

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Douglas Martins Mocelin

**AVALIAÇÃO DA TRABALHABILIDADE DE MISTURAS
ASFÁLTICAS MORNAS COM EMPREGO DE ADITIVO
SURFACTANTE**

Porto Alegre
dezembro 2015

DOUGLAS MARTINS MOCELIN

**AVALIAÇÃO DA TRABALHABILIDADE DE MISTURAS
ASFÁLTICAS MORNAS COM EMPREGO DE ADITIVO
SURFACTANTE**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Jorge Augusto Pereira Ceratti
Coorientadora: Marlova Grazziotin Johnston

Porto Alegre
dezembro 2015

DOUGLAS MARTINS MOCELIN

**AVALIAÇÃO DA TRABALHABILIDADE DE MISTURAS
ASFÁLTICAS MORNAS COM EMPREGO DE ADITIVO
SURFACTANTE**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pelos Coordenadores da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2015

Prof. D.Sc. Jorge Augusto Pereira Ceratti
D.Sc. pela Universidade Federal do Rio de
Janeiro
Orientador

Dra. Marlova Grazziotin Johnston
Dra. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul
Coorientadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Lélío Antônio Teixeira Brito (PUCRS)
PhD. pela University of Nottingham

Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti (UFRGS)
D.Sc. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

Marlova Grazziotin Johnston
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a minha família, em especial aos meus pais, e minha namorada Gracieli, que sempre estiveram ao meu lado e me apoiaram.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha família, principalmente aos meus pais e meus irmãos, por todo apoio, amor e carinho, me incentivando sempre em todas as etapas da minha vida e por terem me proporcionado a oportunidade de chegar até aqui.

À minha namorada, Gracieli, por estar sempre ao meu lado, me ajudando e me incentivando durante o desenvolvimento deste trabalho. Sem a tua ajuda tudo teria sido muito mais difícil. Te amo!

Ao Prof. Ceratti, orientador deste trabalho, pela confiança, pela oportunidade, por coordenar de forma brilhante o Lapav e por ser um exemplo pela carreira dedicada à pesquisa e ao ensino.

À Marlova, minha coorientadora, por me incentivar sempre e pelas inúmeras contribuições feitas a este trabalho.

Ao Prof. Lélío por também ter contribuído muito para este trabalho, e pelo entusiasmo com que coordena todos os seus projetos, transmitindo a todos a vontade de querer sempre o melhor.

Ao Prof. Washington pelo espírito motivador e por ser um grande incentivador da pesquisa científica, e também por ser um profissional exemplar.

Ao Lapav por tudo que aprendi nestes anos, tendo colaborado muito para a minha formação, e a toda a sua equipe, pela amizade, parceria e auxílio neste trabalho.

A todos os meus amigos, companheiros de sofrimento, pelas inúmeras horas compartilhadas de estudo, trabalhos, sono perdido, e também pelos churrascos e momentos de confraternização, sem os quais esta caminhada teria sido mais amarga.

Agradeço também à Ingevity, à Concessionária da Rodovia Osório-Porto Alegre (Concepa) e à Greca Asfaltos, pelo fornecimento dos materiais necessários para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aprenda com o ontem, viva pelo hoje, tenha esperança no
amanhã. O importante é não parar de questionar.

Albert Einstein

RESUMO

Este trabalho trata sobre a trabalhabilidade de misturas asfálticas mornas (WMA - do inglês *Warm Mixes Asphalt*), que são misturas produzidas em temperaturas inferiores às tipicamente utilizadas nas misturas asfálticas à quente (HMA – do inglês *Hot Mixes Asphalt*). Para se tornar possível a mistura a temperaturas reduzidas deve-se utilizar algum tipo de aditivo ou modificação no processo de produção. Neste estudo foram analisadas misturas asfálticas com o emprego de um aditivo surfactante, os agentes surfactantes agem na interface agregado-ligante, permitindo o correto cobrimento do agregado pelo filme de asfalto e promovendo uma melhor lubrificação da mistura. Muitos pesquisadores consideram que o principal mecanismo de funcionamento das misturas asfálticas mornas é o acréscimo de trabalhabilidade em temperaturas inferiores. Existem diversas maneiras de se inferir a respeito da trabalhabilidade destas misturas, neste trabalho, esta medição se deu por meio do volume de vazios atingido por corpos de prova compactados pela metodologia Marshall, do *Construction Density Index* (CDI) obtido na curva de compactação do Compactador Giratório Superpave (CGS) e durante o processo de produção, através da medição do torque do equipamento misturador. Foram analisadas misturas asfálticas produzidas com reduções de 15°C, 30°C e 45°C em relação à mistura quente usada como referência (143°C), com e sem a incorporação do aditivo surfactante. Analisando-se os resultados obtidos verificou-se que durante o processo de produção das misturas a trabalhabilidade não é alterada com as reduções de temperatura, mesmo sem o aditivo, pois na produção de HMAs e WMAs o ligante asfáltico é incorporado em sua condição ideal de temperatura-viscosidade e o tempo de mistura é relativamente pequeno, sendo este tempo insuficiente para que o mesmo tenha sua temperatura reduzida a ponto de alterar sua viscosidade. Já no processo de compactação a trabalhabilidade se mostrou fortemente sensível ao efeito do surfactante e da redução de temperatura, visto que desde a produção da mistura até a compactação há tempo suficiente para que a temperatura do ligante entre em equilíbrio com a temperatura dos agregados, e então, é possível observar uma melhor compactabilidade para as misturas com o aditivo. De forma geral as misturas com temperaturas reduzidas só atingem a compactação adequada com o uso do aditivo. Pode-se concluir que, para as misturas analisadas, o aditivo surfactante permitiu a redução de pelo menos 30°C sem que se tenham perdas de trabalhabilidade.

Palavras-chave: Misturas Asfálticas Mornas. Aditivo Surfactante.
Trabalhabilidade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas do trabalho	17
Figura 2 – Classificação das misturas asfálticas em função da temperatura de usinagem	20
Figura 3 – Dispositivo para medição de trabalhabilidade da Universidade de New Hampshire	28
Figura 4 – Dispositivo para medição de trabalhabilidade da Universidade de Massachussets	28
Figura 5 – Área correspondente ao CDI	30
Figura 6 – Área correspondente ao TDI	31
Figura 7 – Diagrama do plano experimental	40
Figura 8 – Curva granulométrica	43
Figura 9 – Aditivo surfactante Evotherm TM -3G	44
Figura 10 – Misturador de laboratório	47
Figura 11 – Processo de mistura no laboratório	47
Figura 12 - Corpos de prova Marshall (a) e Superpave (b)	48
Figura 13 – Compactador Giratório Superpave	49
Figura 14 – Compactador por impacto Marshall	49
Figura 15 – Determinação dos parâmetros volumétricos dos corpos de prova	50
Figura 16 – Determinação da densidade máxima medida através do método <i>Rice</i>	51
Figura 17 – Tela do <i>software</i> de aquisição dos dados de torque	53
Figura 18 – Resultados do torque médio das misturas analisadas	53
Figura 19 – Processo de mistura da água (a) e da areia (b)	54
Figura 20 - Resultados do torque médio das misturas analisadas e dos materiais alternativos	55
Figura 21 – Resultados de volume de vazios considerando os limites para camada de rolamento	56
Figura 22 – Relação de CDI com a temperatura	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização dos ligantes.....	44
Tabela 2 – Características das misturas HMA e WMA.....	45
Tabela 3 – Resultados de volume de vazios das misturas estudadas.....	56
Tabela 4 – Resultados de CDI para as misturas analisadas	58

LISTA DE SIGLAS

CA – Concreto Asfáltico

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CAUQ – Concreto Asfáltico Usinado a Quente

CGS – Compactador Giratório SUPERPAVE

COV – Compostos Orgânicos Voláteis

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

EAP – Emulsão Asfáltica de Petróleo

GC – Grau de Compactação

HMA – *Hot Mixes Asphalt*

HPA – Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos

Lapav – Laboratório de Pavimentação

IFSTTAR – *Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'aménagement et des Réseaux*

NCHRP – *National Cooperative Highway Research Program*

PMF – Pré-Misturado a Frio

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

WMA – *Warm Mixes Asphalt*

LISTA DE SÍMBOLOS

μm – micrômetro

rpm – rotações por minuto

% – por cento

CO_2 – gás carbônico

SO_2 – dióxido de enxofre

CO – monóxido de carbono

NO_x – óxidos de nitrogênio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 DIRETRIZES DA PESQUISA.....	15
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	15
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	15
2.2.1 Objetivo principal.....	15
2.2.2 Objetivos secundários	15
2.3 PREMISSE.....	16
2.4 DELIMITAÇÕES.....	16
2.5 LIMITAÇÕES	16
2.6 DELINEAMENTO.....	16
3 MISTURAS ASFÁLTICAS.....	19
4 MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS	22
4.1 PROCESSOS DE PRODUÇÃO	24
4.2 TRABALHABILIDADE DAS MISTURAS MORNAS	26
4.2.1 Construction Densification Index - CDI	29
4.2.2 Traffic Densification Index – TDI.....	30
4.3 BENEFÍCIOS DAS WMA.....	31
4.3.1 Benefícios ambientais	32
4.3.2 Benefícios ao ambiente de trabalho na pavimentação	34
4.4 DESEMPENHO DAS MISTURAS MORNAS	35
5 PLANO EXPERIMENTAL	40
6 MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
6.1 MATERIAIS	42
6.1.1 Agregados.....	42
6.1.2 Ligante Asfáltico.....	43
6.1.3 Aditivo surfactante	44
6.1.4 Características das misturas.....	45
6.2 MÉTODOS.....	45
6.2.1 Produção das misturas	45
6.2.2 Moldagem dos corpos de prova.....	48
6.2.3 Determinação do volume de vazios e grau de compactação	50
7 RESULTADOS E ANÁLISES	52
7.1 TORQUE NO PROCESSO DE MISTURA.....	52

7.2 VERIFICAÇÃO DO VOLUME DE VAZIOS	55
7.3 <i>CONSTRUCTION DENSIFICATION INDEX</i> – CDI.....	57
8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	61
8.1 CONCLUSÕES	61
8.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	63

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com as questões do meio ambiente vem crescendo, cada vez mais, em todos os segmentos da sociedade. Diversos setores vêm buscando alternativas mais sustentáveis em seus processos, tanto na diminuição da poluição quanto na utilização mais racional dos recursos. O setor rodoviário tem buscado acompanhar essa tendência, desenvolvendo novas tecnologias no campo da pavimentação, principalmente em relação às misturas asfálticas, com o intuito de contribuir com as questões ambientais.

Misturas asfálticas consistem basicamente na mistura de agregados pétreos com ligantes asfálticos. Existem diferentes tipos de misturas asfálticas, podendo ser classificadas de acordo com a temperatura empregada em sua produção, sendo divididas em quatro grupos, ou seja, misturas a quente, misturas mornas, misturas semimornas e misturas a frio (MOTTA, 2011).

As misturas asfálticas a quente, devido às altas temperaturas de usinagem, em torno de 150° C a 170°C, levam a uma grande emissão de gases poluentes, sendo nocivas para os trabalhadores e ainda demandam um consumo energético elevado. Estes fatores, entre outros, impulsionaram as iniciativas de se produzir concretos asfálticos com temperaturas mais baixas. Surgiram então, as misturas asfálticas mornas (*Warm Mixes Asphalt – WMA*), que são misturas produzidas com uma redução de pelo menos 30°C em relação às temperaturas tipicamente utilizadas em misturas asfálticas convencionais (PROWELL et al., 2012, p. 5).

Existem importantes benefícios ambientais e de saúde associados com a redução da temperatura de produção, como a diminuição da emissão de gases do efeito estufa, menor consumo de combustível e redução da exposição dos trabalhadores aos gases do asfalto. Além disso, podem haver ganhos no desempenho do concreto asfáltico, pois o ligante asfáltico sendo exposto a temperaturas mais elevadas tem seu envelhecimento acelerado pelo processo de oxidação e pela queima da mistura asfáltica, o que pode ser amenizado nas misturas mornas. Pode, ainda, haver um ganho de tempo adicional entre a usinagem e a compactação em campo devido à menor perda de temperatura, permitindo distâncias maiores entre usina e obra, compactação adequada do material e possibilidade de aplicação em épocas e locais de clima frio (PROWELL et al., 2012, p. 5).

Atualmente existem diversas tecnologias de produção de misturas asfálticas mornas, uma delas é com o emprego de aditivo surfactante. A palavra surfactante tem origem na expressão *surface active agent*, ou seja, agente ativo de superfície. Os agentes surfactantes agem na interface entre agregado e ligante, promovendo uma maior lubrificação da mistura, facilitando o adequado cobrimento do agregado pelo filme de asfalto a temperaturas reduzidas e, ainda, melhorando a adesividade entre eles. As técnicas de utilização de misturas asfálticas mornas visam, também, produzir um concreto asfáltico com resistência, durabilidade e características de desempenho iguais ou superiores aos de concretos asfálticos convencionais.

No Brasil, atualmente não existe uma normatização que regulamente a utilização de misturas asfálticas mornas, o que acaba, de certa forma, fazendo com que a aplicação destas técnicas não seja muito difundida e, assim, apesar de apresentarem uma série de vantagens, esta falta de amparo normativo acaba inibindo sua utilização.

Muitos autores consideram que uma das principais mudanças que viabilizam o funcionamento das misturas asfálticas mornas é a melhoria da trabalhabilidade a temperaturas mais baixas. Com isto, este trabalho tem como objetivo a análise da trabalhabilidade de misturas asfálticas mornas produzidas a diferentes temperaturas, com e sem a incorporação de aditivo surfactante.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: qual o comportamento das misturas asfálticas mornas produzidas com aditivo surfactante quanto à trabalhabilidade, quando se varia a temperatura?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é a verificação da trabalhabilidade de misturas asfálticas mornas realizadas com e sem aditivo surfactante, com diferentes patamares de redução de temperatura.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários do trabalho são, para todas as condições estudadas:

- a) verificação do *Construction Densification Index* (CDI) obtido no Compactador Giratório Superpave (CGS);
- b) verificação do torque necessário no processo de produção das misturas asfálticas;
- c) verificação do volume de vazios das misturas asfálticas compactadas através da metodologia Marshall;

2.3 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que, apesar de existir uma recomendação por parte do fabricante do aditivo a ser incorporado, quanto à temperatura em que se deve produzir a mistura morna, pouco se sabe a respeito da trabalhabilidade da mistura a diferentes temperaturas.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se à análise de misturas asfálticas realizadas com agregado basáltico, com a granulometria enquadrada na faixa C do DNIT, ligante CAP 50-70 e aditivo surfactante do tipo EVOTHERM™-3G.

2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

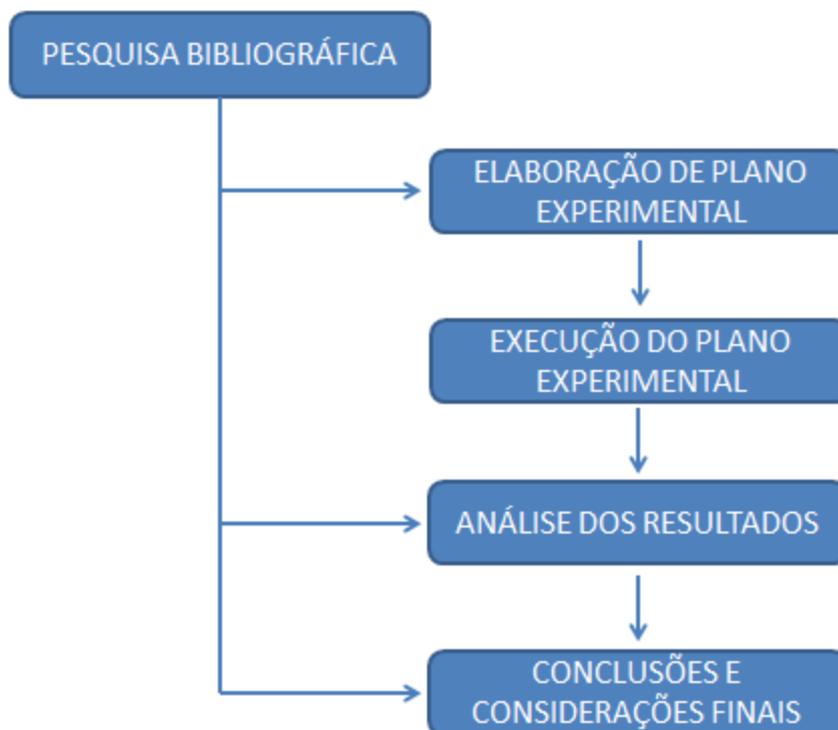
- a) a mistura foi realizada utilizando um equipamento misturador de laboratório com capacidade de até 75 kg;
- b) os corpos de prova foram moldados em compactador automático por impacto, seguindo a metodologia Marshall e em Compactador Giratório Superpave;
- c) a análise limitou-se a 3 temperaturas distintas para uma mistura com incorporação de aditivo e uma semelhante sem o aditivo.

2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir e representadas na Figura 1, sendo descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) elaboração do plano experimental;
- c) execução do plano experimental;
- d) análise dos resultados;
- e) conclusões e considerações finais.

Figura 1 – Diagrama das etapas do trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

A **pesquisa bibliográfica** foi realizada para aprofundar o conhecimento e se ter um melhor embasamento teórico no assunto a ser estudado. Esta etapa foi de fundamental importância para o desenvolvimento de todas as outras fases do trabalho. Para isso, foram utilizadas teses, dissertações, trabalhos de conclusão, artigos científicos e Normas de outros países, pois no Brasil ainda não existe normatização para misturas asfálticas mornas.

Em seguida, já com um embasamento teórico adequado, foi realizado a **elaboração do plano experimental**, levando em consideração o tempo em que o estudo deveria ser realizado e a disponibilidade do laboratório. Nesta etapa foram definidas as temperaturas de compactação utilizadas e a quantidade de corpos de prova necessários para que se tivessem amostragens significativas dos resultados nos ensaios realizados.

A **execução do plano experimental** consistiu na produção das misturas asfálticas, moldagens dos corpos de prova (CP) e realização dos ensaios definidos na etapa anterior. Esta etapa foi

desenvolvida no Laboratório de Pavimentação (Lapav) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

De posse dos dados das misturas e dos ensaios realizados foi feita a **análise dos resultados** que levaram às **considerações finais e conclusões**.

3 MISTURAS ASFÁLTICAS

A construção de estradas, que são vias não pavimentadas mais largas que um caminho, se deu a partir da necessidade do homem em acessar áreas para a obtenção de recursos, indispensáveis para sua existência. O estabelecimento das primeiras técnicas de pavimentação é atribuído aos povos etruscos e cartagineses, devido à forma de organização de suas vidas urbanas. Mais tarde os romanos criaram e aperfeiçoaram as estradas com a aplicação de pavimentos, que possuíam inclusive sistemas de drenagem, que serviram principalmente para a expansão de seu território. Estas técnicas perduraram por cerca de dois mil anos e estenderam-se por toda a Europa e até mesmo para outros continentes (BALBO, 2007).

No Brasil, a primeira estrada pavimentada foi construída no final do século XVIII, por iniciativa de Bernardo José de Lorena, governador da capitania de São Paulo. Construída sob a supervisão de engenheiros portugueses, pôde se observar em sua concepção técnicas aplicadas de engenharia. Esta via recebeu o nome de Calçada de Lorena, e servia de ligação entre o Planalto Paulista e o Porto de Santos (BALBO, 2007).

O asfalto é um derivado do petróleo, sendo obtido a partir do processo de refino, considerado como um dos mais antigos e versáteis materiais de construção utilizados pelo homem. A sua utilização em pavimentação é uma das mais antigas e importantes, dentre as várias aplicações possíveis. Em praticamente todos os países do mundo, a grande maioria dos revestimentos de rodovias é composto de pavimentos asfálticos. No Brasil, cerca de 95% das rodovias pavimentadas são construídas com revestimento asfáltico (BERNUCCI et al., 2008).

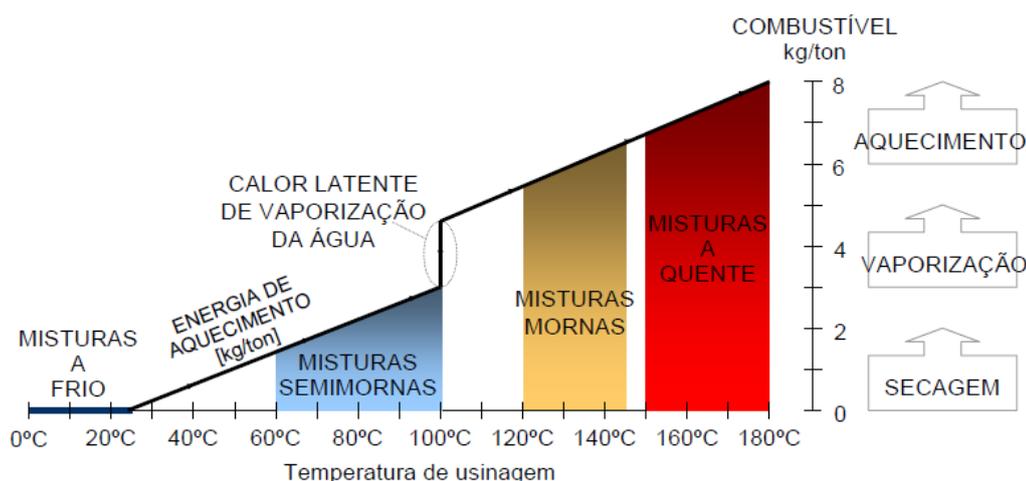
Os pavimentos asfálticos são compostos por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. As misturas asfálticas, quando compactadas recebem o nome de concreto asfáltico, sendo esta a parte do pavimento que se destina a receber as cargas dos veículos que trafegam pelas rodovias, e transmiti-las para as demais camadas.

Segundo Bernucci et al. (2008) os revestimentos asfálticos devem atender aos requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem,

resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com as variáveis que lhe serão impostas, como o tráfego e as condições climáticas.

As misturas asfálticas consistem basicamente na associação de agregados pétreos e de materiais asfálticos, realizada em usina. Os diferentes tipos de misturas asfálticas podem ser classificados principalmente de acordo com a temperatura em que são usinadas, havendo portanto misturas asfálticas a quente, misturas asfálticas mornas, misturas asfálticas semimornas e misturas asfálticas a frio (MOTTA, 2011). A Figura 2 apresenta as faixas de temperaturas em que são produzidos os diferentes tipos de misturas asfálticas, bem como o consumo de combustível necessário para sua usinagem.

Figura 2 – Classificação das misturas asfálticas em função da temperatura de usinagem



(fonte: MOTTA, 2011)¹ adaptada de D'Angelo et al., 2008)

O tipo de mistura mais utilizada e tradicional no Brasil é a mistura asfáltica a quente, também conhecida como concreto asfáltico usinado a quente (CAUQ). Isto se deve tanto pelo desempenho já conhecido, quanto pelos materiais a serem utilizados e pelas técnicas e processos executivos largamente difundidos (BALBO, 2007).

As misturas asfálticas quentes (*Hot Mixes Asphalt – HMA*) podem ser utilizadas como revestimento de pavimentos para qualquer tipo de tráfego, desde muito baixo até muito

¹ O autor indica que se trata de uma adaptação da obra de D'Angelo et al. (2008), cuja referência encontra-se na lista no final deste trabalho.

elevado, podendo inclusive possuir mais de uma camada, sendo que esta pode ser tanto de concreto asfáltico como de concreto de cimento Portland (BERNUCCI et al., 2008).

As HMA podem ser subdivididas de acordo com o tipo de granulometria utilizada em mistura de graduação densa, mistura de graduação aberta e mistura de graduação descontínua. O tipo de granulometria a ser utilizada pode variar com a necessidade de algumas características específicas nos pavimentos (BERNUCCI et al., 2008).

As temperaturas de usinagem das misturas asfálticas a quente são consideradas bastante elevadas, na ordem de 150°C a 180°C. A temperatura a ser utilizada varia principalmente de acordo com a característica de temperatura-viscosidade do tipo de ligante empregado (PROWELL et al., 2012).

As misturas asfálticas a frio, também chamadas de pré-misturados a frio (PMF) consistem na mistura entre agregados pétreos e emulsão asfáltica de petróleo (EAP) realizadas à temperatura ambiente. O uso de EAP se deve basicamente ao fato de que os ligantes asfálticos se encontram no estado semi-sólido à temperatura ambiente, não sendo possível sua mistura com agregados nestas condições (BERNUCCI et al., 2008).

Os PMFs, após a execução, não possuem desempenho semelhante ao de misturas asfálticas usinadas em temperaturas mais altas, mas ao longo do tempo pode ocorrer um ganho de resistência mecânica. Os pré-misturados a frio são utilizados geralmente como revestimento em rodovias de baixo volume de tráfego, como camadas intermediárias sob o concreto asfáltico usinado a quente, e em operações de manutenção de rodovias (BALBO, 2007).

Em temperaturas intermediárias entre as misturas a quente e a frio, se encontram as misturas mornas e semi-mornas, sendo produzidas principalmente por meio de aquecimento parcial dos agregados e com uso de ligante asfáltico ou emulsão, dependendo da técnica a ser utilizada. Estes dois tipos de mistura diferem pela temperatura de usinagem, se a temperatura for menor que 100°C ela é considerada semi-morna, enquanto se for acima é considerada morna (D'ANGELO et al., 2008). Uma descrição mais detalhada das misturas asfálticas mornas, objeto de estudo deste trabalho, é dada no próximo capítulo.

4 MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS

Misturas asfálticas mornas (*Warm Mixes Asphalt – WMA*) são misturas de concreto asfáltico (CA) produzidas a temperaturas mais baixas (pelo menos 30°C abaixo) do que as temperaturas tipicamente utilizadas na produção de misturas asfálticas quentes (*Hot Mixes Asphalt – HMA*) (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2011).

Para que seu uso seja justificado, as WMA devem ter resistência, durabilidade e características de desempenho semelhantes às misturas asfálticas a quente, utilizando temperaturas de produção substancialmente reduzidas. Os patamares de redução de temperatura podem ser muito variáveis, dependendo da tecnologia a se utilizar e também das condições em que se irá aplicar a mistura asfáltica.

De acordo com Motta et al. (2013) as misturas asfálticas mornas vêm ganhando popularidade na indústria da pavimentação, uma vez que promovem a redução do consumo de energia e das emissões de poluentes, devido à diminuição da temperatura de usinagem e compactação em campo, dando uma ideia de mistura asfáltica sustentável.

A utilização de misturas asfálticas mornas é considerada por muitos como uma técnica que substituirá as misturas convencionais no futuro, porém esta técnica ainda não é muito utilizada no Brasil. O fato de não haver normatização para WMA acaba fazendo com que muitos engenheiros optem por utilizar as misturas convencionais, mesmo já conhecendo os benefícios que estas misturas poderiam trazer.

O receio em utilizar uma tecnologia diferente da qual se está acostumado pode ser considerado o grande desafio a ser vencido para uma maior utilização de misturas mornas no Brasil. O apoio e incentivo por parte de instituições e agências e também a criação de parcerias entre indústria e academia podem impulsionar o uso destas tecnologias. Na França, por exemplo, o IFSTTAR (*Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'aménagement et des Réseaux – Instituto Francês de Ciência e Tecnologia para Transportes, Desenvolvimento e Redes Viárias*) oferece parceria para pequenos construtores que tenham

interesse em desenvolver projetos com WMA, para que possam também competir com os grandes construtores (D'ANGELO et al., 2008).

Conforme publicado pelo NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM (2011) as técnicas de utilização de WMA também podem fazer com que haja uma potencial melhoria no desempenho dos pavimentos de concreto asfáltico, fornecendo tempo adicional para a compactação da mistura, permitindo uma melhor compactação mesmo em locais de clima mais frio e reduzindo o envelhecimento do ligante, visto que este pode ter seu processo de oxidação acelerado a altas temperaturas.

Segundo Motta (2011), a utilização de WMA se torna cada vez mais pertinente, pois com o crescente aumento das solicitações do tráfego e a preocupação com a durabilidade dos pavimentos, há a necessidade de se utilizar cimentos asfálticos modificados por polímeros ou por borracha, que possuem temperaturas de usinagem ainda mais elevadas em relação às misturas a quente.

Nos Estados Unidos todos os estados já possuem alguma experiência com WMA, e 80% já possuem especificações para este tipo de mistura. A produção de WMA aumentou de 19,2 milhões de toneladas em 2009 para 47,6 milhões de toneladas em 2010, representando um percentual de aproximadamente 13% da produção total de misturas asfálticas do País (PROWELL et al., 2012).

Diversos estudos sobre WMA vêm sendo desenvolvidos, e os resultados até agora são muito positivos, continua-se a descobrir benefícios decorrentes do uso destas misturas. Nos Estados Unidos, as agências reguladoras têm cooperado com a indústria, permitindo e incentivando projetos para demonstração e desenvolvimento de especificações (PROWELL et al., 2012).

Prowell et al. (2012) afirma, referindo-se a misturas mornas, que ainda são necessárias análises mais aprofundadas em aspectos como:

- a) dosagem de misturas;
- b) orientação para seleção de temperaturas;
- c) desempenho a longo prazo;
- d) aprovação de novos produtos;
- e) quantificação de benefícios;

- f) utilização de materiais reciclados em WMA.

4.1 PROCESSOS DE PRODUÇÃO

Menores temperaturas de usinagem podem não garantir a viscosidade ideal que o ligante asfáltico necessita para recobrir adequadamente os agregados pétreos e conseqüentemente obter a homogeneidade e a trabalhabilidade necessárias para se poder produzir e compactar uma mistura asfáltica. Sendo assim, é necessária a utilização de algum aditivo ou a mudança em alguns processos que possam permitir alcançar as condições ideais para realizar a mistura com redução de temperatura.

As tecnologias de misturas asfálticas mornas foram introduzidas pela primeira vez na Europa, no final da década de 90, como medida para reduzir as emissões de gases do efeito estufa. Desde então, uma série de métodos de produção de WMA foram desenvolvidas na Europa e nos Estados Unidos. Já existem cerca de 20 processos de produção de WMA, incluindo aditivos químicos, ceras, sistemas de formação de espuma de asfalto, processos de mistura sequencial e aditivos sintéticos de zeólitas (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2011).

Os primeiros processos de produção de WMA, desenvolvidos na Europa, baseavam-se na utilização de ceras. Esses materiais têm seu ponto de fusão normalmente abaixo da temperatura de produção de HMA. Em temperaturas acima de seu ponto de fusão estes materiais tendem a diminuir a viscosidade do ligante, enquanto que abaixo do ponto de fusão tendem a aumentar sua rigidez. Algumas pesquisas apontam que os aditivos de ceras também aumentam a lubrificação dos ligantes, resultando em melhoria da trabalhabilidade das misturas asfálticas a temperaturas mais baixas. “A lubrificação ao invés da diminuição da viscosidade pode ser o mecanismo primário pelo qual muitos processos de produção de WMA melhoram a trabalhabilidade e a compactação em temperaturas inferiores.” (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2011, p. 5).

As ceras orgânicas podem ser utilizadas tanto em ligantes convencionais quanto em ligantes modificados, sendo normalmente aplicadas nas misturas asfálticas com um teor de cerca de 0,8% a 4% em massa de CAP. A utilização de teores mais altos podem levar ao enrijecimento excessivo do cimento asfáltico de petróleo quando este retorna a temperatura ambiente, podendo torná-lo mais suscetível ao trincamento (D’ANGELO et al., 2008).

A técnica de espuma de asfalto se baseia na adição de pequenas quantidades de água ao asfalto quente, fazendo com que a água evapore e o vapor d'água fique encapsulado no ligante. Isto faz com que aconteça a formação de espuma no asfalto, aumentando temporariamente seu volume, reduzindo sua viscosidade e melhorando a capacidade de cobertura do agregado pelo filme de asfalto. A espuma de asfalto já é utilizada a mais de 50 anos para a produção de misturas a frio. As usinas também se aproveitaram de alguns casos de secagem incompleta dos agregados para produzir misturas a temperaturas mais baixas, através do processo de formação de espuma (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2011).

Outra técnica também bastante utilizada para a formação de espuma de asfalto é a adição de zeólitas, que são minerais que possuem cerca de 20% de seu peso em água, presa em sua estrutura porosa. Quando este mineral é aquecido, a água presente na estrutura é liberada na forma de vapor e entra em contato com o ligante, iniciando o processo de formação de espuma (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2011).

Processos de produção de WMA que contam com o uso de aditivos químicos foram desenvolvidos nos Estados Unidos e na Europa. Porém, os fabricantes não divulgam informações específicas sobre os produtos químicos utilizados em suas composições. O primeiro aditivo químico para WMA utilizado nos Estados Unidos foi o aditivo EvothermTM. Inicialmente, o EvothermTM foi fornecido como uma emulsão de alto resíduo, conhecida por Evotherm ET. A emulsão continha aproximadamente 70% em peso de ligante asfáltico. O princípio de funcionamento deste aditivo também se baseia no fato de que a água presente na emulsão evapora quando misturado com agregados quentes, e então deixa como resíduo o asfalto e os aditivos químicos (D'ANGELO et al., 2008).

Atualmente existe um aditivo surfactante denominado EvothermTM 3G, que é uma tecnologia para produção de WMA livre de água. Neste processo é possível realizar a mistura do aditivo com o ligante antes de sua distribuição, não necessitando de nenhuma adaptação na usina e nenhuma mudança no processo de produção. Devido à sua conveniência, este aditivo vem substituindo amplamente os demais (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2011).

O Evotherm[®]-3G utiliza-se de um pacote químico, proveniente de óleos naturais de plantas, sendo misturado ao asfalto com a finalidade de melhorar o recobrimento dos agregados, a adesividade e a trabalhabilidade das misturas asfálticas produzidas a baixas temperaturas. Segundo Mello (2012, p. 48) “Quando as misturas são submetidas a altas taxas de cisalhamento durante a usinagem e a compactação, têm seu atrito interno diminuído pelos agentes tensoativos ou agentes de tensão superficial, presentes no aditivo, que facilitam o cobrimento dos agregados pelo ligante asfáltico”.

A empresa norte-americana Ingevity (2015), fabricante do Evotherm[™], define o produto da seguinte forma:

O Evotherm[™] é uma inovadora tecnologia para mistura asfáltica morna que já é utilizada com sucesso nos Estados Unidos, México e diversos países da Europa.

Adicionado diretamente ao ligante, o Evotherm[™] é um aditivo que permite reduzir em até 75°C a temperatura de aplicação da mistura asfáltica, com a consequente diminuição da degradação do ligante por oxidação. Além disso, aperfeiçoa o projeto de mistura, tornando possível o uso mais eficiente dos materiais. O produto aumenta a adesividade do asfalto com o agregado e o torna mais resistente ao tráfego, já que a superfície fica mais homogênea.

Além de manipular uma mistura em temperaturas mais baixas, o que traz economia de combustível e energia ao processo, os empreiteiros de pavimentação contam com significativos benefícios ambientais proporcionados pelo Evotherm[™]. Ao reduzir a emissão ambiental em 97% e permitir o trabalho em local praticamente livre de fumaça, a tecnologia da Ingevity torna o local da obra mais confortável e limpo para a equipe de trabalho e para a vizinhança. O Evotherm[™] permite ainda utilizar elevado teor de pavimento reciclado (RAP), até 40% a mais do que pode ser adicionado na mistura asfáltica, reduzindo o custo final para o empreiteiro.

A tecnologia do Evotherm[™] é totalmente compatível com os projetos originais de pavimentação que usam técnicas convencionais de mistura de asfalto a quente e sua utilização não requer nenhuma modificação na usina de asfalto.

4.2 TRABALHABILIDADE DAS MISTURAS MORNAS

A trabalhabilidade pode ser definida como o grau de facilidade para manipular um determinado material, portanto para misturas asfálticas uma trabalhabilidade maior significa maior facilidade de usinagem e menores esforços de compactação.

O aumento da trabalhabilidade das misturas pode ser considerado o principal mecanismo de funcionamento dos processos de produção de misturas asfálticas em temperaturas inferiores. Independente da técnica a se utilizar, todas elas devem promover essa melhoria.

A trabalhabilidade em misturas asfálticas é diretamente relacionada com a temperatura em que se “trabalhará” com a massa asfáltica. O cimento asfáltico de petróleo é quem dita esta trabalhabilidade, pois é ele o responsável pela interação agregado-ligante. Este material possui comportamento semi-sólido a baixas temperaturas, viscoelástico à temperatura ambiente, e se comporta como um fluído viscoso a altas temperaturas (BERNUCCI et al., 2008). Este comportamento explicita o motivo, no caso de não utilização de aditivos, da trabalhabilidade ser maior a temperaturas mais altas, quanto maior for a temperatura menos viscoso o ligante se torna.

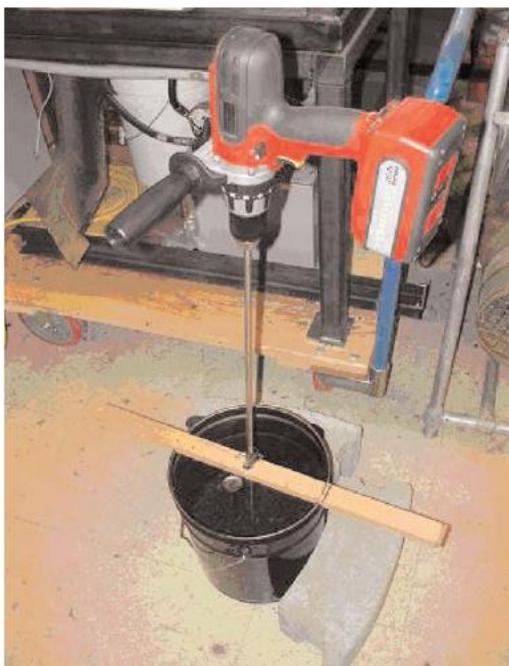
O aditivo utilizado neste trabalho, o EvothermTM-3G, possui propriedades que o caracterizam como surfactante, palavra originada da expressão *surface active agent*, ou seja, agente de atividade superficial. Estes produtos têm a capacidade de alterar as propriedades superficiais na interação entre o agregado e o ligante, diminuindo sua tensão superficial, promovendo uma melhor lubrificação da mistura e possibilitando uma melhoria na trabalhabilidade.

Não existem normas que apontem um método de medição direta da trabalhabilidade em misturas asfálticas, porém, a partir de ensaios de compactação padronizados, o material atingindo o volume de vazios alvo, que pode variar de acordo com a aplicação, pode ser considerado com uma trabalhabilidade adequada.

Uma forma de se mensurar a trabalhabilidade que já foi utilizada em alguns estudos nos Estados Unidos, é através da medição do torque necessário para um conjunto de pás misturarem a massa asfáltica. De acordo com o relatório 691 do National Cooperative Highways Research Program (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAYS RESEARCH PROGRAM, 2011) alguns dispositivos já foram desenvolvidos para esta medição, entre eles, o da Universidade de Massachussets Amherst e o da Universidade de New Hampshire.

O dispositivo desenvolvido pela Universidade de New Hampshire é muito simples, consistindo em uma furadeira de mão com um torquímetro acoplado no mandril, esta furadeira é ligada a uma haste com um conjunto de pás na extremidade, que tem a função de realizar a mistura agregado-ligante enquanto o torque é medido. Já o dispositivo desenvolvido pela Universidade de Massachussets é bastante mais complexo (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2011). As Figuras 3 e 4 apresentam estes dispositivos desenvolvidos pelas universidades.

Figura 3 – Dispositivo para medição de trabalhabilidade da Universidade de New Hampshire



(fonte: NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAYS RESEARCH PROGRAM, 2011)

Figura 4 – Dispositivo para medição de trabalhabilidade da Universidade de Massachussets



(fonte: NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAYS RESEARCH PROGRAM, 2011)

Além destes dispositivos, existem no mercado, misturadores de laboratório que possuem um sistema de medição do torque necessário para realização da mistura. Estes dispositivos têm a vantagem de possuir aquecimento controlado, podendo assim, obter medições mais precisas, em função da temperatura. Possibilitando, inclusive, a obtenção de gráficos para acompanhamento do torque ao longo do tempo.

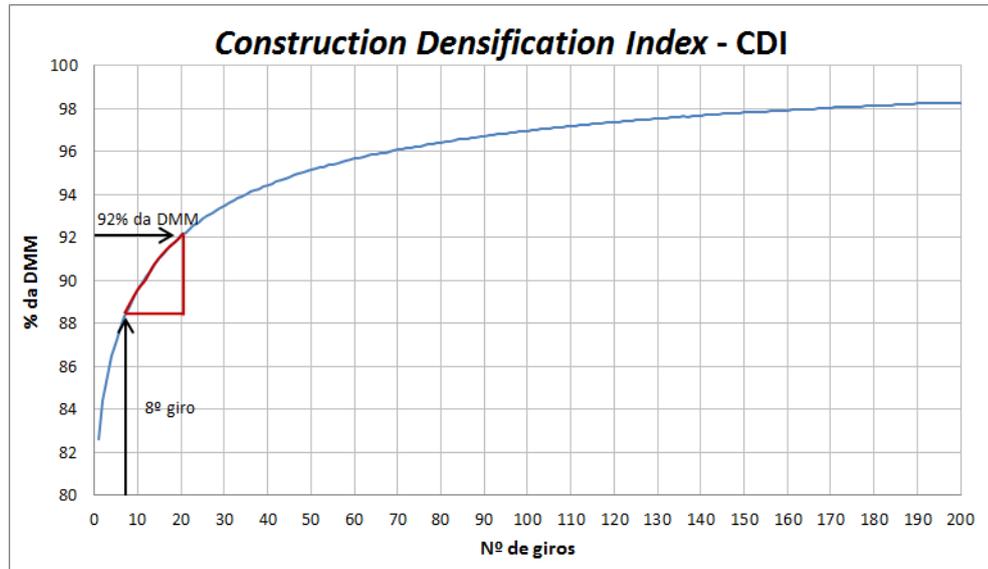
Outra forma de se inferir a respeito da trabalhabilidade de misturas asfálticas é através de alguns parâmetros que podem ser calculados a partir da curva de compactação obtida no Compactador Giratório Superpave, como o *Construction Densification Index* (CDI) e o *Traffic Densification Index* (TDI). A definição e a maneira de obtenção destes parâmetros serão apresentadas nos itens a seguir.

4.2.1 Construction Densification Index - CDI

Como o próprio nome sugere, o *Construction Densification Index* apresenta uma relação com a energia, ou trabalho, imposta pelos rolos compactadores durante a construção do revestimento até ele atingir a densidade especificada em projeto.

O CDI é definido pela área entre a curva de compactação, a reta horizontal que cruza a curva de compactação no giro de número 8 e a reta vertical que cruza a curva de compactação quando a densidade é equivalente a 92% da Gmm (MAHMOUD e BAHIA, 2004). O número de giros igual a 8 é escolhido por simular o esforço imposto por uma vibroacabadora típica durante o processo de espalhamento e acomodação do material na pista, enquanto 92% da Gmm (ou 8% de volume de vazios) refere-se à densidade da massa asfáltica no final do processo de construção, quando a mesma é liberada para o tráfego de veículos, de acordo com o Wisconsin Department of Transportation (WisDOT) (NASCIMENTO, 2008). A Figura 5 apresenta uma representação gráfica da área, na curva de compactação, correspondente ao CDI.

Figura 5 – Área correspondente ao CDI



(fonte: elaborado pelo autor)

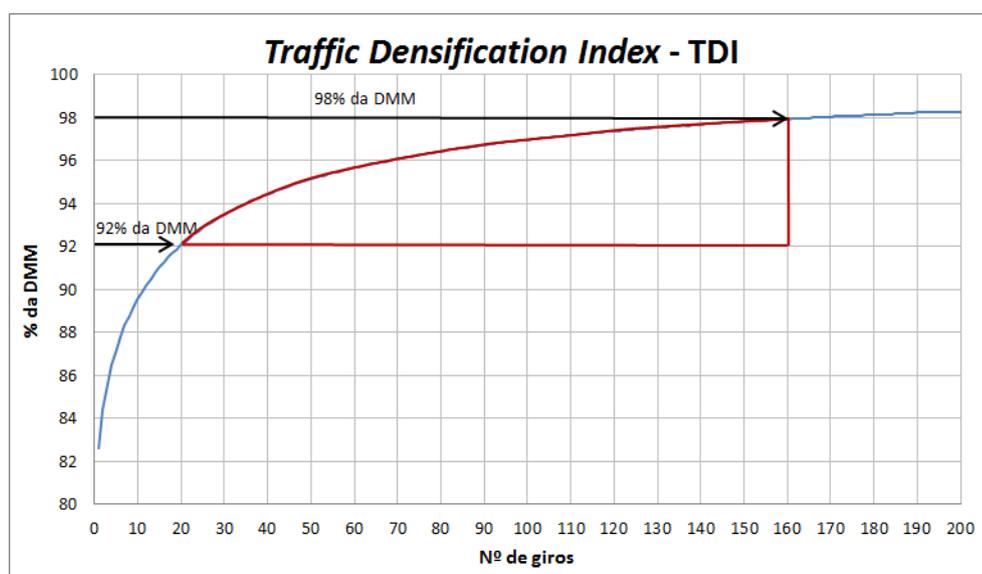
Portanto, um valor baixo de CDI indica a não necessidade de muito esforço durante a compactação do concreto asfáltico, ou seja, uma trabalhabilidade adequada. Enquanto que valores muito altos podem indicar maiores dificuldades em se alcançar o volume de vazios desejado podendo gerar inclusive a quebra de agregados durante a compactação.

4.2.2 Traffic Densification Index – TDI

O *Traffic Densification Index* apresenta uma relação com os esforços impostos pelo tráfego durante a vida útil do revestimento, apresentando também uma correlação com a susceptibilidade à deformação permanente (MAHMOUD e BAHIA, 2004).

O TDI é representado pela área entre a curva de compactação, a reta horizontal em que se observa 92% da **Gmm**, e a reta vertical que cruza a curva de compactação quando a densidade aparente atinge 98% da **Gmm** (MAHMOUD e BAHIA, 2004). A Figura 6 apresenta uma representação gráfica da área, na curva de compactação, correspondente ao TDI.

Figura 6 – Área correspondente ao TDI



(fonte: elaborado pelo autor)

Baseia-se no princípio de que o pavimento após aberto ao tráfego, em princípio com 92% da Gmm, continua a se densificar em função das cargas impostas pelo tráfego de veículos. O limite de 98% da Gmm é aplicado no cálculo do TDI por tratar-se de uma densidade crítica, na qual a mistura está na zona de ruptura plástica (NASCIMENTO, 2008).

Portanto, o TDI se relaciona com a estabilidade da mistura, um alto valor de TDI indica boa resistência a deformações permanentes, enquanto valores baixos indicam uma menor resistência às ações do tráfego.

O ideal seria uma mistura asfáltica com um baixo valor de CDI e um alto valor de TDI, ou seja, fácil de compactar durante a construção e com alta resistência às deformações impostas pelo tráfego (MAHMOUD e BAHIA, 2004).

4.3 BENEFÍCIOS DAS WMA

A ideia de se produzir misturas asfálticas a temperaturas mais baixas surgiu a partir da necessidade de se obter um processo menos agressivo ao meio ambiente, à saúde dos trabalhadores envolvidos na pavimentação e, também, que englobasse conceitos de sustentabilidade, levando a uma utilização mais racional dos recursos disponíveis. Além

disso, alguns estudos ainda apontam que pode haver melhorias no desempenho mecânico destas misturas.

A busca pela adaptação ao cumprimento das metas do Protocolo de Quioto e a criação e implantação de limites de exposição dos trabalhadores aos fumos de asfalto, em 1997, impulsionaram as iniciativas de se criar misturas asfálticas a temperaturas mais baixas que as tipicamente usadas em misturas quentes (NEWCOMB, 2006; PROWELL, HURLEY, 2006).

Prowell e Hurley (2006) ainda afirmam que o fator econômico também pode ser considerado importante para o incentivo a utilização de misturas asfálticas mornas, pois a diminuição das emissões pode representar uma economia de custos significativa, sendo que cerca de 30% a 50% dos custos gerais de uma usina de asfalto podem ser atribuídos a mecanismos para controle de emissões.

Existem diversos fatores difíceis de mensurar para se fazer análises de benefícios econômicos da utilização de aditivos surfactantes para produção de WMA. Como aspecto desfavorável, pode ser citado o gasto constante com a compra dos aditivos. Já considerando os aspectos favoráveis, podem ser citados a diminuição do consumo de combustível e outros diversos benefícios, todos difíceis de ponderar, tais como, melhoria na produtividade por conta de um ambiente de trabalho mais agradável, menor risco de resfriamento da mistura e por consequência menores perdas, menores gastos com controle de emissões nas usinas, entre outros.

4.3.1 Benefícios ambientais

Inúmeras pesquisas revelam uma grande diminuição na emissão de gases poluentes para a atmosfera quando se utiliza temperaturas mais baixas de produção de misturas asfálticas. Este pode ser considerado o grande benefício ambiental das WMA. Além disso, há também a redução do uso de combustíveis fósseis, utilizados para o aquecimento das usinas empregadas para o processo de mistura agregado-ligante.

Segundo Frank et al. (2011) aponta em seu estudo, não pode haver dúvida que a produção de misturas asfálticas a temperaturas mais baixas irá economizar combustível e reduzir as emissões provenientes da queima de asfalto. Os benefícios ambientais gerados por tecnologias

WMA refletem numa diminuição da emissão de carbono de, em média, 10% a 15%. Embora as emissões geradas no carregamento e descarregamento da usina não terem sido medidas neste estudo, foi relatado que eram visivelmente menores com WMA. Também se verificou uma economia de combustível da ordem de 35%.

Motta (2011) realizou estudos de emissão de poluentes de misturas quentes e mornas, tanto em laboratório quanto em usina, e concluiu que houve uma redução de cerca de três vezes na emissão de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) da mistura morna em relação à mistura quente. Ainda salienta que muitos dos HPAs encontrados são considerados mutagênicos e/ou carcinogênicos.

Motta (2011) também verificou que a emissão de poluentes durante a compactação da mistura em campo é menor do que durante o processo de usinagem. Provavelmente essa diferença pode ser explicada pela maior temperatura no início do processo. Em relação ao consumo de combustível na usinagem, estima que houve uma redução da ordem de 15% devido à menor temperatura para secagem e aquecimento dos agregados.

As emissões podem ser provenientes não só da queima de combustível durante a usinagem, mas também da decomposição térmica do asfalto, sendo este, composto de materiais orgânicos em forma gases e partículas. A fase particulada é constituída de componentes sólidos e líquidos, também chamados de aerossóis, ficando em suspensão no ar em função de sua pequena dimensão, menor que 100 μm (MOTTA et al., 2013).

De acordo com D'Angelo et al. (2008), em estudos realizados na Europa, observou-se uma redução média de 30% na emissão de gás carbônico – CO_2 (relacionado aos gases do efeito estufa), 25% da emissão de dióxido de enxofre – SO_2 (um dos responsáveis pelas chuvas ácidas), 35% de compostos voláteis – COV (associados aos Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos – HPAs), 25% de monóxido de carbono – CO (indicador de eficiência de queima), 65% de óxidos de nitrogênio – NO_x (conhecido como importante poluidor da atmosfera) e 45% de material pulverulento.

O fato de haver menores emissões de poluentes e menos odores possibilita que usinas de asfalto sejam construídas em locais onde exista uma maior restrição a esses aspectos, como próximas a áreas residenciais. Isto pode permitir a locação das usinas mais próximas às obras, caso seja necessário.

Para muitas usinas, a minimização de rejeitos reflete na melhor oportunidade para a eficiência energética. Os resíduos ou rejeitos de material são gerados quando a mistura é produzida muito quente, pois pode gerar a queima do asfalto, ou muito fria, podendo inviabilizar o processo de compactação. De acordo com Frank et al. (2011) “Há usinas que utilizam WMA diariamente acreditando que a redução do desperdício e a maior satisfação do cliente são seus retornos reais”.

Em usinas localizadas próximas a áreas residenciais existem, com frequência, reclamações devido ao mau cheiro exalado pelo processo de usinagem das misturas. Enquanto não há nenhuma evidência científica de que os odores representam uma ameaça para a comunidade do entorno, tais aborrecimentos podem criar problemas de relacionamento com a comunidade, o que não é desejável. No entanto, se as temperaturas de produção forem reduzidas, a geração de odores associados à usinagem e às operações de pavimentação pode cair para um nível insignificante (NEWCOMB, 2006).

4.3.2 Benefícios ao ambiente de trabalho na pavimentação

O potencial de exposição dos trabalhadores aos fumos de asfalto, incluindo quantidade e compostos orgânicos envolvidos, é diretamente relacionado com as condições e processos de aplicação das misturas. Os principais atingidos pela emissão dos gases são os operários que trabalham nas usinas e diretamente na aplicação das misturas em campo. Diversos estudos laboratoriais e de medição de emissão de poluentes em usinas, mostram que as emissões são altamente dependentes das temperaturas utilizadas.

No caso das misturas asfálticas realizadas em altas temperaturas, tem-se a produção de vapores que se condensam à medida que são resfriados, sendo chamados de fumos de asfalto, o que pode ser claramente percebido em temperaturas da ordem de 150° C. A composição química dos vapores e fumos de asfalto é variável e depende de diversos fatores além da temperatura, como o tipo de petróleo que deu origem ao CAP, tipo de ligante asfáltico, tempo de usinagem, entre outros. Sabe-se que, como resultado da decomposição térmica do asfalto, se tem a formação de HPAs, que são liberados ao meio ambiente e prejudicam os trabalhadores envolvidos (MOTTA et al., 2013).

Motta et al. (2013) também afirma que os níveis de exposição ocupacional e o potencial toxicológico são fortemente influenciados pelas temperaturas utilizadas. Em temperaturas mais amenas, não só a quantidade de fumos emitida é menor, como provavelmente são menos nocivos.

Segundo D'Angelo et al. (2008), dados obtidos em estudos na França, Alemanha e Itália indicam que há uma redução na exposição dos trabalhadores com o uso de WMA. Nestes estudos, todos os dados de exposição apresentaram valores abaixo dos limites de exposição aceitáveis. Os resultados para os fumos de asfalto e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos indicaram reduções significativas em comparação com HMA.

D'Angelo et al. (2008) relata que além da redução da exposição dos trabalhadores, as temperaturas mais baixas também propiciam um ambiente de trabalho mais confortável. Isto pode ajudar na retenção de trabalhadores na área. Além disso, na Alemanha, foi observado um significativo aumento na produtividade quando se trabalhou com WMA, comparado a HMA, segundo o relato de um empreiteiro.

4.4 DESEMPENHO DAS MISTURAS MORNAS

Diversas pesquisas em relação ao desempenho das misturas asfálticas mornas vêm sendo desenvolvidas nos últimos anos, principalmente no exterior. Muitos destes estudos vêm mostrando que o desempenho das WMA tanto em testes laboratoriais como também em campo se mostram similares, ou em algumas vezes até superiores ao de misturas asfálticas a quente. No entanto, análises de desempenho a longo prazo ainda são necessárias.

Segundo Newcomb (2006), reduzir a temperatura de produção de misturas asfálticas pode levar a algumas melhorias no seu desempenho. Entre elas, menores taxas de resfriamento, melhoria na compactação em campo, diminuição do envelhecimento da mistura e maior resistência ao trincamento. No entanto, há uma preocupação por parte de alguns pesquisadores, de que possa haver uma maior susceptibilidade à umidade e aumento da deformação permanente.

As temperaturas de usinagem das misturas asfálticas mornas são suficientes para secar os agregados externamente, no entanto, talvez esta temperatura, levando em conta o tempo de

permanência no tambor da usina, não seja suficiente para garantir a secagem interna dos agregados. A água remanescente no agregado poderia levar ao efeito *stripping*, que é a fragilidade ou perda da ligação entre agregado e ligante devido à presença de água no sistema. Entretanto, os estudos realizados até o momento indicam que a secagem dos agregados em WMA é suficiente (PROWELL et al., 2012).

O fato de a temperatura da mistura estar mais próxima da temperatura atmosférica e a temperatura para a compactação também sendo reduzida, a taxa de resfriamento será muito menor do que seria a temperaturas de produção mais altas. Uma vez que a mistura resfria mais lentamente, mais tempo estará disponível para a compactação. Isto possibilita menores esforços e tempos maiores para realização da compactação, e também a oportunidade de executar pavimentos em locais e épocas de clima mais frio (D'ANGELO et al., 2008). As especificações brasileiras para concretos asfálticos usinados a quente, tanto com asfaltos convencionais quanto com asfaltos modificados, determinam que estas misturas só podem ser produzidas, transportadas e aplicadas quando a temperatura ambiente for superior a 10°C (MOTTA, 2011).

Segundo Prowell et al. (2012), na maioria dos casos, apesar da temperatura mais baixa, as misturas asfálticas mornas apresentam maior facilidade em se alcançar a densidade desejada, em comparação com misturas asfálticas a quente. No entanto, em alguns casos, quando se utiliza um patamar de redução de temperatura extremo, a WMA pode apresentar certa dificuldade de compactação.

Alguns estudos de campo realizados na Europa mostraram que durante a compactação com temperaturas ambientes em torno -3°C a 4°C, as misturas asfálticas mornas apresentaram uma melhor densificação para um mesmo número de passagens de rolo compactador, comparado às misturas asfálticas quentes (D'ANGELO et al., 2008).

Prowell et al. (2012) relatam uma experiência de aplicação de mistura asfáltica morna, produzida a partir do emprego de aditivo surfactante EvothermTM, na qual, após a usinagem, se esperou um tempo de 17 horas com a mistura estocada antes da aplicação. A mistura foi então compactada na temperatura de 96°C, sendo que deveria estar a 107°C de acordo com a dosagem, e ainda assim apresentou uma adequada trabalhabilidade. Esta é uma grande vantagem, pois no caso de algum problema que impeça a pavimentação em algum momento,

como no caso de chuva, haveria a possibilidade de armazenar o material por um tempo maior, não sendo necessário o seu descarte.

Mello (2012) realizou um estudo de misturas mornas com emprego de aditivo surfactante EvothermTM. Este estudo apontou resultados satisfatórios, dentro dos limites especificados, para alguns parâmetros mecânicos como módulo de resiliência, resistência à tração e dano por umidade induzida.

No trabalho de Mello (2012), estudou-se um trecho de uma rodovia que teve o pavimento composto de HMA substituído por WMA. A partir de levantamentos realizados antes e depois da aplicação da mistura morna foi possível observar uma melhoria significativa nos índices de irregularidade.

Klinsky et al. (2014) constataram em seu estudo que as misturas asfálticas mornas apresentaram bom comportamento quanta à ação deletéria da água, sendo inclusive superior à mistura asfáltica quente comparada. Quanto ao desempenho à fadiga, verificou-se que as WMA produzidas em laboratório apresentaram uma expectativa de vida de fadiga muito superior em relação às HMA. Ainda analisou-se o comportamento em relação ao afundamento de trilho de roda, ou deformação permanente, e concluiu-se que as WMA analisadas não apresentaram este tipo de defeito.

Já no trabalho de Motta (2011), as misturas mornas avaliadas, com o uso de cimento asfáltico de petróleo (CAP) 50-70, apresentaram excessiva deformação permanente, praticamente o dobro da mistura a quente comparada. Entretanto, acredita-se que isto se deve ao fato de a mistura morna ter sido produzida e compactada com excessiva redução de temperatura, visto que ela apresentou um volume de vazios muito alto, podendo este ter comandado a formação das trilhas de roda.

Em um estudo de aplicação de concreto asfáltico morno em uma rodovia de tráfego considerado muito pesado, em São Paulo, Motta (2011) relata que o controle tecnológico realizado ao longo de praticamente um ano demonstrou estabilidade mecânica do revestimento.

O envelhecimento do ligante asfáltico está diretamente relacionado à temperatura em que ele é submetido no processo de usinagem. Alguns estudos apontam que, em uma mistura asfáltica

quente, o ligante pode perder até 60% de sua vida útil somente na usina, o que leva ao enrijecimento do mesmo. Newcomb (2006) afirma que, se a temperatura da usina é reduzida, o enrijecimento devido à oxidação do ligante também será reduzida. Menos enrijecimento durante a produção pode significar uma maior flexibilidade e resistência a fissuras durante sua vida de serviço.

O pavimento com mistura asfáltica morna mais antigo foi construído na Europa, em 1999. Em 2007 pesquisadores dos Estados Unidos realizaram visitas com o intuito de realizar um escaneamento nas técnicas de WMA utilizadas na Europa e coletaram dados de laboratório e de desempenho em curto prazo em campo dos pavimentos mais antigos, com base nestes dados relataram que o desempenho das WMA foi igual ou superior às misturas asfálticas a quente (D'ANGELO et al., 2008).

A temperatura de usinagem e compactação das misturas mornas deve ser controlada com rigor, a fim de alcançar a densidade adequada no concreto asfáltico. Em laboratório quando os corpos de prova de WMA atingem o volume de vazios igual ou muito próximo ao da mistura quente de referência, seu desempenho é semelhante quanto aos parâmetros de módulo de resiliência, resistência à tração e deformação permanente (MOTTA, 2011).

As misturas asfálticas mornas são capazes de serem produzidas em temperaturas mais baixas, serem compactadas em locais de clima frio, serem carregadas por distâncias maiores entre usina e obra, entre outros benefícios, porém talvez não todos estes benefícios ao mesmo tempo. Os fabricantes das tecnologias podem sugerir a redução máxima da temperatura para aumentar a economia de combustível na usina, e as agências reguladoras podem delimitar uma temperatura máxima para as misturas serem consideradas mornas, não aceitando, no caso, misturas com temperaturas acima desta. Portanto, quando o empreiteiro se deparar com uma ou até todas estas situações adversas deve ter cuidado com a temperatura que será utilizada (PROWELL et al., 2012).

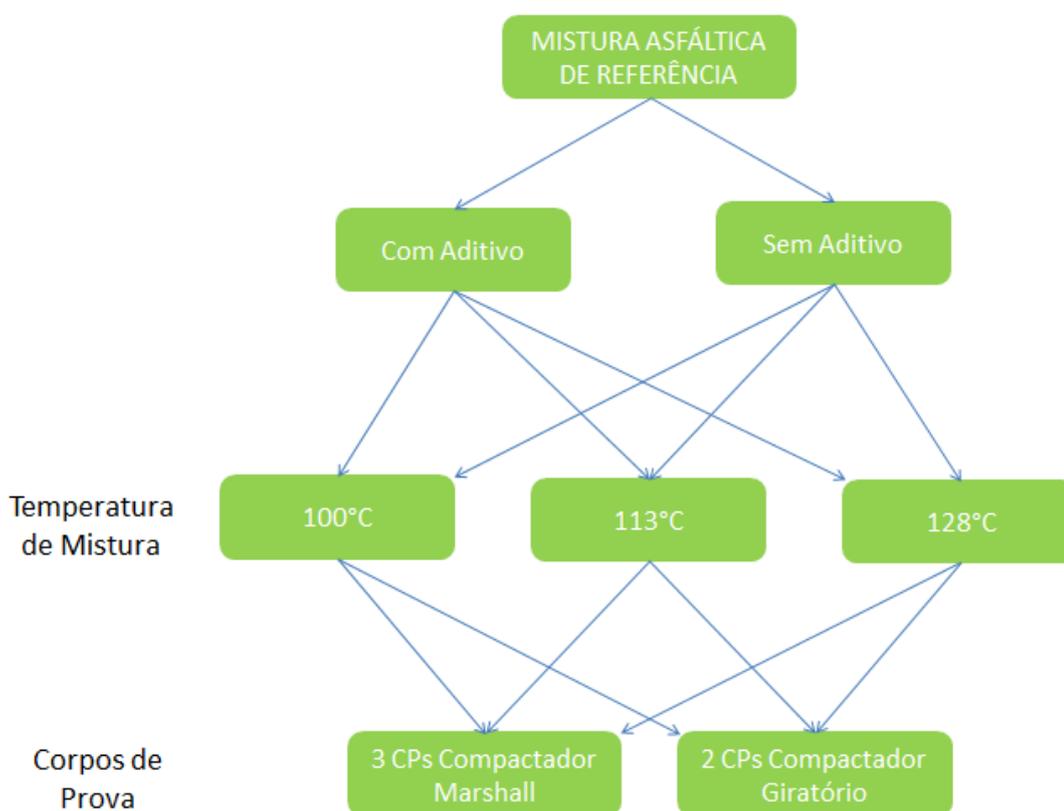
Uma escolha adequada da temperatura a ser utilizada pode garantir o sucesso da mistura asfáltica morna, assim como pode comprometer todo o processo. Portanto, é de extrema importância que sejam desenvolvidos guias de utilização e orientações para ajudar os empreiteiros a escolher temperaturas realistas para usinagem e compactação de WMA (PROWELL et al., 2012).

Estudos de desempenho em longo prazo ainda são necessários para verificar se o comportamento inicial, considerado bom, irá se manter. Apesar de parecer improvável, se um desempenho satisfatório a longo prazo não se confirmar e os pavimentos de WMA durarem menos que os de HMA, o potencial benefício ambiental, como a diminuição da emissão de gases por exemplo, perderia o sentido, pois o ciclo de pavimentação se tornaria mais frequente (PROWELL et al. 2012).

5 PLANO EXPERIMENTAL

Após análise da literatura, e tendo ciência da amostragem necessária para poder chegar a resultados adequados, elaborou-se o plano experimental visando elencar os ensaios a serem realizados e a gama de parâmetros analisados ao longo deste trabalho. A seguir, na Figura 7, é apresentado o diagrama do plano experimental, sendo descrito nos próximos parágrafos.

Figura 7 – Diagrama do plano experimental



(fonte: elaborado pelo autor)

A mistura asfáltica de referência é uma mistura a quente, com CAP 50-70, realizada à temperatura de 143°C. Esta mesma mistura foi realizada a mais três temperaturas distintas: 128°C, 113°C e 100°C, ou seja, com redução de cerca de 15°C, 30°C e 45°C em relação à temperatura original, sendo que a recomendação do fabricante é de uma diminuição da ordem de 30°C em relação a mistura quente. Para todas as temperaturas reduzidas foram realizadas misturas com e sem a incorporação de aditivo surfactante, para análise comparativa do efeito

do aditivo na trabalhabilidade. Portanto, no total, foram elaboradas três misturas asfálticas mornas com aditivo surfactante e três misturas mornas sem o aditivo, mais a mistura quente de referência, totalizando sete misturas asfálticas.

Para cada uma delas mediu-se o torque necessário para realizar o processo de usinagem (mistura em laboratório), posterior moldagem de três corpos de prova com compactador Marshall para obtenção do volume de vazios e análise da compactabilidade das misturas e dois corpos de prova no Compactador Giratório Superpave, onde foi analisado o parâmetro CDI, obtido na curva de compactação.

6 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados neste trabalho, bem como a metodologia empregada para obtenção dos resultados.

6.1 MATERIAIS

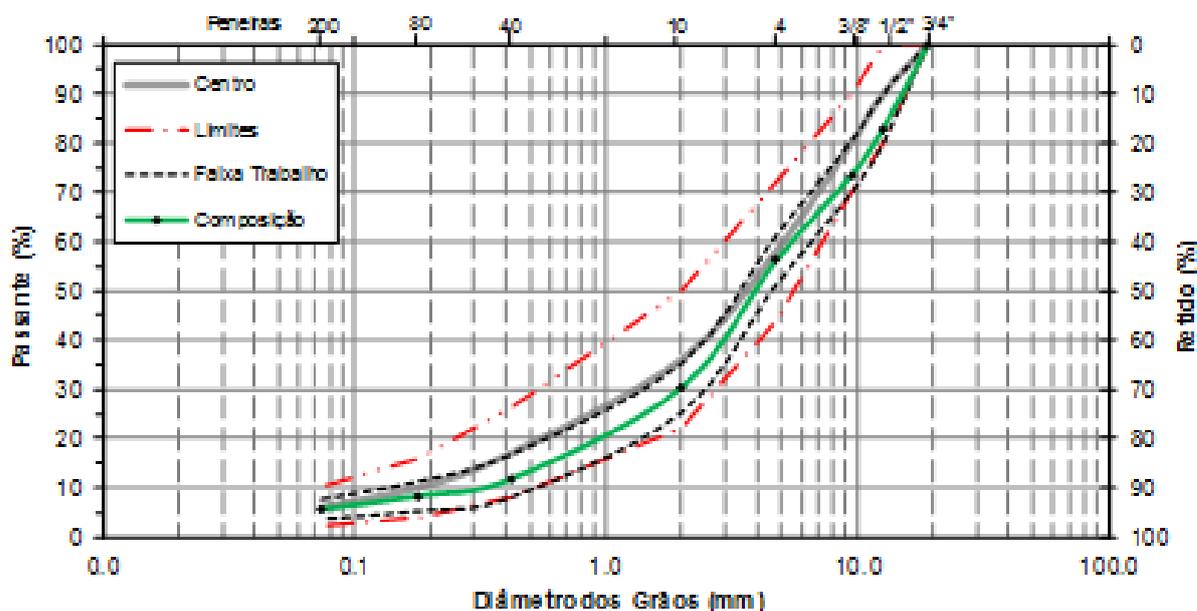
Os estudos foram realizados a partir de uma mistura asfáltica elaborada por Johnston et al. (2015), com características e materiais comumente utilizados na pavimentação rodoviária no Brasil. Uma breve descrição destes materiais é dada a seguir.

6.1.1 Agregados

Os agregados utilizados nas misturas asfálticas estudadas são de origem basáltica, provenientes de uma pedreira localizada no km 30 da BR-290, no município de Santo Antônio da Patrulha-RS. Optou-se pela utilização deste agregado por já se ter um conhecimento prévio de suas características, por se ter a disponibilidade de uma grande quantidade deste material no laboratório, e também pelo fato de os agregados basálticos serem utilizados com bastante frequência em obras rodoviárias.

A granulometria foi enquadrada na FAIXA C do DNIT, utilizando-se as proporções de 30% de brita #3/4, 15% de brita #3/8 e 55% de pó-de-pedra. A curva granulométrica é apresentada na Figura 8 a seguir.

Figura 8 – Curva granulométrica



(fonte: JOHNSTON et al., 2015)

6.1.2 Ligante Asfáltico

O ligante utilizado nas misturas foi o cimento asfáltico de petróleo (CAP) convencional, também denominado de CAP 50-70, de acordo com a sua classificação. Optou-se pela utilização deste ligante por ele não possuir nenhum modificador ou adição de polímeros, sendo analisado somente o ligante com e sem o aditivo surfactante.

Foram realizados, para o ligante com e sem o aditivo, os seguintes ensaios de caracterização: densidade, penetração, viscosidade Brookfield e ponto de amolecimento, todos eles obtiveram resultados de acordo com a especificação da ANP (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2005), para este tipo de ligante (CAP 50/70). O surfactante não alterou significativamente estas características do ligante convencional. Os resultados obtidos, bem como os parâmetros a ser atendidos são apresentados na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Caracterização dos ligantes

Ensaio	Temperatura	Especificação ANP	CAP 50/70	CAP 50/70 com Evotherm
Viscosidade Brookfield	135°C	mínimo 274	408	480
NBR 15184 (cP)	150°C	mínimo 112	237	242
	177°C	57 a 285	90	90,5
Densidade de materiais betuminosos NBR 6296 (g/cm ³)		-	0,957	1,017
Ponto de amolecimento -NBR 6560 (°C)		mínimo 46	49	48
Penetração - NBR 6576 (0.1mm)		50 a 70	69	57
Índice de susceptibilidade térmica (IST)		(-1.5) a (+ 0,7)	-0,8	-1,5

(fonte: JOHNSTON et al., 2015)

6.1.3 Aditivo surfactante

O aditivo surfactante utilizado no desenvolvimento deste trabalho será o EvothermTM-3G (Figura 9), produto que pode ser encontrado no mercado nacional. Este aditivo é incorporado diretamente ao ligante asfáltico, sem que haja a necessidade de nenhuma alteração no procedimento de produção das misturas, tornando assim, sua utilização tanto em laboratório quanto em usina mais prática, quando comparada aos outros métodos (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2011).

Figura 9 – Aditivo surfactante EvothermTM-3G

(fonte: o próprio autor)

6.1.4 Características das misturas

As características finais das misturas HMA e WMA elaboradas por Johnston et al. (2015) são apresentadas na Tabela 2, juntamente com as especificações da Norma DNIT 031 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006).

Tabela 2 – Características das misturas HMA e WMA

Propriedade	Especificação	Mistura HMA 2h	Mistura WMA 2h
Teor de Betume (%)	--	5,7	5,7
Volume de Vazios (%)	3 a 5	4,3	4,2
Relação Betume Vazios (%)	75 a 82	76,9	78,17
Vazios do Agregado Mineral (%)	> 15	18,6	18,32
Massa Esp. Max. Medida (kN/m ³)	--	2,506	2,504
Massa Esp. Aparente (kN/m ³)	--	2,398	2,404
Estabilidade (kgf)	> 500	747	-
Fluência (1/100 in)	8 a 18	9,3	-
Resistência à Tração (MPa)	> 0,65	0,93	0,67
Módulo de Resiliência (MPa)	--	4034	2404
Relação Mr/Rt (adm)	--	4338	3588
Relação Est/Fluência (kgf.m)	--	81	-
Relação Filler/Betume (%)	0,6 a 1,6	0,99	0,99
Resistência Retida à tração (%)			

(fonte: JOHNSTON et al., 2015)

6.2 MÉTODOS

Todos os ensaios deste trabalho foram realizados no Laboratório de Pavimentação (Lapav) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), considerado um laboratório de referência no Brasil na área de pavimentação. A metodologia de ensaios segue as normas vigentes no Brasil, e uma breve descrição é dada a seguir.

6.2.1 Produção das misturas

As misturas asfálticas, em campo, são produzidas em usinas de grande escala devido à grande quantidade demandada, já em laboratório, as misturas podem ser produzidas tanto por

processo manual quanto por misturadores automáticos. A grande dificuldade em se produzir por processos manuais está na dificuldade de se manter a temperatura controlada durante o processo, na homogeneidade da mistura e também na pequena quantidade de material que se consegue produzir.

Neste trabalho foi utilizado um misturador automático de laboratório (*Laboratory Mixer* da Infratest) com capacidade para produzir até 75kg de mistura asfáltica por ciclo. Este equipamento possui aquecimento monitorado. A operação deste misturador pode ser previamente programada, onde são inseridos os parâmetros necessários, tais como, temperatura de usinagem, tempo de mistura dos agregados, tempo de mistura dos agregados com o ligante, velocidade sentido de rotação das pás e tempo de condicionamento dos materiais na temperatura desejada.

Além disso, este equipamento possui um sistema de medição do torque necessário para mover suas pás durante o processo de realização da mistura. Para aquisição destes dados, o equipamento deve ser conectado a um computador, utilizando o programa *Laboratory Mixer DMS* fornecido pelo próprio fabricante do misturador. A medição do torque foi utilizada neste trabalho como um dos critérios de avaliação da trabalhabilidade das misturas a diferentes temperaturas. Este equipamento foi adquirido recentemente pelo Lapav, e ainda se tem pouco conhecimento do seu uso a nível nacional. O equipamento está apresentado nas Figuras 10 e 11 a seguir.

Figura 10 – Misturador de laboratório



(fonte: o próprio autor)

Figura 11 – Processo de mistura no laboratório

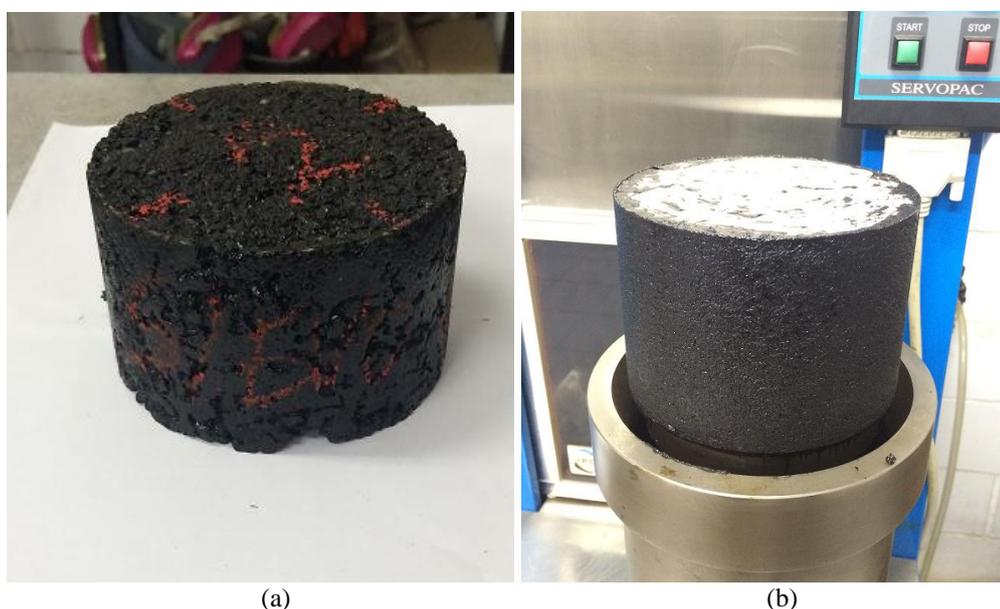


(fonte: o próprio autor)

6.2.2 Moldagem dos corpos de prova

Para a moldagem dos corpos de prova, o Lapav dispõe de dois métodos, através do Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS) e através de um compactador por impacto Marshall. Foram moldados corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 10cm (Marshall), 15cm (SUPERPAVE) e altura a ser determinada de acordo com o volume de vazios de cada corpo de prova (Figura 12).

Figura 12 - Corpos de prova Marshall (a) e Superpave (b)



(fonte: o próprio autor)

O CGS (Figura 13) realiza uma moldagem por amassamento, impondo esforços cisalhantes ao corpo de prova, sendo conhecido por ser o compactador de laboratório que mais se aproxima das condições em que os concretos asfálticos (CA) são aplicados em campo, através de rolos compactadores. Foram moldados corpos de prova neste compactador apenas para verificação do parâmetro CDI, pois para obter este parâmetro é necessário submeter o corpo de prova há um elevado número de giros, fazendo com que ele seja compactado além do ideal, sendo então descartados os CPs após a compactação. Os corpos de prova para análise do volume de vazios foram moldados no compactador por impacto Marshall.

Figura 13 – Compactador Giratório Superpave



(fonte: o próprio autor)

O compactador por impacto Marshall (Figura 14) consiste de um soquete, com um peso padrão, que é suspenso e liberado de uma determinada altura, guiado por uma haste, até golpear a massa asfáltica, compactando-a desta forma. Neste trabalho, o uso deste compactador se deu através de um sistema automatizado que padroniza o tempo entre os golpes, além de garantir a verticalidade do soquete.

Figura 14 – Compactador por impacto Marshall



(fonte: o próprio autor)

Salienta-se que após a usinagem da mistura, e antes do início da moldagem dos corpos de prova, as misturas asfálticas devem ser condicionadas em estufa durante duas horas, na temperatura de compactação, afim de promover a absorção do ligante pelos agregados e o seu enrijecimento, procurando simular os processos que ocorrem em campo (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2011).

6.2.3 Determinação do volume de vazios e grau de compactação

A determinação do volume de vazios é dada através dos ensaios de massa específica aparente, e densidade máxima medida. A massa específica aparente é obtida com os dados de dimensões dos corpos de prova, peso ao ar, peso submerso e peso saturado com superfície seca, conforme preconizado pela Norma NBR 15573 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012a). As medições foram realizadas em balança hidrostática de alta precisão, devido à necessidade de se pesar os corpos de prova submersos, através do princípio do empuxo de Arquimedes (Figura 15).

Figura 15 – Determinação dos parâmetros volumétricos dos corpos de prova



(fonte: o próprio autor)

Já a densidade máxima medida é obtida através do método *RICE* (Figura 16), que consiste na medição do peso da mistura asfáltica, antes de ser compactada, dentro de um recipiente com

água após a agitação e aplicação de vácuo para expulsão do ar, de acordo com a Norma NBR 15619 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012b).

Figura 16 – Determinação da densidade máxima medida através do método *Rice*



(fonte: o próprio autor)

O Grau de Compactação (GC) é determinado através da relação entre a massa específica aparente dos corpos de prova de mistura morna, com a massa específica aparente de projeto, no caso sendo a mistura de referência, de acordo com a Norma DNIT 031 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DOS TRANSPORTES, 2006).

7 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante o processo de mistura da massa asfáltica, o torque, e durante o processo de compactação, CDI e volume de vazios, para as misturas com e sem aditivo e em todas as temperaturas utilizadas.

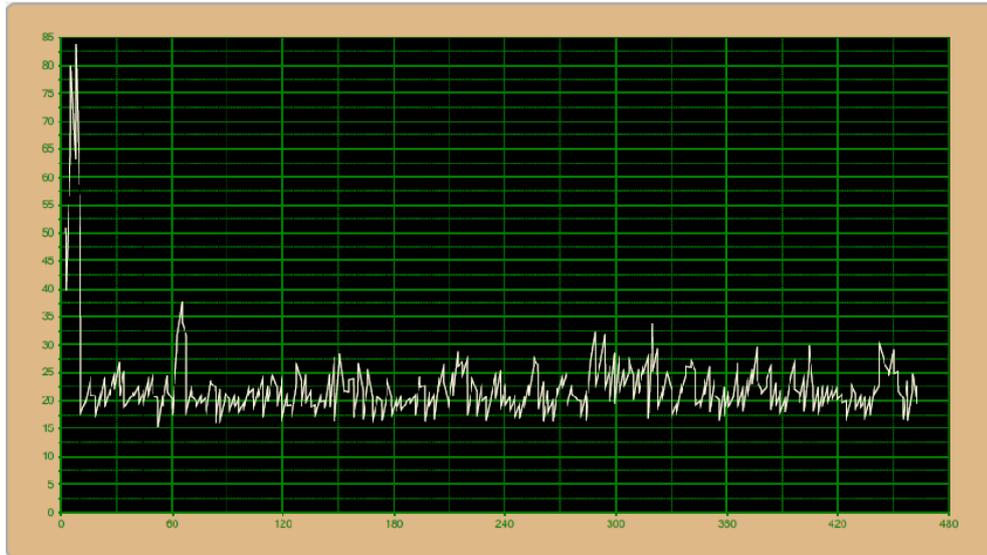
7.1 TORQUE NO PROCESSO DE MISTURA

O equipamento utilizado para a obtenção dos dados de torque necessário para a realização da mistura é um misturador de laboratório, com capacidade para até 75kg de mistura asfáltica. A aquisição dos dados se dá por meio de conexão do equipamento com um computador e um software fornecido pelo mesmo fabricante do misturador.

Como não haviam procedimentos e nem normas que apontassem diretrizes para a condução destas medições de torque, foram realizados uma série de testes preliminares para padronização dos ensaios. Portanto, foram fixados os parâmetros de velocidade de rotação das pás (20 rpm), tambor do misturador girando no sentido contrário ao das pás, quantidade de material a ser ensaiado (20 kg) e tempo de mistura (500 s).

As leituras de torque para as misturas asfálticas apresentam bastante oscilação ao longo do ensaio, podendo estar associadas à granulometria descontínua, típica deste material. Portanto, nesta pesquisa se trabalhou com valores médios de torque, considerando todos os valores obtidos durante o processo de mistura. Na Figura 17, a seguir, consta uma captura da tela do *software*, onde é possível observar a oscilação das leituras durante o ensaio.

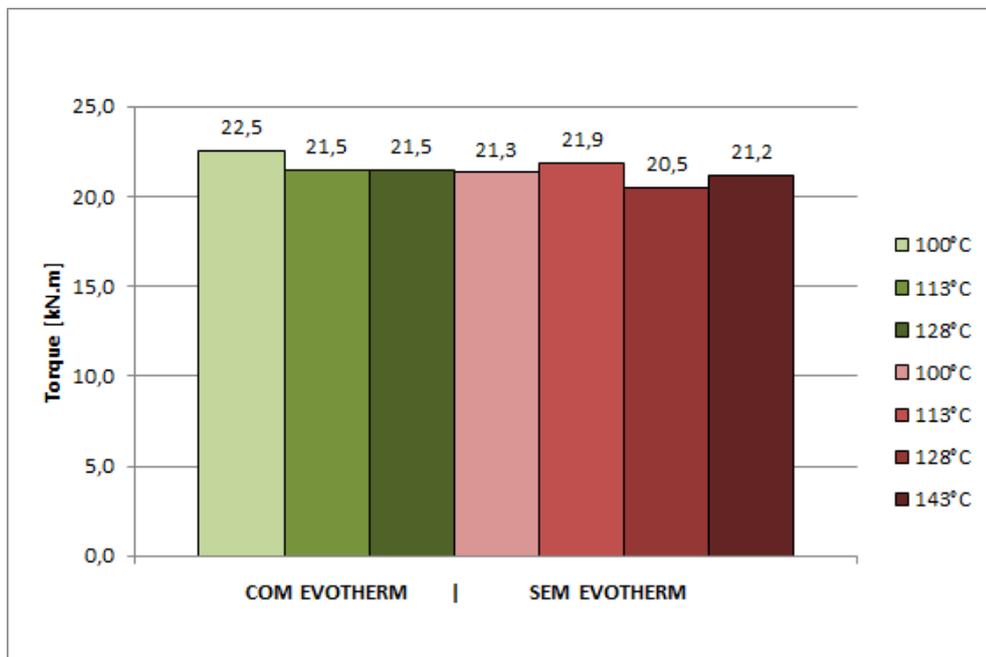
Figura 17 – Tela do *software* de aquisição dos dados de torque



(fonte: o próprio autor)

Os resultados do torque médio obtidos para todas as misturas asfálticas analisadas estão apresentados na Figura 18 a seguir.

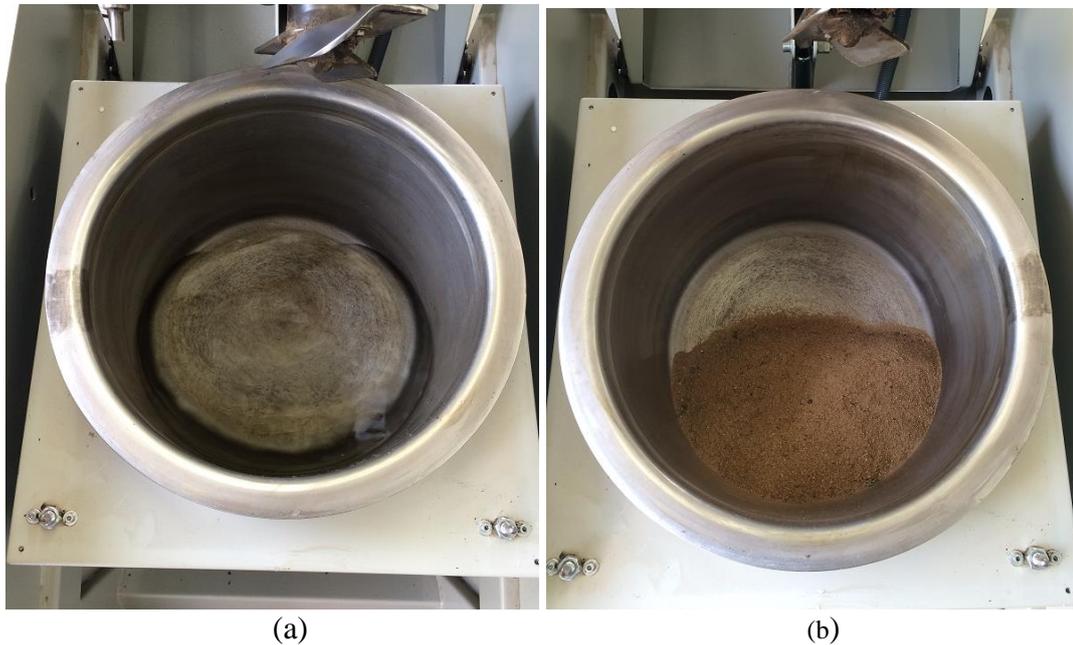
Figura 18 – Resultados do torque médio das misturas analisadas



(fonte: elaborado pelo autor)

Os resultados apresentados não apontaram nenhuma mudança significativa entre as diferentes temperaturas e entre as misturas com e sem aditivo (máximo de 22,5kN.m e mínimo de 20,5kN.m), contrariando o esperado, o que gerou uma série de dúvidas a respeito da sensibilidade do equipamento em relação a estas leituras. Na busca pelo esclarecimento destas dúvidas se resolveu realizar o mesmo processo, utilizando exatamente os mesmos parâmetros para a misturação, com materiais diferentes, como areia e água (Figura 19).

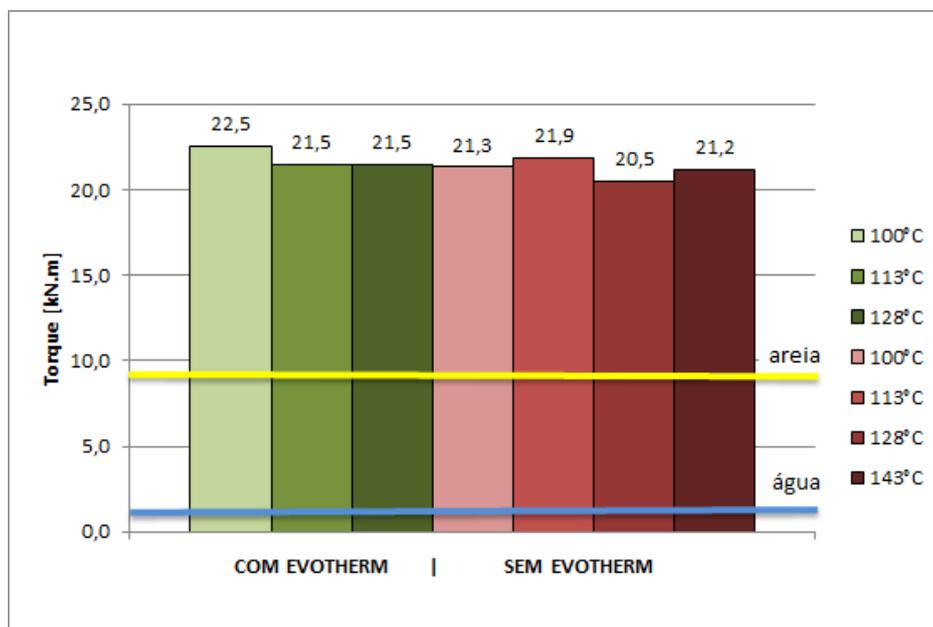
Figura 19 – Processo de mistura da água (a) e da areia (b)



(fonte: o próprio autor)

Os resultados obtidos para estes materiais (Figura 20) foram significativamente menores em relação aos resultados para as misturas asfálticas analisadas (1,67 kN.m para a água e 9,78 kN.m para areia), mostrando um bom indício de que o equipamento possui sensibilidade.

Figura 20 - Resultados do torque médio das misturas analisadas e dos materiais alternativos



(fonte: elaborado pelo autor)

Buscou-se na literatura, valores de referência para medidas de torque em misturas asfálticas, porém não foram encontrados, devido ao fato de que estas leituras irão variar de acordo com diversos fatores, como massa de material utilizado na mistura, velocidade de rotação das pás, tempo de mistura e dimensões do equipamento. Portanto, valores de torque para medição da trabalhabilidade só fazem sentido quando comparados resultados obtidos exatamente nas mesmas condições de ensaio.

7.2 VERIFICAÇÃO DO VOLUME DE VAZIOS

Para todas as misturas realizadas foram moldados corpos de prova no compactador por impacto Marshall para a verificação do volume de vazios com o intuito de relacionar o volume de vazios com a compactabilidade das misturas. A Tabela 3 a seguir apresenta os resultados obtidos.

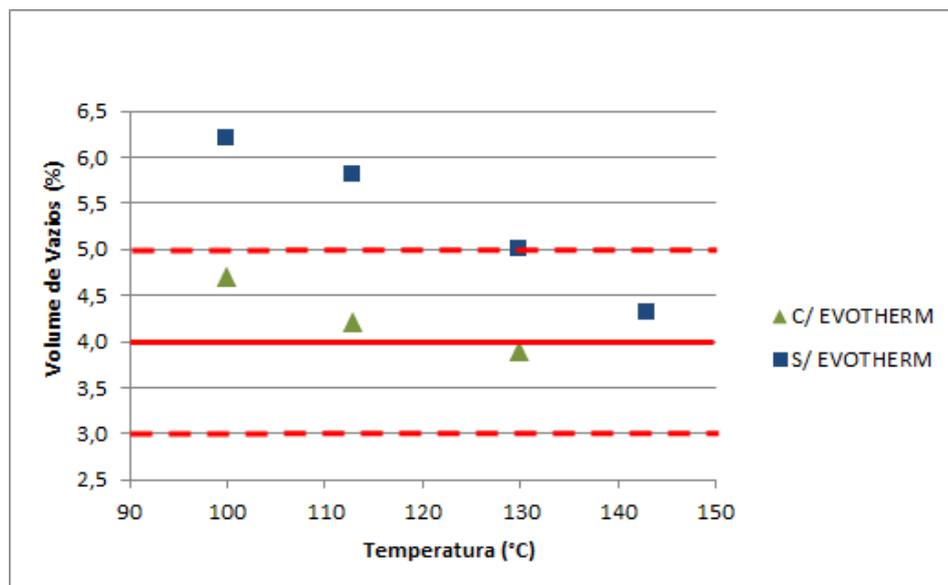
Tabela 3 – Resultados de volume de vazios das misturas estudadas

Temperatura (°C)	Volume de vazios (%)			
	C/ Evotherm	Média	S/ Evotherm	Média
100	4,85	4,7	6,34	6,2
	4,65		6,31	
	4,71		6,07	
113	4,25	4,2	6,02	5,8
	4,19		5,58	
	4,27		5,92	
128	3,91	3,9	5,12	5,0
	3,98		5,08	
	3,82		4,87	
143	-	-	4,11	4,3
	-		4,45	
	-		4,32	

(fonte: elaborado pelo autor)

De acordo com a Norma DNIT 031 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006), para a camada de rolamento de um pavimento, o volume de vazios deve estar entre 3% e 5%, sendo buscado, usualmente, o valor médio de 4%. A Figura 21 a seguir apresenta os resultados obtidos para todas as misturas asfálticas analisadas, com os limites da especificação.

Figura 21 – Resultados de volume de vazios considerando os limites para camada de rolamento



(fonte: elaborado pelo autor)

Com estes resultados pode-se observar a sensibilidade na compactação das misturas quanto à temperatura e ao efeito do aditivo. Nas mesmas temperaturas, as misturas com aditivo apresentam volume de vazios sempre inferiores quando comparado às misturas sem o aditivo, mostrando uma compactabilidade maior, devido ao acréscimo de lubrificação conferido pelo surfactante. As diferenças no Vv foram de 1,5%, 1,6% e 1,1% para as temperaturas de 100°C, 113°C e 128°C, respectivamente.

Para estas misturas, buscando obter-se o mesmo volume de vazios, em torno de 4%, pode-se dizer que a incorporação do aditivo permite uma redução de cerca de 30°C na temperatura de compactação e mistura. O que não significa que reduções ainda maiores de temperatura não seriam possíveis, pois para as reduções de temperaturas analisadas, 15°C, 30°C e 45°C, quando houve a incorporação do aditivo todas elas resultaram num volume de vazios dentro dos limites especificados pela Norma DNIT 031 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006) para camada de rolamento. Entretanto, quando se reduziu a temperatura sem a incorporação do aditivo as misturas resultaram em volumes de vazios superiores ao máximo especificado.

7.3 CONSTRUCTION DENSIFICATION INDEX – CDI

Além de corpos de prova moldados no compactador Marshall, também foram moldados corpos de prova no Compactador Giratório Superpave (CGS), afim de obter o CDI, que é um parâmetro volumétrico relacionado com a trabalhabilidade da mistura asfáltica.

A obtenção deste índice se dá através da curva de compactação obtida no CGS, sendo representado pela área entre a curva de compactação, a reta horizontal que cruza a curva de compactação no oitavo giro do compactador e a reta vertical que cruza a curva de compactação quando é atingido 92% da densidade máxima medida (MAHMOUD e BAHIA, 2004).

O oitavo giro do compactador é considerado como semelhante à “compactação” realizada pela vibroacabadora ao espalhar o material na pista, enquanto os 92% da densidade máxima medida é considerado como a compactação realizada pelos rolos compactadores. Portanto, a

área entre estes dois parâmetros e a curva de compactação é relacionada ao *Construction Densification Index*.

Um CDI maior é indicado na curva de compactação por uma distância maior entre o oitavo giro e os 92% da DMM, ou seja, uma maior dificuldade na compactação, sendo assim, valores maiores de CDI indicam uma menor trabalhabilidade, enquanto valores menores de CDI indicam uma maior trabalhabilidade. Na Tabela 4 a seguir são apresentados os resultados obtidos neste estudo.

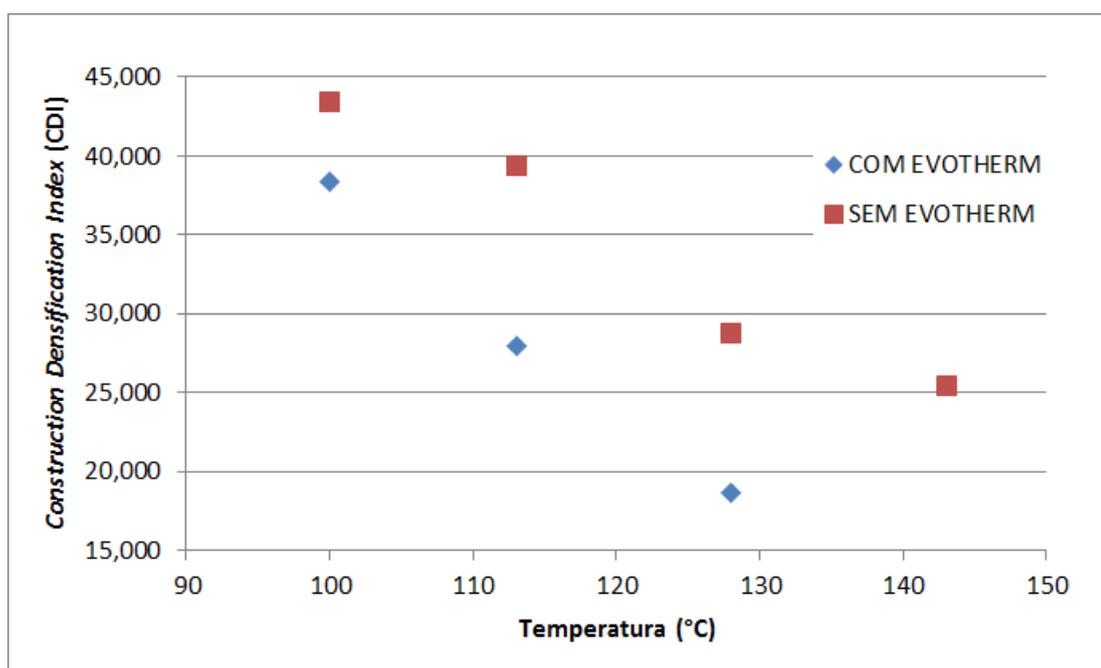
Tabela 4 – Resultados de CDI para as misturas analisadas

Temperatura (°C)	<i>Construction Densification Index (CDI)</i>			
	C/ Evotherm	Média	S/ Evotherm	Média
100	38,41	38,41	43,40	43,40
	-		-	
113	24,22	27,92	51,72	39,34
	31,61		26,95	
128	15,68	18,69	28,95	28,81
	21,69		28,66	
143	-	-	25,40	25,40
	-		-	

(fonte: elaborado pelo autor)

As análises de CDI apresentam as mesmas tendências que o volume de vazios, ou seja, quanto maior a temperatura maior a trabalhabilidade, portanto, um menor CDI, o que já era esperado, até mesmo pelas características de temperatura-viscosidade dos cimentos asfálticos. Quanto ao efeito do surfactante, pode-se observar que o seu acréscimo à mistura proporciona uma maior trabalhabilidade, fato este que também foi percebido na análise do volume de vazios. A seguir é apresentado, na Figura 22, a relação de CDI com a temperatura.

Figura 22 – Relação de CDI com a temperatura



(fonte: elaborado pelo autor)

Considerando os valores de CDI apresentados, a mistura com aditivo e temperatura de 113°C apresentou valores próximos aos valores encontrados para as misturas sem aditivo com temperaturas de 143°C e 128°C, apresentando, portanto, uma condição semelhante à temperatura de mistura quente sem o aditivo.

Estes valores de CDI apresentados são considerados baixos em relação aos encontrados na literatura, indicando uma boa trabalhabilidade. Por ser um parâmetro de densificação, o *Construction Densification Index* também é dependente do esqueleto mineral da mistura. A mistura utilizada neste estudo possui uma alta porcentagem de finos, 55% da fração pó-de-pedra, colaborando com uma trabalhabilidade maior (menor CDI).

Mahmoud e Bahia (2004) analisaram o CDI de misturas asfálticas com diferentes granulometrias e diferentes teores e tipos de ligante asfáltico, encontrando valores muito variáveis (variação de cerca de 20 vezes), reforçando a ideia de que a densificação da mistura apresenta uma forte relação de dependência com o esqueleto mineral e o tipo de ligante utilizado. Salienta-se que neste estudo todas as misturas possuíam a mesma curva granulométrica e tipo de ligante.

Contudo, considerando a variação que houve nos resultados para algumas condições testadas, talvez a amostra seja pequena para apresentar resultados mais conclusivos. Porém, o fato de o CDI ter apresentado a mesma tendência quanto à trabalhabilidade, ou compactabilidade, que o volume de vazios dá um embasamento maior para a confiabilidade da amostragem analisada.

8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas ao longo deste trabalho, considerando a gama de ensaios realizados e as análises de cada um deles. Também são sugeridos alguns itens que poderão ser analisados em trabalhos futuros, buscando complementar e contribuir para as conclusões aqui apresentadas.

8.1 CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo analisar a trabalhabilidade de misturas asfálticas mornas, tanto no processo de mistura quanto no processo de compactação, em diferentes temperaturas, considerando ou não o efeito de um aditivo surfactante, que tem como premissa um acréscimo deste fator. A partir dos resultados obtidos chegou-se às conclusões a seguir.

A diferença na trabalhabilidade entre as diferentes misturas analisadas foi percebida durante o processo de compactação, e não durante o processo de mistura, isto pode ser explicado pelo fato de o ligante ser incorporado aos agregados na mesma temperatura das misturas quentes, ou seja, na sua temperatura “ideal”, fazendo com que ele consiga recobrir completamente o agregado antes mesmo de ter sua temperatura reduzida.

Concluiu-se que o tempo em que o ligante asfáltico permanece no processo de mistura com os agregados, cerca de 8 minutos, não é suficiente para que ele tenha sua temperatura diminuída a ponto de alterar sua característica de viscosidade. Porém, o tempo que ele fica em estufa condicionando para o processo de cura, já misturado aos agregados, até o momento da compactação, cerca de 2 horas, é suficiente para ele atingir o equilíbrio de temperatura com os agregados, modificando então sua viscosidade e sendo possível observar o efeito do aditivo quanto à modificação da trabalhabilidade. Sendo assim, o processo de produção das misturas foi possível para as temperaturas reduzidas mesmo sem o aditivo, entretanto nestes casos uma compactação adequada não foi atingida. Além disso, para todas as temperaturas analisadas tanto com o uso de aditivo ou sem, não se percebeu visualmente agregados descobertos pelo ligante e nem segregação da mistura.

Ainda faltam estudos de maior envergadura acerca da trabalhabilidade medida através do torque durante o processo de mistura. Não foram encontrados valores de referência na literatura, acredita-se que isto se deve às particularidades de cada equipamento de medição. As medidas de torque servem para análises comparativas entre misturas submetidas exatamente às mesmas condições de ensaio.

O volume de vazios obtido na compactação Marshall se mostrou sensível ao efeito do aditivo e às mudanças de temperatura. Para comparação, a mistura com aditivo que apresenta o volume de vazios mais semelhante ao da mistura quente de referência é a realizada à temperatura de 113°C.

Na análise do *Construction Densification Index* observou-se que os resultados apresentaram a mesma tendência que no volume de vazios, quanto maior a temperatura, maior a trabalhabilidade. O efeito do aditivo surfactante também foi claramente observado, tendo reduzido os valores de CDI para todas as temperaturas analisadas.

Estes resultados estão de acordo com Prowell et al. (2012), que também aponta que, apesar da temperatura mais baixa, as misturas asfálticas mornas geralmente apresentam maior facilidade em se alcançar a densidade desejada, em comparação com misturas asfálticas a quente, devido ao acréscimo de lubrificação da massa asfáltica proporcionado pelo aditivo surfactante.

Sabe-se que por serem parâmetros volumétricos, tanto o CDI quanto o volume de vazios, são altamente dependentes do esqueleto mineral do concreto asfáltico e do teor de ligante utilizado, porém, como neste trabalho foi utilizado o mesmo projeto e a mesma curva granulométrica para todas as misturas, estes fatores foram isolados, para que se pudesse analisar apenas o efeito do aditivo surfactante e das variações na temperatura.

Em ambos os parâmetros obtidos da compactação, CDI e volume de vazios, a mistura morna com o surfactante que apresenta maior semelhança às características da mistura à quente, sem o surfactante, é com a temperatura de 113°C, ou seja, com uma redução de temperatura da ordem de 30°C.

8.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Analisar a trabalhabilidade de misturas mornas realizadas com outros tipos de aditivos.
- b) Calcular o *Traffic Densification Index* (TDI), para verificar se o acréscimo da trabalhabilidade não acarretará em uma mistura mais suscetível à deformações permanentes.
- c) Analisar se mesmo em temperaturas mais baixas ocorre a correta secagem dos agregados.
- d) Verificar o CDI para compactação de corpos de prova de diâmetro 10 cm, comparando aos de 15 cm.
- e) Analisar o CDI de misturas com diferentes curvas granulométricas e diferentes tipos de ligante.
- f) Analisar a trabalhabilidade através do torque de misturas asfálticas de granulometrias diferentes.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Cimentos Asfálticos de Petróleo**. Resolução ANP n° 19 de 11 de julho de 2005 – Regulamento Técnico n° 03/2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15573**: misturas asfálticas: determinação da densidade aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados. Rio de Janeiro, 2012a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15619**: misturas asfálticas: determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas. Rio de Janeiro, 2012b.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica – materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica** – formação básica para engenheiros. 1ª ed. (3ª reimpr.) Rio de Janeiro: PETROBRÁS, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO, 2008 (reimpr. 2010).

D'ANGELO, J. D.; HARM, E.; BARTOSZEK, J.; BAUMGARDNER, G.; CORRIGAN, M.; COWSERT, J.; HARMAN, T.; JAMSHIDI, M.; JONES, W.; NEWCOMB, D.; PROWELL, B.; SINES, R.; YEATON, B. **Warm-mix asphalt: european practice**. International Technology Scanning Program. Virginia: FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 031**: pavimentos flexíveis: concreto asfáltico: especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

EVOTHERM™ MISTURA ASFÁLTICA MORNA. Disponível em: <<http://www.mwv.com/pt-br/asphalt-innovations/products/evotherm>>. Acesso em: 10 de jun. 2015.

FRANK, B.; PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C.; WEST, R. C. **Warm mix asphalt (WMA) emission reductions and energy savings**. NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, 2011.

HUNER, L. M. H.; BROWN, E.R. **Effects of re-heating and construction temperature on hot mix asphalt volumetrics**. Report 01-04. Auburn: NATIONAL CENTER FOR ASPHALT TECHNOLOGY, 2001.

JOHNSTON, M. G.; BOCK, A. L.; BRITO, L. A. T.; CERATTI, J. A. P.; RIBEIRO, R. **Influência do período de condicionamento em estufa sobre os parâmetros de dosagem de misturas asfálticas mornas**. XVIII Congresso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Bariloche, Patagônia, Argentina, 2015.

KLINSKY, L. M. G.; FARIA, V. C.; BERNUCCI L. L. B.; MOTTA, R. **Revestimentos asfálticos sustentáveis**: estudo do comportamento mecânico e de redução de emissões de

misturas asfálticas mornas. Santa Isabel – São Paulo: Centro de Pesquisas Rodoviárias da Concessionária CCRNovaDutra, 2014.

MAHMOUD, A. F. F.; BAHIA, H. **Using the gyratory compactor to measure mechanical stability of asphalt mixtures**. Wisconsin Highway Research Program 0092-01-02, Madison, Wisconsin, EUA, 2004.

MELLO, D. **Avaliação da adição de evotherm no comportamento de misturas asfálticas em laboratório e no desempenho em campo**. 2012. 261 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

MOTTA, R. dos S. **Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissão de poluentes e consumo energético**. 2011. 229 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MOTTA, R.; BERNUCCI, L.; VASCONCELLOS, P. **Emissões de misturas asfálticas mornas e a quente devido à temperatura**. São Paulo: SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO PESADA DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2013. Boletim Técnico nº 5.

NASCIMENTO, L. A. H. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente**. Dissertação (mestrado) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **Mix design practices for warm mix asphalt**. Washington D. C.: Transportation Research Board, 2011. Report 691.

NEWCOMB, D. **An introduction to warm-mix asphalt**. Lanham: National Asphalt Pavement Association, 2006.

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

PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C. **Evaluation of Evotherm[®] for use in warm mix asphalt**. Auburn: National Center for Asphalt Technology, 2006. Report 06-02.