

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Amanda Peres Cunha

ANÁLISE DE COMPORTAMENTO DE MISTURA ASFÁLTICA MORNA

Goiânia, GO

2019

Amanda Peres Cunha

ANÁLISE DE COMPORTAMENTO DE MISTURA ASFÁLTICA MORNA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação de Engenharia Civil, do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: **Prof. Dr. João Carlos de Oliveira.**

Goiânia, GO

2019

C9145a Cunha, Amanda Peres.

Análise de comportamento de mistura asfáltica morna / Amanda Peres Cunha. – Goiânia : Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2019.

69f. : il.

Orientador: Prof. Dr. João Carlos de Oliveira.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso Bacharelado de Engenharia Civil, Coordenação do Bacharelado em Engenharia Civil, Departamento de Áreas Acadêmicas III, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Pavimentação. 2. Método Marshall. I. Oliveira, João Carlos de (orientador). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. III. Título.

CDD 691.96

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Lana Cristina Dias Oliveira CRB1/ 2.631
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E
TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS**

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Amanda Peres Cunha

Matrícula: 20141011050066

Título do Trabalho: Análise de comportamento de mistura asfáltica morna

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no ReDi/IFG: 04/02/2020

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☐ Sim ☒ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 04 de janeiro de 2020.

Amanda Peres Cunha

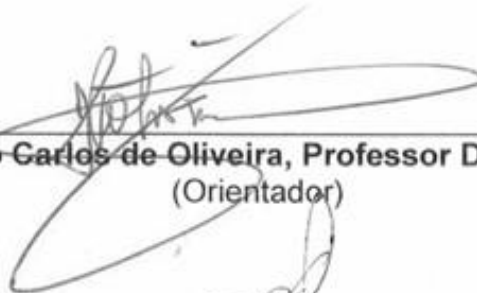
Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Amanda Peres Cunha

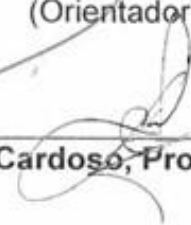
ANÁLISE DE COMPORTAMENTO MISTURA ASFÁLTICA MORNA

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação de
Engenharia Civil, do Instituto
Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Goiás, Câmpus
Goiânia, como parte dos requisitos
necessários para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia
Civil.**

Aprovado em 17 de dezembro de 2019:



João Carlos de Oliveira, Professor Dr. (IFG)
(Orientador)



Ricardo Alves Cardoso, Professor MSc. (IFG)



Wesley Pimenta Menezes, Professor Especialista (IFG)

Goiânia, GO
2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, razão de tudo na minha vida, por me permitir realizar o sonho de estudar o curso que escolhi como profissão – Engenharia Civil – em uma instituição pública de ensino.

A minha família, que é a base que me fortalece e me faz querer seguir a diante, por me fazer me sentir tão amada e protegida. Especialmente aos meus pais, Andreia e Reiner, por serem compreensivos, presentes, e sempre me ajudarem a me tornar uma mulher melhor. As minhas irmãs Natalia e Yasmin por toda a felicidade que me proporcionam.

A todos os meus professores, por me transmitirem seus conhecimentos, e por muitas vezes serem também amigos. Aprendi que nem sempre as coisas acontecem como planejamos, mas que mesmo assim devemos seguir, sem desistir. Em especial agradeço ao meu orientador professor João Carlos, pela paciência e suporte prestado, ao servidor/professor Sandro Borges, pelo companheirismo e toda ajuda oferecida.

A todos os amigos em geral, pelas palavras de incentivo, e por acreditarem que sou capaz, quando muitas vezes nem eu mesmo acredito.

A toda a turma de Pavimentação de Engenharia de Transportes, que me auxiliou em todos os experimentos até agora realizados.

A empresa Disbral - Distribuidora Brasileira de Asfalto, situada no município de Aparecida de Goiânia, pelo fornecimento do ligante e do aditivo surfactante para a realização da pesquisa.

A todos que de alguma maneira me ajudaram a chegar onde estou hoje, feliz e em paz com a pessoa que sou.

*“Cada um de nós compõe a sua história, cada
ser em si carrega o dom de ser capaz, e ser feliz”*

Almir Sater e Renato Teixeira

RESUMO

ANÁLISE DE COMPORTAMENTO DE MISTURA ASFÁLTICA MORNA

AUTORA: AMANDA PERES CUNHA

ORIENTADOR: JOÃO CARLOS DE OLIVERA

Nos últimos anos questões ambientais têm ganhado cada vez mais destaque no cenário mundial. O setor rodoviário, engajado em contribuir com a redução do consumo de combustíveis e a consequente emissão de gases de efeito estufa, passou a fomentar a criação e aplicação de tecnologias para os métodos já existentes de pavimentação. Uma das alternativas encontradas foi a redução das temperaturas de usinagem de misturas asfálticas, a partir da execução de misturas mornas, onde estas são realizadas cerca de 10°C a 50°C abaixo da temperatura convencional, sendo que a redução depende de qual técnica será usada para produzi-la. O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento advindo do uso de misturas asfálticas mornas, obtidas a partir da técnica de incorporação de aditivos químicos do tipo surfactante ao ligante asfáltico. Para tal foram formuladas duas misturas, uma à quente e outra morna, esta com redução de 30°C na temperatura de aquecimento dos agregados e da mistura, para cinco teores diferentes de cimento asfáltico de petróleo, de acordo com método Marshall. Os resultados experimentais de ambas misturas foram analisados e comparados, e indicaram desempenho mecânico semelhante, confirmando assim a viabilidade do uso das misturas asfálticas mornas, na substituição das misturas convencionais, à quente.

Palavras-chave: mistura asfáltica morna; aditivo surfactante; redução de temperatura.

ABSTRACT

BEHAVIOR ANALYSIS OF WARM MIX ASPHALT

AUTHOR: AMANDA PERES CUNHA

ADVISOR: JOÃO CARLOS DE OLIVERA

In recent years environmental issues have become increasingly prominent on the world stage. The road sector, engaged in contributing to the reduction of fuel consumption and the consequent emission of greenhouse gases, started to foster the creation and application of technologies for existing paving methods. One of the alternatives found was the reduction of the machining temperatures of asphalt mixtures, by performing warm mixtures, where they are performed about 10°C to 50°C below the conventional temperature, and the reduction depends on which technique will be used to produce over there. The objective of this research is to analyze the behavior of using warm mix asphalt obtained from the technique of incorporating surfactant chemical additives into the asphalt binder. For this purpose two mixtures were formulated, one hot and the other warm, with a reduction of 30°C in the heating temperature of the aggregates and the mixture, for five different levels of petroleum asphalt cement, according to Marshall method. Experimental results of both mixtures were analyzed and compared, and indicated similar mechanical performance, thus confirming the feasibility of using warm mix asphalt to replace conventional hot mixtures.

Keywords: warm mix asphalt; surfactant additive; temperature reduction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Camadas dos pavimentos asfálticos.....	15
Figura 2 – Classificação das misturas asfálticas em função de temperaturas típicas de usinagem.....	20
Figura 3 – Classificação das misturas asfálticas de acordo com sua porosidade.....	20
Figura 4 – Percentual estimado da produção total de MAMs em cada estado americano, 2009-2017.....	23
Figura 5 – Toneladas de misturas mornas utilizadas na Noruega, de 2000 a 2014.....	25
Figura 6 – Fumos asfálticos liberados pela mistura a quente (esquerda) e pela mistura morna (direita) quando da aplicação do material em pista.....	32
Figura 7 – Tecnologia com formação de espuma.....	33
Figura 8 – Tecnologia com aditivos surfactantes.....	34
Figura 9 – Tecnologia com aditivos orgânicos/ceras.....	35
Figura 10 – Surfactante Evotherm® G3.....	41
Figura 11 – Compactador Marshall.....	43
Figura 12 – Curvas granulométricas dos agregados.....	46
Figura 13 – Curva de viscosidade do CAP 50/70.....	47
Figura 14 – Ensaio visual de adesividade.....	48
Figura 15 – Curva de viscosidade do CAP 50/70 com aditivo surfactante.....	49
Figura 16 – Curva granulométrica.....	50
Figura 17 – Ruptura do CP.....	52
Figura 18 – Massa específica máxima teórica x teor de ligante.....	53
Figura 19 – Massa específica aparente x teor de ligante.....	54
Figura 20 – Volume de vazios x teor de ligante.....	54
Figura 21 – Vazios do agregado mineral x teor de ligante.....	55
Figura 22 – Relação betume/vazios x teor de ligante.....	55
Figura 23 – Estabilidade x teor de ligante.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Temperaturas de produção e compactação obtidas por Filho (2013).....	26
Tabela 2 – Temperaturas de produção e compactação obtidas por Merighi (2015).....	27
Tabela 3 – Temperaturas de produção e compactação obtidas por Motta (2011).....	28
Tabela 4 – Redução em porcentagem nas emissões de gases com uso de mistura morna.....	30
Tabela 5 – Características do aditivo surfactante Evotherm® G3.....	42
Tabela 6 – Distribuição granulométrica dos agregados.....	45
Tabela 7 – Caracterização dos agregados.....	46
Tabela 8 – Distribuição granulométrica para as misturas asfálticas.....	50
Tabela 9 – Temperaturas de aquecimento e compactação.....	51
Tabela 10 – Parâmetros dos CPs da mistura à quente.....	52
Tabela 11 – Parâmetros dos CPs da mistura morna.....	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Temperaturas de produção e compactação obtidas por Pérez (2013).....	29
Quadro 2 – Temperaturas de produção e compactação obtidas por Budny (2012).....	29
Quadro 3 – Valores limites das características da mistura com CAP para o método Marshall.....	37
Quadro 4 – Valores limites dos vazios do agregado mineral da mistura com CAP para o método Marshall.....	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADP	Asfaltos diluídos
AMB	Asfaltos modificados por borracha de pneus
AMP	Asfaltos modificados por polímero
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
AR	Agentes rejuvenescedores
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CPs	Corpos de prova
DMC	Dimensão máxima característica
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EAP	Emulsões asfálticas
EAPA	European Asphalt Pavement Association
EN	European Norm
FHWA	Federal Highway Administration
GEE	Gases de efeito estufa
GTM	Gyratory testing machine
HPAs	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
MAMs	Misturas asfálticas mornas
MTPA	Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil
NAPA	National Asphalt Pavement Association
NBR	Norma Brasileira
NF	Norme Française
RAP	Reclaimed Asphalt Paving
RBV	Relação betume-vazios
RT	Resistência a tração
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavement
VAM	Vazios do agregado mineral
VCB	Vazios com betume
VV	Volume de vazios
WMA	Warm Mix Asphalt
WMA TWG	WMA Technical Working Group

LISTA DE SÍMBOLOS

€	euro
°C	graus Celsius
μm	micrômetro
cm	centímetro
CO	monóxido de carbono
CO ₂	dióxido de carbono
kgf/cm ²	quilograma força por centímetro quadrado
mm	milímetro
MPa	megapascal
N	newton
NO _x	óxidos de nitrogênio
Prup	carga de compressão de ruptura
SO ₂	dióxido de enxofre
t	tonelada
VOC	compostos orgânicos voláteis
σ _R	tensão de tração

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 JUSTIFICATIVA	18
1.2 OBJETIVOS	19
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2 REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1 O PAVIMENTO	21
2.2 LIGANTES ASFÁLTICOS	22
2.3 AGREGADOS	24
2.4 MISTURAS ASFÁLTICAS	24
2.5 MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS	27
2.5.1 Breve histórico	27
2.5.2 Pesquisas desenvolvidas no Brasil	31
2.5.3 Benefícios das misturas mornas	36
2.5.4 Tecnologias utilizadas na produção das misturas mornas	38
2.5.4.1 Formação de espuma	38
2.5.4.2 Aditivos surfactantes	40
2.5.4.3 Aditivos orgânicos/ceras	41
2.6 MÉTODOS DE DOSAGEM	42
2.6.1 Método Marshall	43
2.6.2 Método Superpave	44
3 MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1 MATERIAIS	46
3.1.1 Ligante Asfáltico	46
3.1.2 Agregados	46
3.1.3 Aditivo surfactante	47
3.2 MÉTODOS	48
3.2.1 Composição granulométrica	48
3.2.2 Temperatura de mistura e compactação	48
3.2.3 Dosagem Marshall	49
3.2.4 Resistência a tração por compressão diametral	50
4 RESULTADOS E ANÁLISES	51
4.1 AGREGADOS	51

4.2 LIGANTE ASFÁLTICO	53
4.3 ADITIVO SURFACTANTE	54
4.4 MISTURA ASFÁLTICA	55
5 CONCLUSÃO	64
REFERÊNCIAS.....	66

1 INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário é o principal modal do Brasil, integrando um sistema logístico por onde circula 60,0% de todas as cargas movidas e 90,0% dos passageiros em território nacional. Essa modalidade ganhou importância desde o início da república, quando os governos começaram a priorizar o transporte rodoviário, em detrimento a outros tipos de transporte, tais como o ferroviário e o fluvial. De acordo com dados do anuário de 2018 do Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil (MTPA), somente cerca de 12,4% das rodovias brasileiras são pavimentadas, enfrentando ainda graves problemas com a baixa qualidade da infraestrutura.

Nos últimos anos questões ambientais têm ganhado cada vez mais destaque no cenário mundial. Desde a criação do Protocolo de Kyoto em 1997, os variados setores da economia e sociedade buscam alternativas para o desenvolvimento de condutas corretivas e preventivas, que possam diminuir os impactos das ações antrópicas sobre meio ambiente. Uma das maiores problemáticas neste contexto, está relacionada a redução da emissão de gases de efeito estufa (GEE), sendo estes apontados como os principais responsáveis pelo aquecimento global (MOTTA, 2011).

Um dos principais vetores dos GEE são os produtos derivados do petróleo. Os produtos asfálticos empregados em pavimentação quando aquecidos, emitem gases e vapores que são prejudiciais à saúde humana. Sendo assim, além da preocupação ambiental, há também a preocupação em torno da saúde ocupacional, pois os vapores liberados após se resfriarem condensam, gerando o fumo de asfalto. Os vapores não mudam de fase imediatamente, fazendo com que os trabalhadores fiquem susceptíveis tanto ao vapor, quanto ao fumo. Alguns vapores podem condensar diretamente à fase líquida, formando um líquido viscoso, com algumas partículas sólidas. Em temperaturas ambientes, a exposição acontece somente aos líquidos e vapores, não ao fumo (NIOSH, 2000). Ou seja, quanto maiores temperaturas, maiores quantidades de emissões de gases.

Lopes (2008) reforça que a exposição dos trabalhadores às emissões de misturas de asfalto em pavimentação de ruas e estradas, ocorre não somente por gases e vapores, mas também por meio de material sólido, chamado particulado. Em comum todos esses resíduos gerados são prejudiciais à saúde do indivíduo. O material particulado em geral apresenta tamanho extremamente reduzido (considerado como

minúsculo, $< 2,5 \mu\text{m}$). Sendo assim além de sua inalação superficial ser facilitada, essas partículas também podem atingir as partes mais profundas dos pulmões, diminuindo o trabalho respiratório e gerando processos inflamatórios, alguns estudos revelaram que os compostos químicos presentes nos particulados podem se diluir nos alvéolos e caírem na circulação sanguínea.

Aliado à necessidade de contribuir com as questões ambientais e com saúde ocupacional, o setor rodoviário, passou a fomentar a criação e aplicação de tecnologias para os métodos já existentes de pavimentação, sendo uma delas a redução das temperaturas de usinagem de misturas asfálticas, e a consequente diminuição da emissão dos GEE (MOTTA, 2011).

Buscando essa redução de temperatura, várias técnicas de produção foram desenvolvidas na Europa e nos Estados Unidos, nas últimas décadas, tais como: uso de aditivos químicos e orgânicos, ceras, zeólitas naturais e artificiais, que resultaram na produção de novos tipos de misturas, denominadas misturas asfálticas mornas (MAMs), sendo estas uma alternativa em substituição às misturas asfálticas à quente. A diferença básica entre esses dois tipos de mistura está na temperatura com que cada uma é produzida. As misturas mornas são executadas cerca de 10°C a 50°C abaixo da temperatura convencional, sendo que a redução depende de qual técnica será usada para produzi-la (BUDNY, 2012; WEST et al., 2014).

Todos os processos de obtenção das MAMs visam que a mistura atinja bons níveis de trabalhabilidade mesmo em temperaturas menores (PÉREZ, 2013). Quando se reduz a temperatura em todas, ou pelo menos uma das etapas de preparação da mistura (aquecimento dos agregados, produção e compactação), os benefícios já são iminentes, há diminuição na emissão de fumos e gases, nas usinas e em campo, melhorando a qualidade do ar para os trabalhadores, e população em geral (BUDNY, 2012).

1.1 JUSTIFICATIVA

A redução na temperatura de usinagem das misturas asfálticas é bastante relevante em vários aspectos. A diminuição da emissão de GEE e fumos para a atmosfera, aliadas ao menor consumo de energia, são passos importantes para se consolidar uma nova realidade de transformação no setor ambiental. Ressalta-se também que a

performance atingida por misturas menos quentes que as convencionais, resultam em uma melhor trabalhabilidade e consequentemente melhor compactação do pavimento, além de facilitar a aplicação em regiões com climas mais frios, e serem menos agressivas ao processo de envelhecimento do asfalto, favorecendo a resistência contra quebra (NEWCOMB, 2006).

De acordo com Motta (2011) a literatura apresenta que menores temperaturas de mistura e compactação, com uso de misturas mornas, traz de maneira geral, benefícios importantes relacionados ao meio ambiente, à exposição de trabalhadores aos resíduos gerados no processo de aquecimento e à qualidade do substrato final. Nesse tipo de mistura a quantidade de combustível necessário ao processo de usinagem é menor, sendo assim, há também a redução de custos voltados ao consumo energético (PÉREZ, 2013).

Por tudo já apresentado, é necessário se desenvolver mais pesquisas relacionadas às misturas asfálticas mornas e suas propriedades, para comprovar a legitimidade de seu desempenho e reforçar os vários benefícios ligados ao seu uso. De maneira que gradativamente a utilização desse tipo de mistura seja disseminada no meio acadêmico, e torne mais comum sua aplicação.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é analisar o comportamento advindo do uso de misturas asfálticas mornas, com base no estudo de pesquisas e experiências já realizadas, e no desenvolvimento de ensaios experimentais de laboratório com uma mistura asfáltica morna dosada com agregados da região metropolitana de Goiânia.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para se atingir o objetivo geral do trabalho, foram seguidos os procedimentos descritos a seguir:

- Dosagem de uma mistura asfáltica à quente utilizando concreto asfáltico e agregados da região metropolitana de Goiânia;
- Definição da redução da temperatura da mistura asfáltica morna estudada, com o uso de aditivo surfactante, em relação a mistura à quente;

- Dosagem de uma mistura asfáltica morna utilizando agregados da região metropolitana de Goiânia;
- Comparação dos resultados das propriedades de desempenho obtidas para a mistura morna, com as determinadas para a mistura à quente.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos. No capítulo 01 está apresentada uma breve introdução, contextualizando o tema abordado, de maneira a justificar a relevância da pesquisa, contemplando também os objetivos que devem ser atingidos.

No segundo capítulo foi desenvolvida uma revisão da literatura acerca de pavimentos asfálticos, discorrendo-se sobre a composição de misturas asfálticas à quente e mornas, trazendo informações de experiências e resultados de pesquisas realizadas nesse âmbito por diversos autores, para servirem de parâmetro aos resultados que serão obtidos experimentalmente em laboratório.

O capítulo 03 discorre sobre os materiais e métodos utilizados na realização da pesquisa, o desenvolvimento dos ensaios laboratoriais das misturas à quente e mornas estudadas, especificando as variáveis que foram analisadas em ambas as misturas.

No capítulo 04 estão apresentados os resultados decorrentes do programa experimental e as análises dos mesmos, comparando o desempenho das misturas asfálticas estudadas.

Por fim, no último e quinto capítulo estão apresentadas as conclusões obtidas, e sugestões para a realização de pesquisas futuras.

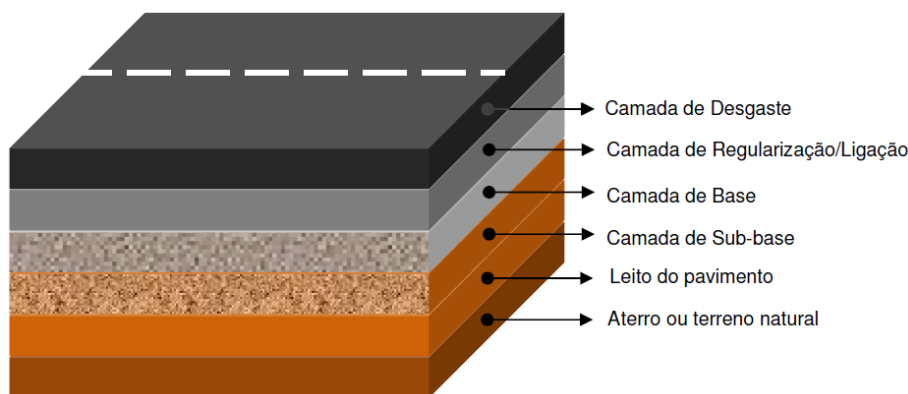
2 REVISÃO DA LITERATURA

No presente capítulo estão apresentados conceitos e elementos referentes ao pavimento, ligantes asfálticos, agregados e às misturas asfálticas.

2.1 O PAVIMENTO

O pavimento rodoviário segundo Bernucci et al. (2010) é uma estrutura formada por diversas camadas heterogêneas (Figura 1), com suas respectivas espessuras, construída sobre a superfície de fundação, após terraplanagem. Ele deve resistir aos esforços a que é solicitado, gerados com o trânsito de veículos e a ação de intempéries. Os pavimentos asfálticos, ou flexíveis, são constituídos de ligantes asfálticos e agregados, e apresentam quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito. Neste trabalho, o foco será no material do revestimento, que é a camada superior do pavimento, que se encontra em contato direto com as rodas dos automóveis. O revestimento é responsável por impermeabilizar o pavimento, e deve fornecer aos usuários melhores condições de rolamento para o tráfego de veículos, com segurança e conforto.

Figura 1 – Camadas dos pavimentos asfálticos



Fonte: PEREIRA, 2009

Um dos principais parâmetros a serem observados no dimensionamento de pavimentos rodoviários é a sua resistência, uma vez que este está sujeito à ação de diversos fatores externos, tanto químicos, físicos e mecânicos, que alteram sua capacidade de resistência ao longo do tempo. A temperatura e o tráfego de veículos

são elementos essenciais na determinação do quanto um pavimento deve resistir aos desgastes e esforços (MENSCH, 2017).

Uma mistura asfáltica é a constituída de agregados e ligantes asfálticos, e caso necessário, aditivos complementares (BERNUCCI et al., 2010; GENNESSEaux, 2015). Nela, os agregados correspondem a uma média de 95% de sua composição total, sendo os 5% restantes referentes ao ligante asfáltico. O desempenho correto de uma mistura asfáltica é definido pela engenharia em parâmetros de tempo, que pode ser medido em anos ou décadas.

2.2 LIGANTES ASFÁLTICOS

Conforme Bernucci et al. (2010) o ligante asfáltico empregado na pavimentação rodoviária é caracterizado como um ligante betuminoso, líquido em elevadas temperaturas, viscoelástico no ambiente, e semi-sólido a baixas temperaturas. Ele é gerado através da destilação do petróleo, e por suas propriedades pode ser classificado como um adesivo termoviscoelástico, impermeável a água e pouco reativo. Seus solventes mais comuns são: benzeno, tricloroetileno e bissulfeto de carbono.

A composição química de um cimento asfáltico depende principalmente da fonte do seu petróleo bruto (ou cru) e, em menor proporção, das técnicas de fracionamento utilizadas. Cada petróleo conduz a diferentes quantidades de resíduos de cimentos asfálticos e outras frações destiláveis. Devido a sua complexidade química, não se pode estabelecer uma fórmula química precisa do ligante asfáltico (GENNESSEaux, 2015, p. 25).

Ainda no contexto da caracterização do ligante asfáltico, Carvalho (2018) o define como sendo um material com função aglomerante, que por sua grande adesividade, proporciona forte junção dos agregados entre si, trazendo flexibilidade controlável ao pavimento. De acordo com Bernucci et al. (2010) e Pizzorno (2010), os principais ligantes asfálticos presentes no mercado brasileiro são:

- Cimentos asfálticos de petróleo (CAP): são compostos basicamente de hidrocarbonetos e de heteroátomos (principalmente oxigênio, nitrogênio, enxofre e metais);

- Asfaltos diluídos de petróleo (ADP): permite que a viscosidade correta do CAP para o recobrimento dos agregados, seja atingida sem a necessidade de aquecimento do ligante. Os ADP são o resultado da adição de um agente diluente volátil (responsável em diminuir a viscosidade) ao asfalto;
- Emulsões asfálticas de petróleo (EAP): assim como nos ADP, a partir do uso desse produto não é necessário o aquecimento do ligante, sendo possível sua utilização em temperatura ambiental. As EAP são constituídas pela dispersão de asfalto (através de emulsificante) e água;
- Asfaltos oxidados ou soprados para uso industrial: consistem na aplicação de uma corrente de ar ao asfalto aquecido. Geralmente são utilizados como impermeabilizantes e películas protetoras.
- Asfaltos modificados por polímero (AMP) / borracha de pneus (AMB): o polímero melhora o desempenho do ligante, por ser um modificador resistente ao desgaste físico nas temperaturas padrões de utilização do asfalto, e para as condições adversas de clima, apresenta-se como uma solução para os problemas decorrentes dos grandes gradientes térmicos;
- Agentes rejuvenescedores (AR): permitem a reciclagem a quente ou a frio do ligante, uma vez que funcionam como repositores de frações maltênicas e propriedades que foram afetadas com o envelhecimento do ligante, recuperando sua flexibilidade.

O CAP é considerado a base da maioria de todos os produtos, e é comumente denominado de “asfalto”. Segundo a especificação de Serviço ES 031 (DNIT, 2006) o cimento asfáltico de petróleo é o asfalto feito com finalidade de atender aos requisitos para emprego direto na construção de pavimentos, devendo assim possuir qualidades e consistências próprias para tal aplicação. Ele não pode conter água, deve ser homogêneo, e quando aquecido a 175°C não pode apresentar espuma. No Brasil os cimentos asfálticos de petróleo são classificados conforme penetração: CAP-30/45, CAP-50/70, CAP-85/100 e CAP-150/200.

Na França, são classificados conforme norma francesa e norma europeia NF EN 12591 em: 20/30, 35/50, 50/70, 70/100 e 160/220 também a partir de sua penetração, que pode ser definida através de ensaio laboratorial. Um ensaio simples e empírico,

no qual uma agulha padrão penetra cerca quantidade de ligante em determinado período de tempo, em temperatura de 25°C (GENNESSEAUX, 2015).

2.3 AGREGADOS

O termo agregado pela NBR 9935 (ABNT, 2011, p.6) é definido como “material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa ou concreto”. Para Bernucci et al. (2010) agregado é uma ampla definição para materiais como areias, pedregulhos e rochas, podendo estes serem naturais ou artificiais.

O agregado escolhido para compor uma mistura asfáltica deve atender aos requisitos de desempenho necessários para resistir aos esforços solicitantes na superfície e interior do pavimento. O modo como as partículas de agregado são produzidas, sua ligação umas com as outras após unidas, e as condições de campo onde atuarão, é o que define seu comportamento final no revestimento. Os grãos devem ser homogêneos, de modo que permita o intertravamento granular e atenda os parâmetros de resistência ao cisalhamento. (BERNUCCI et al., 2010; GENNESSEAUX, 2015).

É preferível a utilização de agregados com maior angularidade, uma vez que o atrito gerado no esqueleto granular será maior, aumentando também a aderência destes com os pneus dos veículos. Para que seja formada a classe de grãos, os agregados para misturas betuminosas podem passar por diferentes processos, tais como: peneiramento, esmagamento, varredura e lavagem. Uma classe é formada a partir do intervalo de menor e maior dimensão diametral, a associação de diferentes classes permite que se forme uma curva granulométrica, que caracteriza um esqueleto mineral (SOMÉ, 2013).

2.4 MISTURAS ASFÁLTICAS

As misturas asfálticas à quente são obtidas a partir da junção do agregado, com o ligante asfáltico, ambos aquecidos. O ligante deve possuir uma temperatura que o assegure de revestir por completo o agregado, e permitir que a mistura seja devidamente compactada, após as etapas de armazenagem, transporte e aplicação em pista (PROWELL, 2014). Atualmente a técnica de Concreto betuminoso usinado a

quente (CBUQ) é a mais utilizada mundialmente, na execução de pavimentos com CAP.

Segundo Pérez (2013) as misturas asfálticas apresentam três níveis de classificação diferentes de acordo com sua temperatura: a de mistura e compactação para trabalhabilidade dos agregados e do asfalto; de amolecimento do CAP e de construção do pavimento.

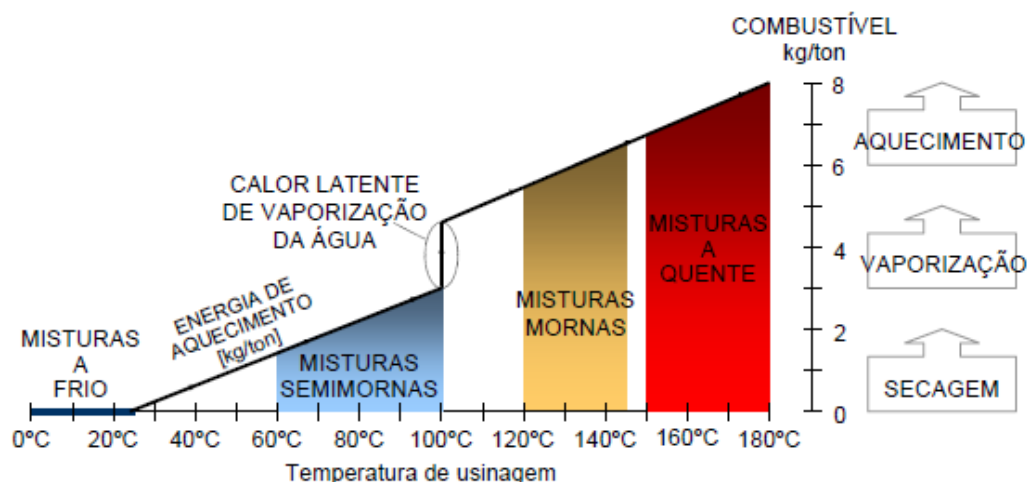
As misturas asfálticas em relação a sua temperatura são classificadas em quatro diferentes tipos: a quente; mornas; semi-mornas e a frio. As misturas a quente são definidas a partir da temperatura de seu agregado, que possui cerca de 10 a 15°C acima da temperatura do ligante, sendo que esta não pode exceder 177°C, e é a mistura comumente utilizada em pavimentos. As misturas a frio por sua vez, são usinadas em temperatura ambiente, dessa maneira não requerem aquecimento do agregado, e utilizam emulsão asfáltica (BERNUCCI et al., 2010; DNIT, 2006; MOTTA 2011).

Os valores referenciais definidos por EAPA (2014) e Lancaster (2015) para cada tipo de mistura de acordo com sua temperatura é:

- Misturas a quente: usinadas e misturadas entre 120 e 190°C;
- Misturas mornas: usinadas e misturadas entre 100 e 150°C;
- Misturas semi-mornas: produzidas entre 70 e 100°C;
- Misturas frias: não apresentam necessidade de aquecer o agregado, utilizam as tecnologias de emulsão e espuma asfáltica.

De acordo com D'Angelo et al. (2008) as misturas asfálticas podem ser organizadas a partir da variação de sua temperatura de usinagem, a Figura 2 mostra o aumento gradual na temperatura de misturas, que variam de frias a quentes. Observa-se que as MAMs são produzidas cerca de 20 a 30°C a abaixo das misturas quentes, e que na diferenciação das misturas mornas para as semi-mornas, o critério se baseia no marco dos 100°C, abaixo dessa temperatura a mistura é considerada semi-morna.

Figura 2 – Classificação das misturas asfálticas em função de temperaturas típicas de usinagem

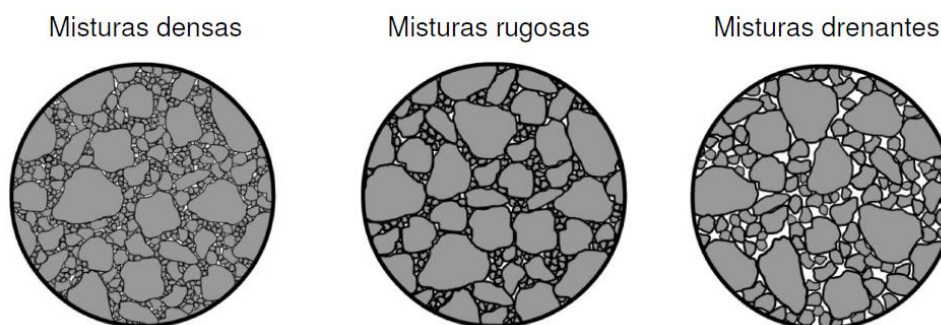


Fonte: MOTTA, 2011

Observa-se também que quanto maior a temperatura de usinagem, maior será o consumo energético, sendo que as etapas de secagem e vaporização da água presentes nos materiais, necessitam de grande quantidade de energia. O aquecimento é responsável por diminuir a viscosidade do ligante, manter a temperatura da mistura asfáltica e secar os agregados pétreos (MOTTA, 2011).

Segundo Bernucci et al. (2010) e Pereira (2009) as misturas asfálticas à quente no que concerne à sua porosidade, pela graduação dos agregados e fíler, podem ser classificadas conforme ilustrado pela Figura 3 em três tipos diferentes:

Figura 3 – Classificação das misturas asfálticas de acordo com sua porosidade



Fonte: PEREIRA, 2009

- Mistura densa/graduação densa: caracterizada por possuir poucos vazios, com curva granulométrica contínua e bem graduada. Os agregados de menores

dimensões preenchem os espaços gerados pelos de maior dimensão, impedindo a infiltração da água para as camadas inferiores do pavimento;

- Mistura drenante/graduação aberta: como o nome já propõe, sua função é permitir a infiltração de água, por isso possui esqueleto mineral com alto volume de vazios com ar, e consequentemente alta permeabilidade. Sua curva granulométrica é uniforme e mal graduada, sendo que praticamente não há presença de material fino;
- Mistura rugosa/graduação descontínua: é a ponderação entre uma mistura densa e drenante. Sua granulometria apresenta grãos com maiores dimensões se sobrepondo aos intermediários, mas também há a presença de finos (menores que 0,075mm). A passagem de água é possível, porém em menores proporções que nas misturas drenantes.

2.5 MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS

As misturas asfálticas mornas possuem as mesmas especificações de dosagem das misturas à quente, porém são produzidas e lançadas em campo com temperaturas inferiores, em cerca de 30 a 60°C de variação. A redução na temperatura de produção, é obtida a partir da redução na temperatura de aquecimento dos agregados. A escolha da temperatura varia de acordo com as propriedades do asfalto e ao tipo de processo utilizado. A técnica de misturas mornas permite que o agregado seja completamente revestido pelo ligante asfáltico, ajudando assim também, na compactação (BITUME QUÉBEC, 2013; DNIT 2018).

Como especificado por DNIT (2018) a temperatura mínima a ser empregada deve ser analisada através do estudo de corpos de prova moldados em laboratório, de maneira que durante a dosagem o comportamento mecânico da mistura irá delimitar os limites de redução. A resistência mecânica da mistura morna deve ser próxima ou superior aos resultados da mistura convencional.

2.5.1 Breve histórico

Segundo Prowell, Hurley e Frank (2012) os primeiros estudos sobre MAMs foram desenvolvidos na Europa, especialmente na Noruega e Alemanha, a partir de 1995. A maior preocupação estava em torno dos limites de exposição dos trabalhadores ao

fumo asfáltico liberado por misturas quentes. O Ministério do Trabalho e Relações Sociais Alemão percebeu em 1996 que certos tipos de asfaltos eram produzidos em temperaturas superiores as comumente utilizadas pelos Estados Unidos, liberando assim níveis ainda maiores de gases. A partir dessa problemática, foi criado o Fórum Betuminoso Alemão, uma parceria do governo, das indústrias e dos trabalhadores.

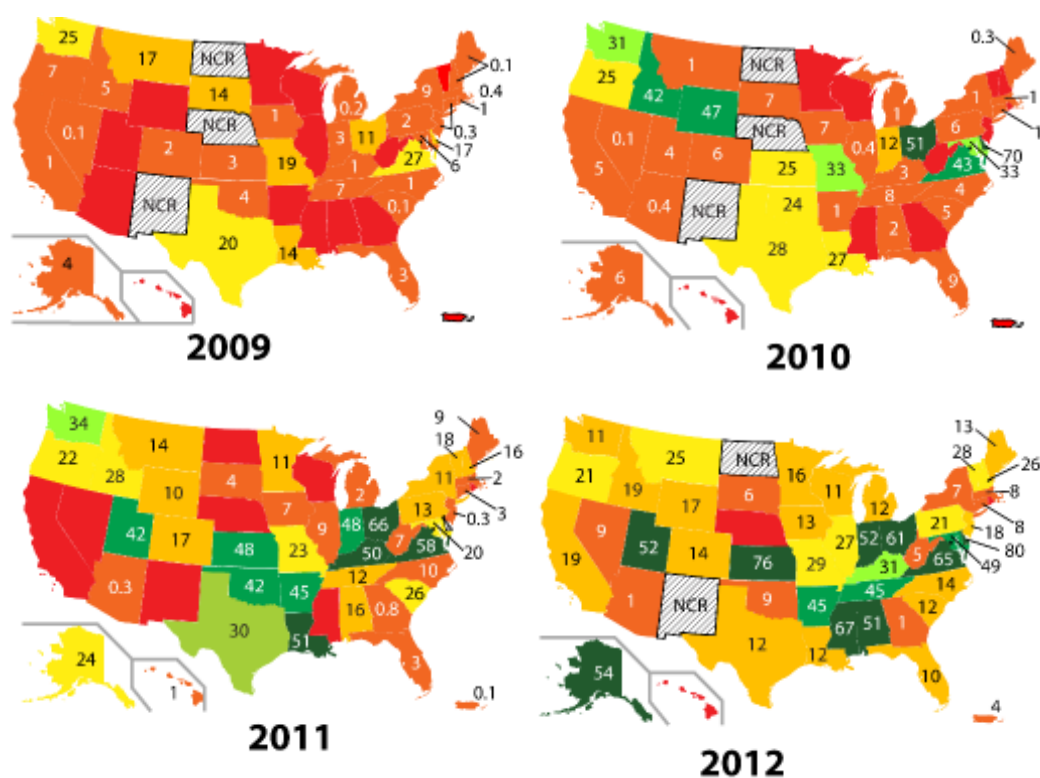
O desenvolvimento das MAMs se tornou ainda mais importante a partir da instauração do Protocolo de Kyoto, em 1997, onde questões ambientais ganharam destaque. Os países pertencentes à União Europeia passaram a ter metas sobre a redução na emissão de GEE, assim os benefícios da diminuição na temperatura de aplicação dos pavimentos quentes, eram iminentes. O Fórum Betuminoso Alemão propôs então que as temperaturas das misturas asfálticas fossem reduzidas, para atender tanto as exigências ambientais, quanto a preocupação da exposição humana aos vapores liberados (PROWELL; HURLEY; FRANK, 2012).

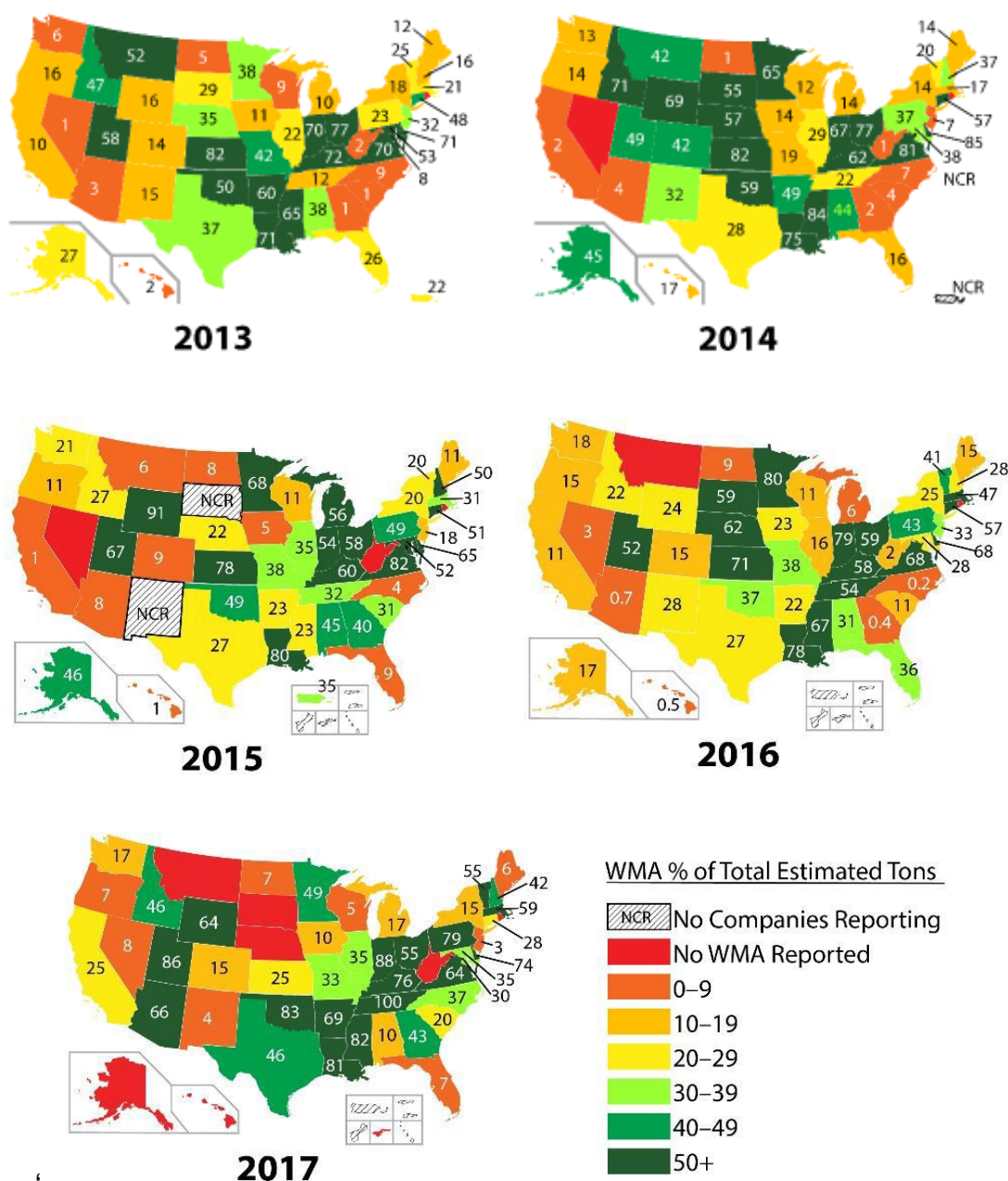
De acordo com Prowell (2007), a aplicação dessa tecnologia nos Estados Unidos, iniciou-se em 2002 quando o tema começou a ser discutido pelo National Asphalt Pavement Association (NAPA), que introduziu etapas no desenvolvimento de misturas asfálticas mornas para o país. Em 2005 a NAPA juntamente com o Federal Highway Administration (FHWA) formaram o WMA Technical Working Group (WMA TWG) que tinha como objetivo implementar de forma correta as coletas e análises de dados, para a geração de métodos genéricos de especificação. Em 2007, The American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) e o FHWA organizaram uma equipe de treze especialistas, para viajarem até a Europa e conhecerem as indústrias, os fornecedores e os contratantes pioneiros no desenvolvimento das misturas asfálticas mornas, e também checarem a performance dos pavimentos mais antigos construídos a partir desta tecnologia. Eles visitaram quatro países, Noruega, Alemanha, França e Bélgica em maio de 2007 durante a primavera europeia, e avaliaram as diversas tecnologias com que as MAMs eram fabricadas e compactadas. A equipe obteve um amplo conhecimento a respeito de como e porque as indústrias estavam empregando essas tecnologias, comparando com os processos já utilizados nos Estados Unidos, e como tais fatores poderiam afetar a implementação em seu país de origem.

Através dos dados levantados, a equipe concordou que a ampliação do uso dessa tecnologia seria viável aos Estados Unidos. Assim, várias metas de implementação foram desenvolvidas, entre elas: realizar testes de performance para a criação de normas específicas voltadas a essa técnica; estimular a divulgação do tema por meio de apresentações, artigos e congressos; fomentação de pesquisas para ajustar e melhorar o desempenho das misturas mornas (PROWELL, 2007).

Os resultados da visita foram bastante expressivos, a Figura 4 mostra que houve um rápido crescimento na quantidade de empresas que passaram a utilizar MAMs entre 2009 e 2011; entre 2011 e 2013, e também em 2015 houve um aumento moderado, em 2014 e 2016 um pequeno decréscimo no total de toneladas produzidas, mesmo mais estados intensificando uso dessa tecnologia; em 2017 o aumento registrado foi de cerca de 40%. Mesmo com alterações ano a ano, no geral, de 2009 a 2017 a tendência foi de crescimento do uso de misturas asfálticas mornas no país (NAPA, 2014, 2017).

Figura 4 – Percentual estimado da produção total de MAMs em cada estado americano, 2009-2017





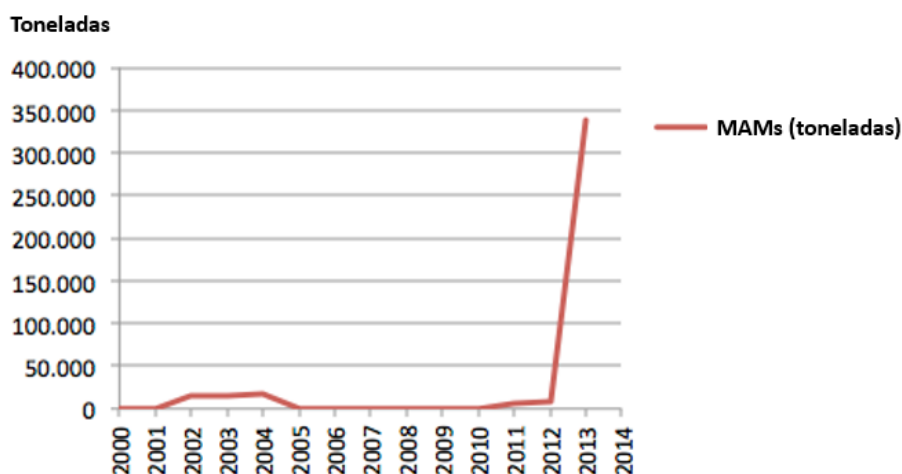
Fonte: Modificado de NAPA, 2014, 2017

Já a Europa por sua vez, continuou a empregar e melhorar a tecnologia em vários países. Na Noruega, a partir de 2010 foi iniciado um projeto chamado “Asfalto de Baixa Temperatura – LTA 2011” afim de estudar a consequência da pavimentação na saúde dos trabalhadores e a qualidade do substrato final. Foram realizadas onze seções experimentais de pavimento a partir de MAMs, com seis técnicas diferentes, a temperatura de produção da mistura foi reduzida em 30°C. O desempenho de cada trecho foi comparado com uma seção de referência de mistura quente. As conclusões do estudo foram: houve redução de 50% na produção de fumos de asfalto, a carga de

trabalho é praticamente a mesma para os trabalhadores, e quanto a qualidade do revestimento, não houve diferenças quanto aos níveis de vazios de ar, uniformidade e sulcos, entre as MAMs e as convencionais (EAPA, 2014).

A partir de 2012, a Autoridade Norueguesa de Inspeção do Trabalho passou a fomentar a produção de MAMs, incentivando os empreiteiros, com bônus de 4 €/t para redução de temperatura da mistura de no mínimo 25°C a menos que a produção convencional, garantindo as mesmas especificações de desempenho. A consequência foi um crescimento acelerado Figura 5 na fabricação de asfalto morno em todo o país (EAPA, 2014).

Figura 5 – Toneladas de misturas mornas utilizadas na Noruega, de 2000 a 2014



Fonte: Traduzido de EAPA, 2014

Na Alemanha, a diminuição na temperatura das misturas dos revestimentos asfálticos, na ordem de 30 a 35°C, além de ter reduzido o envelhecimento do asfalto, trouxe também relevante queda - cerca de 30% - na quantidade de energia consumida para sua produção. Em dados reais, uma estação gasta 8 litros de óleo combustível por tonelada de mistura asfáltica em regime normal, com redução na temperatura de fabricação, a economia foi de 2,4 litros por tonelada. Foram fabricados anualmente no país cerca de 63 milhões de toneladas de misturas, sendo assim a economia potencial é em torno de 150 milhões de litros por ano (RÜHL, 2006).

2.5.2 Pesquisas desenvolvidas no Brasil

Pesquisa laboratorial desenvolvida por Filho (2013) em Fortaleza, utilizou o aditivo químico Gemul® em teor de 0,4% da massa total de CAP classificado por penetração

como CAP 50/70, sendo o ligante aquecido a 145°C para processo de envelhecimento de curto prazo em Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) e a produção da mistura ocorreu em 135°C, e sua compactação 10°C a menos conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Temperaturas de produção e compactação obtidas por Filho (2013)

Misturas	Controle	Adit. Gemul®
Temp. usinagem (°C)	150-160	135
Temp. compactação (°C)	150	125

Fonte: Modificado de FILHO, 2013

Concluiu-se que os valores de penetração e ponto de amolecimento do asfalto antes e após uso do aditivo, foram praticamente os mesmos. Esse resultado já era previsto, uma vez que Gemul® não altera a viscosidade, e nem a consistência do ligante, além de garantir uma boa trabalhabilidade mesmo em temperaturas menores, devido à forte interação ligante/agregado que o produto promove.

Entretanto, no que se confere a oxidação, houve um aumento de 15% do ligante modificado com Gemul®, em relação ao CAP puro, fato não esperado, pois o aditivo surfactante tem propriedades antioxidantes. O ensaio de adesividade por sua vez, mostrou que o concreto asfáltico natural possui tal propriedade insatisfatória, e que com o uso do aditivo essa característica foi melhorada, assim, a utilização deste poderia eliminar ou diminuir o uso complementar de dopes de adesividade.

Quanto ao desempenho, a mistura com Gemul® trouxe dados em média 30% inferiores ao da mistura de controle (sem modificação) da pesquisa, ou seja, pode haver menor resistência a deformação permanente no pavimento. Em relação aos custos, a mistura natural e a modificada, apresentaram valores muito próximos, podendo ser considerados praticamente iguais.

Merighi (2015) realizou tanto experimentos laboratoriais, quanto aplicação em campo. A autora avaliou as propriedades físicas do ligante asfáltico Ecoflex B 2G (ligante modificado por borracha) sem, e com aditivo surfactante denominado Evotherm® M1 em dosagem de 0,4%. Os ensaios em campo ocorrem em trecho experimental na cidade de São Paulo, e as temperaturas conforme Tabela 2 atenderam aos requisitos

de diminuição das misturas convencionais para as mornas. Em relação a viscosidade, não houve alteração após o aditivo químico ser empregado.

Tabela 2 – Temperaturas de produção e compactação obtidas por Merighi (2015)

Item	Temperatura (°C)	AB	BWMA
Dosagem Marshall	Temperatura de mistura	170	155
	Temperatura de compactação	160 - 165	150
Amostra trecho experimental	Temperatura de usina	165	135 - 150
	Temperatura de aplicação em pista	155	120 - 135
	Temperatura de moldagem de corpo de prova	160	135

Fonte: MERIGHI, 2015

No ensaio de tração por compressão diametral a mistura morna obteve resultados inferiores de resistência à tração indireta e de módulo de resiliência, do que a mistura piloto, uma vez que os ensaios com Evotherm® M1 foram realizados com misturas reaquecidas e por isso possui maior índice de vazios, sendo assim esse já era o resultado esperado. Em termos ambientais, houve decréscimo na redução da emissão de fumos totais em cerca de 86%. Também ocorreu economia no consumo de combustível para produção da mistura morna, entretanto devido ao uso do surfactante, houve elevação no custo do ligante (MERIGHI, 2015).

Estudos realizados por Motta (2011) em pesquisa laboratorial, foram estudados três tipos de misturas asfálticas, para o concreto asfáltico CAP 50/70 foi utilizado teor de projeto de 4,4%. Optou-se pelo uso do aditivo surfactante Gemul XT14, dosado para duas amostras em 0,3% e para a última em 0,4%, por se tratar de asfalto-borracha. A partir da escolha das temperaturas de usinagem e compactação das misturas à quente (mistura asfáltica HMA) conforme Tabela 3 foram estabelecidas as demais temperaturas para a preparação da mistura asfáltica morna (mistura asfáltica WMA).

Tabela 3 – Temperaturas de produção e compactação obtidas por Motta (2011)

Mistura asfáltica	Temp. do ligante [°C]	Temp. dos agregados [°C]	Temp. final de usinagem [°C]	Diferença de temp. usinagem [°C]	Temp. final de compactação [°C]	Diferença de temp. compactação [°C]
HMA1	160	170	150	35	140	30
WMA1	160	115	115		110	
HMA2	160	170	160	25	150	25
WMA2	160	135	135		125	
HMA3	175	180	180	35	175	25
WMA3	175	150	145		140	

Fonte: MOTTA, 2011

Os dados obtidos para a quantidade de vazios, mostrou que a mistura morna apresentou maior quantia em relação a mistura de referência (à quente). É um resultado insatisfatório, uma vez que pode diminuir a resistência mecânica do pavimento. O elevado número de vazios, também trouxe como consequência menor resistência a tração e menor modulo de resiliência.

Motta (2011) também executou trechos experimentais com MAMs em rodovias de São Paulo. Após um ano de implantação do revestimento na Rodovia Presidente Dutra, a média dos valores de estabilidade mecânica se apresentarem praticamente inalterados, ressaltando-se que é uma rodovia de tráfego muito pesado. Também se manteve constante, a resistência ao dano por umidade induzida, a resistência à tração e a deformação permanente. Sendo que aditivo surfactante não se degradou, mesmo após reaquecimento em laboratório e usinagem.

A autora também realizou análise das emissões de gases tanto em laboratório quanto em campo, sendo que os resultados foram expressivamente benéficos, houve redução de três vezes da concentração total de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs) do particulado da mistura morna para à quente. Em relação a demanda de energia, houve economia de 15% com a redução da temperatura de aquecimento dos agregados, mas é importante ressaltar que a técnica de MAMs com uso de aditivo trará investimentos contínuos, para sua produção.

Pérez (2013) a partir de estudos laboratoriais realizados com o método francês de dimensionamento de pavimentos, utilizou diversos aditivos em CAP 50/70 em teor ótimo da mistura no valor de 4,86%. O aditivo surfactante CECABASE foi dosado em

0,4% de massa de asfalto. A modificação das temperaturas de cada material e etapa do processo está representada no Quadro 1.

Quadro 1 – Temperaturas de produção e compactação obtidas por Pérez (2013)

Temperaturas	Convencional	Misturas Asfálticas Mornas		
		REDISET	CECABASE	ZEÓLITAS
Agregado	165	145		
Ligante	155	135		
Usinagem	155	135		
Compactação	145	125		

Fonte: PÉREZ, 2013

Os resultados de desempenho obtidos através dos ensaios empíricos, mostraram que a mistura com o aditivo químico CECABASE apresentou deformação permanente e índice de vazios similar a mistura piloto. Não ocorreram também diferenças relevantes de trabalhabilidade, elasticidade e viscosidade (PÉREZ, 2013).

Budny (2012), utilizou ligante CAP 30/45, aditivo AD-Warm em dose de 0,3% conforme recomendado pelo fabricante. As temperaturas nas quais foram produzidas as misturas e suas respectivas compactações estão representadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Temperaturas de produção e compactação obtidas por Budny (2012)

Tipo de Ligante	Mistura (°C)	Compactação (°C)
Cap 30/45	166	150
Cap 30/45 + 2%CCBit	164	148
Cap 30/45 + 3%CCBit	158	145
Cap 30/45 + 0.3%AD-Warm	160	148
Cap 50/70	150	140

Fonte: BUDNY, 2012

O teor de ligante utilizado foi de 5,1%, sendo que o mistura convencional não foi satisfatória quanto ao recobrimento do agregado, mas com o uso de AD-Warm, melhorou a adesividade do ligante, mostrando que esse aditivo é do tipo surfactante. A partir de seu estudo, o autor concluiu que em temperaturas maiores, as misturas se tornam mais rígidas, e que abaixo dos 140°C o módulo de resiliência praticamente não se altera, devido ao menor envelhecimento do ligante.

2.5.3 Benefícios das misturas mornas

Diversos benefícios são decorrentes do uso de misturas asfálticas mornas, dentre eles alguns são:

Redução nas emissões de gases

Vários fatores são preponderantes para a diminuição das emissões de gases, os principais são: a redução na temperatura da mistura asfáltica, tipo de combustível utilizado no processo de usinagem, tipo e modo de operação da usina, umidade presente no agregado e se a mistura é proveniente de algum tipo de asfalto reciclado. Na produção de MAMs, o uso temperaturas reduzidas possibilita que menores níveis de fumos e vapores sejam produzidos, e além desse fator, há também menor demanda de queima de combustível para o aquecimento, consequentemente menos gases devido a combustão são lançados na atmosfera (PROWELL; HURLEY; FRANK, 2012).

Dados apresentados por D'Angelo et al. (2008) em relação a emissão de gases em usina de mistura asfáltica em diversos países da Europa, mostram redução de 30 a 40% nas emissões de dióxido de carbono (CO₂) e dióxido de enxofre (SO₂); 10 a 30% em monóxido de carbono (CO); 60 a 70% em óxidos de nitrogênio (NO_x); 50% em compostos orgânicos voláteis (VOC); e de 20 a 25% de poeira, quando do uso de misturas mornas. Prowell, Hurley e Frank (2012) complementaram a pesquisa e registraram que no Canadá também houve redução na emissão de poluentes, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Redução em porcentagem nas emissões de gases com uso de mistura morna

Emissão	Noruega	Itália	Países Baixos	França	Canadá
CO ₂	31,5	30-40	15-30	23,0	45,8
SO ₂	SD	35,0	SD	18,0	41,2
CO	28,5	10-30	SD	SD	63,1
NO _x	62,5	60-70	SD	18,0	58,0
VOC	SD	50,0	SD	19,0	SD
Poeira	54,0	25-55	SD	SD	SD

SD = sem dados

Fonte: Modificado e traduzido de Prowell, Hurley e Frank (2012)

Redução no consumo de combustível e energia

Estudos apontam que a economia de combustível nas usinas pode variar de 20 a 35% em relação a produção de misturas quentes. Estes níveis podem chegar a valores ainda maiores, caso os aquecedores das usinas sejam regulados para funcionarem em temperaturas mais baixas, em processos onde os agregados são aquecidos abaixo do ponto de ebulição d'água (PROWELL; HURLEY; FRANK, 2012). O aquecimento dos agregados, é um dos processos que mais demanda energia nas usinas, o uso de combustível pode aumentar cerca de 10% para cada 1% de água presente no agregado, principalmente se este apresentar alto teor de umidade. A partir do uso de misturas mornas é possível diminuir a temperatura, e reduzir o consumo de combustível e energia (PROWELL; WEST, 2005).

Facilidade na pavimentação

De acordo com Prowell (2007) e EAPA (2014) são bastantes expressivos os benefícios para as técnicas de pavimentação em geral. É possível pavimentar o substrato em regiões de climas mais frios, com a presença de temperaturas médias menores, e ainda assim obter a densidade ideal da mistura; o transporte da mistura pode ser feito entre distâncias maiores, sem perder sua capacidade de trabalhabilidade para produção e compactação (que também exigirá menos esforço para ser realizada); e também é possível incrementar maiores taxas de pavimento asfáltico reciclado (em inglês, Reclaimed Asphalt Paving – RAP).

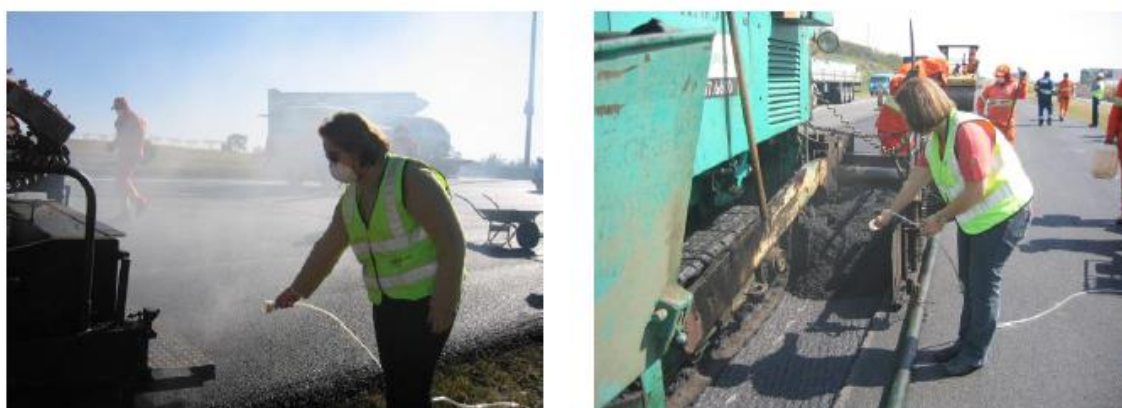
O risco de resfriamento da mistura, pode levar a perda de material da mistura, nesse contexto as MAMs são benéficas por possuírem menor gradiente térmico, apresentando riscos menores de resfriamento. Esse fator é muito importante para a realização de obras noturnas, facilitando a execução de serviços com restrições operacionais, tais como em aeroportos e o fechamento de estradas para manutenção (MOTTA, 2011).

Menor exposição ao trabalhador

Em relação a saúde ocupacional e à higiene industrial, o uso de misturas mornas são uma solução ideal para proteger os trabalhadores das emissões das misturas quentes (RÜHL, 2006). Menores temperaturas de produção e pavimentação minimizam os níveis de fumos, odores e gases emitidos, melhorando assim as condições de trabalho

a todos que estão diretamente expostos a esses riscos. As emissões de fumo são visíveis em temperaturas de aproximadamente 150°C, conforme Figura 6. Em média, a cada 12°C reduzidos, há uma diminuição em cerca de 50% de fumaça emitida para a atmosfera, sendo assim, se diminuídos 25°C no processo de produção pode haver até 75% de decréscimo na emissão de gases (EAPA, 2014; SHELL 2003).

Figura 6 – Fumos asfálticos liberados pela mistura a quente (esquerda) e pela mistura morna (direita) quando da aplicação do material em pista



Fonte: MOTTA, 2011

Menor envelhecimento do ligante

Segundo Newcomb (2006) o envelhecimento do ligante asfáltico está diretamente relacionado a temperatura de produção escolhida para a mistura. Em temperaturas mais baixas, ocorre menor oxidação do ligante, e consequente menor endurecimento do mesmo. É importante que não ocorra endurecimento do ligante, para não comprometer a flexibilidade e resistência à quebra do pavimento.

2.5.4 Tecnologias utilizadas na produção das misturas mornas

As tecnologias desenvolvidas na produção de misturas mornas, de acordo com seu tipo, podem reduzir a viscosidade do ligante, ou aumentar a adesividade do mesmo, sendo assim, permitem uma melhor cobertura de asfalto sobre os agregados, sem a necessidade de altas temperaturas (OTTO, 2009).

2.5.4.1 Formação de espuma

Segundo Otto (2009) e Pérez (2013) nesse processo são utilizados dois ligantes betuminosos com durezas distintas, sendo um atribuído a uma baixa consistência, e

outro a uma alta consistência. Primeiro adiciona-se o asfalto “mole” e posteriormente o “duro”, em forma de espuma. As misturas podem ser produzidas entre 100°C e 120°C, e compactadas entre 80°C e 110°C.

O processo de formação de espuma consiste na injeção de pequenas quantidades de água (Figura 7) em temperatura ambiente no asfalto quente, ou na caixa de mistura do ligante. A água rapidamente transforma-se em vapor e é incorporada ao ligante, gerando uma espuma volumosa. A ação da espuma expande temporariamente o ligante, reduzindo sua viscosidade. Assim é e consequentemente melhorando a trabalhabilidade. Após a espuma ser desfeita, o ligante retorna as suas características originais (OTTO, 2009; PÉREZ, 2013).

Figura 7 – Tecnologia com formação de espuma



Fonte: PaviaSystems, 2011

Deve-se estar atento para não se incorporar elevada quantidade de água ao ligante, pois sua adesão pode ser comprometida. Os níveis de água devem somente garantir a formação de espuma. Alguns fabricantes de CAP aconselham o uso de aditivos melhoradores de adesividade, para assegurar que a mistura asfáltica fique mais resistente a umidade (RIVOIRE JR., 2014).

O aditivo melhorador de adesividade ou como é comumente intitulado “dope de adesividade” trata a deficiência de aderência entre os agregados e o ligante asfáltico, de maneira que o agregado passa a ter mais atração química pelo asfalto do que pela água. Este tipo de aditivo estimula a afinidade das propriedades físico-químicas na interface ligante/agregado, promovendo um melhor recobrimento e adesão. O resultado do uso do dope na elaboração de misturas asfálticas mornas é um produto mais resistente a ação da umidade residual entre os agregados e o CAP (PEREIRA, 2012). O aditivo deve ser incorporado ao ligante antes dos agregados, e geralmente

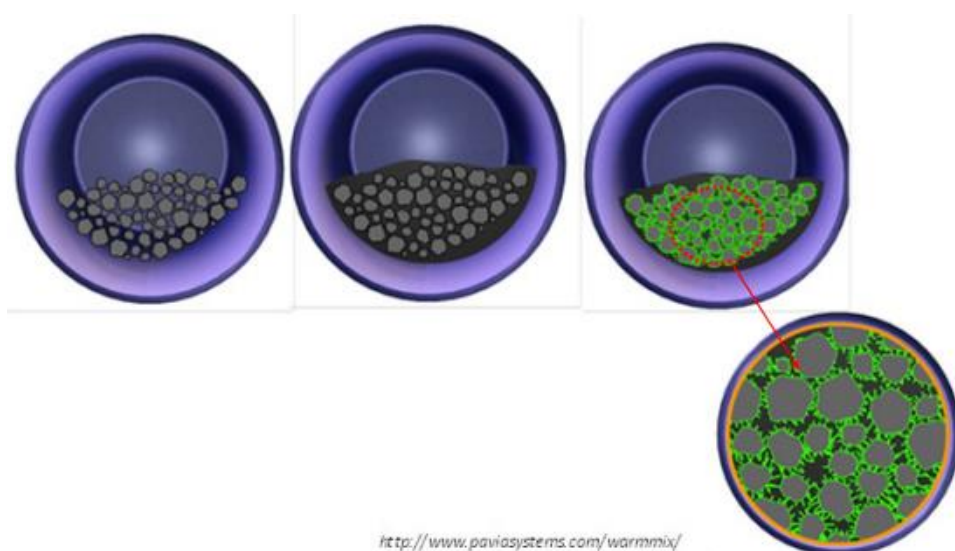
é dosado em 0,5% da massa de ligante asfáltico (SOMÉ, 2013; ZAUMANIS, 2010). Entretanto na prática, observa-se que o teor de DOPE pode chegar até 1,0%, para garantir a segurança no comportamento da interação da água com a mistura asfáltica (PÉREZ, 2013).

2.5.4.2 Aditivos surfactantes

Os aditivos são responsáveis por modificar propriedades físicas e mecânicas da mistura asfáltica, o tipo de aditivo a ser empregado varia de acordo com a característica a ser melhorada no concreto asfáltico. Para pavimentos, os mais empregados são aqueles que tem função de melhorar a adesividade do ligante/agregado, a deformação permanente e o comportamento à fadiga.

Segundo DNIT (2018), surfactantes também chamados tensoativos, são aditivos químicos que influenciam nas características superficiais e interfaciais de líquidos, conforme exposto na Figura 8. Eles são responsáveis por diminuir a tensão de superfície no contato ligante asfáltico e agregado, sendo assim melhoram a compactação do material, mesmo na presença de temperaturas menores que misturas à quentes.

Figura 8 – Tecnologia com aditivos surfactantes



Fonte: PaviaSystems, 2011

A partir do uso deste aditivo, é possível reduzir a temperatura de usinagem e compactação das misturas asfálticas convencionais numa faixa de 10°C e 30°C. Agentes químicos surfactantes foram desenvolvidos para o uso em misturas asfálticas

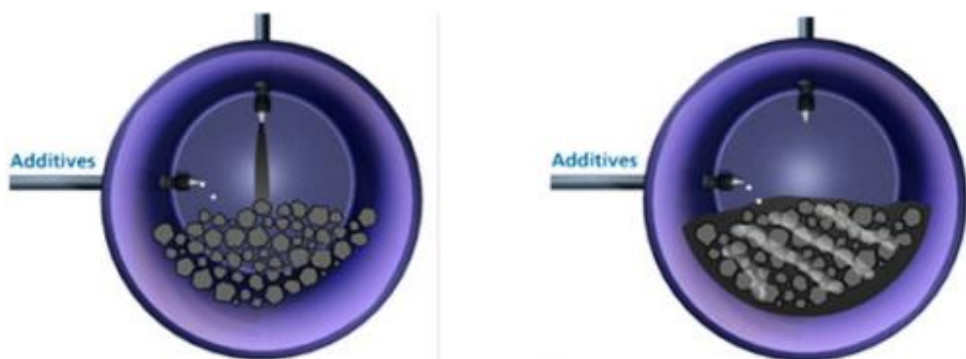
mornas sem adição de água. A formulação desse material é realizada de modo a garantir a compatibilidade com os ligantes asfálticos usualmente empregados, e também por aqueles alterados por pó de borracha de pneu ou por polímeros (MENSCH, 2017). De acordo com Oliveira et al. (2012) esse tipo de aditivo para misturas mornas não altera as propriedades mecânicas e a viscosidade do asfalto.

O teor de surfactante varia em função do ligante e agregado utilizados. Uma pequena quantidade do aditivo é capaz de cobrir a superfície dos agregados minerais, sem interferir nas propriedades de todo o volume do asfalto. Sendo assim, são necessárias pequenas quantidades do mesmo para a produção da MAM (OLIVEIRA et al., 2012). Os valores comumente adotados na dosagem com uso desse produto, é cerca de 0,3% a 0,7% da massa total de ligante asfáltico, entretanto deve-se observar as especificações e recomendações do fabricante do aditivo. Este pode ser previamente incorporado ao ligante pelo fornecedor de asfalto, ou diretamente ao ligante na usina. Atualmente no Brasil, os aditivos que podem ser utilizados são: Evotherm®, Rediset®, Cecabase® e Gemul® (DNIT, 2018).

2.5.4.3 Aditivos orgânicos/ceras

São aditivos encontrados em estado sólido, e podem ser introduzidos diretamente ao ligante ou a mistura asfáltica em usinagem. Promovem uma redução em cerca de 30°C a 40°C na temperatura da mistura. Essa tecnologia consiste em submeter o aditivo ao seu ponto de amolecimento em conjunto ao asfalto (Figura 9), fazendo com que as propriedades do ligante sejam alteradas, especialmente a redução na sua viscosidade, também nas fases de usinagem e compactação. Com o resfriamento da mistura, os componentes do aditivo se cristalizam de modo disperso no ligante, aumentando a rigidez deste, e da mistura asfáltica em geral (GENNESSEaux, 2015).

Figura 9 – Tecnologia com aditivos orgânicos/ceras



Fonte: PaviaSystems, 2011

O tipo e teor de ligante são de extrema responsabilidade, pois dependendo da sua temperatura de amolecimento, pode haver o risco de deformação permanente no pavimento por altas temperaturas, e trincamento por baixas. Uma vez que elevadas quantidades desse aditivo orgânico, podem promover redução excessiva na viscosidade do asfalto, e forte enrijecimento da mistura final (MOTTA, 2011; PROWELL; HURLEY; FRANK, 2012).

As zeólitas são minerais naturais ou industriais, que retêm cerca de 21% de água em seus cristais, sendo que quando aquecidas juntamente ao ligante asfáltico, a água mantida em seu interior se desprende em forma de vapor, e passa a ser incorporadora ao asfalto que sofre expansão volumétrica (efeito similar ao processo de espuma), resultando na diminuição de sua viscosidade (BUDNY, 2012; OTTO, 2009).

2.6 MÉTODOS DE DOSAGEM

Segundo WesTrack (2001) atualmente há vários tipos de métodos de performance a resistência disponíveis. Dentre estes, o método Marshall; Hveem; Gyratory testing machine (GTM), Wheel-Track (ou comumente conhecido como método francês); Superpave, testes triaxiais, entre outros. Testes realizados para cada método, mostraram vários níveis satisfatórios de resistência permanente a deformação. Conhecendo as limitações de cada teste, o projetista deve escolher aquele que mais se enquadra na realidade operacional e tecnológica com qual o pavimento que será dimensionado.

Os métodos de produção das misturas asfálticas mornas são baseados nos métodos de misturas à quente. Os mais utilizados atualmente são: método de Marshall, especialmente na Europa e no Brasil e o método SUPERPAVE (SUPERior PERforming asphalt PAVement) nos Estados Unidos (ZAUMANIS, 2010).

2.6.1 Método Marshall

Esse método foi desenvolvido pelo engenheiro Bruce Marshall, em 1939, nos Estados Unidos, ao departamento de estradas do Mississippi (ASPHALT INSTITUTE, 2007). No Brasil, a norma que trata do método de dosagem Marshall é a DNER-ME 043/95, e especifica os procedimentos necessários a determinação da fluência e estabilidade de misturas betuminosas à quente. A fluência Marshall é definida como a “deformação total” e a estabilidade Marshall é a “resistência máxima à compressão radial do corpo de prova”.

Em relação aos parâmetros volumétricos utilizados no procedimento, para se estabelecer o teor de projeto do CAP, o Quadro 3 apresenta as quantidades limites das camadas de rolamento e ligação, para as características: porcentagem de vazios, relação betume/vazios (RBV), e estabilidade de acordo com ES 031 (DNIT, 2006) para o método Marshall.

Quadro 3 – Valores limites das características da mistura com CAP para o método Marshall

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, 2006

A mistura também deve atender ao parâmetro mínimo de vazios do agregado mineral, conforme ES 031 (DNIT, 2006), assim como especificado no Quadro 4.

Quadro 4 – Valores limites dos vazios do agregado mineral da mistura com CAP para o método Marshall

VAM – Vazios do Agregado Mineral		
Tamanho Nominal Máximo do agregado		VAM Mínimo %
#	m m	
1½"	38,1	13
1"	25,4	14
¾"	19,1	15
½"	12,7	16
3/8"	9,5	18

Fonte: DNIT, 2006

No método Marshall os teores de asfalto utilizados para a moldagem dos corpos de prova (CPs), são divididos por grupos, sendo que para cada teor, deverá haver no mínimo 3 CPs. De forma empírica, um valor T, em % é adotado como o inicial para a quantidade de ligante que será incorporado aos agregados, os outros grupos de CPs devem variar seu teor em -1,0%, -0,5%, +0,5% e +1,0% em relação ao de referência. A compactação ocorre por energia de impacto, através de golpes aplicados por um soquete. No geral é recomendado para execução da compactação, 50 golpes de cada lado do CP, para pressões até 7kgf/cm² e 75 golpes, para o intervalo de 7kgf/cm² a 14kgf/cm². A compactação pode ocorrer de forma manual ou automática (BERNUCCI, et al. 2010).

De acordo com Motta (2011) é importante salientar que quando há necessidade de melhorar a densificação da mistura, é comum o aumento no teor de concreto asfáltico, entretanto, é uma técnica ineficiente quando se trata do método Marshall, uma vez que a quantidade de asfalto se torna excessiva, prejudicando os níveis de deformação permanente do pavimento devido a lubrificação exagerada.

2.6.2 Método Superpave

A especificação Superpave, é regida pela norma americana AASHTO M 323-17 (Superpave Volumetric Mix Design), e utiliza um compactador giratório no procedimento de dosagem, que aplica energia não por impacto como o método Marshall, mas sim por amassamento do corpo de prova. O compactador giratório foi

considerado mais eficaz no que se diz respeito a projetar a verdadeira realidade de compactação encontrada em campo, de maneira que as densidades finais do pavimento fossem mais condizentes ao clima e carregamento a quais o pavimento estaria sujeito (ANTT, 2011).

O método Superpave pode ser utilizado de forma simples ou complexa, depende do tráfego e do clima da região onde o pavimento será executado. No ligante asfáltico e nos agregados são feitos diversos testes a fim de especificar suas propriedades. Para um baixo volume de veículos, em climas moderados, uma seleção simples de materiais e parâmetros volumétricos são considerados. Quanto maior a demanda de veículos, mais requisitos são adicionados ao projeto, para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos. Uma das características do método é que seus testes são realizados em temperaturas e condições de envelhecimento do material, que se aproximam da realidade a qual o revestimento asfáltico será submetido (D'ANGELO, 2001).

Dnit (2018) ressalta que no Brasil podem ser utilizados, tanto o método Marshall quanto o Superpave para a produção de misturas asfálticas mornas, seguindo como já citado anteriormente, a dosagem fixada para a mistura convencional, devendo-se apenas respeitar os parâmetros do método de dosagem escolhido.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme apresentado no primeiro capítulo deste trabalho, almejou-se estudar uma solução de mistura asfáltica morna com uso de aditivo surfactante. Foram realizados diversos ensaios laboratoriais dos materiais e das misturas, para se verificar a aplicabilidade de surfactantes que permitam reduzir as temperaturas de produção e aplicação de concretos asfálticos.

Todos os procedimentos foram realizados nas dependências do Laboratório de Solos, Pavimentação Asfáltica e Materiais de Construção do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás, câmpus Goiânia.

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para realização da pesquisa, estão descritos a seguir, assim como os ensaios relacionados as diferentes características e parâmetros que foram analisados.

3.1.1 Ligante Asfáltico

A norma brasileira que especifica as características do concreto asfáltico para pavimentos é a DNIT-ES 031/06. O ligante utilizado para o desenvolvimento do trabalho foi cedido por uma empresa distribuidora de asfalto, situada na região metropolitana de Goiânia, e é classificado como CAP 50/70.

Segue relação dos ensaios que foram desenvolvidos para caracterização do ligante asfáltico, e suas respectivas especificações:

- Penetração: ME 155 (DNIT, 2010);
- Viscosidade Saybolt Furol: NBR 14950 (ABNT, 2003);
- Adesividade: ME 078 (DNER, 1994).

3.1.2 Agregados

Os agregados utilizados para realização dos ensaios são procedentes de uma pedreira localizada próxima à região metropolitana de Goiânia, no estado de Goiás. Este material pétreo é de origem gnáissica, que é uma rocha metamórfica, e foi escolhido por ser um agregado usualmente empregado na região metropolitana de

Goiânia. Foram coletadas amostras de brita 1, brita 0 e pó de brita nas pilhas da pedreira. As amostras foram obtidas de vários pontos, dispostos alternadamente de um lado e do outro, desde a crista até a base das pilhas, removida uma camada superficial de aproximadamente 15 cm, conforme recomendações da NBR NM 026 (ABNT, 2001).

Segue relação dos ensaios desenvolvidos para caracterização dos agregados, e suas respectivas especificações:

- Caracterização granulométrica: ME 083 (DNER, 1998) e pela norma NBR 7211 (ABNT, 2009);
- Massa específica: NBR 6458 (ABNT, 2016);
- Índice de forma: NBR 7809 (ABNT, 2019);
- Abrasão “Los Angeles”: ME 035 (DNER, 1998).

3.1.3 Aditivo surfactante

Foi obtida uma amostra de aditivo surfactante na mesma distribuidora que forneceu o CAP, denominado Evotherm® conforme ilustrado na Figura 10. O aditivo é classificado como do tipo 3G e seu fabricante é a empresa americana MeadWestvaco Corporation, algumas de suas características físicas e químicas estão apresentadas na Tabela 5.

Figura 10 – Surfactante Evotherm® 3G



Fonte: Autoria própria

Tabela 5 – Características do aditivo surfactante Evotherm® G3

Característica	Aditivo Evotherm 3G
Aparência	Âmbar
Carcinógeno	Sim
Estado físico	Líquido
Odor	Semelhante ao de amina
pH	10 a 12
Solubilidade	Pouco solúvel em água

Fonte: Adaptado de MeadWestvaco Corporation, 2015

De acordo com o FHWA (2019) esse material não possui água, sendo assim não se assemelha aos princípios de espuma, e a outros métodos que interferem na viscosidade do ligante. Aditivos desse tipo, devem fornecer redução no atrito interno entre os agregados e as finas camadas de ligante que os encobrem, quando estes estiverem sujeitos a altas taxas de cisalhamento, decorrentes das tensões que ocorrem durante a compactação.

3.2 MÉTODOS

Os métodos empregados para a execução dos CPs das misturas à quente e mornas, estão descritos abaixo.

3.2.1 Composição granulométrica

Foi produzida uma mistura de agregados, cuja curva granulométrica se enquadre na faixa C da especificação brasileira DNIT ES 031/2006.

3.2.2 Temperatura de mistura e compactação

A temperatura de compactação varia de acordo com a viscosidade ideal do ligante asfáltico (MENSCH, 2017). Sendo assim, após estabelecida curva de viscosidade versus temperatura do CAP, foi definida a temperatura de trabalho para as misturas à quente, e para a mistura morna, ocorrendo uma redução de temperatura para o aquecimento dos agregados e para a compactação da mistura.

Segundo Motta (2011) é essencial que a temperatura de produção e compactação seja controlada, para garantir que a qualidade da mistura morna resultante seja similar

à da mistura à quente, o surfactante é um fator importante para que a resistência ao dano por umidade não seja comprometida.

3.2.3 Dosagem Marshall

As dosagens das misturas foram executadas de acordo com método Marshall (DNER ME 043/95). A partir das misturas intituladas pilotos, com cinco dosagens de ligantes asfálticos diferentes, (teores 4,5% a 6,5%, em intervalos de 0,5%), obteve-se o teor de ligante “ótimo”, ou também chamado teor de projeto. Foi usada compactação manual, em aparelho da marca Solotest, conforme ilustrado pela Figura 11. Como estabelecido por norma, o esforço ou energia de compactação empregado foi de 75 golpes em cada face do CP.

Figura 11 – Compactador Marshall



Fonte: Autoria própria

Ao total foram compactados 30 CPs de 1200g cada, sendo 15 compostos de mistura asfáltica à quente, e outros 15 de mistura asfáltica morna com aditivo surfactante. É

importante ressaltar que o uso do aditivo surfactante e a diminuição nas temperaturas de produção e compactação, são as únicas variáveis que diferenciam as misturas mornas das misturas convencionais (MOTTA, 2011). Por isso, todas as etapas do processo de produção das MAMs seguiram as especificações de misturas à quente.

3.2.4 Resistência a tração por compressão diametral

Esse ensaio é normatizado pelo DNIT ME 136/2018 e pela NBR 15087/2012. O corpo de prova será submetido a duas forças de compressão, sendo estas concentradas e paralelas, perpendiculares ao longo de seu diâmetro. A resistência a tração indireta (RT) por compressão diametral será determinada pela Equação (1)

$$\sigma_R = \frac{2 \text{ Prup}}{100\pi DH} \quad (1)$$

σ_R = resistência a tração (MPa);

Prup = carga de compressão de ruptura (N);

D = diâmetro do CP (cm);

H = altura do CP (cm).

Conforme definido por Bernucci et al. (2010) os valores médios de resistência a tração de CPs recém moldados, variam entre 0,5 e 2,0 MPa. Após aplicação em pista, a RT aumenta, e ocorre perda de flexibilidade, a partir do envelhecimento dos materiais.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Nessa etapa estão registrados e analisados os resultados provenientes dos ensaios desenvolvidos em laboratório para os materiais utilizados na pesquisa. Assim, a partir dos dados adquiridos foi possível comparar os resultados de desempenho da mistura morna estudada aos de uma mistura de referência (à quente) produzida nas condições de temperatura convencionais, de acordo com os parâmetros estabelecidos.

4.1 AGREGADOS

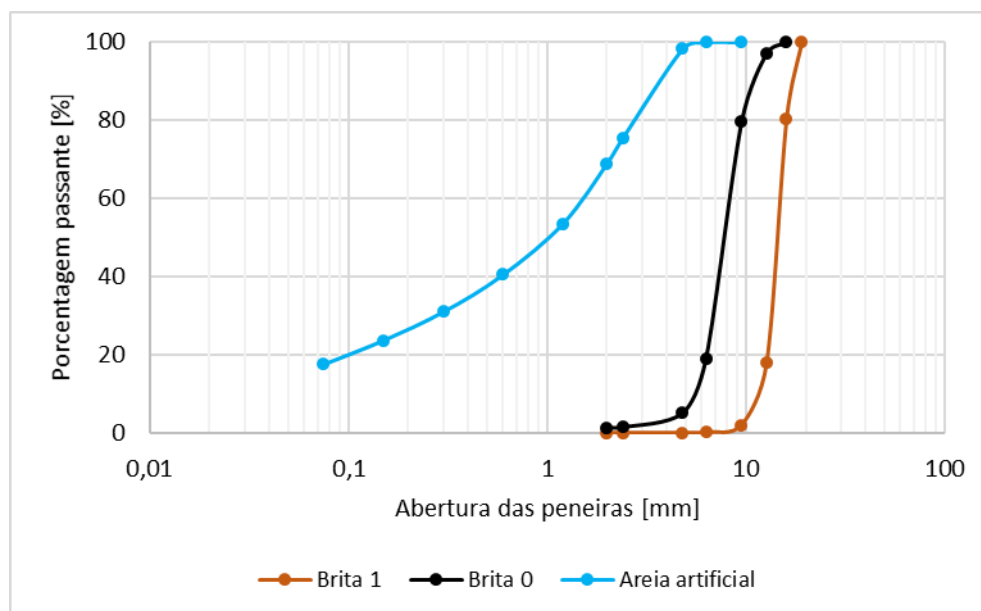
A partir dos ensaios realizados em laboratório: granulometria, massa específica, massa unitária, abrasão “Los Angeles” e índice de forma, foi possível caracterizar os agregados utilizados na pesquisa. A tabela 6 traz os valores referentes a granulometria dos agregados, e a Figura 12 suas respectivas curvas granulométricas.

Tabela 6 – Distribuição granulométrica dos agregados

Peneira	Abertura (mm)	% Passante		
		Brita 1	Brita 0	Areia artificial
3/4"	19,1	100,0	-	-
5/8"	16,0	80,4	100,0	-
1/2"	12,7	18,0	97,1	-
3/8"	9,5	2,1	79,5	100,0
1/4"	6,3	0,3	19,2	99,9
4	4,8	0,2	5,2	98,3
8	2,4	0,1	1,6	75,5
10	2,0	0,1	1,5	69,0
15	1,2	-	-	53,6
30	0,6	-	-	40,6
50	0,3	-	-	31,1
100	0,15	-	-	23,8
200	0,075	-	-	17,7
Fundo	-	-	-	-

Fonte: Autoria própria

Figura 12 – Curvas granulométricas dos agregados



Fonte: Autoria própria

Em relação aos demais dados, a tabela 7 apresenta os resultados da caracterização dos agregados.

Tabela 7 – Caracterização dos agregados

Propriedade	Agregado	Resultado
Massa específica (g/cm ³)	Brita 1	2,94
	Brita 0	2,99
	Areia artificial	2,83
Massa unitária (kg/L)	Brita 1	1,62
	Brita 0	1,58
	Areia artificial	1,79
Abrasão "Los Angeles"		14%
Índice de forma (mm)		2,4

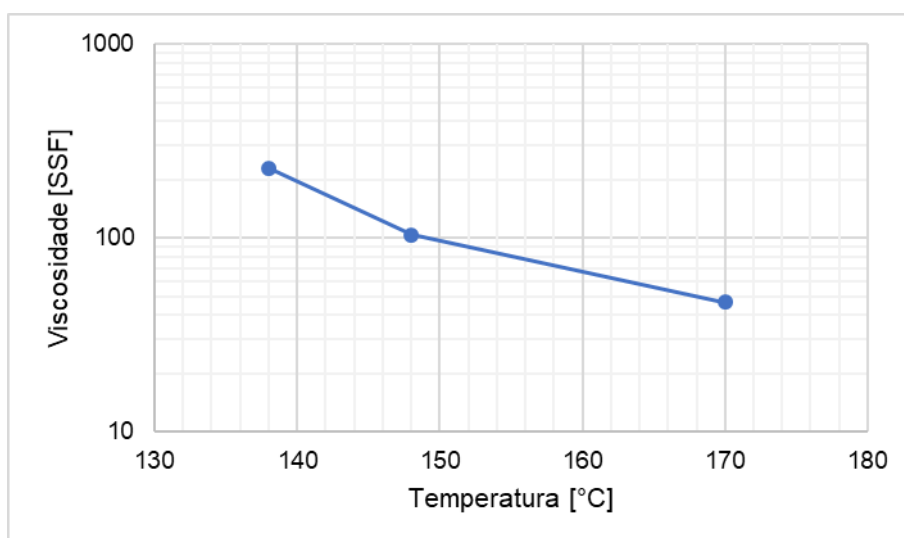
Fonte: Autoria própria

Segundo NBR 031 (ABNT, 2006) o agregado graúdo utilizado para execução de pavimentos flexíveis com concreto asfáltico, deve apresentar desgaste Los Angeles menor que 50%, sendo assim o agregado utilizado atende a especificação. Assim como o índice de forma dos agregados, que deve possuir valor máximo de 3,0 de acordo com NBR 7809 (ABNT, 2019).

4.2 LIGANTE ASFÁLTICO

Os ensaios realizados em laboratório para caracterização do ligante foram: penetração, viscosidade Saybolt Furol, e adesividade. A massa específica do cimento asfáltico como amplamente difundida foi considerada de $1,02 \text{ g/cm}^3$. A partir do ensaio de penetração, houve a comprovação da classificação do CAP como 50/70, sendo encontrado o valor de 63mm. A principal propriedade estudada do ligante foi a viscosidade, uma vez que é através dela que são definidas as temperaturas de aquecimento e aplicação das misturas asfálticas. Assim a curva Viscosidade x Temperatura foi definida conforme o ensaio de viscosidade Saybolt Furol de acordo com a NBR 14950 (ABNT, 2003), e está representada na Figura 13.

Figura 13 – Curva de viscosidade do CAP 50/70



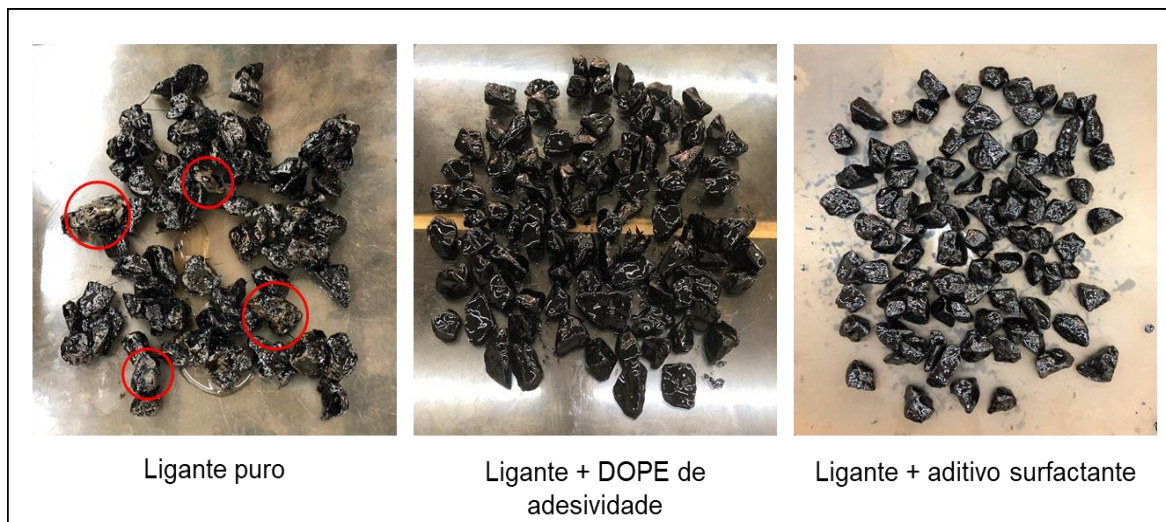
Fonte: Autoria própria

A temperatura de aquecimento do ligante asfáltico foi determinada conforme ES 031 (DNIT, 2006), que estabelece que o CAP utilizado na mistura deve apresentar preferencialmente viscosidade entre 75 a 95 SSF, sendo que sua temperatura deve variar entre 107°C e 177°C . Para as equações de regressão definidas pelas curvas de viscosidade x temperatura, os valores de aquecimento variaram entre 157° e 160° .

O ensaio de adesividade foi executado primeiramente com o CAP puro, e seu resultado não foi satisfatório, uma vez que houve deslocamento da película betuminosa. Optou-se então por utilizar DOPE de adesividade em taxa de 0,9%, o seu cobrimento foi notado como competente, desse modo, seu uso foi necessário para a

execução da mistura à quente. O mesmo ensaio também foi realizado para a o ligante com adição de aditivo surfactante, uma vez que este melhora a propriedade adesiva do asfalto. Seu resultado foi classificado como satisfatório, podendo-se assim dispensar o uso do DOPE, na preparação da mistura morna. A Figura 14 apresenta os cobrimentos obtidos a partir do método visual de adesividade.

Figura 14 – Ensaio visual de adesividade

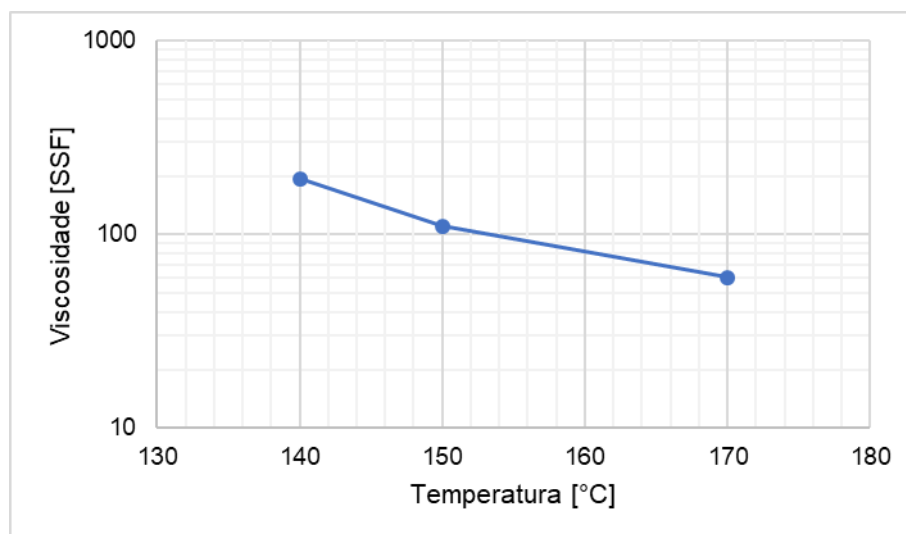


Fonte: Autoria própria

4.3 ADITIVO SURFACTANTE

A curva viscosidade x temperatura do ligante asfáltico + surfactante está representada na Figura 15. O aditivo surfactante foi utilizado em taxa de 0,7%, conforme especificações do fabricante.

Figura 15 – Curva de viscosidade do CAP 50/70 com aditivo surfactante



Fonte: Autoria própria

O ensaio laboratorial comprovou como proposto por Oliveira et al. (2012) que esse tipo de aditivo não altera a viscosidade do CAP, uma vez que a diferença de temperatura do ligante com aditivo para o puro, foi de 2,5°C a mais.

É importante ressaltar que o uso desse aditivo não altera as etapas de execução da mistura, sendo que a diferença básica está na diminuição da temperatura de aquecimento dos agregados, e de compactação.

4.4 MISTURA ASFÁLTICA

A Tabela 8 apresenta a composição granulométrica das misturas asfálticas estudadas. Para que as misturas se enquadrassem na Faixa C da ES 031 (DNIT, 2006) foram empregados 14% de brita 1, 39% de brita 2 e 47% de areia artificial. A distribuição dos agregados foi classificada como contínua bem-graduada, e sua dimensão máxima característica (DMC) foi de 19,1mm.

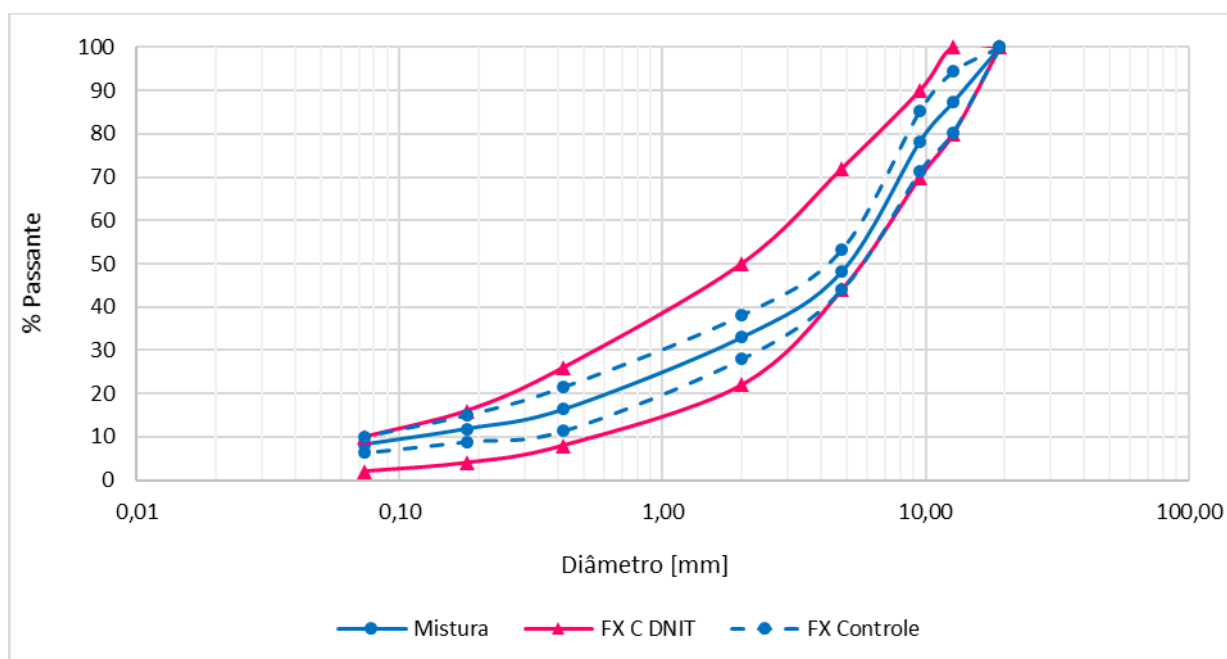
Tabela 8 – Distribuição granulométrica para as misturas asfálticas

Peneiras		Brita 1 (14%)	Brita 0 (39%)	Areia artificial (47%)	Faixa de controle			Faixa C DNIT		
N °	(mm)	%	%	%	% Mín	Mistura	% Máx	% Mín	% Máx	Variação
3/4"	19,1	100,00	100,00	-	100,00	100,00	100,00	100	100	7
1/2"	12,7	17,98	97,12	-	80,39	87,39	94,39	80	100	7
3/8"	9,5	2,14	79,54	100,00	71,32	78,32	85,32	70	90	7
4	4,8	0,16	5,17	98,26	43,22	48,22	53,22	44	72	5
10	2,0	0,12	1,51	69,01	28,04	33,04	38,04	22	50	5
40	0,42	0,12	0,00	34,90	11,42	16,42	21,42	8	26	5
80	0,18	0,00	-	25,30	8,89	11,89	14,89	4	16	3
200	0,075	-	-	17,67	6,31	8,31	10,00	2	10	2

Fonte: Autoria própria

A Figura 16 apresenta a curva granulométrica das misturas estudadas, a faixa C do DNIT e as faixas de controle para aplicação.

Figura 16 – Curva granulométrica



Fonte: Autoria própria

Segundo ES 031 (DNIT, 2006) a temperatura de aquecimento dos agregados deve ser cerca de 10 a 15°C superior à do ligante asfáltico, não podendo exceder os 177°C. A partir da equação encontrada no gráfico do ensaio de viscosidade Saybolt Furol, foi determinada a temperatura de aquecimento do ligante, fixou-se o valor de 160°C, sendo que este definiu as temperaturas de aquecimento dos agregados, e de compactação da mistura.

A referência para a fixação das temperaturas referentes a mistura morna, foram adotadas de acordo com a tese de Motta (2011), onde a temperatura de aquecimento do CAP foi mantida, variando-se somente para os agregados, e para a compactação, sendo estabelecida uma redução de 30°C para cada processo. Os valores finais adotados para os dois tipos de misturas estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Temperaturas de aquecimento e compactação

Mistura asfáltica	Temperatura (°C)		
	Ligante	Agregado	Compactação
Quente	160	170	150
Morna	160	140	120

Fonte: Autoria própria

A dosagem da mistura foi estabelecida conforme método Marshall pela DNER ME 043/1995 por compactação manual. Após a realização do ensaio foi possível o levantamento de dados para se estabelecer os parâmetros volumétricos: massa específica máxima teórica; massa específica aparente; volume de vazios (VV); vazios com betume (VCB); vazios do agregado mineral (VAM); e relação betume/vazios (RBV). A partir do rompimento dos CPs (Figura 17), foram determinados os dados de estabilidade Marshall, e fluência. As Tabelas 10 e 11 trazem os valores referentes a cada característica analisada, para a mistura à quente, e morna, respectivamente.

Figura 17 – Ruptura do CP



Fonte: Autoria própria

Tabela 10 – Parâmetros dos CPs da mistura à quente

Parâmetro	Mistura à quente				
Teor de ligante (%)	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
Massa específica máxima teórica (g/cm ³)	2,68	2,66	2,64	2,62	2,59
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,54	2,55	2,54	2,53	2,52
Volume de vazios (%)	4,81	4,22	3,70	3,28	2,86
Vazios com betume (%)	11,22	12,49	13,70	14,88	16,06
Vazios do agregado mineral (%)	16,03	16,71	17,40	18,16	18,92
Relação betume/vazios (%)	70,00	74,74	78,73	81,94	84,88
Estabilidade (kgf)	1125	1180	1153	1069	899
Fluência (mm)	4,66	4,69	4,84	7,12	7,92

Fonte: Autoria própria

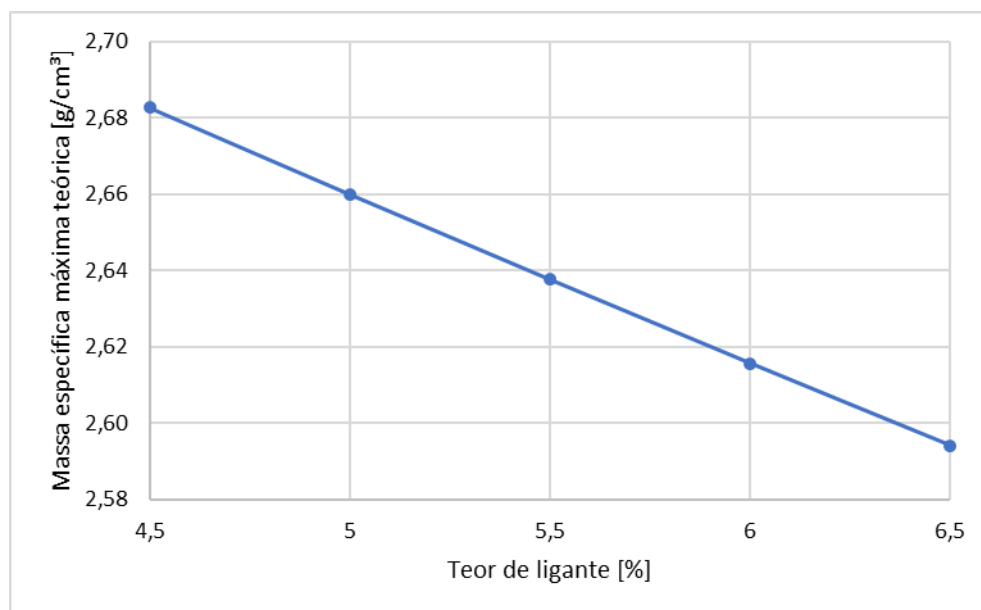
Tabela 11 – Parâmetros dos CPs da mistura morna

Parâmetro	Mistura morna				
Teor de ligante (%)	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
Massa específica máxima teórica (g/cm ³)	2,68	2,66	2,64	2,62	2,59
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,52	2,53	2,54	2,53	2,53
Volume de vazios (%)	6,04	4,77	3,86	3,17	2,50
Vazios com betume (%)	11,12	12,42	13,67	14,90	16,12
Vazios do agregado mineral (%)	17,16	17,19	17,53	18,07	18,62
Relação betume/vazios (%)	64,80	72,25	77,99	82,46	86,57
Estabilidade (kgf)	731	890	884	793	703
Fluência (mm)	5,25	6,20	5,61	6,46	7,09

Fonte: Autoria própria

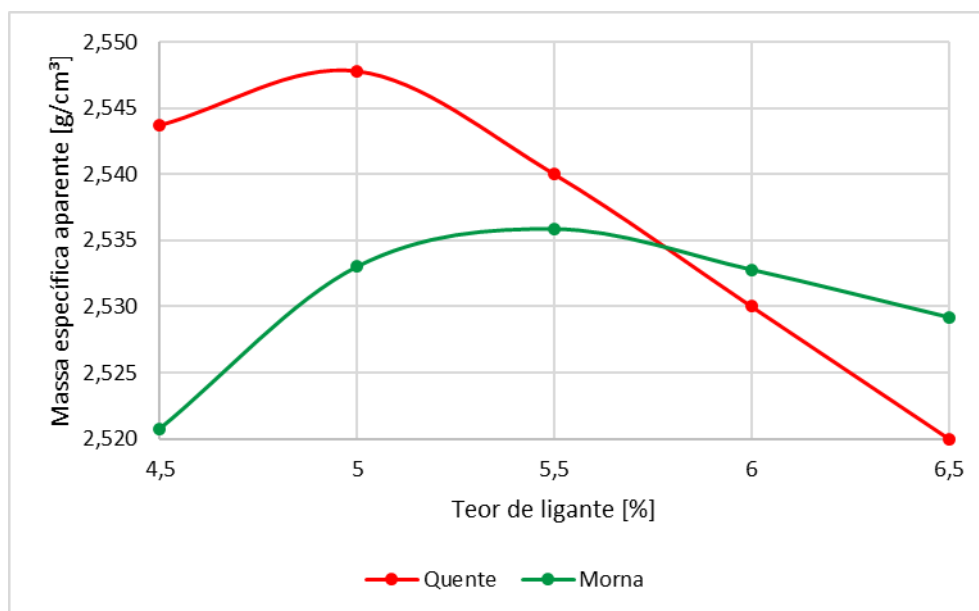
Os gráficos gerados a partir dos resultados dos parâmetros, estão representados pelas Figuras 18, 19, 20, 21, 22 e 23.

Figura 18 – Massa específica máxima teórica x teor de ligante



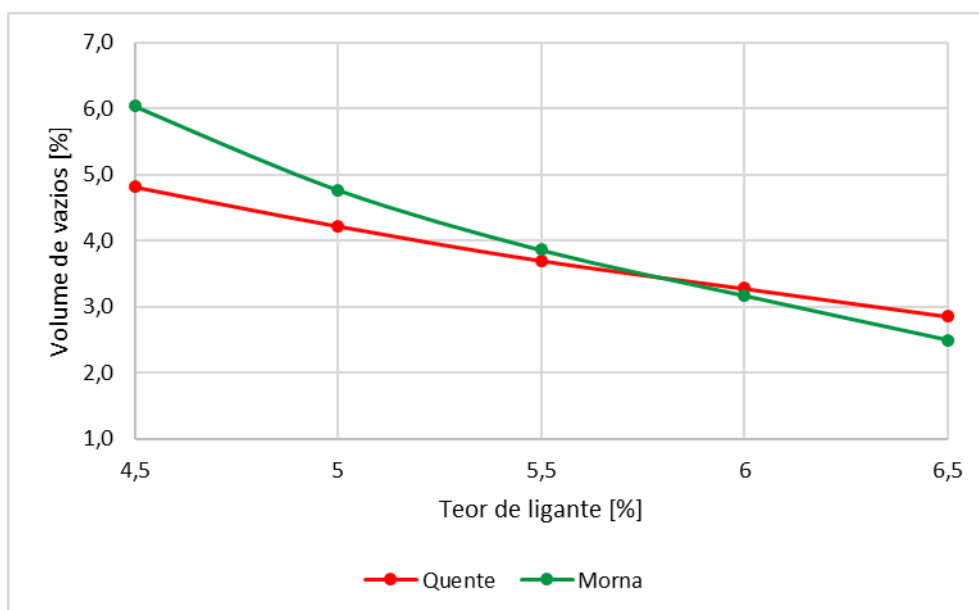
Fonte: Autoria própria

Figura 19 – Massa específica aparente x teor de ligante



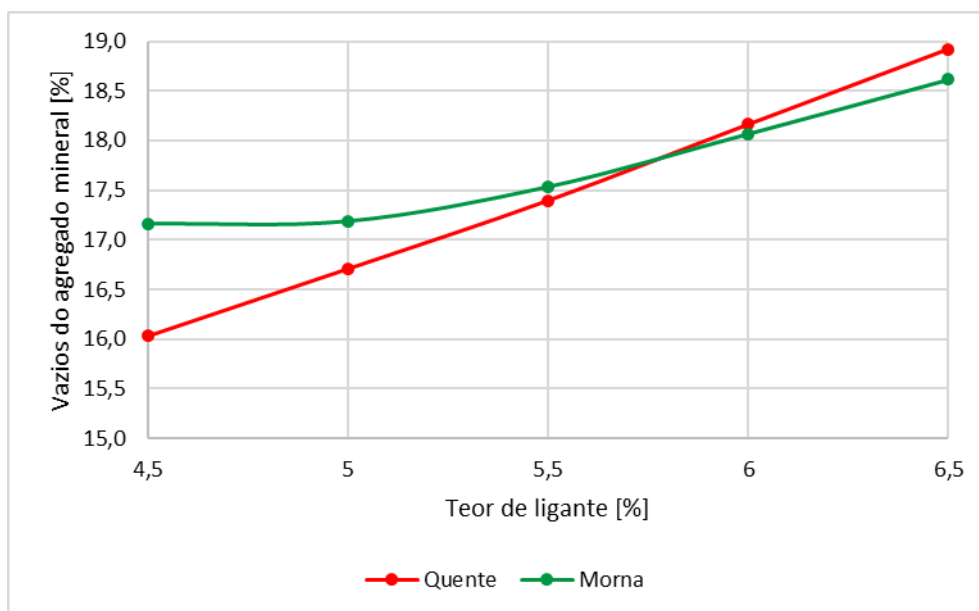
Fonte: Autoria própria

Figura 20 – Volume de vazios x teor de ligante



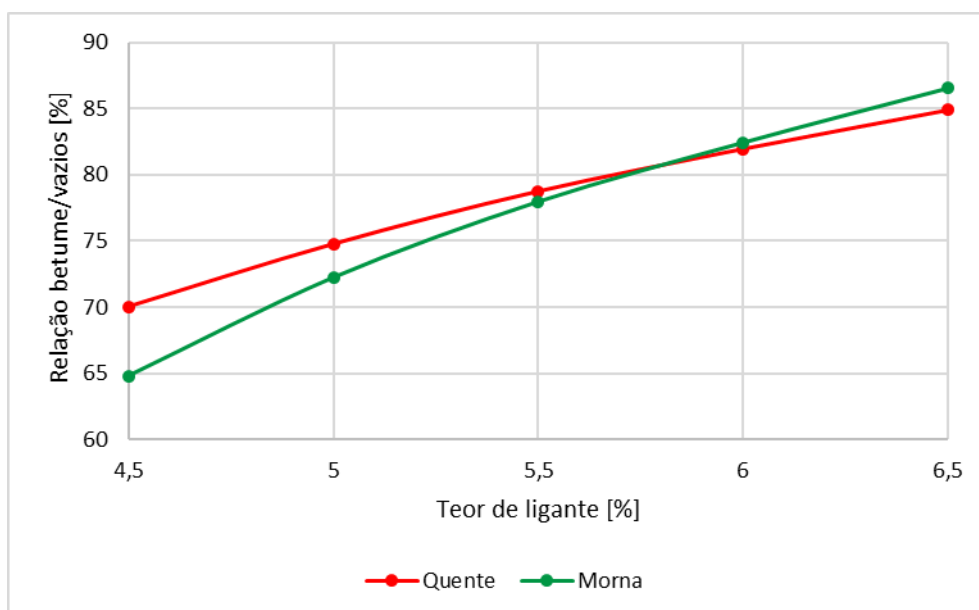
Fonte: Autoria própria

Figura 21 – Vazios do agregado mineral x teor de ligante



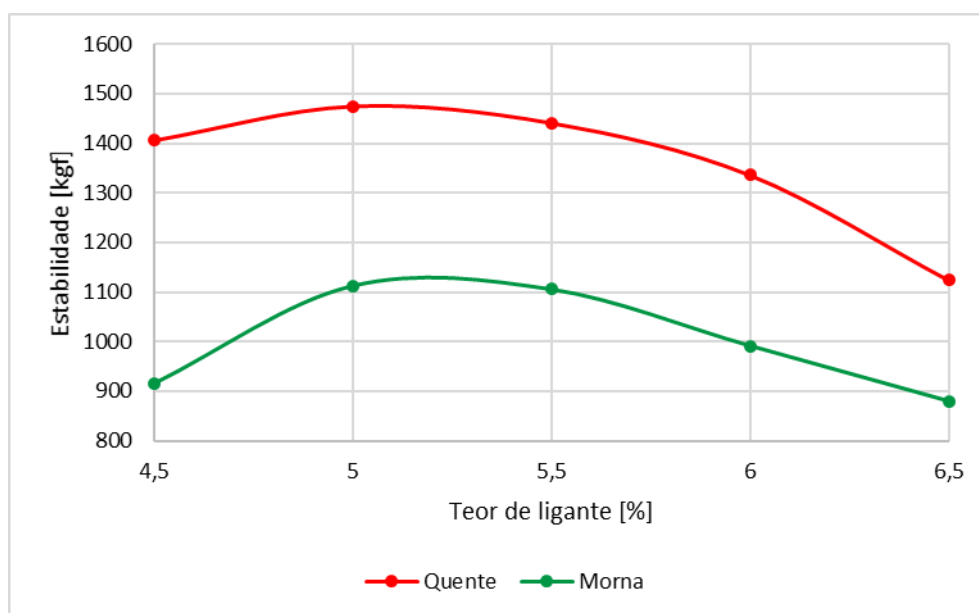
Fonte: Autoria própria

Figura 22 – Relação betume/vazios x teor de ligante



Fonte: Autoria própria

Figura 23 – Estabilidade x teor de ligante



Fonte: Autoria própria

Para a escolha do teor “ótimo” de ligante, foram utilizados dois métodos de cálculo. O primeiro, definido por NAPA (1982) estabelece que o critério a ser atendido pelos CPs corresponde ao volume de vazios igual a 4%, uma vez que a porcentagem de vazios para camadas de rolamento deve estar entre 3 e 5%, assim como já apresentado no item 2.6.1. Assim foi encontrado para a mistura à quente o valor de 5,3% e para a mistura morna 5,5%.

Outro método empregado é baseado na média de 3 teores, sendo eles: volume de vazios de 4%, a máxima estabilidade Marshall e a massa específica aparente máxima das amostras compactadas. Os valores dos teores de projeto para este modelo de cálculo, foram para as misturas à quente, 5,1% e morna 5,3%, respectivamente.

Para o critério da relação betume/vazios, na mistura à quente os teores de 5,5 e 6% foram os únicos que se enquadraram, na morna somente o teor de projeto 5,5% cumpriu o requisito estabelecido no intervalo mínimo de valores da norma, sendo este de 75 a 82. A estabilidade Marshall mínima (500 kgf) foi atingida em todos os teores, apresentando valores de resistência consideravelmente superiores ao valor de referência, tanto para a mistura padrão, quanto para a morna. A porcentagem esperada de 15% de VAM de acordo com o DMT dos agregados de 19,1mm, também

foi outra característica que obtive valores acima do mínimo normatizado para todos os teores.

5 CONCLUSÃO

A partir do desenvolvimento desta pesquisa, foi possível perceber uma crescente preocupação no cenário da pavimentação, na busca de soluções para os problemas e limitações que existem no emprego de materiais petrolíferos. Diversas tecnologias já foram e ainda estão sendo desenvolvidas nesse contexto. Existe uma ampla variedade de técnicas que utilizam misturas asfálticas mornas e semi-mornas, como alternativa de substituição para o processo de CBUQ, dentre elas, o uso de aditivos surfactantes.

A utilização do aditivo surfactante permitiu que houvesse uma redução na temperatura de aquecimento dos agregados e de compactação da mistura da morna. Após análises dos resultados foi possível concluir que as duas misturas obtiveram resultados de desempenho que se enquadram aos valores esperados para o método Marshall, assim como das diversas literaturas consultadas, apesar de cada uma possuir suas particularidades. Esse método de compactação mostrou ser estaticamente igual em relação a definição do teor de projeto para os dois tipos de misturas.

Na comparação direta entre os dados da mistura à quente e morna, a redução de 30°C de diferença entre uma e outra, não gerou grandes modificações no volume de vazios entre ambas misturas. Para os teores mais elevados de CAP, acima de 5,7 %, a mistura morna apresentou menores valores de VV. Somente para o teor de 4,5% ocorreu um considerável aumento no volume de vazios na amostra morna, acredita-se que essa grande diferença é consequência de algum problema na variação da temperatura no processo de preparação dos CPs.

No geral, pode-se concluir que a diminuição da temperatura não interferiu de maneira expressiva na densificação da mistura asfáltica, uma vez que os resultados do VV para os dois tipos de misturas foram praticamente iguais. Esse fator é importante, pois demonstra que a mistura morna possui comportamento mecânico semelhante ao da mistura à quente.

Em relação à estabilidade Marshall, a mistura morna registrou capacidade de resistência em cerca de 75% do valor resultante da mistura padrão. Essa grande diferença não era esperada, uma vez que esse parâmetro está intimamente ligado ao

VV das misturas, que por apresentaram valores próximos, não deveriam sofrer significativa redução em suas resistências. Pode ter ocorrido que a interação entre a superfície dos agregados, com o ligante associado ao aditivo surfactante nos CPs da mistura morna tenha ocasionado maior deformação, e a diminuição da resistência.

O emprego do aditivo químico não alterou a viscosidade do ligante asfáltico, sendo assim, foi comprovado sua ação como surfactante. O uso dessa tecnologia foi positivo, pois substituiu o DOPE de adesividade. Entretanto, notou-se que para os teores de 6,0 e 6,5% houve exsudação na superfície dos CPs, provavelmente devido à grande quantidade de ligante da mistura, acima do teor de projeto, aliada as propriedades adesivas do aditivo.

Em geral, a pesquisa apresentou aspectos positivos quanto ao uso da tecnologia de misturas mornas com aditivo surfactante, uma vez que o comportamento mecânico de ambas foi equivalente, além dos diversos benefícios gerados através da diminuição da temperatura. Comprovou-se que a tecnologia empregada é adequada para se reduzir cerca de 30°C na temperatura de aquecimento dos agregados e compactação da mistura.

Para que o desempenho mecânico das misturas à quente e morna sejam semelhantes, é importante que as temperaturas de aquecimento e compactação dos materiais sejam corretamente controladas, assim como a porcentagem de aditivo surfactante. O ideal seria que o ensaio de compactação também fosse realizado a partir de outros métodos, além do Marshall, para a comparação de resultados.

A sugestão para trabalhos futuros é a realização dos mesmos testes e análises para um ligante asfáltico do tipo CAP 30/45, uma vez que o CAP 50/70 possui viscosidade e consistência menor, e assim está mais susceptível a defeitos causados por deformação. Também o desenvolvimento de pesquisas com os outros tipos de aditivos redutores de temperatura, e se possível, uma aplicação em campo de trechos experimentais com misturas asfálticas mornas.

REFERÊNCIAS

ASPHALT INSTITUTE. The Asphalt Handbook. MS-4. 7th edit. Asphalt Institute, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água, Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 7809: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2019.

_____. NBR 9935: Agregados - Terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

_____. NBR 14950: Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade Saybolt Furol, Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR 15087: Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR NM 26: Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro, 2001.

BITUME QUÉBEC. Les enrobés tièdes: une approche écologique. Techno-Bitume: Bulletin Technique, Sainte-Julie, 2013.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. DA, CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2010.

BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. Relatório Final - Capacitação da Equipe Técnica. Asfálticos, 2011.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 035: Agregados - Determinação da Abrasão "Los Angeles": Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

_____. DNER-ME 043: Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

_____. DNER-ME 078: Agregado graúdo: adesividade a ligante betuminoso: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

_____. DNER-ME 083: Agregados - Análise Granulométrica: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

_____. DNER-ME 086: Agregado – Determinação do índice de forma: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1994.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Diretoria Geral. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Diretrizes básicas para execução de misturas asfálticas mornas com uso de aditivos surfactantes. Rio de Janeiro, p. 48. 2018.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 031 - ES: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

_____. DNIT 095 - EM: Cimentos asfálticos de petróleo - Especificações de material. Rio de Janeiro, p. 6. 2006.

_____. DNIT 136 - ME: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

_____. DNIT 155 - ME: Material asfáltico - Determinação da penetração - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

BRASIL. Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. Anuário estatístico 2018. Disponível em: < http://www.transportes.gov.br/anu%C3%A1rio_estatistico.html>. Acesso em: 14 mai. 2019.

BUDNY, J. Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas. 137 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2012.

CARVALHO, J. R. Estudo do comportamento do asfalto modificado com óleo de girassol visando à obtenção de misturas mornas. 122 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, 2018.

D'ANGELO J. A. Superpave mix design tests methods and requirements. U.S. Federal Highway Administration. APWA International Public Works Congress, 2001.

D'ANGELO, J.; 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.

EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. The use of Warm Mix Asphalt, EAPA - Position Paper, Belgium, 2014.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. U.S. Department of Transportation. Pavements, Sustainability: Warm Mix Asphalt Technologies and Research. Disponível em: < <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/wma.cfm>>. Acesso em: 20 nov. 2019.

FILHO, N. W. Avaliação da influência da redução das temperaturas de usinagem e de compactação no comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas. 110 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Do Ceará. Departamento de Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2013.

GENNESSEAUX, M. M. L. Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado. 195 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2015.

KVANASK, A., WEST, R., HURLEY G., PROWELL, B., JONES, D., KREICH T., OSBORN, L., PEREGRINE, K., FRANK B. NCHRP 09-47A: Engineering properties, emissions, and field performance of warm mix asphalt technologies. Interim report appendix literature review. Volume I. Auburn, 2009.

LANCASTER, I. M. Warm Mix Asphalt in Europe. 27 p. Nynas, Oslo, 2015.

LOPES, J. L. Riscos para a saúde de trabalhadores de pavimentação com asfalto. INTERFACEHS – Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente, v 3, nº 3, 2008.

MENSCH, N. G. Análise viscoelástica de misturas asfálticas quentes e mornas. 168 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2017.

MERIGHI, C. F. Estudo do comportamento de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimento com adição de borracha moída de pneu. 201 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2015.

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

NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. Mix Design Techniques - Part I. NAPA TAS-14, Instructors Manual, Greenbelt, 1982.

NIOSH. Hazard Review: Health Effects of Occupational Exposure to Asphalt. Cincinnati: National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 2000.

OLIVEIRA, J. R. M.; SILVA, H. M. R. D.; ABREU, L. P. F.; GONZALEZ-LEON, J. A. The role of a surfactant based additive on the production of recycled warm mix asphalts – Less is more. Construction and Building Materials, nº 35, 693-700, 2012.

OTTO, G. G. Misturas Asfálticas Mornas - Verificação da Fadiga e do Módulo Complexo. 179 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico, Florianópolis, 2009.

PÉREZ, Y. A. G. Avaliação do desempenho mecânico e reológico de misturas asfálticas mornas. 326 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico, Florianópolis, 2013.

PEREIRA, F. J. Q. Estudo da sensibilidade à água de misturas betuminosas. 90 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Departamento de Engenharia Civil, Lisboa, 2009.

PEREIRA, G. da S. Aditivos Orgânicos Melhoradores de Adesividade. SINICESP. Boletim Técnico, São Paulo, 2012. Disponível em: < <http://sinicesp.org.br/materias/2012/bt08a.htm> >. Acesso em: 22 mai. 2019.

PIZZORNO, B. de S. Efeito do solvente e da temperatura na morfologia superficial do cimento asfáltico de petróleo. 109 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal

do Rio de Janeiro. COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Rio de Janeiro, 2010.

PROWELL, B. D.; WEST, R. C. Begin Reducing Production and Laydown Temperatures – Today. National Asphalt Pavement Association. Hot Mix Asphalt Technology, Vol. 10, nº 4, 24-31, 2005.

PROWELL, B. D. Warm Mix Asphalt. The international technology scanning program summary report. American Trade Initiatives, 2007.

PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C.; FRANK, B. Warm-mix asphalt: Best Practices. National Asphalt Pavement Association. Quality Improvement Publication 125, 3rd edition. Lanham, 2012.

PROWELL, B.; FRANK, B.; OSBORNE, L.; KRIECH, T.; WEST, R. Effects of WMA on Plant Energy and Emissions and Worker Exposures to Respirable Fumes. Defat Final Report, Vol. 2, NCHRP 9-47A, 2014.

ROVOIRE JR., L. Avaliação de misturas mornas com emprego de simulador de tráfego linear. 249 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2014.

RÜHL, R. Réduction des expositions lors de la production et mise en œuvre d'enrobés tièdes. Frankfurt, 2006.

SHELL. The Shell bitumen handbook. 5 ed. London: Shell Bitumen/Thomas Telford Publishing, 2003.

SOMÉ, S. C. Comportement thermomécanique des enrobés tièdes et de l'interface bitumegrulat. Thermique [physics.class-ph]. Université de Nantes, Nantes, 2013.

WEST, R.; RODEZNO, C.; JULIAN, G.; PROWELL, B. Engineering properties and field performance of warm mix asphalt technologies. Final Report. National Cooperative Highway Research Program, Auburn, 2014.

WESTRACK. Superpave mixture design guide. WesTrack Forensic Team Consensus Report. U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration, Washington, 2001.

ZAUMANIS, M. Warm Mix Asphalt investigation. Master of Science Thesis. Kgs. Lynbgy, Denmark, 2010.