seca	500	500	499,6
Volume do picnômetro (calibrado)	1058,7	1058,7	1058,7
Peso do picnômetro + rolha	532	532	532
Pic + rolha + H ₂ O etiqueta	1119,4	1109,8	1119,5
Pic + rolha + H ₂ O etiqueta + amostra	1619,4	1609,8	1619,1
Pic + rolha + amostra + H ₂ O (vácuo)	1914,4	1912,8	1913,1
Confirmação da amostra seca	500	500	499,6
Volume da água (água até o menisco)	882,4	880,8	881,5
Volume da amostra	176,300	177,900	177,200
Densidade real	2,836	2,811	2,819
Densidade real média (g/cm³)	2,822		

Fonte: autor

4.2.2. Ligante Betuminoso e Aditivos

O CAP e os aditivos surfactantes, Rediset (Figura 4.5a) e Evotherm (Figura 4.5b), utilizados nesta pesquisa foram fornecidos pela empresa CBB Asfaltos. O cimento asfáltico utilizado na pesquisa foi o CAP classificado como CAP 50/70.

Figura 4.5 – Aditivos surfactantes



Fonte: autor

Para determinar se um tipo de asfalto é adequado para pavimentação são utilizadas algumas medidas de caracterização física dos ligantes (BERNUCCI et al., 2008). Duas destas principais são a “dureza” e a resistência ao fluxo do material, que podem ser obtidas através da penetração de uma agulha em uma amostra e do ensaio de viscosidade respectivamente.

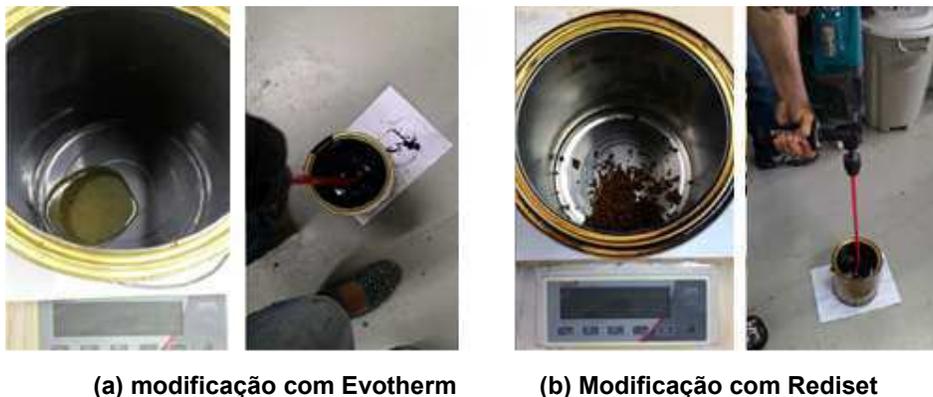
Os ensaios de caracterização dos ligantes betuminosos foram realizados com o ligante puro e para os ligantes modificados com Rediset e Evotherm.

No processo de modificação do ligante asfáltico aplicou-se uma redução de 30°C com relação à temperatura de usinagem. Mesmo que na revisão bibliográfica encontraram-se tanto reduções superiores a esta quando inferiores, optou-se por utilizar uma temperatura média entre as faixas de redução de temperatura encontradas para os aditivos utilizados. Sendo assim a modificação foi realizada à 123°C.

Para a modificação primeiramente o ligante permaneceu por duas horas na estufa na temperatura de mistura, até que sua temperatura fosse homogênea.

Foi pesado o aditivo de acordo com sua dosagem e após a permanência do mesmo na estufa até que a sua consistência fosse líquida e a temperatura homogênea, a quantidade calculada de ligante foi adicionado. Foi utilizado um misturador de argamassa ajustado a uma furadeira para o processo. Na Figura 4.6 abaixo pode-se observar parte do processo.

Figura 4.6 – Processo de mistura do aditivo ao ligante



Fonte: autor

Analisando as especificações técnicas de cada produto, ambos fabricantes não fornecem um teor exato a ser utilizado, mas sim uma faixa ideal de teores. A seguir pode-se observar a faixa de dosagem fornecida por cada fabricante e a dosagem que foi determinada para cada aditivo. A dosagem adotada (Tabela 4.7) foi o termo médio dentre o intervalo fornecido pelos fabricantes, levando também em consideração referências encontradas em pesquisas realizadas (ALVES, 2012; BARBOSA 2012; CAVALCANTI, 2010; GUERRERO, 2013 HURLEY AND PROWELL, 2006; KU YANG, 2012)

Tabela 4.7 – Dosagem de aditivos

Aditivo	Intervalo	Teor adotado
REDISET	1,5% a 2,5% em peso do ligante	2%
EVOTHERM	0,25% a 0,75% em peso do ligante	0,5%

Fonte: autor

O passo seguinte foi a caracterização dos ligantes betuminosos. Foram três tipos de ensaios realizados para caracterização dos mesmos, sendo eles: penetração, ponto de amolecimento anel e bola e viscosidade (Saybolt-Furol e Brookfield).

O ensaio de penetração (DNIT-ME 155, 2010) determina a profundidade que uma agulha penetra na amostra sob condições normativas de temperatura, tempo e carga. Neste caso sendo a temperatura de 25°C, tempo de 5 segundos e com uma carga de 100g. A Figura 4.7 ilustra o procedimento de ensaio.

Figura 4.7 – Ensaio de penetração



Fonte: autor

Os resultados dos ensaios realizados com as três diferentes amostras de CAP encontram-se na Tabela 4.8

Tabela 4.8 – Resultado ensaio de penetração

	CONVENCIONAL	REDISET	EVOTHERM
Penetração 1	54,8 mm	55,3 mm	53,7 mm
Penetração 2	55,4 mm	52,5 mm	55,2 mm
Penetração 3	53,2 mm	54,6 mm	54,4 mm
MÉDIA	54,47	54,13	54,43

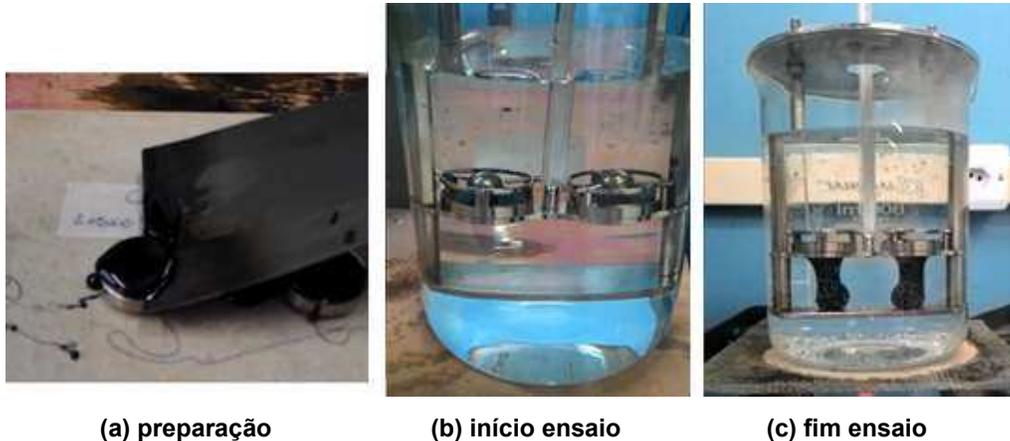
Fonte: autor

O resultado deste ensaio confirma que a adição de aditivos surfactantes ao ligante betuminoso não altera suas características referentes a penetração, visto que os resultados obtidos foram muito parecidos.

O ponto de amolecimento (DNIT-ME 131, 2010) do ligante é determinado pelo ensaio também chamado de anel e bola. Este define a temperatura na qual

o ligante betuminoso amolece quando submetido a um aquecimento de $5^{\circ}\text{C} \pm 0,5$ a cada minuto. A temperatura de amolecimento é obtida no momento em que as esferas metálicas posicionadas acima dos anéis com ligante encostam na barra metálica do suporte. A Figura 4.8 mostra o momento de preparação dos anéis contendo o ligante (a) e por fim o momento inicial (b) e final do ensaio (c).

Figura 4.8 – Ensaio ponto de amolecimento



Fonte: autor

Com os resultados obtidos dos ensaios de penetração e ponto de amolecimento, pode-se determinar o índice de suscetibilidade térmica (Equação 4.1), indica a sensibilidade da consistência dos ligantes asfálticos à variação de temperatura (BERNUCCI et al., 2010).

$$IP = \frac{500 \log P + 20PA - 1951}{120 - 50 \log P + PA} \quad (4.1)$$

onde:

IP = Índice de Pfeiffer e Van Doormaal;

PA = Ponto de amolecimento obtido no ensaio anel e bola ($^{\circ}\text{C}$);

P = Penetração obtido no ensaio de penetração (mm).

A faixa aceitável de índices que a norma brasileira adota é entre (-1,5) e (+0,7). Quanto menor o valor de IP em valor absoluto menor será sua

suscetibilidade térmica. Ou seja, o valor próximo ao limite superior apresenta pouca suscetibilidade a altas temperaturas (BARRA, 2005). Na Tabela 4.9 tem-se os resultados obtidos a partir do ponto de amolecimento e penetração de cada ligante.

Tabela 4.9 – Resultados do índice de suscetibilidade térmica dos ligantes

CONVENCIONAL					
Penetração (0,1mm)		Anel e Bola (°C)		IP	
1	54,8	1	51	-0,7	
2	55,4	2	51		
3	53,2	-	-		
MÉDIA	54	MÉDIA	51		
REDISET					
Penetração (0,1mm)		Anel e Bola (°C)		IP	
1	55,3	1	50	-1,0	
2	52,5	2	50		
3	54,6	-	-		
MÉDIA	54	MÉDIA	50		
EVOTHERM					
Penetração (0,1mm)		Anel e Bola (°C)		IP	
1	53,7	1	49	-1,3	
2	55,2	2	49		
3	54,4	-	-		
MÉDIA	54	MÉDIA	49		

Fonte: autor

O ligante betuminoso convencional apresentou uma menor susceptibilidade térmica dentre os três ligantes. Porém os três ligantes apresentaram uma forte susceptibilidade térmica, por apresentar valores próximos ao limite inferior (-1,5).

O resultado do ensaio de ponto de amolecimento também confirma que não houve mudanças significativas nas características físicas dos ligantes modificados. Novamente os resultados obtidos foram muito próximos.

A viscosidade pode ser avaliada por dois tipos de viscosímetros, o mais utilizado no Brasil é o Saybot-Furol, a partir dele se obtém uma medida empírica da viscosidade (BERNUCCI *et al*, 2008). Nesta metodologia a viscosidade é avaliada pela consistência do cimento asfáltico, por resistência ao escoamento.

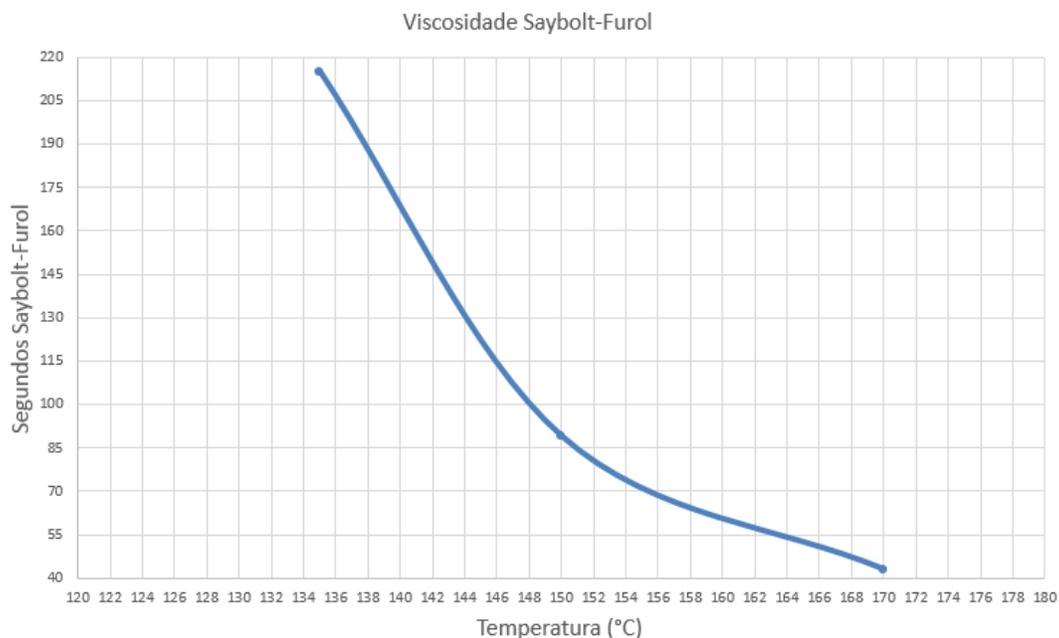
O aparelho possui uma configuração simples, composto de um tubo com formato e dimensões padronizadas, no fundo do qual fica um orifício de diâmetro de $3,15 \pm 0,02$ mm. O tubo contendo o material a ser ensaiado é colocado em um

recipiente, com óleo, com o orifício fechado, sendo aquecido na temperatura desejada. Quando o material se estabiliza na temperatura, abre-se o orifício, por onde escoo o material e é então contabilizado o tempo até o líquido alcançar a marca de 60 ml. O valor é obtido em segundos Saybot-Furol (sSF) dado que correlaciona o tempo de escoamento com a viscosidade do material analisado.

O ensaio é realizado para fins de determinação da curva de viscosidade-temperatura, a qual fornece as temperaturas ideais de usinagem e compactação da mistura, ou seja, definição da consistência que o ligante betuminoso deve apresentar na mistura como agregado para se obter uma boa cobertura, e a temperatura que a mistura asfáltica deve apresentar para melhor aplicação no campo (BERNUCCI et al., 2008).

A Figura 4.9 apresenta a curva obtida com o ensaio de viscosidade, com o ligante convencional. Apenas com o intuito de demonstrar a aparência da curva. As curvas com os limites normativos recomendáveis serão ilustradas no decorrer do capítulo.

Figura 4.9 – Curva viscosidade para CAP convencional



Fonte: autor

Outro viscosímetro muito utilizado é o Brookfield, que permite medir as propriedades de consistência. Permite ainda obter o gráfico de temperatura e viscosidade por meio da medida de comportamento do fluido a diferentes taxas de cisalhamento e a diferentes tensões de cisalhamento, obtidas por rotação de cilindros coaxiais que ficam mergulhados nas amostras (spindle). Para cada tipo de material ou faixa de temperatura é necessário especificar o tipo de spindle adequada (BERNUCCI et al., 2008).

Os resultados dos ensaios de caracterização citados anteriormente estão descritos na Tabela 4.10 abaixo.

Tabela 4.10 – Resumo resultados caracterização dos ligantes

Ensaio		PURO	REDISET	EVOTHERM
Penetração (mm)		54,47	54,13	54,43
Ponto de amolecimento (°C)		51	50	49
Viscosidade Saybolt-Furol · sSF	170°C	48	43	45
	150°C	94	89	97
	135°C	217	215	211
Viscosidade Brookfield Pa.s	177°C	0,063	0,058	0,0615
	150°C	0,1715	0,156	0,1675
	135°C	0,347	0,307	0,333

Fonte: autor

4.2. SELEÇÃO DA CURVA GRANULOMÉTRICA

A seleção da curva granulométrica foi determinada através da fórmula estabelecida por Talbot-Fuller (Equação 4.2), que permite calcular curvas granulométricas bem definidas, a partir da escolha do percentual de material passante na peneira de menor diâmetro e de diâmetro máximo do grão que fará parte da série de peneiras selecionadas. Assim é possível obter uma curva granulométrica com uma maior densidade, esperando obter um maior entrosamento das partículas, resultando em uma menor porcentagem de vazios e como consequência uma mistura mais duradoura (BARRA, 2005; GUERRERO, 2013).

$$\%P = a. (d/D)^n \quad (4.2)$$

onde:

%P = Percentagem em peso que passa na peneira de abertura d (menor diâmetro);

a = constante tomada igual a 100;

d = abertura de uma determinada peneira;

D = Tamanho máximo (mm), abertura da peneira que passa 100% do material;

n = Expoente.

Sendo assim, a curva granulométrica utilizada na pesquisa foi selecionada a partir das frações dos materiais utilizados, tais frações seguiram as mesmas proporções da curva teórica CT2 da pesquisa de BARRA (2005). Onde o diâmetro máximo da série de peneiras utilizados foi de 19,1mm e a percentagem de peso que passa na peneira de menor abertura (0,075mm) foi de 6%, resultando em um expoente n da ordem de 0,51, conferindo a característica de uma mistura asfáltica densa.

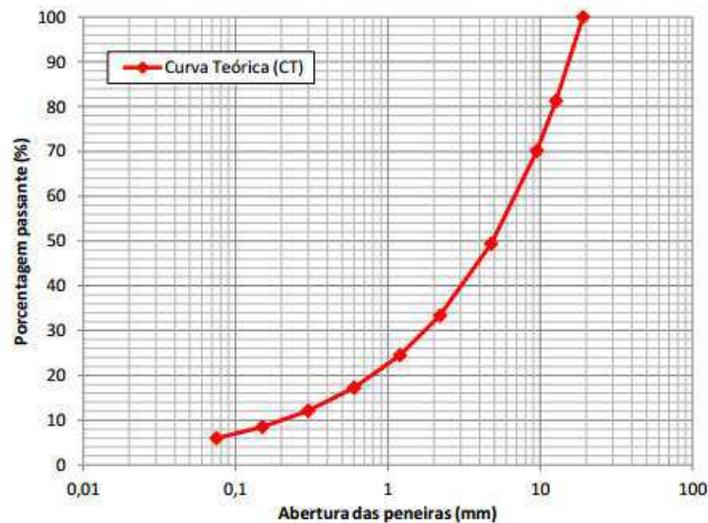
Na tabela 4.11 estão indicados os resultados dos percentuais de cada fração, calculadas com base na equação de Fuller-Talbot (Equação 4.2), apresentada anteriormente. Na Figura 4.10 é apresentado um gráfico da curva granulométrica utilizada.

Tabela 4.11 – composição da curva granulométrica

Peneiras	% passante
19,1	100
12,7	81,3
9,5	70,1
4,76	49,4
2,2	33,4
1,2	24,5
0,6	17,2
0,3	12,1
0,15	8,5
0,075	6

Fonte: autor

Figura 4.10 – Curva granulométrica utilizada



Fonte: Barra, 2005

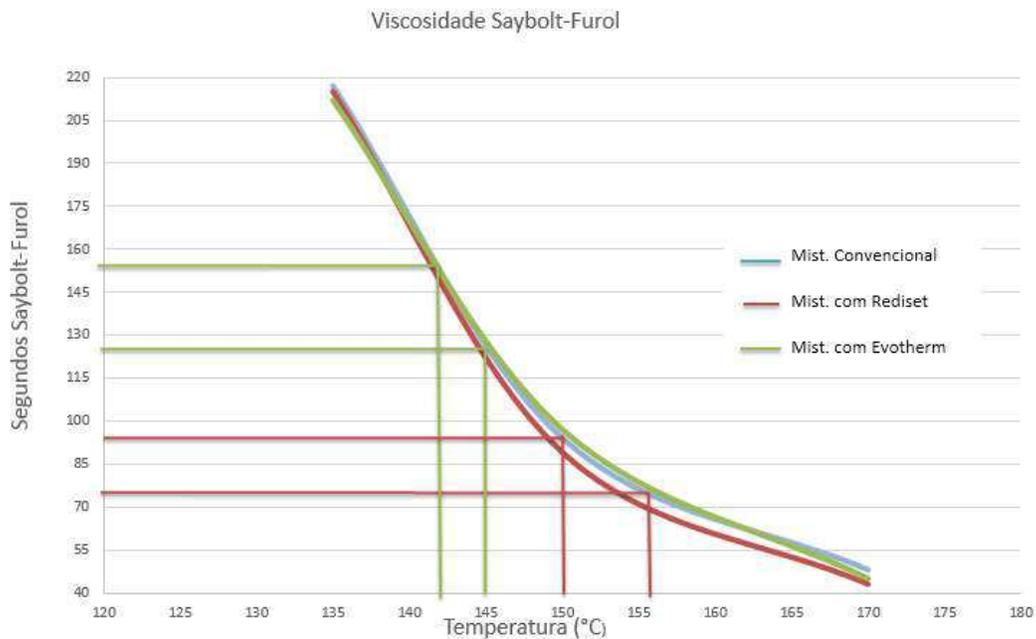
4.3. TEMPERATURA DE USINAGEM E COMPACTAÇÃO

As temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas com CAP puro foram obtidas a partir da curva de viscosidade, com base no intervalo de viscosidade ideal para as mesmas. Para usinagem o intervalo de viscosidade sugerido se encontra entre 75 e 95 sSF e para a compactação de 125 a 155 sSF. A partir deste intervalo, no gráfico se determinam as temperaturas para cada momento.

As curvas de viscosidade para os ligantes modificados foram obtidas apenas para confirmação da teoria, de que os aditivos surfactantes não alteram a curva viscosidade do ligante original. De modo que estas duas curvas não foram utilizadas para estipular as temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas mornas.

As curvas dos três ligantes foram representadas em uma mesma figura para melhor visualização dos resultados (Figura 4.11)

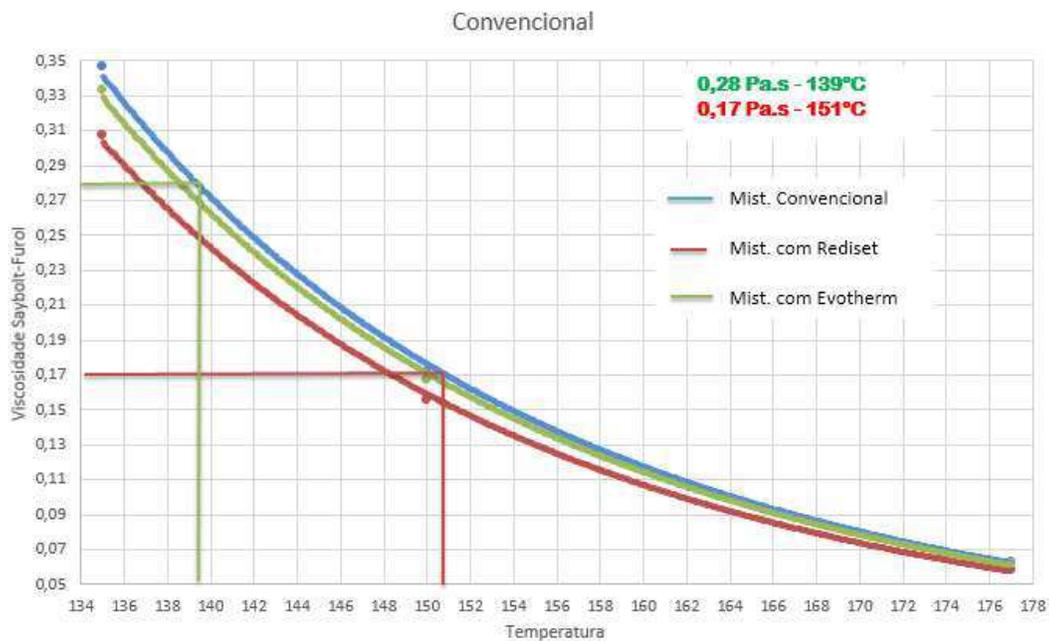
Figura 4.11 –Curva viscosidade Saybolt-Furol das misturas asfálticas



Fonte: autor

Com a intenção de apresentar um estudo um pouco mais detalhado sobre a viscosidade dos ligante utilizados com aditivos utilizou-se também o viscosímetro Brookfield para avaliar a viscosidade. Como pode-se observar os resultados na Figura 4.12, a seguir, as temperaturas de usinagem e compactação definidas pelas curvas viscosidades Brookfield resultaram muito semelhantes às curvas Saybolt-Furol. É possível observar também, que igualmente ao caso da curva Saybolt-Furol a viscosidade dos ligantes modificados não sofreu grandes variações, comprovando novamente a teoria de que os aditivos surfactantes não alteram a viscosidade do ligante puro.

Figura 4.12 – Curva viscosidade Brookfield misturas



Fonte: autor

Com base na literatura e estudos brasileiros e internacionais referidos na bibliografia, estudos utilizando Rediset e Evotherm tem-se que são capazes de reduzir as temperaturas de usinagem e compactação em até 30°C e entre 30-45°C respectivamente (ALVES, 2012; CAVALCANTI, 2010; GUERRERO, 2013; HURLEY & PROWELL, 2006; OTTO, 2009; KUANG, 2012). Analisando os resultados das pesquisas citadas optou-se pela redução de 30°C para cada uma das misturas analisadas, sendo assim, a Tabela 4.12 apresenta as temperaturas de mistura e compactação para cada mistura analisada.

Tabela 4.12 – Temperaturas de usinagem e compactação de cada mistura

Mistura	Ligante	Agregados (°C)	Mistura (°C)	Compactação (°C)
A	CAP 50/70 de referência	163	153	144
B	CAP 50/70 + 2% REDISET	133	123	114
C	CAP 50/70 + 0,5% EVOTHERM	133	123	114

Fonte: autor

4.4. ENSAIO MARSHALL

O teor ótimo de betume é uma variável importante no que diz a respeito do desempenho do pavimento. A determinação do teor ótimo de betume pode evitar diversas patologias, tais como, trilhas de roda, fadiga, exsudação entre outros. Nesta pesquisa se utilizou o Método de dosagem Marshall seguindo as orientações da norma DNER-ME 043/95, este também é o método oficialmente utilizado no Brasil.

Através do Método Marshall buscam-se misturas com: (i) uma densidade máxima possível para garantir a máxima estabilidade e fluência entre os limites normatizados, para garantir flexibilidade (ii) o volume de vazios dentro de limites, também normatizados, para garantir que não ocorra oxidação da massa asfáltica pela ação da água e/ou ar, e por fim (iii) a relação de betumes/vazios dentro de parâmetros que garantam a existência de ligante betuminoso sem excesso (ALVES, 2012).

4.4.1. Preparação dos corpos de prova

O método de dosagem Marshall foi utilizado para os três tipos de misturas estudadas, a dosagem de cada mistura foi feita a partir de cinco teores de betume, para cada teor cinco corpos de prova. O teor inicial estipulado foi de 4% seguindo com uma diferença de 0,25% entre os seguintes. As porcentagens de ligantes utilizadas foram então: 4,00%, 4,25%, 4,50%, 4,75% e 5,00%.

Ao final, para o Ensaio Marshall foram confeccionados 75 corpos de prova cilíndricos, 25 para cada tipo de mistura, dentre elas uma se caracteriza como sendo a mistura de controle ou de referência. A Figura 4.13 representa um conjunto de 25 amostras de agregados separados para confecção de uma das misturas.

Figura 4.13 – Amostras de agregados separadas

Fonte:autor

A execução dos corpos de prova teve seu início pelo aquecimento dos agregados na estufa, onde permaneceram durante aproximadamente 12 horas, a uma temperatura em torno de 10°C acima da temperatura de aquecimento do ligante (Figura 4.14).

Figura 4.14 – Amostras na estufa

Fonte: autor

O passo seguinte foi o processo de mistura do esqueleto mineral ao ligante betuminoso, no caso das misturas mornas, do ligante betuminoso juntamente com os respectivos aditivos. A mistura foi realizada em um recipiente

de alumínio (Figura 4.15) aquecido anteriormente na estufa e misturada manualmente durante cerca de 2 a 3 minutos até a certificação que todos os agregados estavam recobertos pelo ligante.

Figura 4.15 – Processo de mistura manual



Fonte: autor

Após a homogeneização dos materiais, estes foram levados novamente à estufa, onde permaneceram por duas horas, desta vez na temperatura de compactação, determinada pela curva de viscosidade conforme abordado anteriormente neste capítulo. A mistura é então acomodada no molde cilíndrico por 15 golpes com espátula ao redor dos mesmos e por 10 golpes no centro do molde. A compactação é realizada por impacto do soquete Marshall (Figura 4.16), com a aplicação de 75 golpes em ambas as faces do corpo de prova.

Figura 4.16 – Compactação utilizando soquete Marshall

Fonte: autor

O aparelho utilizado é eletromecânico, impedindo a variabilidade da energia de compactação, contribuindo para redução do gradiente de densidade, que certamente seria mais elevado caso compactado manualmente (BÚRIGO, 2015). O número de golpes necessários é determinado através da norma, considerando que a pesquisa analisa o comportamento de misturas a serem utilizadas para camada de rolamento.

Depois de compactados os moldes ficaram em repouso durante no mínimo 24 horas, para que fosse atingida a cura. Após este período, foram ligeiramente aquecidos, cerca de 10 minutos na estufa, para sua extração. O equipamento utilizado é ilustrado na Figura 4.17.

Figura 4.17 – Extração manual do corpo de prova

Fonte: autor

Cada corpo de prova foi medido com auxílio do paquímetro em quatro pontos para definição da altura média e em dois pontos para obtenção do diâmetro médio. Foram obtidas também os valores do peso seco e peso submerso para o cálculo de grandezas como: relação betume/vazios, volume de vazios, vazios do agregado mineral e massa específica aparente dos corpos de prova. Além destes parâmetros foi calculada a densidade real da mistura (Equação 4.3), para posterior avaliação das propriedades volumétricas das misturas avaliadas. A densidade real é a densidade de uma mistura hipotética sem a presença de vazios.

$$D_{real} = \frac{100}{\frac{\%retido\ até\ 4,8mm}{d_{graúdo}} + \frac{\%retido\ até\ fundo}{d_{miúdo}} + \frac{\%ligante}{d_{ligante}}} \quad (4.3)$$

onde:

D_{real} = massa específica real da mistura;

%retido até 4,8 mm = percentagem retida na peneira de abertura 12,7mm até 4,8mm;

%retido até fundo = percentagem retida na peneira de abertura 2,2mm até o fundo;

%ligante = percentagem de ligante betuminoso da mistura;

$d_{graúdo}$ = massa específica real do agregado graúdo;

$d_{miúdo}$ = massa específica real do agregado miúdo;

$d_{ligante}$ = massa específica real do ligante betuminoso.

O seguinte parâmetro obtido foi a massa específica aparente dos corpos de prova (Equação 4.4). O cálculo deste parâmetro seguiu a norma DNER-ME 117/94, no caso de corpos de prova com até 7% de vazios, realizou-se a pesagem do corpo de prova ao ar e posteriormente submerso na água. A massa específica aparente é a relação entre a massa da mistura e o volume ocupada pela mesma. O processo se encontra ilustrado na Figura 4.18.

$$D_{aparente} = \frac{P_{ar}}{P_{ar} - P_i} \quad (4.4)$$

onde:

$D_{aparente}$ = densidade aparente do corpo de prova;

P_{ar} = peso do corpo de prova ao ar;

P_i = peso do corpo de prova submerso na água.

Figura 4.18 – Pesagem do corpo de prova ao ar e submersa



Fonte: autor

Outra grandeza importante para avaliação dos parâmetros volumétricos das misturas asfálticas estudadas é o teor de vazios dos corpos de prova. O teor de vazios é a relação entre o volume de vazios e o volume total da porção de agregados. Foi obtido a partir a Equação 4.5:

$$V(\%) = \frac{D_{real} - D_{aparente}}{D_{real}} \quad (4.5)$$

onde:

$V(\%)$ = teor de vazios;

D_{real} = massa específica real do corpo de prova;

$D_{aparente}$ = massa específica aparente do corpo de prova.

Vazios cheios de betume (VCB) é a relação entre o volume ocupado pelo betume total e pode ser expressa pela Equação 4.6.

$$VCB(\%) = \frac{D_{aparente} \cdot B}{D_b} \quad (4.6)$$

onde:

$VCB(\%)$ = vazios cheio de betume;

$D_{aparente}$ = massa específica aparente;

B = percentagem de ligante betuminoso na mistura asfáltica;

D_b = densidade do ligante betuminoso.

Vazios do esqueleto mineral (VAM) é a soma das percentagens de vazios da mistura asfáltica não preenchidos com a percentagem de vazios cheio de betume ou seja, o percentual total de vazios da mistura. Conforme Equação 4.7.

$$VAM(\%) = V + VCB \quad (4.7)$$

onde:

VAM = vazios do agregado mineral;

V = percentagem de vazios;

VCB = vazios cheio de betume.

A relação betume/vazios (RBV) é a relação entre os vazios que são cheios de betume e o total de vazios do agregado mineral que é relacionada na Equação 4.8.

$$RBV(\%) = \frac{VCB}{VAM} \cdot 100 \quad (4.8)$$

onde:

RBV = relação betume/vazios;

VCB = vazios cheio de betume;

VAM = vazios do agregado mineral.

4.4.2. Estabilidade e Fluência Marshall

O ensaio de compressão Marshall permite determinar a estabilidade e fluência dos corpos de provas testados. Entende-se como estabilidade Marshall a resistência máxima à compressão diametral, apresentada pelo corpo de prova quando rompido. E por fluência Marshall o deslocamento vertical que o mesmo corpo de prova sofre quando rompido pela compressão diametral. A Figura 4.19 a seguir demonstra o aparelho utilizado.

Figura 4.19 – Mesa de rompimento



Fonte: autor

O primeiro passo é a calibração do sistema de aquisição de dados, para que os valores sejam adquiridos com precisão. Após a calibração e obtenção dos parâmetros volumétricos necessários, densidade aparente, vazio cheio de betume, volume de vazios, vazios do agregado mineral e relação betume/vazios, dos corpos de prova, começou-se por aquece-los a uma temperatura de 60°C em banho maria, por um período entre 30 e 40 minutos. Foram colocados na estufa com intervalos de 1 minuto para que todos permanecessem o mesmo tempo na estufa. Em seguida o corpo de prova foi retirado do banho-maria e imediatamente colocado no molde de compressão. A carga é aplicada, de modo que o êmbolo se eleve a uma velocidade de 5 cm por minuto, no cilindro de compressão diametral até o rompimento do corpo de prova. O procedimento descrito anteriormente encontra-se ilustrado na Figura 4.19 a seguir.

Figura 4.20 – Ensaio Marshall



Fonte: autor

Os valores de estabilidade e fluência são registrados pela célula de carga e extensômetro, respectivamente, e por meio de um software que gera as curvas dos ensaios, os registros são gravando no computador. O valor da carga necessária para produzir o rompimento foi corrigido para a espessura de cada corpo de prova ensaiado, através da Equação 4.9:

$$f = 927,23 \cdot h^{-1,64} \quad (4.9)$$

onde:

f = fator de correção;

h=espessura do corpo de prova.

O resultado obtido é o valor da Estabilidade Marshall. O resultado da fluência é obtido simultaneamente ao da estabilidade. Ambos são dados pela média dos 5 corpos de prova por teor de betume.

Com todos os resultados, procede-se com a confecção dos gráficos para determinação do teor ótimo de betume, conforme cada intervalo aceitável. Este processo será mostrado detalhadamente no Capítulo 5.

4.5. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA

O ensaio de resistência à tração indireta por compressão diametral foi criado pelo professor Fernando Luiz Lobo B. Carneiro. Este ensaio foi desenvolvido inicialmente para corpos de prova de concreto de cimento Portland e se tornou popular pela sua rápida execução e facilidade (BERNUCCI et al., 2010).

Este ensaio tem por finalidade caracterizar a resistência à tração das misturas asfálticas e é regido pela norma DNIT-ME 136/10. As forças são aplicadas por frisos de carga metálicos com curvatura adequada ao corpo de prova cilíndrico.

A composição do corpo de prova com os frisos metálicos é colocada na prensa e então realizado o ensaio, onde o valor da tensão de ruptura é fornecido. A tensão de tração é então calculada a partir da Equação 4.10.

$$\sigma_r = \frac{2F}{\pi DH} \quad (4.10)$$

onde:

σ_r = resistência à tração (Mpa);

F = carga de ruptura (N);

D = diâmetro do corpo de prova (cm);

H = altura do corpo de prova (cm).

Para este ensaio foram testados nove corpos de prova, moldados no soquete Marshall, o teor de ligante utilizado foi o teor ótimo encontrado a partir da análise de dados dos resultados obtidos no Ensaio Marshall.

CAPÍTULO 5

RESULTDOS E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo serão analisados e discutidos os resultados de caracterização dos ligantes apresentados no Capítulo 4. Serão abordados os resultados numéricos e por meio de gráficos obtidos através do Ensaio Marshall, descrito no capítulo anterior.

5.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Visto que o objetivo desta pesquisa não é a análise da qualidade dos agregados, seus resultados serão discutidos forma breve e objetiva.

Os ensaios de caracterização dos agregados objetivaram o conhecimento de suas propriedades e para garantir que os mesmos possuíssem todas as características normativas mínimas necessárias para se obter amostras de qualidade. De forma a não prejudicar os resultados de comportamento mecânico das misturas asfálticas estudadas.

A partir dos resultados apresentados ainda no Capítulo 4, pode-se afirmar que o agregado mineral utilizado na pesquisa possui os parâmetros enquadrados nos limites normativos para a aplicação na pavimentação. Uma vez que os resultados se enquadram nos limites apresentados na norma, de acordo com a Tabela 5.1.

Tabela 5.1- Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização do agregado

Ensaio	Norma	Limite	Resultado
Los Angeles	DNER-ME 035	perda inferior a 50%	12,54%
Durabilidade	DNER-ME 089	perda inferior a 12%	3,08%
Índice de Forma	DNER-ME 086	superior a 0,5	0,685

Fonte: autor

5.2. RESULTADOS DO ENSAIO MARSHALL

Tal como já referido anteriormente, efetuou-se um estudo Marshall para determinar as grandezas, estabilidade e fluência, e os parâmetros volumétricos, tais como, densidade aparente, vazios cheio de betume, volume de vazios da mistura, volume de vazios do agregado mineral, relação betume/vazios. Para a partir desses dados poder avaliar os diferentes comportamentos das misturas asfálticas estudadas.

Para confecção da Tabela 5.2, contendo o resumo dos resultados, foram gerados gráficos de carga e deslocamento (Figura 5.1) no decorrer do ensaio a partir do software myPCLab.

Figura 5.1 – Gráfico do ensaio Marshall



Fonte: autor

A Tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos através das fórmulas e parâmetros abordados no Capítulo 4. Cabe mencionar que os valores apresentados são as médias dos 5 corpos de prova de cada teor utilizado de cada tipo de mistura.

Tabela 5.2 – Resumo dos valores médios obtidos no ensaio Marshall em relação aos valores normativos

Mistura	Betume	Parâmetros						
		D Ap.	VCB	Vv	VAM	RBV	Estab.	Flu.
Convencional	4,00%	2,46	9,80	5,88	15,67	62,53	1870,87	4,22
	4,25%	2,46	10,39	5,65	16,04	64,80	1592,73	4,17
	4,50%	2,47	11,05	4,81	15,86	69,70	1966,07	4,28
	4,75%	2,47	11,64	4,64	16,28	71,51	1382,13	3,91
	5,00%	2,47	12,27	4,07	16,35	75,10	1702,66	4,41
Com Rediset	4,00%	2,46	9,76	5,95	15,71	62,17	1322,56	3,31
	4,25%	2,46	10,37	5,56	15,92	65,15	1225,39	4,72
	4,50%	2,48	11,04	4,61	15,65	70,57	1323,49	4,38
	4,75%	2,47	11,63	4,43	16,06	72,43	1246,97	4,43
	5,00%	2,47	12,24	4,03	16,28	75,24	1247,01	4,55
Com Evoterm	4,00%	2,47	9,81	5,85	15,66	62,66	1184,60	4,38
	4,25%	2,47	10,44	5,32	15,75	66,28	1416,56	4,39
	4,50%	2,48	11,09	4,59	15,68	70,77	1327,22	4,33
	4,75%	2,47	11,68	4,46	16,13	72,40	1105,71	4,18
	5,00%	2,48	12,30	4,00	16,30	75,48	1226,76	4,45
DNIT-ES 031/2006	-	-	3,0 a 5,0	min 16*	75,0 a 82,0	min 500	2,0 a 4,6	

* Para curvas granulométricas com diâmetro nominal máximo de 12,7mm, caso de estudo

Fonte: autor

Os gráficos referentes aos resultados do Ensaio Marshall, que serão apresentados posteriormente nos próximos tópicos foram confeccionados a partir dos valores médios, porém estão inclusos também os valores para cada corpo de prova ensaiado. Os valores das médias estão caracterizados por um marcador vermelho enquanto os valores reais obtidos estão caracterizados por cruzetas. Com estes resultados e com base nas observações feitas durante a produção dos corpos de prova pode-se definir um teor de trabalho ideal. O teor de trabalho foi definido separadamente para cada tipo de mistura (M1, M2 e M3). O fator decisivo para a determinação do teor foi tido como sendo os limites normativos de cada parâmetro, que foram apresentados ainda neste capítulo, na Tabela 5.2.

O procedimento foi realizado da seguinte maneira, após a confecção dos gráficos traçaram-se linhas horizontais que representavam os limites aceitáveis, de acordo com cada parâmetro analisado. Em seguida foram traçadas linhas verticais indicando quais teores se encontravam dentro e fora dos limites. Assim

foram se eliminando os teores que tinham seus resultados fora das normas. Somado a isto a última análise foi verificando a coerência dos resultados. Por exemplo no quesito da densidade aparente, não se tem um valor normativo de referência, porém sabe-se que quanto mais densa a misturas asfáltica maior a sua tendência a possuir uma melhor resistência (BERNUCCI et al., 2008).

Por fim, como previsto e abordado nos capítulos anteriores, na literatura e nem por meio de recomendações dos fabricantes tem-se um teor ótimo de betume a ser adotado para as misturas asfálticas mornas. No entanto com base em pesquisas anteriores realizadas pelos autores desta bibliografia os teores ótimos de ligante encontrados foram quase que em sua totalidade muito semelhantes ao teor encontrado para a mistura de referência. No caso desta pesquisa, os teores ótimos de betume para os três tipos de mistura também foram idênticos. Então o teor de trabalho das misturas foi determinado em 5,0%.

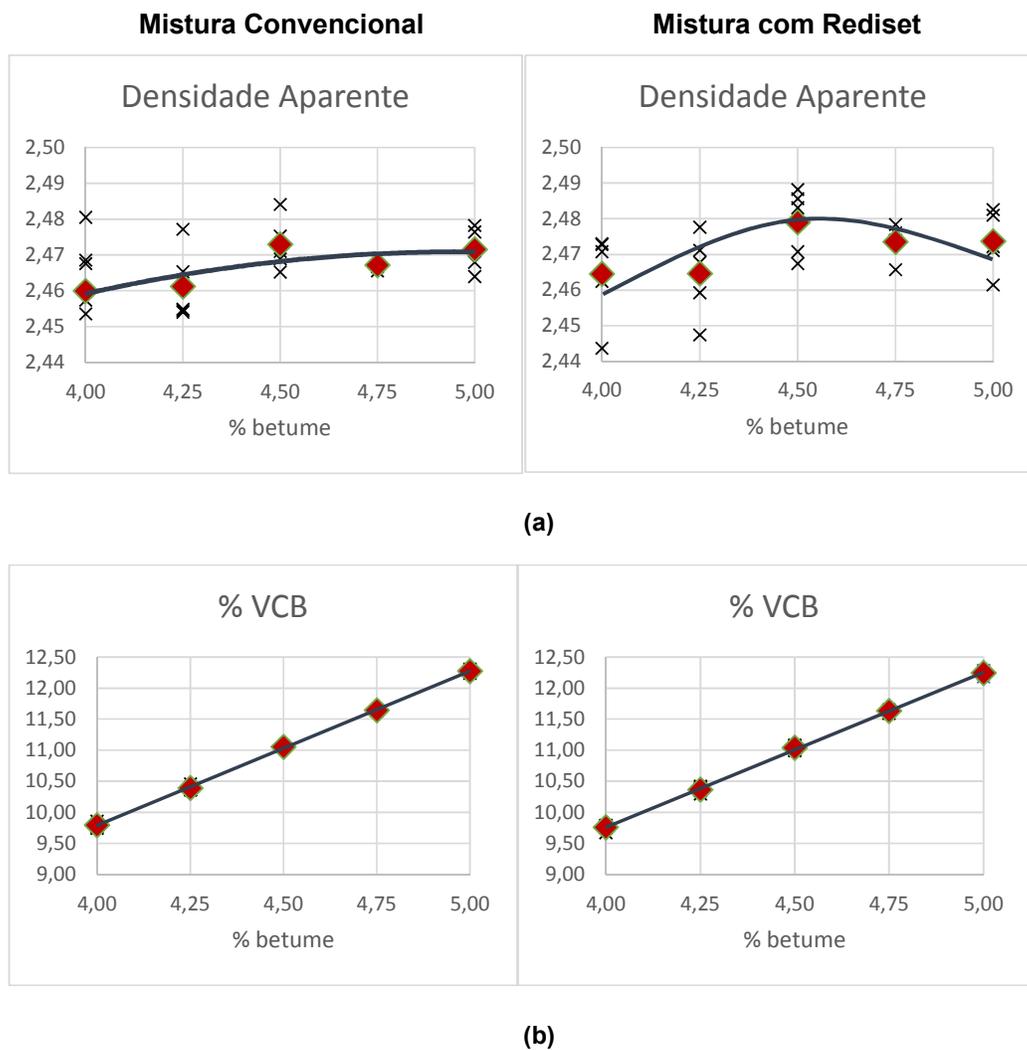
De acordo Otto 2009, *apud* BARRA, 2005, em estudos realizado na Universidade Federal de Santa Catarina, com misturas betuminosas e o ensaio Marshall concluiu-se que os teores tidos teoricamente como ótimos no Ensaio Marshall tendem a ser superiores aos valores necessários para mistura. Isto ocorre em função da ausência da acurácia do Método Marshall, na etapa de compactação ocorre a aplicação de severos esforços mecânicos que não condizem com a situação real de compactação no campo. Os golpes geram a quebra das frações granulares em seu interior alterando os parâmetros de densidade aparente, volume de vazios e por sua vez a curva granulométrica formulada. Causando então uma modificação no comportamento mecânico das misturas e por consequência nos resultados. Na pesquisa feita pela UFSC (CARVALHO, 1999 *apud* OTTO, 2009), citada anteriormente, verificou-se problemas de afundamento excessivo por fluência na trilha de roda nos ensaios de deformação permanente realizados, confirmando a necessidade da correção deste teor.

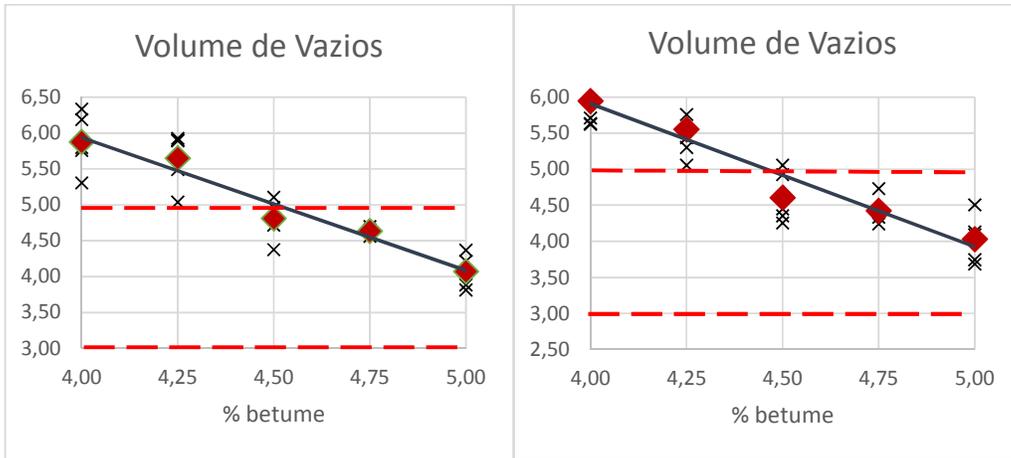
No entanto, decidiu prosseguir o estudo sem a correção deste fator, devido ao fato de que ambas as misturas estarão sendo avaliadas com a utilização do mesmo teor adotado. Por consequência, todas estão vulneráveis as mesmas condições.

Observando os resultados demonstrados por meio dos gráficos da Figura 5.2 nota-se que em sua maioria foram muito semelhantes. Em um primeiro

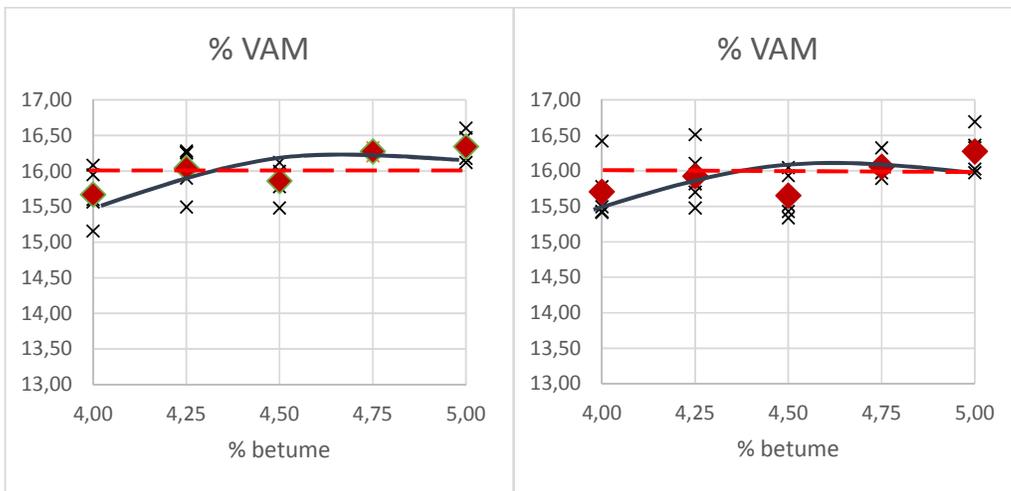
momento podemos afirmar que a adição do aditivo surfactante Rediset não apresentou um resultado negativo neste quesito. Porém quando avaliamos o resultado da estabilidade Marshall (Figura 5.2f), verifica-se que a mistura M2 apresentou valores similares e menores dos valores da mistura M1. Caracterizando desta maneira uma mistura com uma menor resistência, ou seja, uma menor capacidade de carga. Enquanto a mistura convencional suportou cargas de quase 2000kgf a mistura com a adição de Rediset suportou cargas de no máximo 1369kgf.

Figura 5.2 – Comparação pelos gráficos obtidos através dos parâmetros Marshall (M1 e M2)

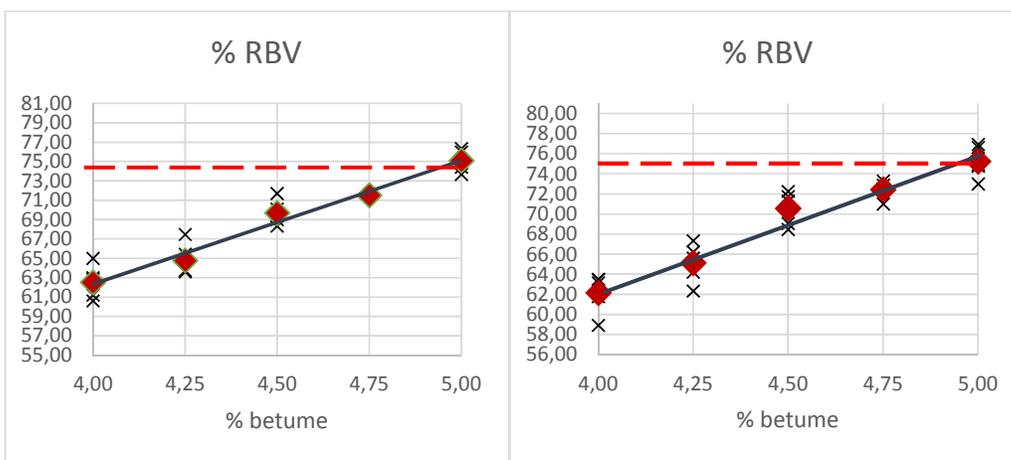




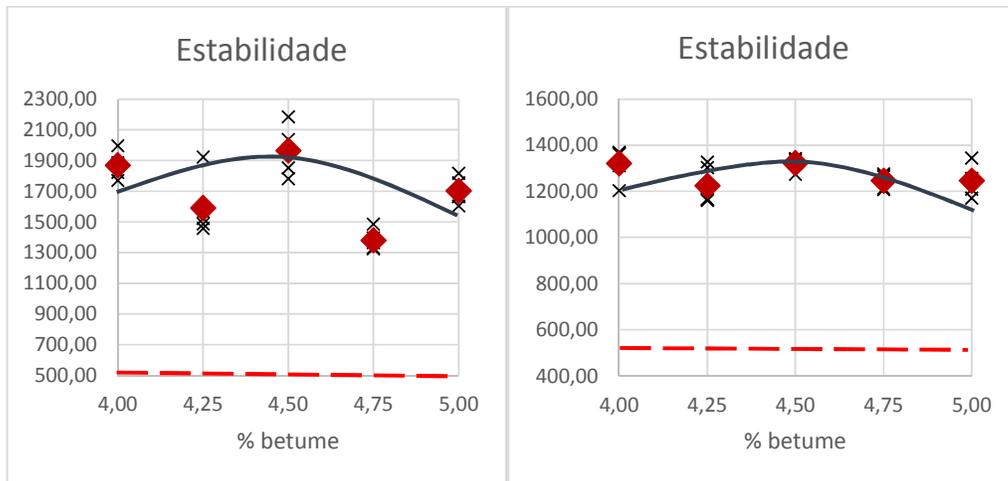
(c)



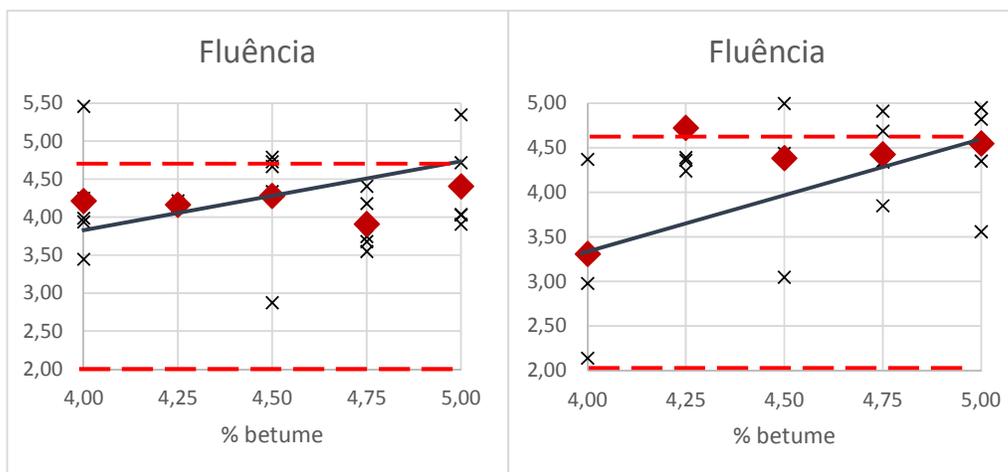
(d)



(e)



(f)

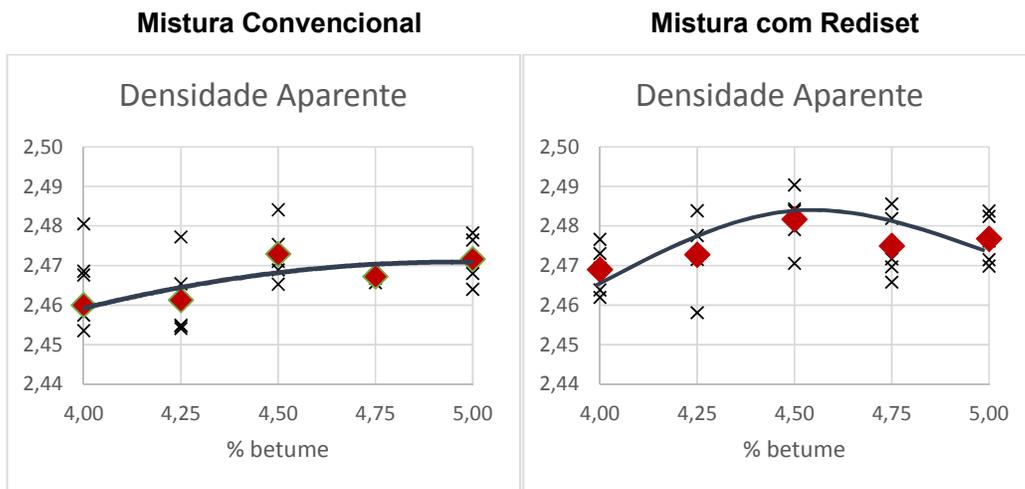


(g)

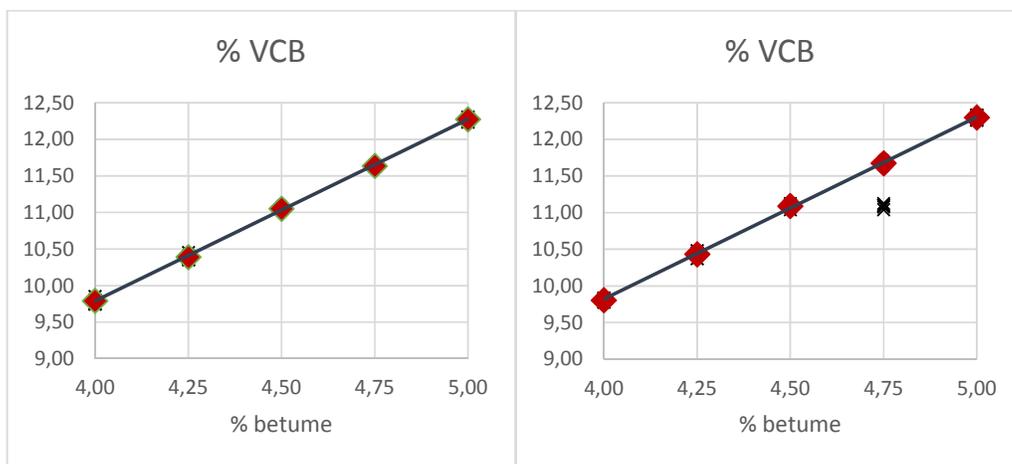
Fonte: autor

A seguir será feita a comparação de resultados da mistura convencional com a misturas com a adição do aditivo surfactante Evotherm.

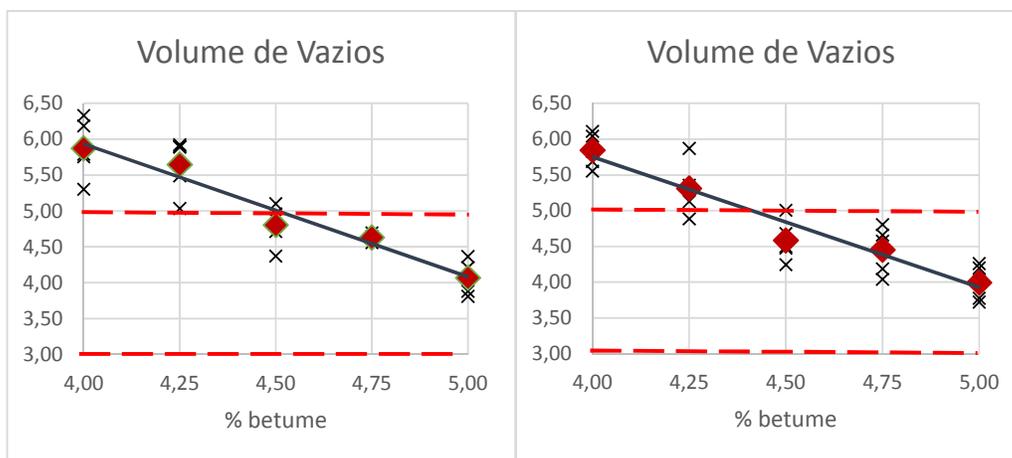
Figura 5.3 - Comparação pelos gráficos obtidos através dos parâmetros Marshall (M1 e M3)



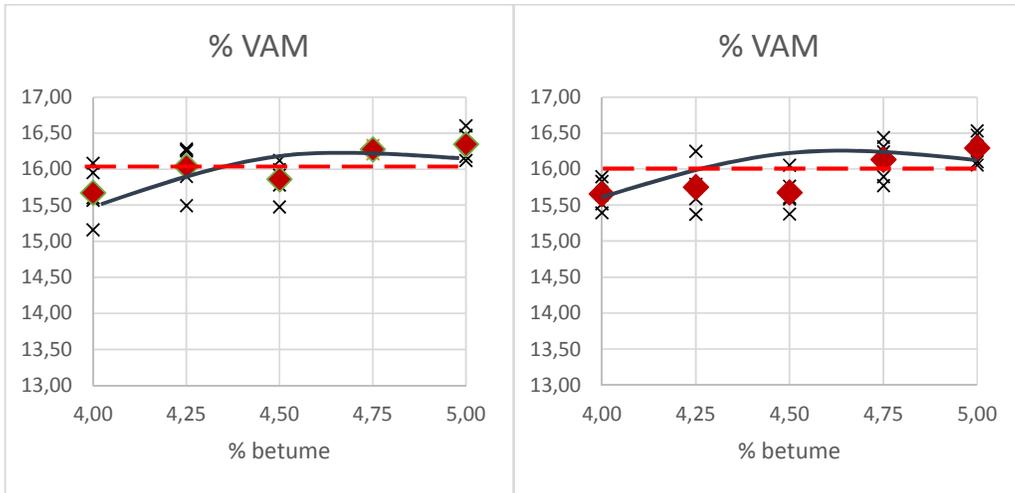
(a)



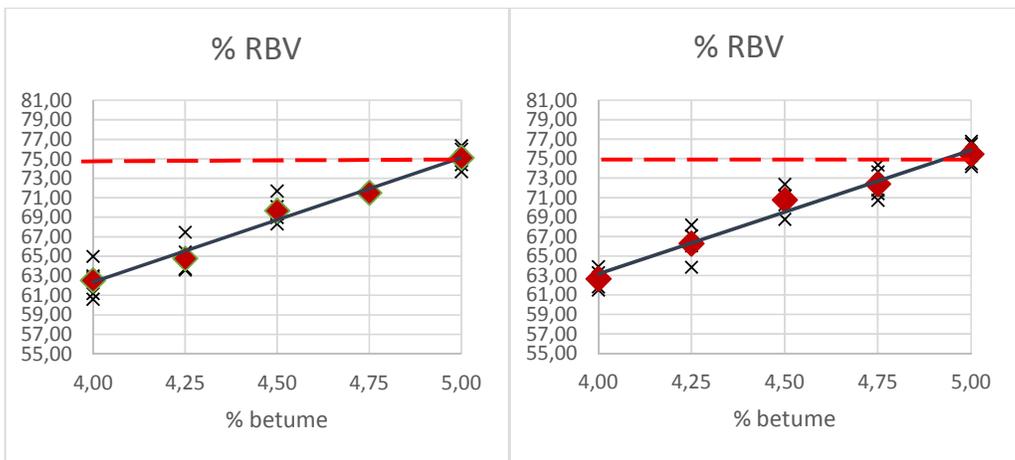
(b)



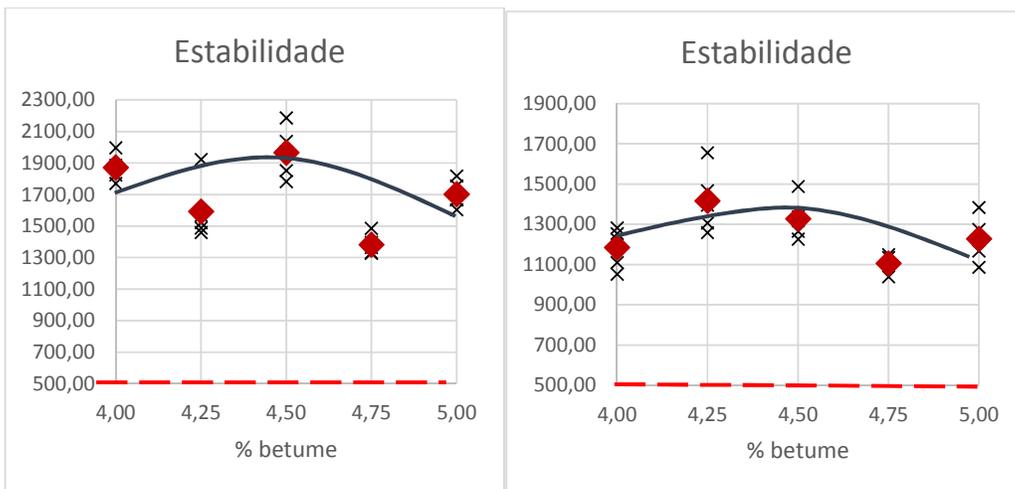
(c)



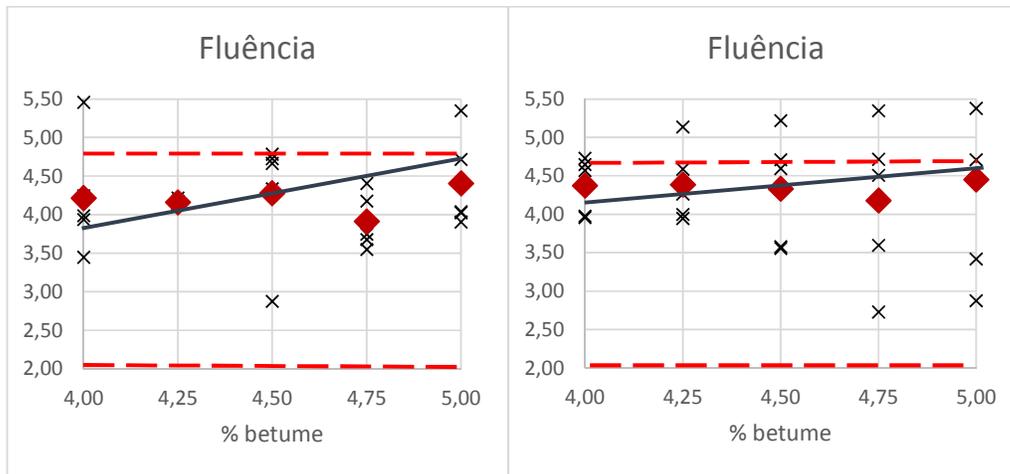
(d)



(e)



(f)



(g)

Fonte: autor

Ao observar os resultados demonstrados na Figura 5.3, nota-se que os valores entre as duas misturas foram novamente muito semelhantes, em suas características volumétricas. No entanto novamente no parâmetro estabilidade os resultados obtidos pela mistura com a adição de Evotherm foram ligeiramente menores. Enquanto a mistura convencional atingiu uma estabilidade de quase 2000kgf a misturas modificada com Evotherm possui seu maior valor da estabilidade em 1416kgf.

5.3. RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA POR COMRESSÃO DIAMETRAL

Após a definição do teor ótimo de betume, pelo Método Marshall, foram moldados três corpos de prova para cada tipo de mistura. Antes que ocorresse o ensaio, foram tiradas medidas de altura, em quatro pontos, e o diâmetro em dois pontos, de todos os 9 corpos de prova fabricados. Os corpos foram então deixados em uma sala a uma temperatura ambiente de 25°C e sendo ensaiados em seguida.

Figura 5.4 – Gráfico carga de ruptura



Fonte: autor

As curvas dos ensaios foram geradas durante o ensaio pelo software *myPCLab*. Em seguida verificou-se e registrou-se os os valores das cargas de ruptura (kgf), para que a Tabela 5.3, contendo os resultados fosse gerada. A partir dos três resultados obtidos para cada tipo de mistura, foi feita uma média dos valores.

Tabela 5.3 – Resultados da resistência à tração indireta

		Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Carga de ruptura (kgf)	Tração Indireta (Mpa)	Média Tração Indireta (Mpa)
M1	1	59,73	102,15	1700	1,77	1,97
	2	59,30	102	1937	2,04	
	3	59,29	102,15	2000	2,10	
M2	1	60,28	102	1433	1,48	1,55
	2	61,43	102,05	1586	1,61	
	3	59,71	102,1	1491	1,56	
M3	1	61,04	102,025	1642	1,68	1,61
	2	60,80	102	1495	1,53	
	3	61,33	102,05	1581	1,61	

Fonte: autor

O valor mínimo normativo, retirado da especificação de serviço do DNIT (DNIT-ES 31/06) é de 0,65Mpa. Observando os resultados na Tabela 5.3, nota-se que todos os valores obtidos são superiores ao valor limite.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo geral deste trabalho foi concluído, que tinha por avaliar alguns parâmetros de comportamento, volumétricos, de estabilidade, fluência e a resistência à tração indireta, a partir da Metodologia Marshall, das misturas asfálticas mornas, com o uso dos aditivos Rediset e Evotherm. Os resultados foram comparados com uma mistura asfáltica convencional.

Os resultados experimentais obtidos neste trabalho contribuem para o conhecimento do comportamento de misturas asfálticas mornas produzidas com a adição dos aditivos surfactantes, Rediset e Evotherm, em relação ao comportamento mecânico a partir do ensaio Marshall.

Os resultados apresentados neste estudo estão limitados à comparação das misturas mornas produzidas (rediset e evotherm) com a mistura convencional de referência utilizando a metodologia Marshall, o que não permite generalizar o comportamento dos aditivos em estudo, ou mesmo, condenar ou aceitar a utilização de um determinado produto ou tecnologia. Para isto, seria necessário uma maior quantidade de estudos, com o intuito de fornecer maior segurança estatística nos resultados.

A metodologia Marshall, tradicionalmente aplicada no Brasil, visa a avaliação dos parâmetros volumétricos e de resistência das misturas asfálticas com base em valores volumétricos, de resistência a ruptura e deslocamento. Sendo que para cada parâmetro avaliado tem-se um valor normativo aceitável para que ao final dos resultados se julgue o comportamento da mistura asfáltica aceitável ou não.

Os primeiros indícios do comportamento mecânico das misturas mornas estão nos resultados dos ensaios de caracterização dos ligantes betuminosos, penetração, ponto de amolecimento e viscosidade. A partir destes resultados pode-se confirmar a informação que a adição de aditivos surfactante ao CAP não alteram as suas características originais.

Do estudo Marshall, verificou-se que o teor de trabalho encontrado pelas misturas asfálticas mornas não se altera quando em comparação ao teor das misturas asfálticas quentes. Os resultados dos parâmetros Marshall das misturas mornas e da mistura de referência, volumétricos, estabilidade e fluência, se mostraram dentro das faixas dos parâmetros normativos (DNER-ES 31/2006). Indicando desta forma que as misturas asfálticas mornas com a adição de Rediset e Evotharm, têm uma boa perspectiva de resistir aos esforços do tráfego, podendo substituir as misturas asfálticas quentes, pois se encaixaram dentro dos padrões exigidos. Mesmo que os resultados de estabilidade de ambas misturas mornas tenham se mostrado inferiores aos da mistura convencional, ainda sim se mostraram dentro do limite exigido.

Entretanto, é importante destacar que o Método Marshall não é o método ideal para seleção do teor ótimo de betume a ser utilizado nas misturas asfálticas, pois os esforços de compactação aplicados durante o ensaio não são coerentes com o ocorrido no campo. Visto que no método Marshall este esforço de compactação se dá por meio de impactos, enquanto a compactação no campo ocorre por meio do amassamento, aplicado pelo rolamento dos rolos pneumáticos e de chapas.

Do ensaio de resistência atração indireta pode-se concluir que as misturas mornas com a adição dos dois aditivos estudados apresentaram bons resultados. Visto que os valores obtidos foram consideravelmente maiores do que o limite imposto pela especificação de serviço do DNIT. Constatando mais uma vez a eficiência das misturas mornas mesmo que compactando a temperaturas mais baixas é possível se obter bons resultados em relação às características volumétricas e de resistência das misturas mornas. Em comparação com as misturas asfálticas convencionais verifica-se uma diferença em torno de 0,5 Mpa quanto as misturas asfálticas mornas.

Apesar dos ensaios Marshall e de tração indireta serem empíricos, pouco sensíveis e acurados na interpretação do seu comportamento mecânico, os resultados obtidos superaram tais limites normativos sendo considerados adequados para pavimentação. Porém tais misturas devem apresentar o mesmo comportamento das misturas convencionais, devido a este fato, seria necessário um estudo com a utilização de ensaios mais apurados. Como a utilização dos

ensaios mais preciso e menos empíricos, como o ensaio de fadiga e módulo complexo, podendo haver uma maior aproximação com a solicitação dos esforços de compactação ocorridos em campo.

Acredita-se que os valores normativos impostos pelo DNIT devam servir apenas como uma mera diretriz e não como condições a serem cumpridas. Devido às diferenças entre o proposto pelo ensaio com a similaridade ocorrida em campo em questões referentes à compactação e medição da resistência das misturas.

Como forma de uma melhor eficácia nos resultados, recomenda-se a realização de ensaios complementares, como por exemplo deformação permanente, módulo complexo e resistência a fadiga de acordo com a metodologia francesa.

A fim de se obter resultados mais aproximados com a realidade, sugere-se a implantação e adaptação de uma metodologia de avaliação do comportamento mecânico e reológico das misturas asfálticas que possua uma relação mais estreita quanto aos procedimentos ocorridos no laboratório/campo, como é o caso, por exemplo, da metodologia francesa.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas **NBR 7809/87: Agregado Graúdo Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro**. São Paulo, SP, Brasil, 1987.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6296/2004: Determinação da massa específica real de ligantes betuminosos**. São Paulo, SP, Brasil, 2004.
- ALMEIDA, A. J. **Comportamento mecânico demisturas asfálticas com aplicação dos aditivos pr plast s e pr flex 20 no módulo complexo e na fadiga**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2013.
- ALVES, M. C. C. S. L. **Estudo do desempenho de materiais alternativos na pavimentação rodoviária, caso das misturas betuminosas temperada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Técnica de Lisboa. Portugal, 2012.
- ARUN, S. B.; GOMARSHI, V.; SHIVARAJ, B. S. **Mix desing properties and moisture sensivity characteristics of dense bituminous macadam mixes modified with rediset, a warm mix additive**. International Journal of Research in Engineering and Technology, 2004.
- BARBOSA, F. C. A. M. Contribuição para o estudo do desempenho de misturas betuminosas temperadas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Técnica de Lisboa. Portugal, 2012.
- BARRA, B. S.; HORNYCH, P.; BROSSEAUD, Y.; MOMM, L.. **Metodologia Francesa para o Dimensionamento de Estruturas de Pavimentos de Concreto Asfáltico**. Revista Pavimentação, 2010.
- BARRA, B. S. **Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas densas utilizando materiais do Estado do Pará com o emprego de pó calcário**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.
- BARRA, B. S.; MOMM, L.; BROSSEAUD, Y.; HORNYCH, P. **Diretrizes para a Formulação e Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas**. Revista Pavimentação, Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv), 2010.
- BARRA, B.S. **Avaliação da Ação da Água no Módulo Complexo e na Fadiga de Misturas Asfálticas Densas**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.
- BERNUCCI, L. B; MOTTA L. M. G. da; CERATTI J. A. P.; SOARES J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro, 2010.
- BUDNY, J. **Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Mornas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Feederal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012.
- BÚRIGO, A. S. **Influência da formulação de esqueletos minerais no comportamento mecânico de misturas de concreto asfáltico**. Dissertação (Graduação em Engenharia de Infraestrutura). Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2015.
- BUTTON, J. W.; ESTAKHRI, C.; WIMSATT, A. **A synthesis of warm-mix asphalt**. Texas Department of Transportation, 2007.
- CAVALCANTI, L. S. **Efeito de alguns modificadores de ligante na vida de fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2010.
- DAVIDSON, J.K. **Evotherm Trial**. Serviços de Engenharia McAsphalt. Ontário, 2005.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **Misturas Betuminosas a quente: Ensaio Marshall (DNER-ME 043/95)**. Rio de Janeiro, Brasil, 1995.

DNER-ME 04/94. **Material Betuminoso: Determinação da Viscosidade Saybolt-Furol à Alta Temperatura.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994.

DNER-ME 043/95. **Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1995.

DNER-ME 078/94. **Agregado - adesividade a ligante betuminoso.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994.

DNER-ME 35/98. **Agregados: Determinação da Abrasão Los Angeles.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1998.

DNER-ME 81/98. **Agregados: Determinação da Absorção e da Densidade do Agregado Graúdo.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1998.

DNER-ME 84/95. **Agregado Miúdo: Determinação da Densidade Real.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1995.

DNER-ME 89/94. **Agregados: Avaliação da Durabilidade pelo Emprego de Soluções de Sulfato de Sódio ou de Magnésio.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT, **Manual de Pavimentação.** Editado pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR). 2ª Edição. Ministério dos Transportes. Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

DNIT-EM 095/2006. **Cimentos asfálticos de petróleo.** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT-ES 031/2006. **Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço.** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT-ME 117/94. **Mistura betuminosa – determinação da densidade aparente.** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT-ME 131/2010. **Materiais asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola.** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 2010.

DNIT-ME 136/2010. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral.** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 2010.

DNIT-ME 155/2010. **Material asfáltico - Determinação da penetração.** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, 2010.

EAPA. **The Use of Warm Mix Asphalt - Position Paper.** European Asphalt Pavment Association, 2010.

FERREIRA, C. I. **Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas.** Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho. Braga, 2009.

GUERRERO, Y. A. **Avaliação do desempenho mecânico e reológico de misturas asfálticas mornas.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2013.

HURLEY, G. C. & PROWELL, B. D. **Evaluation of Potential Processes for use in Warm Mix.** National Center for Asphalt Technology, 2006.

KLINSKY, L. M. G.; FARIA, V. C.; BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, R. **Revestimentos asfálticos sustentáveis: Estudo do comportamento mecânico e da redução de emissões de misturas asfálticas mornas.** Agência Nacional de Transportes Terrestres, 2014.

- KRISTJANSDDOTTIR, O. **Warm mix asphalt for cold weather paving**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade de Washington. Washington, 2006.
- KUANG, Y. **Evaluation of Evotherm as a WMA technology compaction and anti-strip additive**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade de Iowa, Iowa, 2012.
- MANUEL LPC, **Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés. Groupe de Travail RST "Formulation des enrobés"**. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris, France, 2007.
- MARTINHO, F.C.G. Misturas betuminosas temperadas com incorporação de subprodutos industriais- caracterização e validação tecnológica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2014.
- MOMM, L. **Estudo dos Efeitos da Granulometria Sobre a Macrotextura Superficial do Concreto Asfáltico e Seu Comportamento Mecânico**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). São Paulo, 1998.
- MOTTA, R. S. **Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para a redução de emissão de poluentes e consumo energético**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). São Paulo, 2011.
- OTTO, G. G. **Misturas asfálticas mornas: verificação da fadiga e do módulo complexo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2009.
- PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C. **Evaluation of Evotherm for use in warm mix asphalt**. National Center for Asphalt Technology, 2006.
- ROHDE, L. **Estudo de misturas asfálticas de módulo elevado para camadas estruturais de pavimentos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.
- WARGHA, N.F. **Avaliação da influência da redução das temperatura de usinagem e de compactação no comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade do Federal do Ceará. Fortaleza, 2013.
- ZAUMANIS, M. **Warm Mix Asphalt Investigation**. Technical University of Denmark, 2010.