

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Jéssica da Silva Vieira

**ESTUDO LABORATORIAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS  
COM A UTILIZAÇÃO DE ADITIVOS SURFACTANTES**

Santa Maria, RS

2022

**Jéssica da Silva Vieira**

**ESTUDO LABORATORIAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS COM A  
UTILIZAÇÃO DE ADITIVOS SURFACTANTES**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia Civil,  
da Universidade Federal de Santa Maria  
(UFSM, RS), como requisito parcial para a  
obtenção do título de **Bacharel em  
Engenharia Civil.**

Orientador: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht  
Coorientador(a): Ma. Chaveli Brondani

Santa Maria, RS  
2022

**Jéssica da Silva Vieira**

**ESTUDO LABORATORIAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS COM A  
UTILIZAÇÃO DE ADITIVOS SURFACTANTES**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Civil**.

Aprovado em 28 de março de 2022:

.....  
**Luciano Pivoto Specht, Prof. Dr. (UFSM)**  
(Orientador)

.....  
**Chaveli Brondani, Mestre (UFSM)**  
(Coorientadora)

.....  
**Lucas Dotto Bueno, Prof. Dr. (UFSM)**  
(Banca)

.....  
**Cléber Faccin, Mestre (UFSM)**  
(Banca)

Santa Maria, RS  
2022

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço aos meus pais, Sergio e Nara, pelo apoio, suporte e carinho, em todos esses anos de curso e principalmente ao longo das etapas desse trabalho no qual estiveram presentes. Sempre me incentivaram desde o início na minha jornada e foram meu porto seguro em todos os momentos mais difíceis. Sou eternamente grata pelo amor e suporte que me deram e deixo registrado meu amor incondicionalmente por vocês.

Agradeço ao meu orientador Luciano Pivoto Specht, pela compreensão do início ao fim, onde aceitou me guiar nessa jornada pelo laboratório no qual não tinha vivência prévia. Obrigada pelos ensinamentos ao longo desse trabalho, que contribuindo para minha formação acadêmica despertando interesse na ciência e assim ingressar na pesquisa.

A doutoranda Chaveli Brondani orientadora desse trabalho e a mestranda Gabriela Fanck, pela paciência, ensinamentos, dedicação e palavras de incentivo. Agradeço por tudo que me ensinaram, aos inúmeros auxílios sem medir esforços e os momentos de descontração que passamos no laboratório. Me alegra ver que construímos uma amizade nesse tempo que iniciamos esse trabalho e que ela continue por muitos anos.

A todos os amigos que estiveram presentes ao longo do curso, sou grato pelas palavras de incentivo, momentos vivenciados juntos ao longo desses anos, a paciência e ensinamentos que puderam me proporcionar, sem vocês com certeza essa jornada não teria sido fácil e memorável, ficou feliz em ter vocês como colegas de profissão e amizades para a vida.

Agradeço a minha irmã Leticia e ao restante da família, pelo apoio e palavras de confiança ao longo dos anos, feliz por concluir mais uma etapa, ser mais um exemplo entre nós e celebrar essa conquista junto de todos.

Não poderia deixar de agradecer a Universidade Federal de Santa Maria e ao GEPPASV, uma instituição pública de excelência e qualidade, onde tive o privilégio de estudar e adquirir minha formação profissional.

A todos minha eterna gratidão!

## RESUMO

### ESTUDO LABORATORIAL DE MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS COM A UTILIZAÇÃO DE ADITIVOS SURFACTANTES

AUTORA: Jéssica da Silva Vieira  
ORIENTADOR: Luciano Pivoto Specht  
COORIENTADORA: Chaveli Brondani

O ramo da pavimentação está em constante desenvolvimento, procurando atualizar suas técnicas ajustadas à preservação do meio ambiente, assim melhorando as condições de execução e qualidade das misturas, se tornando cada vez mais populares. Em meio as essas técnicas, as misturas mornas apresentam um impacto positivo e vários benefícios quando comparadas às misturas convencionais. O emprego dessas misturas, permite a redução das temperaturas de usinagem e compactação usualmente empregadas nas misturas a quente. Como objetivo dessa pesquisa, foram analisados a partir de ensaios laboratoriais o comportamento das misturas asfálticas mornas, utilizando ligante convencional e aditivos surfactantes. Desse modo, os ensaios de caracterização dos materiais pétreos realizados aprovaram a utilização desses materiais granulares na mistura e os mesmos estão em conformidade com a Faixa A do DAER. A partir do método Marshall, foi possível determinar a porcentagem de ligante asfáltico utilizado e após os corpos de prova moldados, ensaios de estabilidade/fluência foram realizados. Por fim, ainda como metodologia nessa pesquisa realizaram-se ensaios mecânicos como resistência a tração por compressão diametral (RT) e módulo de resiliência (MR). Como resultado, a redução de temperatura de compactação de 15°C e 30°C da mistura referência, nas diferentes composições com os aditivos utilizados trouxeram resultados adequados e valores muito próximos do ligante convencional. Os valores encontrados de RT e MR estão em conformidade com a literatura e os materiais pétreos utilizados apresentam características satisfatórias, podendo ser utilizados na mistura sem necessidade de adequação. Dessa forma, os benefícios das misturas mornas são muitos vantajosos e como comprovado nesse estudo os aditivos surfactantes avaliados são duas opções presentes no mercado.

**Palavras-chave:** Mistura morna, Temperatura de compactação, Ensaios Mecânicos, Aditivos surfactantes.

## ABSTRACT

### LABORATORY STUDY OF WARM ASPHALT MIXTURES WITH THE USE OF SURFACTANT ADDITIVES

AUTHOR: Jéssica da Silva Vieira  
ADVISER: Luciano Pivoto Specht  
COADVISER: Chaveli Brondani

The paving branch is constantly developing, seeking to update its techniques adjusted to the preservation of the environment, thus improving the conditions of execution and quality of the mixtures, becoming increasingly popular. Among these techniques, warm mix asphalt (WMA) bring a positive impact and several benefits when compared to conventional hot mix asphalt. The use of warm mix asphalt allows the reduction of manufacturing and compaction temperatures usually used in hot mix asphalt. As the objective of this research, the behavior of warm mix asphalt, using conventional binder and surfactant additives, was analyzed from laboratory tests. Thus, the characterization tests of the stone materials carried out approved the use of these granular materials in the mixture and they are following (as DAER A range). Dosed by the Marshall methodology, it was possible to determine the percentage of asphalt binder used and after the molded specimens, stability/creep tests were performed. Finally, still as a methodology in this research, were submitted to the following tests: Diametral Tensile Strength (RT) and Resilience Module (MR). As a result, the compaction temperature reduction of 15°C and 30°C of the reference mixture, in the different compositions with the additives used, brought adequate results and values very close to the conventional binder. The values found for RT and MR are in accordance with the literature and the stone materials used have satisfactory characteristics, and can be used in the mixture without the need for adjustment. In this way, the benefits of warm mix are very advantageous and as proven in this study, the surfactant additives evaluated are two options presents in the market.

**Keywords:** Warm mix, Compaction temperature, Mechanical Tests, Surfactant additives.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação das misturas asfálticas em função de temperaturas típicas de usinagem.....	18
Figura 2 - Tecnologia com aditivos orgânicos/ceras.....	21
Figura 3 - Sasobit em flocos e em pastilha, respectivamente.....	22
Figura 4 - Aditivo surfactante agindo como melhorador de adesividade.....	23
Figura 5 - Aditivos citados quanto a seu estado físico.....	24
Figura 6 - Tecnologia com formação de espuma.....	25
Figura 7 - Fumos asfálticos liberados pela mistura a quente (A) e pela mistura morna (B) quando da aplicação do material em pista.....	27
Figura 8 - Traçado da pesquisa.....	32
Figura 9 - Coletado agregado mineral.....	34
Figura 10 - Aditivos Surfactantes utilizados.....	35
Figura 11 - Série de peneiras e percentuais para granulometria.....	37
Figura 12 - Granulometria por peneiramento.....	37
Figura 13 - Ensaio densidade: Picnômetro na bomba de vácuo (A); picnômetro com amostra e água (B) e amostra em banho-maria (C).....	41
Figura 14 - Ensaio Abrasão: equipamento LMCC (A); bolas de aço (B); material ensaiado (C) e resultado do ensaio (D).....	42
Figura 15 - Ensaio Sanidade: Amostras separadas em frações (A); amostras submersas no sulfato (B) e amostras após 16 horas (C).....	43
Figura 16 - Ensaio equivalente de areia: Kit Solotest (A); preparação do ensaio (B) e período de sedimentação(C).....	44
Figura 17 - Requisitos para Concreto Asfáltico segunda a norma.....	47
Figura 18 - Valores limites dos vazios do agregado mineral da mistura com CAP para o método Marshall.....	47
Figura 19 - Material separado em frações (A); adição do ligante (B) e moldagem Marshall (C).....	49
Figura 20 - Misturas prontas (A); CPs com moldes (B) e CPs após 12 horas (C).....	50
Figura 21 - Dispositivo centralizador para Resistência à tração.....	51
Figura 22 - Estado de tensões gerado no ensaio de RT.....	52
Figura 23 - Ensaio de MR realizado no equipamento UTM-25.....	53
Figura 24 - Curva granulométrica dos agregados.....	57
Figura 25 - Curva da composição granulométrica - Faixa A DAER-ES-P 016/91.....	58
Figura 26 - Parâmetros de dosagem Marshall.....	62
Figura 27 - Comparativo volume de vazios das composições.....	63
Figura 28 - Resultados de Resistência a Tração.....	66
Figura 29 - Resultados de Módulo de Resiliência.....	69
Figura 30 - Resultados da razão MR/RT.....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação das quantidades de corpos de prova por ensaios e misturas.....	32
Tabela 2 - Especificação do CAP 50/70. ....	33
Tabela 3 - Ensaios e normas utilizadas para caracterização dos agregados. ....	35
Tabela 4 - Temperaturas dos agregados, mistura e compactação para moldagem. ....	48
Tabela 5 - Granulometria dos agregados. ....	56
Tabela 6 - Composição granulométrica da mistura asfáltica conforme limites da Faixa A do DAER-ES-P 016/91. ....	57
Tabela 7 - Resultados de massa específica do material graúdo. ....	58
Tabela 8 - Massa específica do material miúdo (pó de pedra).....	59
Tabela 9 - Propriedades do agregado em estudo.....	59
Tabela 10 - Características da mistura referência. ....	60
Tabela 11 - Parâmetros Finais da Mistura .....	61
Tabela 12 - Volume de vazios médio das composições.....	63
Tabela 13 - Valores da Resistência a Tração.....	65
Tabela 14 - Valores de média e desvio padrão para RT. ....	66
Tabela 15 - Resultados de MR para cada amostra, média por posição de ensaio, desvio padrão, coeficiente de variação e resultado de MR médio por composição. ....	68
Tabela 16 - Valores de média de Módulo de Resiliência.....	68
Tabela 17 - Resultados da relação MR/RT.....	70

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AD-I@121°	Aditivo I temperatura de compactação 121°C
AD-I@106°	Aditivo I temperatura de compactação 106°C
AD-II@121°	Aditivo II temperatura de compactação 121°C
AD-II@106°	Aditivo II temperatura de compactação 106°C
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAP	Concreto Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CECA	Cecabase - Arkema Group
CP	Corpo-de-Prova
DAER	Departamento Autônomo de Estradas e Rodagem
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes
EAPA	European Asphalt Pavement Association
FHWA	Federal Highway Administration
	Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança
GEPPASV	Viária
GMM	Densidade Máxima Medida
HMA	Hot Mix Asphalt
HPA	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
LVDT	Linear Variable Differential Transducer
MR	Módulo de Resiliência
NAPA	National Asphalt Pavement Association
NBR	Norma Brasileira
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
ONU	Organização das Nações Unidas

RBV	Relação Betume Vazios
REF@136°	Referência Temperatura de compactação 136°C
REFAP	Refinaria Alberto Pasqualini
RT	Resistência à Tração por Compressão Diametral
SABITA	Southern African Bitumen Association
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
UTM	Universal Testing Machine
VAM	Vazios no Agregado Mineral
VV	Volume de vazios
WMA	Warm Mix Asphalt

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	13
1.1	JUSTIFICATIVA	14
1.2	OBJETIVO	15
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo geral</b>	15
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b>	15
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	17
2.1	CLASSIFICAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS QUANTO À TEMPERATURA DE PRODUÇÃO	17
2.2	MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS	18
<b>2.2.1</b>	<b>Breve histórico das misturas mornas</b>	19
<b>2.2.2</b>	<b>Técnicas de produção de misturas mornas</b>	20
2.2.2.1	Aditivos orgânicos/ceras	21
2.2.2.2	Aditivos químicos/surfactantes	22
2.2.2.3	Formação de espuma	24
<b>2.2.3</b>	<b>Principais Benefícios das Misturas Mornas</b>	25
2.2.3.1	Redução da emissão de poluentes atmosféricos	26
2.2.3.2	Melhoria do ambiente de trabalho	26
2.2.3.3	Diminuição do consumo energético	27
2.2.3.4	Menor envelhecimento do ligante	28
2.2.3.5	Aplicação a temperaturas mais baixas	28
2.2.3.6	Aumento da distância de transporte	29
2.2.3.7	Melhorias na compactação	29
2.2.3.8	Lucratividade no Mercado de Carbono	29
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	31
3.1	PLANEJAMENTO DA PESQUISA	31
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA	32
<b>3.2.1</b>	<b>Ligante asfáltico</b>	32
<b>3.2.2</b>	<b>Agregados Minerais</b>	33
<b>3.2.3</b>	<b>Aditivos Surfactantes</b>	34
3.3	AValiação LABORATORIAL DOS AGREGADOS	35
<b>3.3.1</b>	<b>Análise granulométrica</b>	36
<b>3.3.2</b>	<b>Densidades e massas específicas</b>	38
3.3.2.1	Agregados Graúdos	38
3.3.2.2	Agregados Miúdos	39
<b>3.3.3</b>	<b>Abrasão “Los Angeles”</b>	41
<b>3.3.4</b>	<b>Sanidade</b>	42

<b>3.3.5</b>	<b>Equivalente de areia</b> .....	43
3.4	DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	45
<b>3.4.5</b>	<b>Método Marshall</b> .....	45
<b>3.4.6</b>	<b>Moldagem dos corpos de prova</b> .....	48
3.5	ENSAIOS MECÂNICOS .....	50
<b>3.5.5</b>	<b>Resistência à tração por compressão diametral (RT)</b> .....	50
<b>3.5.6</b>	<b>Módulo de resiliência (MR)</b> .....	53
<b>3.5.7</b>	<b>Estabilidade e Fluência</b> .....	55
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS</b> .....	56
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	56
<b>4.1.1</b>	<b>Análise granulométrica</b> .....	56
<b>4.1.2</b>	<b>Densidades e massas específicas</b> .....	58
4.1.2.1	Agregados graúdos .....	58
4.1.2.2	Agregados miúdos .....	59
<b>4.1.3</b>	<b>Abrasão “Los Angeles”, sanidade e equivalente de areia</b> .....	59
<b>4.1.4</b>	<b>Definição do teor ideal de ligante para o projeto</b> .....	60
4.2	ENSAIOS MECÂNICOS .....	63
<b>4.2.1</b>	<b>Volume de vazios</b> .....	63
<b>4.2.20</b>	<b>Ensaio de resistência a tração por compressão diametral</b> .....	64
<b>4.2.3</b>	<b>Ensaio de Módulo de Resiliência</b> .....	67
<b>4.2.4</b>	<b>Relação MR/RT</b> .....	70
<b>4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	71
5.1	CONCLUSÕES .....	71
4.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	72
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	73

## 1 INTRODUÇÃO

Um pavimento pode ser definido como um sistema de múltiplas camadas semi-infinitas designado a distribuir os esforços verticais e horizontais resultantes do tráfego, proteger as camadas inferiores das intempéries e proporcionar aos usuários uma superfície regular e segura de modo a promover condições de rolamento com conforto, economia e segurança (MEDINA e MOTTA, 2005; BERNUCCI et al., 2010).

Segundo Papagiannakis e Massad (2008), existem três tipos gerais de pavimentos rodoviários: flexíveis, rígido e composto. Os termos flexível e rígido referem-se à forma como concreto asfáltico e pavimentos de concreto Portland, respectivamente, transmitem tensão e deflexão para as camadas subjacentes. Os pavimentos flexíveis geralmente consistem em concreto asfáltico colocado sobre camadas granulares de base/sub-base suportadas pelo solo compactado, conhecido como subleito.

Por definição o concreto asfáltico é uma mistura executada a quente, em usina apropriada, características específicas, composta de agregado graduado, material de enchimento (filer) se necessário e cimento asfáltico, espalhada e compactada a quente. O concreto asfáltico pode ser empregado como revestimento, camada de ligação (binder), base, regularização ou reforço do pavimento. Sendo aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas (DNIT, 2006).

A preocupação crescente nos últimos anos com o meio ambiente também afetou o setor rodoviário que tem buscado seguir esta tendência, por meio do desenvolvimento de novas tecnologias no campo da pavimentação. Almejando um desenvolvimento sustentável, faz-se necessária uma busca constante por novas matérias primas e por meios de produção mais eficientes, que minimizem os desperdícios e os danos ambientais, contribuindo, dessa forma, para que os bens naturais não se esgotem. Como consequência, uma das principais fontes de poluição decorrente das indústrias relacionada com infraestrutura de transporte (ou seja, construção de estradas), reside na fabricação, difusão e conservação de misturas asfálticas (BOHN, 2017; MELLO, 2012; RUBIO *et al.*, 2012).

Em meio a esse desenvolvimento surgiram, no setor rodoviário, novas alternativas sustentáveis. Com o objetivo de contribuir com a redução da emissão de gases e particulados, provenientes do aquecimento do cimento asfáltico de petróleo, e ainda se baseando no protocolo de Quioto de 1997, a Europa desenvolveu a tecnologia de misturas asfálticas mornas (em inglês – Warm Mix Asphalt) (PROWELL; HURLEY; FRANK, 2012).

Misturas asfálticas mornas e semimornas são aquelas produzidas a temperaturas intermediárias, ou seja, não se encaixam na definição de misturas asfálticas frias, produzidas à temperatura ambiente, entre 25° e 55°C, e também não estão enquadradas na faixa das misturas asfálticas quentes, que são produzidas a temperaturas que podem variar entre 145° até 180°C, dependendo do tipo de ligante utilizado. As misturas asfálticas mornas são produzidas a temperaturas intermediárias, em uma faixa que varia de 105° a 145°C, enquanto que as misturas asfálticas semimornas são produzidas a temperaturas variando entre 55°C e 105°C (D'ANGELO et al, 2008; BUDNY, 2012).

O princípio fundamental das misturas asfálticas mornas está diretamente ligado ao aumento da lubricidade do ligante asfáltico, pois consegue-se revestir o agregado a temperaturas mais baixas. Quando produzidas a temperaturas inferiores às tradicionais, as misturas asfálticas reduzem de forma significativa a emissão de gases como o  $CO_2$ , contribuindo para menor emissão de gases causadores do efeito estufa (PROWELL; HURLEY; FRANK, 2012), sendo este ponto de extrema importância, pois possibilita a instalação de usinas em locais anteriormente proibidos por questões ambientais, além da redução do consumo de energia, que é um grande benefício aos produtores de asfalto, trazendo redução do custo da tonelada de asfalto (BOHN, 2017).

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Na Constituição Federal, o artigo 21 delibera sobre as competências quando a exploração, concessão ou permissão de alguns serviços básicos. As concessões dos serviços de saneamento básico são definidas pela Lei 11.445/07 (EOS, 2022). Um dos modelos de concessionária, são as empresas privadas, segundo a Associação Brasileira das Concessionárias Privadas de Água e Esgoto (ABCON), as concessionárias atendem de forma plena ou parcial, em cada município, 15% da

população (32,5 milhões de pessoas) e estão presentes em 7% dos municípios (AGÊNCIA BRASIL, 2022).

Seguindo a NBR 12266/92, as concessionárias realizam obras de ampliação do sistema de esgotamento sanitário prevendo a recomposição do pavimento da via após o assentamento das tubulações. Dentro do processo de execução de serviço, seguindo a (NORMA DNIT 031/2006 – ES DNIT Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço), foi possível constatar a logística de execução desde a saída da usina, armazenamento da massa ao longo do dia, perda de temperatura em decorrência do clima e distância, exposição dos funcionários aos gases emitidos no processo de execução, entre outros pontos. Desse modo, a utilização de misturas mornas como alternativa para os pontos observados no cenário ampara esse trabalho.

Dessa forma, com à redução da temperatura na usinagem e compactação das misturas asfálticas, importantes benefícios relacionados ao meio ambiente e à qualidade da pavimentação surgem como: redução do consumo energético, menor emissão de poluentes atmosféricos, menor exposição aos trabalhadores de pavimentação, redução do envelhecimento asfáltico, aplicação em locais de clima frio, possibilidade de transporte com maiores distâncias as misturas.

## 1.2 OBJETIVO

### 1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a partir de ensaios laboratoriais o comportamento das misturas asfálticas mornas, utilizando ligante convencional e dois aditivos surfactantes, a fim de verificar a influência da redução de temperatura no volume de vazios, resistência à tração por compressão diametral e no módulo de resiliência.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar a composição granulométrica da amostra de agregados, realizando ensaios laboratoriais como: Ensaio Los Angeles, Equivalente de areia, Sanidade, Densidade real dos agregados;

- Analisar a influência do percentual de ligante utilizado para determinação de volume de vazios ideal, através da dosagem;
- Analisar a influência das amostras de mistura morna quanto à referência em temperatura mais elevada, em relação às propriedades mecânicas do material, com uso de aditivos surfactantes;

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 CLASSIFICAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS QUANTO À TEMPERATURA DE PRODUÇÃO

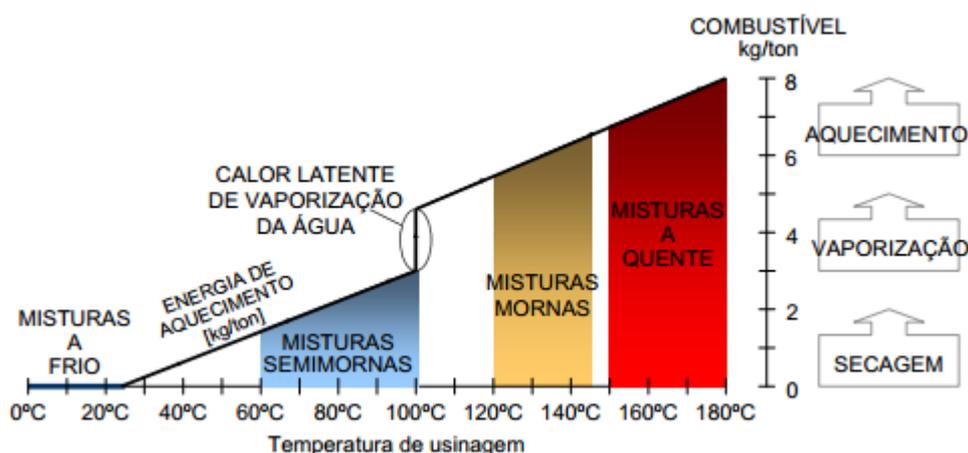
As misturas asfálticas de usinas podem ser classificadas de acordo com a temperatura empregada em sua produção, divididas basicamente em quatro grupos: misturas a quente, misturas mornas, misturas semimornas e misturas a frio (MOTTA, 2011). As misturas a quente são preparadas a partir do aquecimento dos agregados pétreos e do ligante asfáltico, sendo a usinagem executada em níveis elevados de temperatura, da ordem de 145 a 180°C (BERNUCCI et al., 2010).

As misturas preparadas em temperaturas intermediárias às das misturas a quente e a frio são denominadas de misturas semimornas e mornas. As misturas asfálticas semimornas diferem da mistura morna pela temperatura de mistura, sendo que, se a temperatura de mistura em usina for abaixo de 105°C a mistura é considerada semimorna. As misturas asfálticas mornas são aquelas produzidas a temperaturas que não se encaixam na definição de misturas asfálticas frias, as quais são as produzidas à temperatura ambiente, entre 25° a 55°C, e também não estão enquadradas na faixa das misturas asfálticas quentes. As misturas asfálticas mornas são produzidas a temperaturas intermediárias, em uma faixa que varia de 105° a 145°C (BERNUCCI et al., 2010).

A crescente preocupação em se produzir misturas asfálticas com maior economia e menor impacto ambiental tem instigado o setor de pavimentação ao desenvolvimento de novas tecnologias que mantenham as mesmas propriedades das misturas asfálticas utilizadas atualmente e minimizem os impactos ambientais.

Conforme o nível de aquecimento no processo de usinagem há variação da energia consumida (combustível), como ilustrado na Figura 1, onde apresenta-se a classificação das misturas asfálticas em função de temperaturas típicas de usinagem (BOHN, 2017).

Figura 1 – Classificação das misturas asfálticas em função de temperaturas típicas de usinagem.



Fonte: D'Angelo et al. (2008) adaptado por Motta (2011).

Temperaturas de usinagem e compactação muito elevadas trazem como consequência a aceleração do envelhecimento e a queima da mistura asfáltica. Um dos problemas do envelhecimento é o enrijecimento do ligante asfáltico, pois conforme o ligante torna-se mais rígido, também se torna mais resistente a deformações permanentes, porém, sua susceptibilidade ao trincamento por fadiga torna-se maior (MELLO, 2012).

## 2.2 MISTURAS ASFÁLTICAS MORNAS

Misturas asfálticas mornas ou Warm Mix Asphalt (WMA) são misturas asfálticas produzidas em temperaturas mais baixas, que reduzem o gasto com combustível, as emissões de gases poluentes e a exposição dos trabalhadores aos fumos durante a usinagem ou aplicação da mistura (BOHN, 2017).

De acordo com a EAPA – European Asphalt Pavement Association (2014), as misturas asfálticas mornas operam acima de 100°C e possuem diferentes técnicas de produção. Essas técnicas são usadas para reduzir a viscosidade efetiva do ligante, permitindo revestimento completo dos grãos da mistura e compatibilidade a temperaturas mais baixas.

A técnica de misturas mornas permite que o agregado seja completamente revestido pelo ligante asfáltico, ajudando assim também, na compactação (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.

### **2.2.1 Breve histórico das misturas mornas**

As primeiras pesquisas de análise à possibilidade de diminuir a temperatura de produção de misturas asfálticas foram realizadas no ano de 1956, onde o professor Ladis Csany, da Universidade do Iowa, avaliou o potencial da espuma de betume, formada através da introdução de vapor de água no betume quente e que poderia ser utilizada como um ligante para solos (CHOWDHURY e BUTTON, 2008). De acordo com Prowell e Hurley (2007), o nível de emissão de poluentes em uma usina de mistura asfáltica não é só função da temperatura, o combustível utilizado, o tipo de usina, teor de umidade dos agregados e a utilização de material fresado também influenciam no nível de poluição emitida pela usina. Após esse primeiro estudo, vários se sucederam até que o Protocolo de Kyoto fosse criado, e fizesse então intensificar a pesquisa sobre novas tecnologias, mais limpas, na Europa.

Segundo Prowell, Hurley e Frank (2012) os primeiros estudos sobre WMA 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.

Em 1997 teve início a comercialização do aditivo Sasobit® na Europa, pela empresa *Sasol Wax International AG* (CHOWDHURY e BUTTON, 2008). No mesmo ano 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.

No Brasil, um dos primeiros trabalhos a respeito de misturas mornas foi publicado, em 2006, por Souza Filho (2006), através da dissertação de Mestrado publicada na Universidade Federal do Ceará (UFC), tendo como título “Produção de Misturas Asfálticas Mornas pela Inserção de Zeólitas”. Destaca-se também os trabalhos publicados pelo Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV), envolvendo estudo com misturas mornas, como o Trabalho de Conclusão de Curso, tendo como título “Misturas asfálticas mornas: uma revisão de literatura” por William Cassol (2012) e através da dissertação de Mestrado de Kátia A. Bohn (2017), “Avaliação de misturas asfálticas recicladas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero”. Até o momento, inúmeros trabalhos sobre WMA já foram publicados e outros estudo continuam no Brasil.

### **2.2.2 Técnicas de produção de misturas mornas**

As misturas asfálticas mornas não correspondem a um único produto, mas sim a uma variedade de tecnologias destinadas a reduzir as temperaturas de usinagem e compactação. Na maioria das vezes, os processos de mistura asfáltica morna reduzem a viscosidade do asfalto de diversas formas, possibilitando a cobertura completa dos agregados a temperaturas inferiores se comparadas às técnicas convencionais de mistura de asfalto a quente (OTTO, 2009; MELLO, 2012).

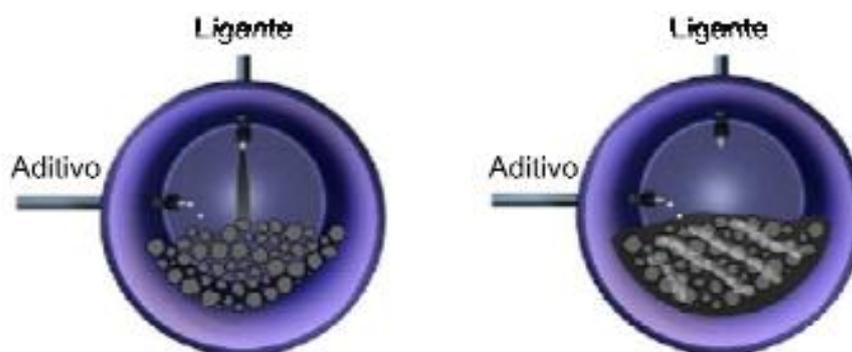
Segundo Perkins (2009), as misturas asfálticas mornas podem ser classificadas de acordo com o tipo de tecnologia empregada para reduzir a temperatura de trabalho. As WMAs são basicamente produzidas a partir de três tecnologias distintas: aditivos orgânicos/ceras; aditivos químicos/surfactantes; e, formação de espuma.

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).

### 2.2.2.1 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 2), 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 2 – Tecnologia com aditivos orgânicos/ceras.



Fonte: Motta (2011).

São também conhecidos como “fíleres inteligentes” por promovem uma redução da viscosidade do CAP na temperatura de produção e compactação das misturas asfálticas e um aumento desta viscosidade na temperatura de serviço do revestimento. Croteau e Tessier (2008) afirmam que este fato é um benefício adicional específico para o sistema WMA, proporcionando assim o aumento da resistência à deformação permanente quando aplicadas a temperaturas de serviço elevadas.

Um exemplo de aditivo orgânico, é o aditivo Sasobit® uma cera parafínica, que permite a produção de misturas mornas com a redução da viscosidade do ligante, modificando a curva temperatura-viscosidade. O Sasobit é fabricado pela Sasol Wax International e é comercializado na Europa e na Ásia desde 1997. Este é uma cera sintética produzida a partir de gaseificação de carvão e requer pouca modificação na

usina, o aditivo pode ser inserido diretamente no ligante ou na mistura (D' ANGELO et al., 2008). Este produto é comercializado em flocos ou em pastilhas, sendo que, quando utilizado em flocos deve ser incorporado diretamente no ligante, e quando utilizado sob a forma de pastilhas deve ser incorporado diretamente na massa asfáltica, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Sasobit em flocos e em pastilha, respectivamente.



Fonte: Almeida e Sergio (2019).

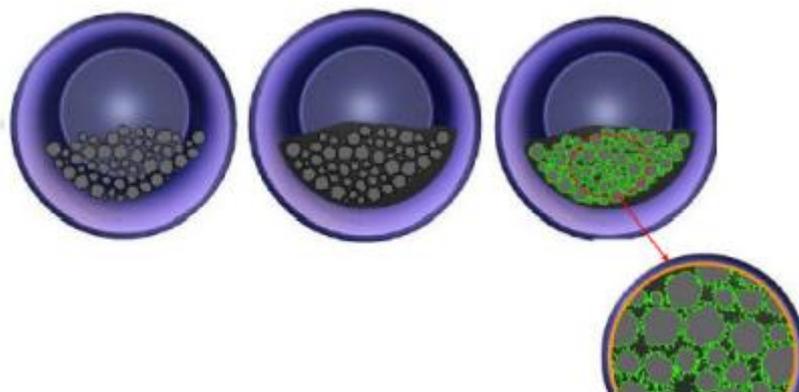
#### 2.2.2.2 Aditivos químicos/surfactantes

Os processos de misturas mornas contendo o uso de aditivos surfactantes estão relacionados com os mecanismos capazes de auxiliar o ligante no revestimento do agregado quando a mistura é fabricada a temperaturas mais baixas (CROTEAU e TESSIER, 2008). Os agentes surfactantes, também conhecidos como compostos tensoativos, são capazes de diminuir a tensão superficial na interface ligante/agregado, sem alterar as propriedades mecânicas e a viscosidade do asfalto. Conseqüentemente aumentar a capacidade de espalhamento e recobrimento dos agregados pelo ligante, sem interferir nas propriedades de todo o volume do asfalto (MELLO, 2012; MOTTA, 2011).

Nesta tecnologia o aditivo não altera as propriedades medidas nos ensaios de viscosidade, penetração e ponto de amolecimento, portanto não modificam a consistência do asfalto (MOTTA, 2011).

Na Figura 4 tem-se um esquema de como se comportam as misturas asfálticas mornas quando adicionado um aditivo surfactante as mesmas.

Figura 4 – Aditivo surfactante agindo como melhorador de adesividade.



Fonte: Motta (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 (DAPPER, 2020).

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 (Figura 5). Atualmente no Brasil, os aditivos que podem ser encontrados no mercado são: Cecabase®, Evotherm®, Gemul® e Rediset® (DNIT, 2018).

- O Cecabase RT® é um aditivo líquido que age como agente de superfície, proporcionando o perfeito recobrimento dos agregados pelo ligante quando a usinagem é realizada a temperaturas mais inferiores das praticadas comumente. Também atua como melhorador de adesividade. (MELLO, 2012; BOHN, 2017)
- O processo Evotherm utiliza-se de um “pacote químico” misturado a uma emulsão ou a um asfalto, tendo por finalidade melhorar o recobrimento dos

agregados, a adesividade e a trabalhabilidade da mistura asfáltica produzidas a baixas temperaturas conforme afirma Mello (2012).

- O aditivo Rediset™ é comercializado na forma de pastilhas, e através da combinação de agentes surfactantes e aditivos orgânicos, busca aperfeiçoar o recobrimento do ligante – agregado, sendo que, também age como melhorador de adesividade (MELLO, 2012).
- O aditivo Revix® também é produzido com aditivos surfactantes e busca reduzir o atrito interno entre as partículas de agregados e as finas películas de ligante durante a usinagem da mistura asfáltica e compactação em campo, momentos em que a massa asfáltica é submetida a altas taxas de cisalhamento (MELLO, 2012).

Figura 5 - Aditivos citados quanto a seu estado físico.



**Figure 1:** *Types of WMA Additives*

Longer Haulage Distance  	Reduce Operating Cost  	Reduce Harmful Emissions  
Increase Recycling Rate  	Increase Compaction  	Increase Production Rate  

Fonte: Bashir (2018).

Dentre as tecnologias apresentadas, o presente trabalho tem como objetivo o estudo de misturas asfálticas mornas através da adição de WarmGrip™ - Cecabase® e Cargill - Anova® 1501, buscando produzir misturas asfálticas mornas com a mesma qualidade das misturas asfálticas quentes.

### 2.2.2.3 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 6) 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 conseqüentemente melhorando a trabalhabilidade. Após a espuma ser desfeita, o ligante retorna as suas características originais (OTTO, 2009; PÉREZ, 2013).

Figura 6 - Tecnologia com formação de espuma.



Fonte: Motta, (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).

### 2.2.3 Principais Benefícios das Misturas Mornas

Segundo as literaturas quando tratado sobre as misturas mornas diversos benefícios indicam que a redução das temperaturas de usinagem e compactação pode trazer tanto nas questões relacionadas ao meio ambiente, a exposição ocupacional, no tempo de pavimentação e quanto nas relativas à qualidade do pavimento.

### 2.2.3.1 Redução da emissão de poluentes atmosféricos

A produção de misturas mornas é capaz de reduzir a emissão de substâncias nocivas à atmosfera, incluindo os gases responsáveis pelo efeito estufa. Apesar de depender de fatores como o grau de redução da temperatura, teor de umidade do agregado, projeto e utilização de material fresado, de maneira geral, pode se atribuir ao combustível a responsabilidade da redução de emissões de poluentes. Em temperatura mais baixa há diminuição do lançamento de gases, uma vez que, o processo de secagem e aquecimento dos agregados não necessita de tanta energia. (PROWELL; HURLEY; FRANK, 2012).

Pesquisas comprovam que as emissões na usina de asfáltica e no campo são diretamente dependentes da temperatura da mistura: quanto maior a temperatura que a mistura fica exposta, maior a emissão de anéis de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) (CAVALLARI et al., 2012) e baixas temperaturas de produção significam menor consumo de combustível, logo, novamente redução de emissões de poluentes. Isso é uma vantagem para locais que possuem problemas ambientais ou com condições que não permitem acúmulo de gases e fumaça, como por exemplo, pavimentação em túneis.

### 2.2.3.2 Melhoria do ambiente de trabalho

Segundo SABITA (2011), a segurança ao trabalhador é beneficiada diretamente pela redução da temperatura da mistura asfáltica, que reduz o risco de acidentes relacionados com temperatura, ganhos de conforto, referentes à redução da emissão dos gases e de temperatura.

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 7. 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 7 – Fumos asfálticos liberados pela mistura a quente (A) e pela mistura morna (B) quando da aplicação do material em pista.



Fonte: MOTTA (2011).

Considerando a exposição ocupacional, a utilização de misturas mornas pode ser um fator importante, posto que, a temperatura influencia de modo direto a quantidade de vapor expelido pela massa asfáltica e inalado pelos envolvidos nas atividades (MOTTA, 2011). Deste modo, a tecnologia morna possibilita melhores condições tanto para os trabalhadores da área quanto tanto para o público no entorno do local de aplicação, pois há redução do odor e do volume de fumaça (ZAUMANIS, 2010).

### 2.2.3.3 Diminuição do consumo energético

A mistura asfáltica morna apresenta-se como uma solução para a redução do consumo de combustível fóssil, em virtude da menor temperatura de aquecimento da massa (MERIGHI, 2015). Em um estudo realizado por Cervarich (2007), cálculos teóricos indicaram que a redução de 28°C na mistura poderia resultar em uma economia de combustível de 11%.

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).

#### 2.2.3.4 Menor envelhecimento do ligante

A utilização de misturas asfálticas mornas tende a reduzir a permeabilidade da mistura e o endurecimento do ligante em decorrência do envelhecimento, melhorando o desempenho em termos de resistência à fissuração e suscetibilidade à umidade (D'ANGELO et. al., 2008).

De acordo com a Southern African Bitumen Association (SABITA) é especulado que a produção da mistura asfáltica em temperaturas moderadas pode aumentar o período entre as intervenções de manutenção, resultando na economia dos custos do ciclo de vida e na redução da utilização de recursos não renováveis (SABITA, 2011).

#### 2.2.3.5 Aplicação a temperaturas mais baixas

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) – um dos órgãos regulamentadores das rodovias brasileiras – permite a fabricação, o transporte e a aplicação da mistura asfáltica a quente apenas quando a temperatura ambiente é superior a 10°C (DNIT 031/2006-ES). Tal recomendação ocorre devido às dificuldades na compactação em climas muito frios por perdas expressivas na temperatura (MOTTA, 2011).

Um estudo realizado na Alemanha, com diferentes tecnologias de mistura morna e a uma temperatura ambiente de -3 a 4°C, apontou que com a mistura morna obtém-se melhor densidade se comparada com a mistura a quente, isso com os mesmos ou menos número de passadas do rolo compactador (D'ANGELO et al., 2008).

### 2.2.3.6 Aumento da distância de transporte

No caso das misturas a quente distâncias muito longas podem impedir a execução do serviço. Além do transporte, deve ser considerado o tempo de compactação, pois quando a temperatura da mistura e o limite de compactação estão relativamente próximos há possibilidade de problemas na construção da pista (CROTEAU e TESSIER, 2008).

### 2.2.3.7 Melhorias na compactação

Pode-se afirmar que uma mistura asfáltica convencional quando compactada em temperaturas baixas, o ligante asfáltico se comporta no regime hidrodinâmico devido à existência de condições adequadas para as superfícies das partículas serem totalmente separadas (HANZ; BAHIA, 2013). Por este motivo, os autores afirmam que os aditivos de mistura morna ajudam na compactação, reduzindo a fricção interna do ligante asfáltico.

### 2.2.3.8 Lucratividade no Mercado de Carbono

A partir da entrada em vigor do Protocolo de Kyoto, houve uma transformação do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que antes considerado como o grande vilão do efeito estufa, passou a ser mercadoria, ou seja, o mercado de carbono possibilita trocar a redução dos gases que colaboram para o aumento do efeito estufa por créditos, que serão posteriormente negociados (MELLO, 2012)

Com o vigor do protocolo, é permitido que investidores de países que precisam reduzir suas emissões de CO<sub>2</sub> financiem em outros territórios projetos que reduzam a poluição atmosférica. Emitidos pela ONU, os chamados créditos de carbono, podem ser conquistados por empresas e governos que criarem projetos que tenham como objetivo o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, ou seja, quando um órgão ou empresa conseguir diminuir a emissão de gás carbônico na atmosfera e obter os certificados de redução de emissão de CO<sub>2</sub>, este certificado poderá ser abatido da cota que o país tem de cumprir ou ser vendido a terceiros.

Tendo-se em vista que a produção de misturas asfálticas mornas tende a reduzir cerca de 30% a emissão de gases (MELLO, 2012), já se pode começar a

calcular em termos de créditos de CO<sub>2</sub>, o benefício em termos econômicos que a produção destas pode gerar, pois além de beneficiar o meio ambiente, a redução de emissão de CO<sub>2</sub> já está representando verba para os cofres públicos.

O consumo de cimento asfáltico no Brasil em 2010 foi de aproximadamente 3 milhões de toneladas. Considerando-se que 90% deste total foi utilizado para fabricação de mistura asfáltica, e que, para cada tonelada de mistura asfáltica produzida, haja um consumo de 6% de cimento asfáltico, foram produzidas aproximadamente 45 milhões de toneladas de massa asfáltica. Considerando-se os valores estabelecidos por Ruhl (2008), isso resulta na emissão de 1,125 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> lançados na atmosfera. Produzindo-se misturas asfálticas a temperaturas mais baixas, entre 30°C a 35°C a menos que as temperaturas usualmente utilizadas, a emissão da taxa de CO<sub>2</sub> cairia cerca de 30%, resultando numa redução de 337.500 toneladas de CO<sub>2</sub>. Considerando-se o valor do crédito de carbono em 19 euros, isso resultaria em uma receita anual para as empresas brasileiras de aproximadamente 6,5 milhões de euros (R\$ 17 milhões).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

Inicialmente para o planejamento desta pesquisa uma revisão da literatura com relevância para o tema foi construída, objetivando encontrar conceitos e práticas necessárias para concretização do estudo. A seguir são apresentadas as seguintes etapas do planejamento:

- Coleta e caracterização dos agregados em estudo;
- Caracterização dos parâmetros dos ligantes asfálticos;
- Análise granulométrica, a fim de escolher uma estrutura adequada para o bom desempenho das misturas asfálticas;
- Ensaios do processo de dosagem de misturas asfálticas através da metodologia Marshall;
- Ensaios para verificação do comportamento mecânico (Resistência à Tração por Compressão Diametral e Módulo de Resiliência);

Para isso, o estudo evidenciou a incorporação de aditivos químicos surfactantes na pesquisa, com redução de 15°C e 30°C na compactação diferenciadas da mistura de referência, respectivamente foram divididos entre dois aditivos e diferentes composições de temperatura, e optou-se também por fazer uma mistura de referência, a qual não será inserida nenhum aditivo, para posterior análise de propriedades mecânicas.

Concretizando o estudo, a pesquisa realizada foi representada seguindo as descrições das etapas conforme o fluxograma da Figura 8. Para os ensaios foram moldados 40 corpos de prova referente a cinco diferentes composições, incluindo para a dosagem Marshall. Para fácil representação no desenvolver do trabalho, determinou-se as misturas como: REF@136°, AD-I@121°, AD-I@106°, AD-II@121° e AD-II@106°. A Tabela 1 apresenta as quantidades de corpos de prova para cada ensaio realizado na presente pesquisa.

Figura 8 - Traçado da pesquisa.



Fonte: Autora (2022).

Tabela 1 - Relação das quantidades de corpos de prova por ensaios e misturas.

<b>Ensaio/Misturas</b>	<b>REF@136°</b>	<b>AD-I@121°</b>	<b>AD-I@106°</b>	<b>AD-II@121°</b>	<b>AD-II@106°</b>
Dosagem Marshall e Estabilidade/Fluência	15	X	X	X	X
Resistência à Tração / Módulo de Resiliência	5	5	5	5	5
Subtotal	20	5	5	5	5
<b>TOTAL</b>	<b>40</b>				

Fonte: Autora (2022).

Em seguida, realizou-se a composição da mistura e depois moldados, então os corpos de prova passaram a ser submetidos a ensaios mecânicos no LMCC - Laboratório de Materiais de Construção Civil, da UFSM. A realização das moldagens e dos ensaios relacionados seguiram as especificações técnicas exigidas pelas normativas. Por fim, a interpretação e análise dos resultados e conclusões sobre os resultados obtidos.

## 3.2 MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA

### 3.2.1 Ligante asfáltico

O ligante asfáltico convencional utilizado nesta pesquisa foi o CAP 50/70 da REFAP – Refinaria Alberto Pasqualini, na cidade de Canoas – RS, próxima à Capital do Estado do Rio Grande do Sul. O material foi cedido pela própria refinaria, na qual anteriormente o material foi caracterizado para a dissertação de mestrado, Possebon (2018). Para cada tipo de ligante existe uma especificação da ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) que determina as características que devem ser atendidas. Assim, foram realizados os seguintes ensaios para caracterização: viscosidade Brookfield (NBR 15184), ponto de amolecimento (NBR 6560) e penetração (NBR 6576). As especificações das fabricantes se encontram na Tabelas 2.

Tabela 2 – Especificação do CAP 50/70.

<b>Propriedades</b>	<b>Método</b>	<b>Especificação</b>	<b>Laudo Petrobrás</b>	<b>LMCC - GEPPASV</b>
Penetração (0,1mm)	D 5	50 a 70	57	55
Ponto de Amolecimento (°C)	D 36	46 min	48,6	47
Viscosidade Brookfield a 135°C, SP 21, 20rpm (cP)	D 4402	274 min	300	307
Viscosidade Brookfield a 150°C, SP 21 (cP)	D 4402	112 min	156	162
Viscosidade Brookfield a 177°C, SP 21 (cP)	D 4402	57 a 285 min	60	60

Fonte: Adaptado Possebon (2018).

### 3.2.2 Agregados Minerais

Os agregados utilizados nesta pesquisa são provenientes da pedraira Andrezza localizada no km 371 da BR-290/RS, na cidade de Vila Nova do Sul/RS. Os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Santa Maria (LMCC/UFSM). Foram coletadas amostras de brita 3/4", brita 3/8" e pó de pedra nas pilhas da pedraira. 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). A figura 9 ilustra o dia de coleta do material diretamente da pedraira.

Figura 9 - Coletado agregado mineral.



Fonte: Autora (2022).

### 3.2.3 Aditivos Surfactantes

Para as misturas mornas utilizadas na pesquisa foram incorporados 0,4% dos agentes surfactantes: Arkema - WarmGrip™ e Cargill - Anova® 1501, em relação ao peso do ligante (Figura 10). O percentual utilizado é uma recomendação do fornecedor do material e a incorporação do aditivo foi realizada antes da usinagem das misturas, após o aquecimento do ligante.

Ambos aditivos são comercializados na forma líquida, com aspecto físico oleoso, podendo ser incorporado com facilidade aos ligantes asfálticos, sem necessidade de alteração no processo de produção das misturas, o que torna sua utilização, tanto em laboratório quanto em usina, mais prática em comparação a outros métodos (NCHRP, 2011).

Este aditivo não altera as características dos ligantes e proporciona uma melhora na trabalhabilidade das misturas, mesmo a temperaturas mais baixas de mistura e compactação. Com uma redução de temperatura da ordem de 30°C, é possível alcançar condições de compactabilidade semelhantes às das misturas quentes (MOCELIN et al., 2017).

Figura 10 - Aditivos Surfactantes utilizados.



Fonte: Autora (2022).

### 3.3 AVALIAÇÃO LABORATORIAL DOS AGREGADOS

Nesta seção, serão descritos os métodos que foram utilizados na pesquisa para a caracterização dos materiais granulares das misturas asfálticas. Inicialmente a caracterização deu-se pela análise granulométrica do material pétreo, posteriormente descobriu-se as densidades e massas específicas da brita 3/8” e pó de pedra, realizou-se ensaio de abrasão Los Angeles, sanidade, absorção e equivalente de areia, utilizados para caracterização dos agregados (Tabela 3).

Tabela 3 - Ensaio e normas utilizadas para caracterização dos agregados.

ENSAIOS	METODOLOGIA		
Análise granulométrica dos agregados	DAER-ES-P 16/91	DAER/RS-EL 102/01	DNIT-ME 083/98
Massa específica real dos agregados graúdos	DAER/RS-EL 105/01		
Massa específica real dos agregados miúdos	DNIT - ME 084/95		
Abrasão “Los Angeles”	DAER/RS-EL 103/01		
Absorção	DAER/RS-EL 105/01		
Sanidade	DAER/RS-EL 104/01		
Equivalente de areia	DAER/RS-EL 006/01		

Fonte: Autora (2022).

### 3.3.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica consiste na distribuição dos agregados por meio de uma série de peneiras, onde a massa do material retido em cada peneira é comparada com a massa total da amostra do agregado seco. Tais procedimentos seguiram a norma DAER/RS-EL 102/01, a qual descreve o procedimento para determinação da composição granulométrica por peneiramento de agregados graúdos e miúdos, ou de mistura de agregados para mistura asfálticas, além de descrever toda a aparelhagem a ser utilizada, preparação das amostras e procedimentos para obtenção de uma curva granulométrica. As escolhas das peneiras de malhas foram baseadas na norma DAER-ES-P 16/91, cujas as aberturas utilizadas foram: 12,70mm, 9,52mm, 4,76mm, 2,38mm, 0,59mm, 0,257mm, 0,249mm e 0,074mm.

Adotou-se peneiramento manual dos materiais, garantindo assim a preservação da concordância entre as amostras, para garantir melhor precisão após a separação dos materiais em sua respectiva malha retida foi realizado a lavagem da amostra, posteriormente foram para a estufa por 24 horas à 105°C, até a secagem absoluta e finalmente pesadas para determinação das porcentagens. E com isso a norma determina que para a escolha da faixa que irá ser trabalhada, deve ser feita partindo-se do diâmetro máximo dos agregados, onde estes devem ser inferiores a dois terços da espessura da camada. As misturas foram enquadradas na faixa A do DAER, as figuras 11 e 12 apresentam a distribuição dos tamanhos das partículas dos grãos dos materiais granulares utilizados nesta pesquisa.

Figura 11 - Série de peneiras e percentuais para granulometria.

USO	A	B	C	D
	ROLAMENTO	ROLAMENTO, LIGAÇÃO OU NIVELAMENTO	NIVELAMENTO, LIGAÇÃO OU BASE	LIGAÇÃO, NIVELAMENTO OU BASE
ESPESSURA APÓS COMPACTAÇÃO (cm)	min. 2,5 cm	min. 4,0 cm	min. 5,0 cm	6,0 - 10,0 cm
PENEIRA	% QUE PASSA EM PESO			
1 1/2" (32, 13)				100
1" (25, 40)			100	80 - 100
3/4" (19, 10)		100	80 - 100	70 - 90
1/2" (12, 70)	100	80 - 100	-	-
3/8" (9, 52)	80 - 100	70 - 90	60 - 80	55 - 75
1/4" (6, 73)	-	-	-	-
n° 4 (4, 76)	55 - 75	50 - 70	48 - 65	45 - 62
n° 8 (2, 38)	35 - 50	35 - 50	35 - 50	35 - 50
n° 16 (1, 19)	-	-	-	-
n° 30 (0, 59)	18 - 29	18 - 29	19 - 30	19 - 30
n° 50 (0, 257)	13 - 23	13 - 23	13 - 23	13 - 23
n° 100 (0, 249)	8 - 16	8 - 16	7 - 15	7 - 15
n° 200 (0, 074)	4 - 10	4 - 10	0 - 8	0 - 8

Fonte: DAER-ES - P 016 (1991, p.20).

Figura 12 - Granulometria por peneiramento.



Fonte: Autora (2022).

### 3.3.2 Densidades e massas específicas

A razão entre a massa (quantidade de um material) e o volume, são determinadas como massas específicas. Segundo BERNUCCI et al. (2010) podem-se dividir essas massas específicas em três tipos:

- Densidade real ( $D_r$ ): a relação entre massa seca e o volume real, onde é considerado o volume todos os poros na superfície;
- Densidade aparente ( $D_a$ ): a relação entre a massa seca e o volume aparente, onde se inclui o volume sólido do material e o volume dos poros superficiais que contenha água, sendo medida quando o agregado encontra em estado de superfície saturada seca (SSS);
- Densidade efetiva ( $D_{ef}$ ): a relação entre massa seca e o volume efetivo do agregado, isto é, o volume do agregado sólido e o volume dos poros permeáveis que não foram preenchidos pelo asfalto.

#### 3.3.2.1 Agregados Graúdos

A determinação da densidade de agregados graúdos que compuseram a mistura foi pelo DAER/RS-EL 105/2001 (DAER, 2001). Esse item descreve o procedimento para determinar a massa específica média de uma quantidade de agregado graúdo e absorção deste agregado, para posterior aplicação nos estudos de dosagem e produção do concreto asfáltico. Os procedimentos a serem seguidos para determinação das densidades dos agregados graúdos devem ter a seguinte ordem:

- Imergir o material já limpo em água por um período de 24h;
- Remover o material da água, enxugar as partículas visíveis da água e determinar a massa da amostra na condição saturada superfície seca ( $P_h$ );
- Transportar a amostra no recipiente, imergindo em água potável e determinar a massa do agregado imerso ( $P_i$ );
- Secar o material em estufa, deixando resfriar a temperatura ambiente e, por fim, determinar a massa do agregado ( $P_s$ );

As equações (1, 2 e 3) a seguir correspondem respectivamente a densidade e absorção dos agregados e por fim calculadas pelas seguintes equações:

$$MEA = \frac{P_s}{P_h - P_i} \quad [1]$$

$$MER = \frac{P_s}{P_s - P_i} \quad [2]$$

$$A = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 \quad [3]$$

Onde:

MEA= massa específica aparente, em g/cm<sup>3</sup>;

MER= Massa específica real, em g/cm<sup>3</sup>;

A = Absorção do agregado, em porcentagem.

Ph = massa ao ar do agregado na condição saturada de superfície seca, em g;

Pi = massa do agregado imerso, em g;

Ps= massa do agregado seco, em g;

Pi = Peso imerso, em g.

### 3.3.2.2 Agregados Miúdos

A norma utilizada para a determinação da densidade real dos agregados miúdos (menores que 4,8mm) foi a DNER – ME 084/1995 (DNIT, 1995). Para a utilização dessa norma, se faz necessário a utilização de um picnômetro. O cálculo da densidade do agregado miúdo é realizado através da equação 4:

$$Dr(25) = \frac{B-A}{(D-A)-(C-B)} \quad [4]$$

Onde:

$D_r$  = densidade real do agregado miúdo;

A = massa do picnômetro vazio e seco, em g;

B = massa do picnômetro mais amostra, em g;

C = massa do picnômetro, mais amostra, mais água, em g;

D = massa do picnômetro cheio d'água, em g

O ensaio procedeu-se desta forma: pesou-se em torno de 500g do material passante na peneira nº 4, já seco em estufa a 110°C. Pesou-se também o picnômetro vazio e seco (A), então a amostra foi inserida dentro do equipamento (B) e posteriormente adicionada água destilada ao picnômetro sem enchê-lo. Este picnômetro foi inserido com a tampa na bomba de vácuo por pelo menos 20 minutos, com suaves balanços a cada 5 minutos com o objetivo de eliminar o ar que ali permanece. Por fim, encheu-se completamente o restante do picnômetro com água destilada e foi para banho-maria até a solução atingir a temperatura de 25°C, então foi realizada a pesagem (C). Após o processo ser realizado com a amostra de agregado miúdo, obteve-se também o peso do picnômetro cheio de água destilada, à 25 °C, e se determinou a sua massa (D) (Figura 13).

Figura 13 - Ensaio densidade: Picnômetro na bomba de vácuo (A); picnômetro com amostra e água (B) e amostra em banho-maria (C)



Fonte: Autora (2022).

### 3.3.3 Abrasão “Los Angeles”

Esse ensaio foi realizado de acordo com a norma do DAER/RS-EL 103/01. Segundo a norma este método descreve o procedimento para determinar a resistência de agregado graúdo ao desgaste por abrasão num cilindro rotativo, tambor metálico de 80 centímetros de diâmetro a uma velocidade de 30 a 33 rpm, com a presença de doze bola de aço. O ensaio foi concluído após 500 rotações a depender da faixa granulométrica, em seguida o material foi peneirado e o desgaste é expresso razão entre a quantidade de material que passou na peneira n° 12 (1,70 mm), após o ensaio e a quantidade total que foi colocada inicialmente no tambor. A figura 14 apresenta o equipamento do ensaio existente no LMCC da UFSM e as etapas do ensaio, a fórmula para o cálculo final do desgaste de encontra abaixo (Equação 5):

$$Ax = \frac{Mx - mx}{Mx} \times 100 \quad [5]$$

Onde:

$Ax$  = abrasão “Los Angeles” das graduações, com aproximação de 1%;

$x$  = graduação (A, B, C, D) escolhida para o ensaio;

$Mx$  = peso total da amostra seca antes do ensaio;

$mx$  = peso da amostra lavada e seca após o ensaio.

Figura 14 - Ensaio Abrasão: equipamento LMCC (A); bolas de aço (B); material ensaiado (C) e resultado do ensaio (D).



Fonte: Autora (2022).

### 3.3.4 Sanidade

Esse ensaio foi realizado de acordo com a norma do DAER/RS-EL 104/01. Assim a norma descreve o procedimento para determinar a sanidade de agregados, avaliando a sua resistência à desintegração pela ação da solução de sulfato de sódio. As amostras são separadas em frações, coloca em cestos metálicos e submersas na solução de sulfato de sódio por um período de 16 a 18 horas, após esse período as amostras são inseridas em estufa por um período de 4 horas. O processo de imersão, secagem e esfriamento das amostras constituem um ciclo de operação, para o total ensaios são realizados cinco ciclos. Finalizado os cinco ciclos, o material é lavado em peneira de malha igual ou inferior a fração inicial, para a total remoção do sulfato, as

mesmas são levadas a estufa para secagem, devidamente esfriadas na temperatura ambiente realiza-se o peneiramento final em malhas de metade da abertura original da fração.

Para os cálculos, necessários valores de peso inicial, peso final, porcentagem de peso retida, porcentagem de perda e cálculo da perda média final:

$$\text{Perda média final} = \text{perda média da amostra do agregado graúdo} \times 0,55 + \text{perda média da amostra do agregado miúdo} \times 0,45$$

A figura 15 ilustra o processo do ensaio realizado nessa pesquisa.

Figura 15 - Ensaio Sanidade: Amostras separadas em frações (A); amostras submersas no sulfato (B) e amostras após 16 horas (C).



Fonte: Autora (2022).

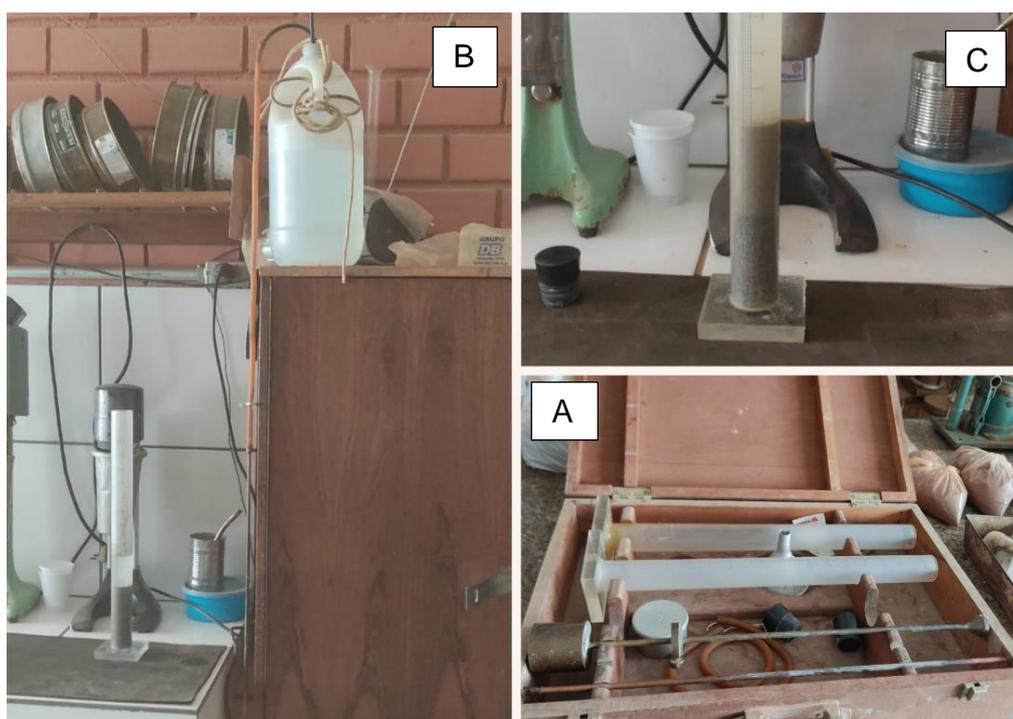
### 3.3.5 Equivalente de areia

Este método descreve o procedimento para determinar o equivalente de areia de solos ou de agregados miúdos. Seguindo os procedimentos da norma DAER/RS-EL 006/01, onde inicialmente foi sifonado 10 cm de solução de trabalho de cloreto de cálcio na proveta especificada para o ensaio, utilizou-se um kit para o ensaio da existente no LMCC. Depois transferiu-se uma das amostras para a proveta usando o funil, a fim de evitar perda de material, tampou-se a proveta e bateu-se no fundo com a palma da mão várias vezes para remover as bolhas de ar.

Foi utilizado uma quantidade mínima de solução para lavar as paredes da proveta, durante 10 minutos, deixou-se a proveta com a amostra umedecida em repouso, livre de qualquer vibração. No fim do período de saturação de 10 minutos, agitou-se vigorosamente com movimento linear horizontal, de um lado para o outro. Agitou-se a proveta executando 90 ciclos em aproximadamente 30 segundos, logo após a operação de agitação, introduziu-se o tubo lavador e lavou-se o material das paredes da proveta à medida que o tubo lavador foi inserido até o fundo da proveta. Continuou até encher a proveta na marca de 38 cm.

Então, levantando o tubo lavador lentamente sem fechar o fluxo de modo que o nível do líquido seja mantido em torno da marca dos 38 cm, enquanto o tubo lavador está sendo retirado. Deixou-se a proveta e o conteúdo permanecer em repouso por 20 minutos, no fim do período de sedimentação de 20 minutos foi registrado o nível da parte superior da suspensão de argila e anotou-se como “leitura da argila”. Após a leitura de argila ter sido feita, introduziu-se o conjunto da sapata de peso especificado, na proveta, com a guia apoiada na boca da proveta, e suavemente inseriu a sapata até que ela repouse na areia, quando a sapata repousou na areia, foi registrado o nível do parafuso de centragem como “leitura da areia” (Figura 16).

Figura 16 - Ensaio equivalente de areia: Kit Solotest (A); preparação do ensaio (B) e período de sedimentação(C).



### 3.4 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

A dosagem das misturas asfálticas consiste na escolha correta do teor considerado ótimo de ligante, ou teor de projeto, obtido a partir da faixa granulométrica predefinida (BERNUCCI et al., 2010). Segundo Balbo (2007), um dos objetivos essenciais da dosagem de uma mistura asfáltica é obter-se uma mistura bem trabalhável, estável sobre ação de cargas, durável com teor de ligante bem projetado, resultando na baixa deformação permanente e pouca vulnerabilidade à fissuração por fadiga e não deve apresentar excesso de vazios.

O método mais usual e mais antigo para dosagem será apresentado a seguir, conhecido como Marshall, o qual foi adotado nesta pesquisa como método principal.

#### 3.4.5 Método Marshall

Esse método foi desenvolvido pelo engenheiro Bruce Marshall, em 1939, nos Estados Unidos, ao departamento de estradas do Mississippi, no decorrer da Segunda Guerra Mundial como um procedimento para definir a proporção de agregado e ligante capaz de resistir às cargas de roda e pressão de pneus das aeronaves militares (ASPHALT INSTITUTE, 2007; BERNUCCI et al., 2010).

Para a utilização deste método de dosagem deve ser definido alguns parâmetros básicos: o tipo e o destino da mistura; granulometria; massa específica real e aparente dos agregados; escolha de uma faixa granulométrica de projeto e, em função do tráfego previsto, escolher qual será a energia de compactação dos corpos de prova (CERATTI E REIS, 2011).

A dosagem Marshall FOI realizada seguindo os procedimentos descritos no método de ensaio DNER-ME 043/95 para a preparação os corpos de prova:

- Preparou-se o material, separando o material granular para a quantia de 15 corpos de prova (3 para cada teor de ligante);
- Misturou-se o material com os teores estimados (para a pesquisa foi de 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0% e 6,5%) para confecção dos corpos de prova.

- Moldagem por compactação automático, com equipamento de Marshall para os teores estimados. Na pesquisa as amostras foram moldadas com compactação de 75 golpes por face.
- Extração dos corpos de prova dos moldes cilíndricos e cura ao ar livre durante 24 horas;
- Pesagem e medição dos corpos de prova para determinar o cálculo das características físicas (massa específica aparente, volume de vazios, relação betume vazios); teve-se o cuidado para que ao realizar o peso imerso a temperatura da água permanecesse em  $25\pm 1^{\circ}\text{C}$ ;
- Posteriormente, colocou-se os corpos de prova em banho-maria expostos a  $60^{\circ}\text{C}$  durante 30 minutos, e então se obtém a determinação da estabilidade e fluência;
- Por fim, foram expostos os resultados em curvas de variação para todas as características a serem determinadas pela dosagem Marshall e posterior definição do teor de ligante de projeto.

Na metodologia Marshall, utilizada no Brasil, o teor ótimo de ligante asfáltico é determinado, levando-se em consideração valores empíricos da estabilidade, que é a capacidade da mistura deformar-se sob a ação de cargas, fluência e os parâmetros volumétricos volume de vazios (Vv) e relação betume vazios (RBV).

Em relação aos parâmetros volumétricos utilizados no procedimento, para se estabelecer o teor de projeto do CAP, a Figura 17 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 016 (DAER, 1991) para o método Marshall.

Figura 17 – Requisitos para Concreto Asfáltico segunda a norma.

REQUISITOS DE DE PROJETO	TRÁFEGO PESADO		TRÁFEGO MÉDIO	
	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO
<b>I - MARSHALL</b>				
1. Número de golpes em capada face do corpo de prova		75		50
2. Estabilidade (kgf)	800	-	500	-
3. Fluência (1/100")	8	16	8	16
4. Vazios de ar (%)				
Camadas de Rolamento, Ligação e Nivelamento	3	5	3	5
Camada de Base	3	8	3	8
5. Relação Betume-Vazios				
Camadas de Rolamento	75	82	75	82
Camada de Ligação, Nivelamento e Base	65	72	65	72
6. Vazios de Agregado Mineral (%)	Ver Figura I Anexa		Ver Figura I Anexa	
7. Relação entre as % que passam nas peneiras n° 200 e n° 8	Ver Figura II Anexa		Ver Figura II Anexa	
<b>II - ESTABILÔMETRO</b>				
1. Valor do Estabilômetro	37	-	35	-
2. Susceptibilidade do Vapor de Água (Valor do Estabilômetro) Método DAER n° 307	30	-	25	-
3. Inchamento (polegada) Método DAER n° 305	0,03	-	0,03	-

Fonte: DAER (1991, p.21).

A mistura também deve atender ao parâmetro mínimo de vazios do agregado mineral, conforme ES 031 (DNIT, 2006), assim como especificado no Figura 18.

Figura 18 - Valores limites dos vazios do agregado mineral da mistura com CAP para o método Marshall.

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

Fonte: DNIT (2006).

### 3.4.6 Moldagem dos corpos de prova

Durante o procedimento de dosagem, os corpos de prova foram moldados pela metodologia Marshall. Três corpos de prova para cada teor de ligante (4,5%; 5,0%; 5,5%, 6,0% e 6,5%) foram moldados, continham 1200g cada, totalizando 15 corpos de prova. Também uma amostra de 1200g foi separada para a realização do ensaio de determinação da densidade máxima medida (Gmm), através do método de Rice que foi realizado para cada teor testado, o qual obedece a AASHTO T 209-15 - Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Hot Mix Asphalt, normatizada no Brasil através da NBR 15619:2012 para misturas asfálticas.

Através desse parâmetro de densidade foi possível calcular, em média, o volume de vazios para cada teor, e assim, determinar o teor ótimo de projeto para cada mistura, correspondente a um volume de vazios (VV) igual a 4,0%. Todos os resultados do procedimento de dosagem estão apresentados no Capítulo 4.

Em relação às temperaturas de compactação, Bernucci et al (2010) ressaltam que a temperatura do ligante deve estar entre 107°C e 177°C, e a temperatura dos agregados deve ser de 10 a 15 °C acima da temperatura estabelecida para o ligante, entretanto, sem ultrapassar os 177°C. Por tanto, a Tabela 4, apresenta as temperaturas utilizadas para mistura, agregados e compactação.

Tabela 4 - Temperaturas dos agregados, mistura e compactação para moldagem.

Mistura	Temperatura dos agregados (°C)	Temperatura de mistura (°C)	Temperatura de compactação (°C)
CAP 50/70	161	151	136

Fonte: Adaptado Possebon (2018).

Com os agregados completamente envoltos pelo ligante, e a mistura pronta iniciou-se o processo de moldagem e compactação do corpo de prova. A mistura asfáltica permaneceu por duas horas dentro de uma estufa para realização do chamado período de condicionamento de curto prazo, empregando a mesma temperatura de compactação. Os moldes cilíndricos para os corpos de prova também foram aquecidos a fim de que a mistura asfáltica não perdesse a temperatura no momento de inserção do material e compactação.

Assentou-se o molde na posição correta no suporte de compactação e colocou-se o papel filtro no fundo para não perder material. Em seguida introduziu-se a mistura no interior do molde, acomodando-o por meio de 15 golpes em seu interior, extremidade e centro. Com a mistura acomodada, apoiou-se o compactador Marshall automático e aplicou-se 75 golpes em cada face do molde com o soquete (Figura 19).

A seguir da moldagem, os corpos de prova ficaram em repouso por aproximadamente 24 horas em temperatura ambiente, para então serem retirados do molde cilíndrico. Com a remoção do molde dos corpos de prova, após compactação, colocou-se todos em uma superfície lisa, plana e limpa e deixou-se em repouso por 12 horas, à temperatura ambiente, seguindo especificações da norma, como visualizado na Figura 20.

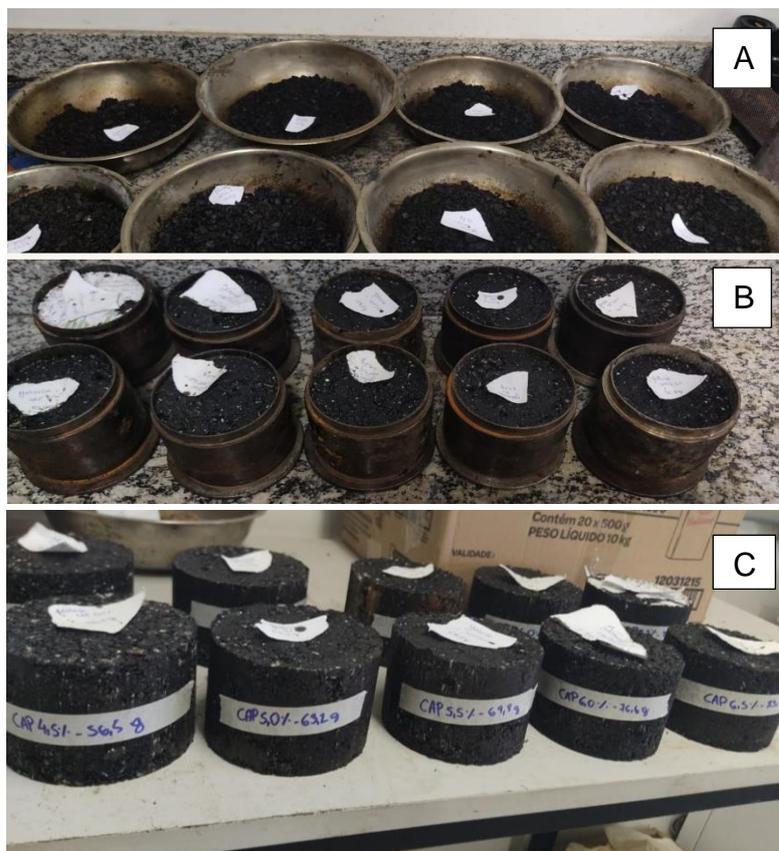
Por fim, atendendo às especificações da norma, aferiu-se as dimensões da norma, aferiu-se as dimensões dos corpos de prova utilizando um paquímetro manual, medindo-se sua altura e seu diâmetro, perfazendo a média entre as três medidas. Sucedeu-se também a pesagem dos corpos de prova, secos, submersos em água em temperatura de 25°C e então na condição de superfície saturada seca.

Figura 19 - Material separado em frações (A); adição do ligante (B) e moldagem Marshall (C).



Fonte: Autora (2022).

Figura 20 - Misturas prontas (A); CPs com moldes (B) e CPs após 12 horas (C).



Fonte: Autora (2022).

### 3.5 ENSAIOS MECÂNICOS

#### 3.5.5 Resistência à tração por compressão diametral (RT)

A norma que prescreve a ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral é a DNIT 136/2018 – ME – Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio, para este ensaio, o corpo de prova pode ser obtido diretamente na pista por extração, por meio de onda ou moldado em laboratório.

O mesmo consiste na aplicação de uma carga estática de compressão distribuída ao longo de duas geratrizes opostas, a fim de se obter as tensões de tração através do diâmetro horizontal, perpendicularmente à carga (Figura 21). Antes de aplicar a carga, o corpo-de-prova deve estar apoiado sobre uma geratriz em

compartimento com temperatura controlada de 25°C, durante 24 horas. A resultante obtida é a resistência à tração (RT).

Os procedimentos de ensaio pela norma são os seguintes:

- Medir a altura (H) e o diâmetro (D) do corpo de prova com paquímetro, em quatro posições equidistantes; adotar como valor de ambos a média aritmética das leituras;
- Colocar o corpo de prova no compartimento com a temperatura controlada de 25°C por um período de quatro horas antes da realização do ensaio;
- Após esse período, o corpo de prova deve ser posicionado no dispositivo centralizador, com sua superfície cilíndrica entre os dois frisos metálicos, curso em uma das faces, com curvatura igual ao corpo de prova (Figura 22);
- Aplicar uma carga vertical de compressão progressivamente, com uma velocidade de deformação de  $0,8 \pm 0,1$  mm/s, até que ocorra a ruptura;
- Anotar o valor da carga de ruptura (F).

Figura 21 – Dispositivo centralizador para Resistência à tração.



Fonte: Autora (2022).

Foram utilizados corpos-de-prova com 6,8cm, aproximadamente, de altura e 10cm de diâmetro. Os resultados da ruptura para determinação da resistência à tração são obtidos através da Equação 6.

Para corpos de prova moldados em laboratório, a resistência a tração por compressão diametral foi a média aritmética dos valores obtidos de três corpos de prova, desde que a variação entre os valores individuais e a média esteja em um intervalo de  $\pm 10\%$ .

$$\sigma_R = \frac{2F}{100\pi DH} \quad [6]$$

Onde:

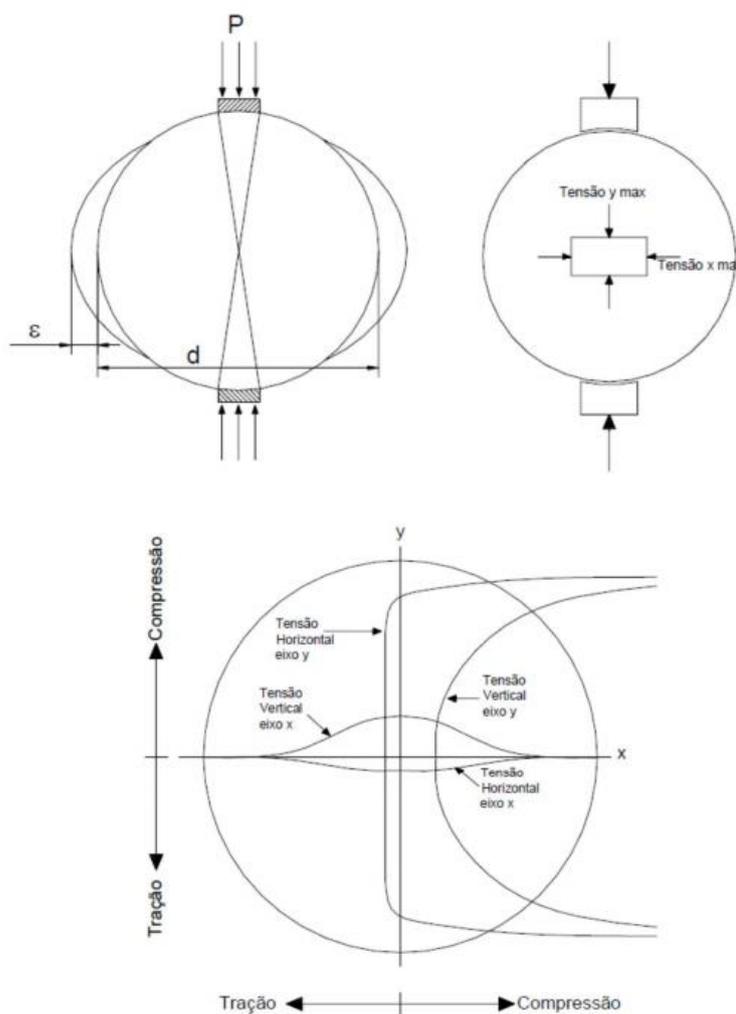
$\sigma_R$  = resistência à tração por compressão diametral (MPa);

$F$  = carga de ruptura (N);

$D$  = diâmetro do corpo-de-prova (cm);

$H$  = altura do corpo-de-prova (cm).

Figura 22 – Estado de tensões gerado no ensaio de RT.



Fonte: Specht (2004).

### 3.5.6 Módulo de resiliência (MR)

O ensaio de módulo de resiliência é determinado através das prescrições da norma DNIT 135/2018 – ME – Pavimentação asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação do Módulo de Resiliência e da norma ASTM D 4123:1982 – Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures. O intuito do ensaio é determinar a capacidade que um corpo elástico tem de armazenar energia, quando solicitado a um carregamento e, após, retornar ao seu estado inicial.

Segundo Bernucci et al. (2010) o módulo de resiliência de misturas asfálticas a quente pode variar com o tipo de mistura, a faixa granulométrica, o tipo de ligante, as propriedades volumétricas, a energia de compactação, a temperatura de compactação e a temperatura da realização do ensaio, entre outras variáveis.

O equipamento utilizado (Figura 23) é a Universal Testing Machine UTM – 25, a qual utiliza a norma ASTM (American Society for Testing and Materials) D 4123:1982 como base para realizar o ensaio de módulo de resiliência.

A UTM – 25 é um equipamento de estrutura metálica, um pistão que propicia o carregamento repetido pulsante com auxílio de um dispositivo pneumático junto a um regulador de tempo e frequência (SANTOS, 2019). Devido ao equipamento funcionar dentro de uma câmara com temperatura controlada (geralmente realiza-se o ensaio a 25°C), permite que sejam realizados ensaios em diversas temperaturas.

Figura 23 – Ensaio de MR realizado no equipamento UTM-25.



Fonte: Autora (2022).

Após condicionados a 25°C, por no mínimo 12 horas, o corpo-de-prova é colocado no suporte e posiciona-se os LVDTs (Linear Variable Differential Transducer), na face do mesmo, alinhando-o na vertical, horizontal e centralizado no cilindro de aplicação da carga. O módulo de resiliência é medido a partir da aplicação do carregamento dinâmico com tempo de 0,1s de duração e 0,9s de repouso.

Dessa forma, a amostra sofre deformações horizontais, que são medidas através de um LVDT, ligado a um microcomputador, que coleta e arquiva todas as informações. O carregamento utilizado é equivalente a um valor de 10% da resistência à tração da mistura. E o coeficiente de Poisson, para execução do ensaio, foi fixado em 0,30 para 25°C, de acordo com a norma DNIT – ME 135/2018.

O módulo de resiliência segundo DNIT 135/2018 é encontrado pela seguinte equação 7:

$$M_R = \frac{P}{\Delta h} (0,9976\mu + 0,2692) \quad [7]$$

Onde:

$M_R$  = módulo de resiliência (MPa);

$P$  = carga vertical repetida aplicada diretamente no corpo-de-prova (N);

$\Delta$  = deformação elástica ou resiliente medida nos ciclos particulares de repetição de carga ( $P$ ) (mm);

$h$  = altura do corpo-de-prova (mm);

$\mu$  = o coeficiente de Poisson (0,30 para 25°C).

Para corpos de prova de laboratório, a norma recomenda que se utilize ao menos três corpos de prova semelhantes, para representar a mistura asfáltica, calculando-se a média entre os três.

### 3.5.7 Estabilidade e Fluência

Conforme Bernucci et al. (2010) a estabilidade é a carga máxima pela qual o corpo de prova resiste antes de sua ruptura, definida como um deslocamento ou quebra de agregados de modo a causar diminuição da carga necessária para manter o prato da prensa se deslocando a uma taxa constante (0,8mm/segundo). Já a fluência, para o mesmo autor, é considerada um deslocamento na vertical apresentado pelo corpo de prova correspondente à aplicação da carga máxima.

Para a realização deste ensaio, deve-se obter as medidas volumétricas dos corpos de prova, e posteriormente, submergi-los em banho maria à 60°C por 30 a 40 minutos. Por fim, retira-se cada corpo de prova e coloca-se imediatamente dentro do molde de compressão para então obter os parâmetros mecânicos resultantes da curva obtida (BERNUCCI et al., 2010).

A norma DNIT-ES 031/2006 (DNIT, 2006b) prescreve que para as camadas de rolamento os valores de estabilidade devem partir de 500 kgf, enquanto a fluência deve estar entre os valores de 8 a 16/0.01in, de acordo com a norma DAER/RS-EL 217/01 (DAER, 2001c).

## 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Neste Capítulo estão apresentados os resultados obtidos após a realização dos ensaios descritos no Capítulo 3 bem como sua discussão no intuito de cumprir os objetivos estabelecidos. As misturas que compõem os ensaios foram moldadas na faixa A da norma DAER-ES-P – 016/1991, (Concreto Asfáltico – Especificações de Serviços).

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

#### 4.1.1 Análise granulométrica

Após o peneiramento de cada material, formulou-se uma curva granulométrica de cada um dos componentes da mistura dos agregados britados.

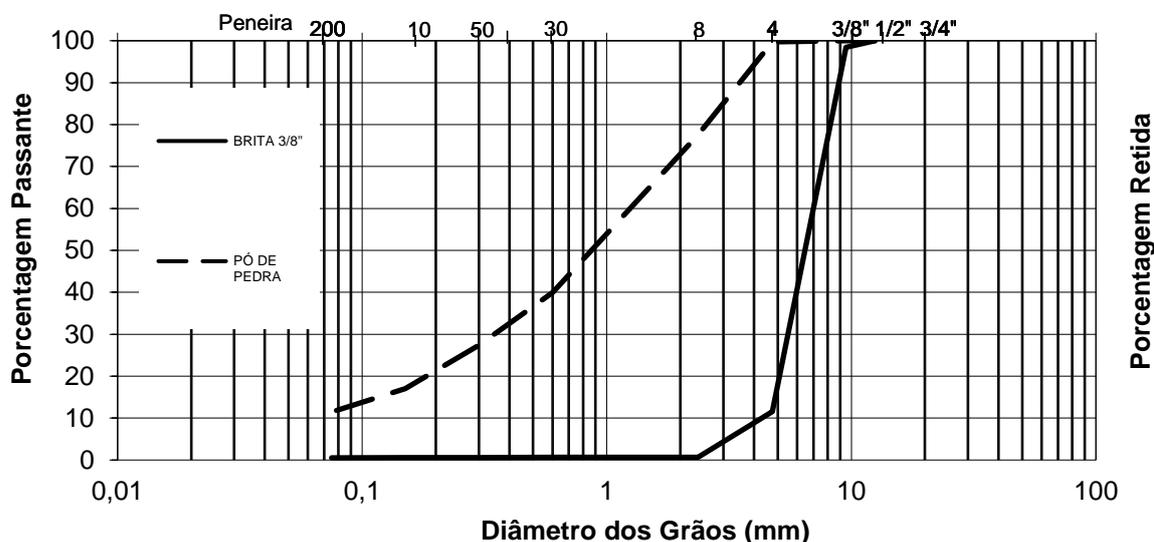
A Tabela 5 apresenta a porcentagem passante de cada material de acordo com as peneiras. A Figura 24 representa a curva granulometria do material pétreo, a partir da classificação dos materiais conforme sua granulometria bem definida.

Tabela 5 - Granulometria dos agregados.

QUANTIDADE PASSANTE ACUMULADA (%)			
PENEIRA	(mm)	Brita 3/8"	Pó de pedra
1/2"	12,70	100,00	100,00
3/8"	9,52	98,42	100,00
N° 4	4,76	11,52	99,74
N° 8	2,38	0,69	77,58
N° 30	0,59	0,65	39,96
N° 50	0,257	0,62	27,38
N° 100	0,249	0,57	17,06
N° 200	0,074	0,53	11,45

Fonte: Autora (2022).

Figura 24 - Curva granulométrica dos agregados.



Fonte: Autora (2022).

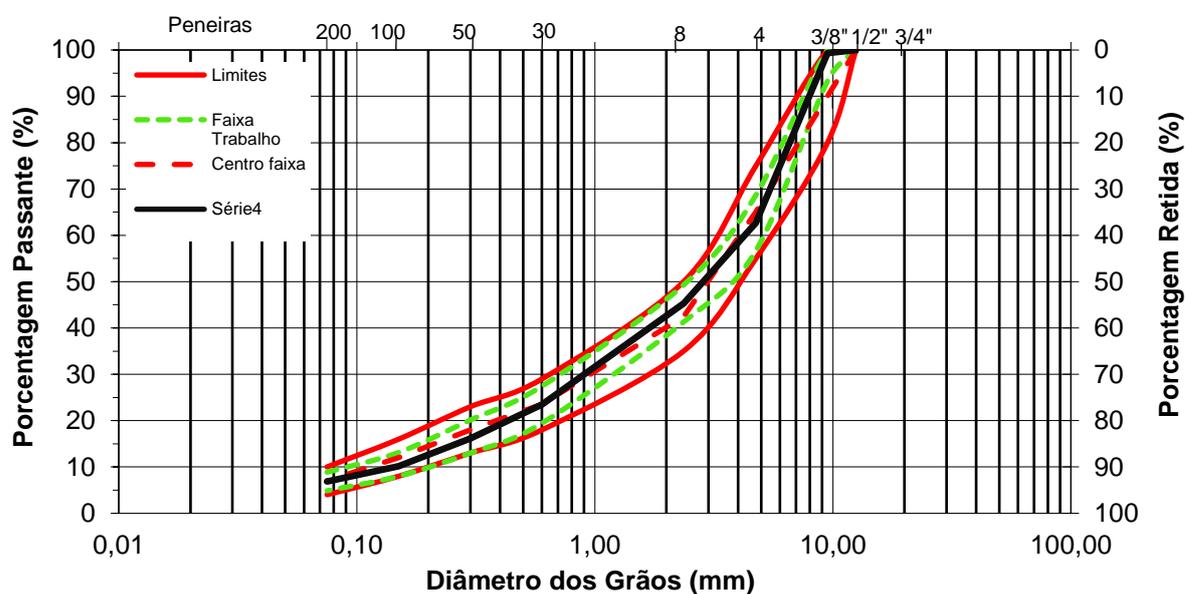
A composição granulométrica da mistura foi estudada e definida conforme Tabela 6, para se adequar aos limites da Faixa A do DAER-ES-P – 016/1991, a curva de composição granulométrica da mistura está apresentada na Figura 25 onde é possível visualizar o encaixe da curva de composição das misturas (preta) entre as curvas de limites da faixa A do DAER (vermelhas) e também o ajuste entre a faixa de trabalho (curvas verdes).

Tabela 6 - Composição granulométrica da mistura asfáltica conforme limites da Faixa A do DAER-ES-P 016/91.

PENEIRA	(mm)	Limites faixa		Centro faixa	Faixa trabalho		MISTURA
1/2"	12,70	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	<b>100,0</b>
3/8"	9,52	80,0	100,0	90,0	93,3	100,0	<b>99,3</b>
N° 4	4,76	55,0	75,0	65,0	56,7	68,7	<b>62,7</b>
N° 8	2,38	35,0	50,0	42,5	41,3	49,3	<b>45,3</b>
N° 30	0,59	18,0	29,0	23,5	19,4	27,4	<b>23,4</b>
N° 50	0,257	13,0	23,0	18,0	13,0	20,1	<b>16,1</b>
N° 100	0,249	8,0	16,0	12,0	8,0	13,1	<b>10,1</b>
N° 200	0,074	4,0	10,0	7,0	4,9	8,9	<b>6,9</b>

Fonte: Autora (2022).

Figura 25 - Curva da composição granulométrica - Faixa A DAER-ES-P 016/91.



Fonte: Autora (2022).

#### 4.1.2 Densidades e massas específicas

##### 4.1.2.1 Agregados graúdos

A metodologia para obtenção da densidade do material graúdo baseou-se, conforme já mencionado, na norma DAER/RS EL 105/01 (DAER, 2001), e foi realizada conforme sua granulometria, seguindo os parâmetros propostos pela norma. A Tabela 7 apresenta os resultados da massa específica aparente e real dos agregados.

Tabela 7 – Resultados de massa específica do material graúdo.

Amostra	Massa SSS (Ph)	Massa Imersa (Pi)	Massa Seca (Ps)	Massa Especifica Aparente (MEA)	Massa Especifica Real (MER)	Absorção (A)
A	668,36	410,9	651,73	2,531	2,706	2,552
B	667,02	415,04	651	2,584	2,759	2,461
<b>MÉDIA</b>				<b>2,557g/cm³</b>	<b>2,733</b>	<b>2,506%</b>

Fonte: Autora (2023).

A tabela acima demonstra os resultados obtidos no ensaio, onde realizou-se a média para as duas determinações, tanto para obter a Massa Específica Aparente como a Massa Específica Real. Para a absorção, também foi realizada a média e adotado o valor em porcentagem.

#### 4.1.2.2 Agregados miúdos

A metodologia para obtenção da massa específica do material miúdo foi realizada através da norma DNER 084/95 (DNIT, 1995), a qual prescreve o ensaio com a utilização de picnômetros. O ensaio realizou-se à temperatura de 25 °C conforme normativa e os resultados encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 – Massa específica do material miúdo (pó de pedra).

<b>Massa Específica Real - 25°C</b>		
PESOS	AMOSTRA (A) g	AMOSTRA (B) g
A= Pic seco	151,79	151,85
B= Pic + amostra	423,28	423,03
C= Pic + amostra + água	821,95	821,30
D= Pic cheio d'água	649,82	649,70
DR(25)=	2,732	2,723
MÉDIA (g/cm³)=	<b>2,728</b>	
DIFERENÇA=	<b>0,009</b>	

Fonte: Autora (2022).

#### 4.1.3 Abrasão “Los Angeles”, sanidade e equivalente de areia

A metodologia para a realização desses ensaios já foi abordada anteriormente no capítulo 3, seguindo as normas DAER/RS-EL 103/01, DAER/RS-EL 104/01 e DAER/RS-EL 006/01. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos e os respectivos limites indicado por norma.

Tabela 9 – Propriedades do agregado em estudo.

<b>Propriedades</b>	<b>Norma</b>	<b>Limites DAER</b>	<b>Resultados (%)</b>
Abrasão “Los Angeles”	DAER/RS-EL 103/01	40% (máx)	16,63
Sanidade	DAER/RS-EL 104/01	10% (máx)	3,67
Equivalente de areia	DAER/RS-EL 006/01	50% (mín)	59,82

Fonte: Autora (2022).

Destaca-se que os resultados de ensaios tecnológicos dos agregados o qualificam para serem utilizados na mistura, sem necessidade de qualquer modificação.

#### 4.1.4 Definição do teor ideal de ligante para o projeto

Para encontrar o teor de projeto, moldaram-se três corpos de provas para cinco teores diferentes de betume (4,5%; 5,0%; 5,5%, 6,0% e 6,5%), sob 75 golpes por face, conforme o procedimento de moldagem Marshall. O projeto foi realizado para mistura de referência, somente, e a partir daí definiu-se o teor, a Tabela 10 ilustra os parâmetros de dosagem e características volumétricas. A partir dessas características, foram elaborados os gráficos para obtenção final do teor de projeto, e encontram-se representados na Figura 26.

Tabela 10 – Características da mistura referência.

<u>Propriedade</u>	<u>Teor de Betume (%)</u>				
	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
Volume de Vazios (%)	8,9	7,4	5,3	3,1	2,2
Relação Betume Vazios (%)	46,6	51,3	65,5	80,1	85,4
Vazios do Agregado Mineral (%)	16,7	15,1	15,4	15,5	15,2
Densidade Máxima Medida (g/cm <sup>3</sup> )	2,521	2,538	2,488	2,442	2,442
Massa Específica Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,296	2,351	2,356	2,367	2,388
Estabilidade (kgf)	1824	1137	1308	1801	1850
Fluência (1/100 in)	9,6	10,8	12,3	13,3	14,0

Fonte: Autora (2022).

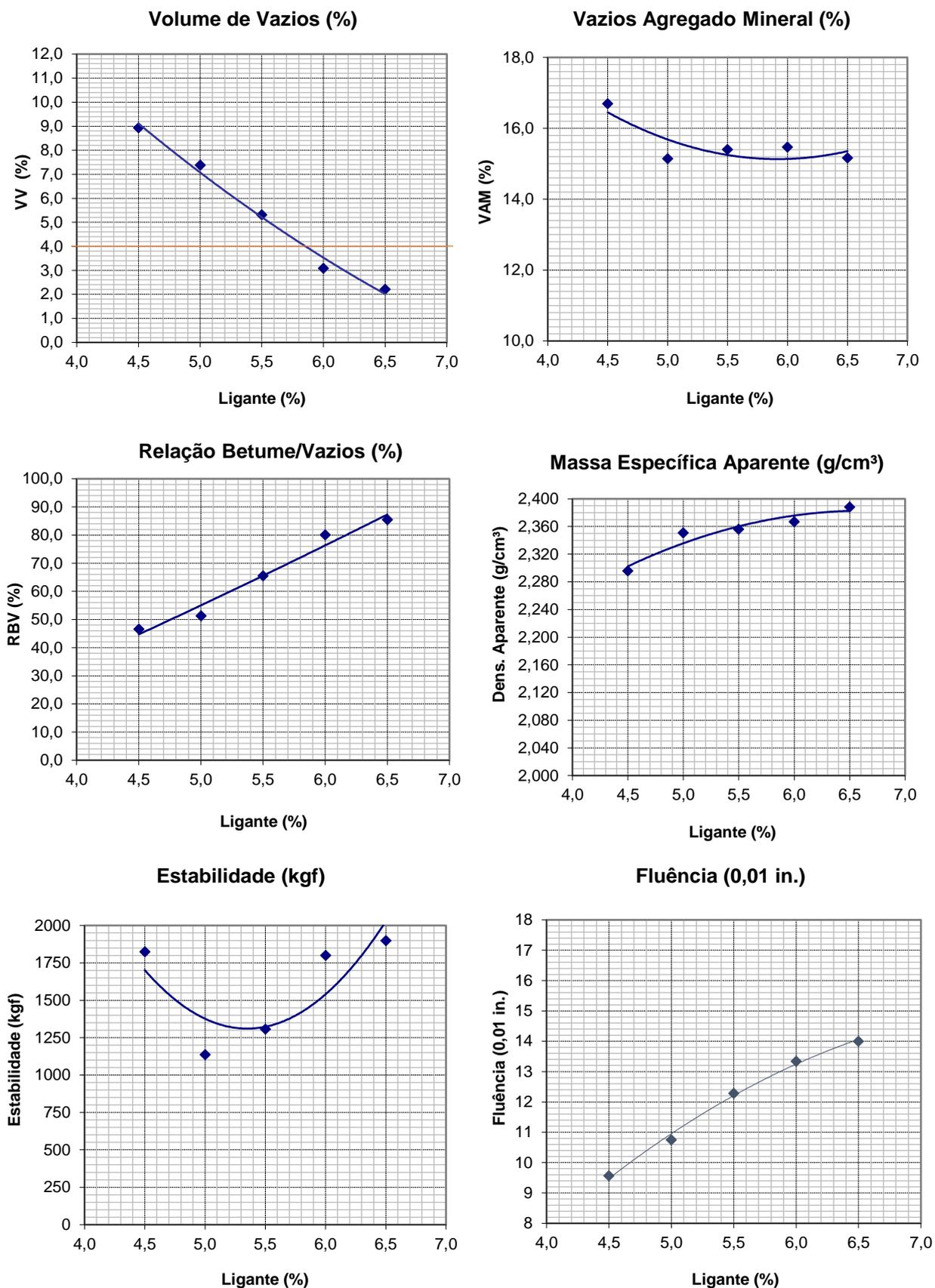
De posse destas informações e resultados, é possível realizar uma interpolação para encontrar o valor de porcentagem de volume de vazios. Segundo especificações da norma DAER 016/91 (DAER, 1998), para as misturas enquadradas na faixa A o volume de vazios (Vv) deve ser encontrado no intervalo entre 3% a 5%. Visando que os valores apresentam elevado resultado comparado com a especificação, buscou-se o teor de ligante que correspondesse a 4% de volume de vazios, sendo considerado o ponto médio entre 3% e 5%. Então, o teor definido ficou em 5,8% conforme Tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros Finais da Mistura

<b><i>Propriedade</i></b>	<b><i>ES P 16/98 DAER</i></b>	<b><i>Valor de Projeto</i></b>
Teor de Ligante (%)	± 0,3	<b>5,80</b>
Volume de Vazios (%)	3 a 5	<b>4,00</b>
Relação Betume Vazios (%)	75 a 82	<b>71,3</b>
Vazios do Agregado Mineral (%)	>16	<b>15,4</b>
DMM Rice (g/cm <sup>3</sup> )	--	<b>2,460</b>
Massa Específica Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	97% (mínimo)	<b>2,360</b>
Estabilidade (kgf)	>800	<b>1505</b>
Fluência (1/100 in)	8,0 a 16,0	<b>13</b>

Fonte: Autora (2022).

Figura 26 - Parâmetros de dosagem Marshall.



Fonte: Autora (2022).

## 4.2 ENSAIOS MECÂNICOS

Nos próximos itens serão apresentados os resultados dos ensaios mecânicos aos quais os corpos de prova foram submetidos, sendo a Resistência a tração por compressão diametral e Estabilidade e Fluência ensaios destrutivos e o Módulo de resiliência não destrutivos.

### 4.2.1 Volume de vazios

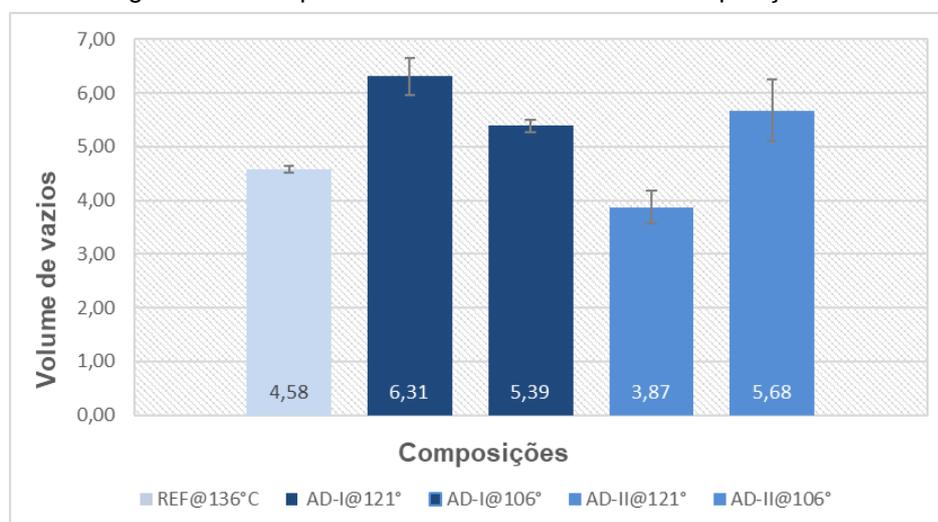
Após a moldagem, os corpos de prova foram submetidos a pesagem seca, submersa e com a superfície seca para determinar o volume de vazios. Com os valores de volume de vazios obtidos, apresentado na Tabela 12 a seguir, foi feito um gráfico comparativo entre as diferentes composições e o volume de vazios (Figura 27).

Tabela 12 - Volume de vazios médio das composições.

	REF@136°	AD-I@121°	AD-I@106°	AD-II@121°	AD-II@106°
<b>VV</b>	4,51	6,56	5,41	3,99	5,12
	4,65	6,55	5,00	3,71	6,47
	4,58	5,83	5,74	3,92	5,44
<b>MÉDIA</b>	<b>4,58</b>	<b>6,31</b>	<b>5,39</b>	<b>3,87</b>	<b>5,68</b>
<b>DESV PAD</b>	0,07	0,42	0,37	0,15	0,71
<b>CV</b>	1,49%	6,62%	6,93%	3,77%	12,46%
<b>D aparente</b>	2,360	2,306	2,328	2,366	2,321

Fonte: Autora (2022).

Figura 27 - Comparativo volume de vazios das composições.



Fonte: Autora (2022).

Analisado os valores encontrados de volume de vazios das composições, foi possível observar os diferentes comportamentos associado a compactação dos corpos de prova, de mesma mistura com os aditivos, atentando aos resultados após a redução de temperatura. Apesar de não impactar fortemente nos ensaios mecânicos, como serão apresentados a frente. A um indicio que o AD-II funcionou melhor em temperatura mais alta comparado com o mesmo em temperatura mais baixa. Enquanto AD-I, funcionou bem em ambas as temperaturas e apresentou resultados de volume de vazios próximos.

#### **4.2.2 Ensaio de resistência a tração por compressão diametral**

Depois de determinada o teor da mistura e do ligante, foram realizadas moldagens pelo método Marshall, com a adição dos diferentes aditivos reduzindo a temperatura da mistura em 15°C e 30°C da temperatura referência de compactação. Foram moldados 3 corpos de prova para cada temperatura reduzida, totalizando 15 amostras expostas ao ensaio de Resistência à Tração (RT).

A norma DAER 016/91, inicialmente utilizada para especificação dos parâmetros, não possui uma definição quanto ao valor do RT. Assim a norma embasada, segundo DNIT 031/2006 – ES (DNIT, 2006) especifica um valor mínimo de RT de 0,65 MPa para a camada de rolamento. Os quinze CPs avaliados apresentam valores acima de 0,65 MPa, como estipula a norma, Bernucci et al. (2010) afirmam que, para misturas asfálticas convencionais, os valores típicos situam-se na média de 0,5 e 2,0 MPa.

Para cada tipo de mistura ensaiada e para cada um dos quinze corpos de prova, obteve-se no equipamento de RT a força final exercida em cada corpo de prova, dado em quilogramas. Posteriormente aplicou-se a fórmula da resistência à tração, à temperatura do ensaio, dado em MPa. Segue abaixo a Tabela 13, que apresenta os valores encontrados na RT para cada tipo de mistura ensaiada.

Tabela 13 – Valores da Resistência a Tração.

Mistura	N° CP	Altura (mm)	Diâmetro (mm)	Força Kg	$\sigma_t$ (MPa)
REF@136°	16	67,03	101,63	1124	1,03
	18	67,83	101,87	1343	1,21
	19	69,67	101,63	1040	0,92
AD-I@121°	11	69,67	102,40	1094	0,96
	12	67,80	103,63	920	0,82
	14	68,87	102,63	933	0,82
AD-I@106°	1	69,97	101,90	1127	0,99
	3	68,80	101,50	1300	1,16
	4	69,73	101,90	1158	1,02
AD-II@121°	7	68,40	100,93	1441	1,3
	8	69,20	101,23	1367	1,22
	9	67,70	100,93	1074	0,98
AD-II@106°	20	67,37	101,20	859	0,79
	22	70,03	100,93	781	0,69
	24	70,10	102,10	1026	0,89

Fonte: Autora (2022).

O resultado para este ensaio foi filtrado, buscando os dados de forma mais objetiva e representativa, procurando uma análise de variabilidade estatística. Para nota de esclarecimento o valor encontrado do CP19, na mistura de referência, foi desprezado devido à grande variação, logo para completar os valores analisados foi realizado uma média dos dois CPs na mistura.

Portanto, o desvio padrão é uma medida de dispersão, medida esta, que indica o quanto o conjunto de dados é uniforme. Portanto, quando o desvio é mais baixo, quer dizer que os dados do conjunto estão bem aproximados da média. Iniciou-se o procedimento com as 15 amostras totais de cada mistura, realizou-se a Média ( $\bar{x}$ ) e calculou-se o Desvio padrão ( $\sigma$ ), os resultados finais obtidos encontram-se na Tabela 14 abaixo.

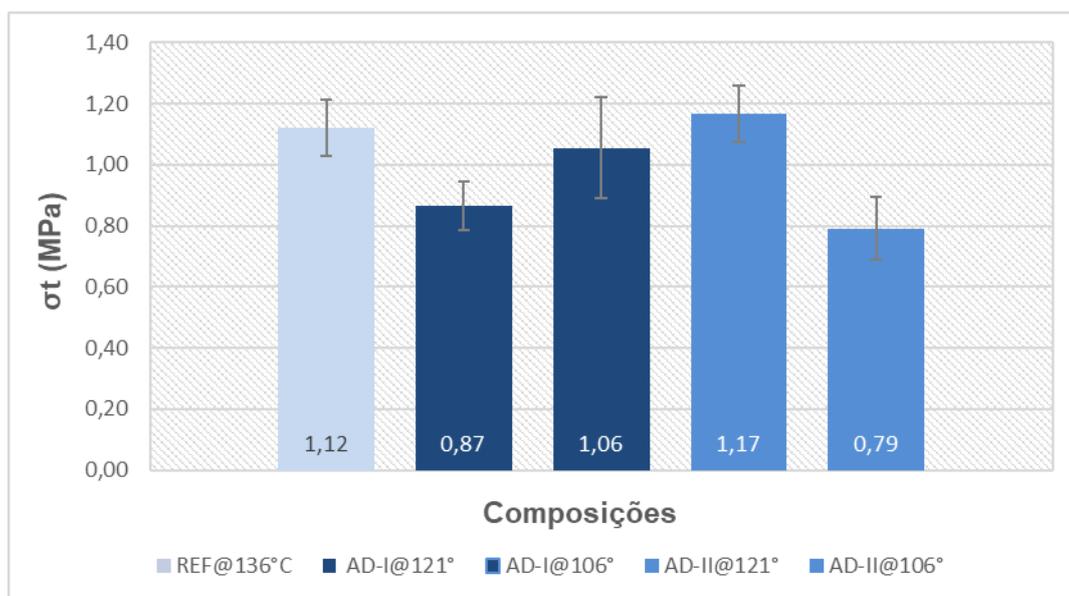
Tabela 14 – Valores de média e desvio padrão para RT.

	REF@136°	AD-I@121°	AD-I@106°	AD-II@121°	AD-II@106°
$\sigma_t$ (MPa)	1,03	0,96	0,99	1,30	0,79
	1,21	0,82	1,16	1,22	0,69
	1,12	0,82	1,02	0,98	0,89
<b>MÉDIA</b>	<b>1,12</b>	<b>0,87</b>	<b>1,06</b>	<b>1,17</b>	<b>0,79</b>
<b>DESV PAD</b>	0,092	0,079	0,094	0,167	0,103
<b>CV</b>	8,17%	9,11%	8,87%	14,28%	12,98%

Fonte: Autora (2022).

A Figura 28 ilustra os resultados das médias aritméticas da RT, expressas em MPa, após a aplicação do critério estatístico para cada tipo de composições.

Figura 28 – Resultados de Resistência a Tração.



Fonte: Autora (2022).

Com os resultados de RT, apresentados na Figura 28, foi possível afirmar que as misturas mornas não diferem em comportamento das misturas convencionais, provado pela pouca diferença nos valores de resistência médio. É importante destacar que os corpos de prova utilizados para o ensaio de RT foram, anteriormente, ensaiados para obtenção do seu módulo de resiliência.

Com a figura acima, nota-se que as misturas com incorporação de aditivos surfactantes obtiveram resultados satisfatórios de resistência à tração e comparados entre si apresentam resultados semelhantes. Ainda se percebe que as misturas que

apresentaram maiores resultados de RT são de diferentes aditivos em reduções de temperaturas distintas. A mistura AD-II@121° apresentou o resultado mais elevado, superior a mistura de referência. Concluiu-se que as cinco composições atenderam aos resultados propostos pela bibliografia, sendo superiores a 0,65 MPa e inserido no intervalo de 0,5 a 2,0 MPa.

Assim como os resultados obtidos por Boeira (2014) utilizou o CAP 50/70 da REFAP em suas misturas com diversos agregados, obteve valores de RT para as suas misturas entre 1,20 e 1,70 MPa, em média valores mais altos dos que os encontrados nessa pesquisa. Resultados obtidos por Faccin (2018), utilizando CAP 50/70 - DAER faixa A, obteve valores de 1,89 MPa e 1,72 MPa, dessa forma, comparados aos resultados dos autores os valores encontrados nesse trabalho estão no intervalo proposto para CBUQ.

Por fim, importante ressaltar que o uso do ensaio RT isoladamente como indicador de desempenho à fadiga não pode ser afirmado. Segundo Schuster (2018), a fraca relação encontrada entre a resistência à fadiga e o parâmetro RT, levam alguns autores investigar indicadores adicionais determinados a partir do próprio ensaio de RT, buscando mensurar o desempenho de misturas asfálticas a fadiga por diferentes abordagens.

#### **4.2.3 Ensaio de Módulo de Resiliência**

Utilizou-se apenas três corpos de prova para cada mistura, que é o mínimo exigido pela norma, que após ensaios de MR foram utilizados para realizar a resistência a tração. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados de MR para cada amostra, média por posição de ensaio, desvio padrão, coeficiente de variação e resultado de MR médio por composição.

Mistura	Amostra	0°			90°			média	MR Médio (MPa)
		MR	SD	CV %	MR	SD	CV %		
REF@136°	16	<b>3327</b>	101,61	3,05	<b>4003</b>	165,28	4,13	3665,00	<b>2992</b>
	18	<b>4034</b>	139,00	3,45	<b>4065</b>	137,60	3,39	4049,50	
	19	<b>1271</b>	34,76	2,74	<b>1253</b>	14,95	1,23	1262,00	
AD-I@121°	11	<b>4247</b>	132,58	3,12	<b>4268</b>	25,30	2,94	4257,50	<b>3649</b>
	12	<b>3129</b>	167,68	5,36	<b>3202</b>	118,28	3,69	3165,50	
	14	<b>3487</b>	160,48	4,60	<b>3560</b>	237,37	6,67	3523,50	
AD-I@106°	1	<b>5135</b>	183,21	3,57	<b>5506</b>	100,23	1,82	5320,50	<b>4301</b>
	3	<b>4089</b>	144,71	3,54	<b>4625</b>	207,36	4,48	4357,00	
	4	<b>3102</b>	78,17	2,52	<b>3347</b>	74,11	2,21	3224,50	
AD-II@121°	7	<b>5049</b>	142,61	2,13	<b>5271</b>	226,82	4,30	5160,00	<b>4652</b>
	8	<b>4800</b>	292,75	6,10	<b>5025</b>	136,84	2,72	4912,50	
	9	<b>3691</b>	142,66	3,86	<b>4075</b>	212,37	5,21	3883,00	
AD-II@106°	20	<b>3606</b>	309,75	8,59	<b>3598</b>	114,04	3,36	3602,00	<b>3678</b>
	22	<b>3276</b>	288,17	8,80	<b>3064</b>	73,50	2,40	3170,00	
	24	<b>4094</b>	181,41	4,43	<b>4431</b>	131,31	2,96	4262,50	

Fonte: Autora (2022).

A tabela 15 apresenta os resultados de MR filtrados, buscando os dados de forma mais objetiva e representativa, procurando uma análise de variabilidade estatística.

Tabela 16 – Valores de média de Módulo de Resiliência.

	REF@136°	AD-I@121°	AD-I@106°	AD-II@121°	AD-II@106°
<b>MR (MPa)</b>	3665	4258	5321	5160	3602
	4050	3166	4357	4913	3170
	3857	3524	3225	3883	4263
<b>MÉDIA</b>	3857	3649	4301	4652	3678
<b>DESV PAD</b>	119,25	556,68	1049,13	677,23	550,22
<b>CV</b>	4,98%	15,26%	24,39%	14,56%	14,96%

Fonte: Autora (2022).

A Figura 29 ilustra os resultados das médias aritméticas da MR, expressas em MPa, após a aplicação do critério estatístico para cada tipo de mistura.

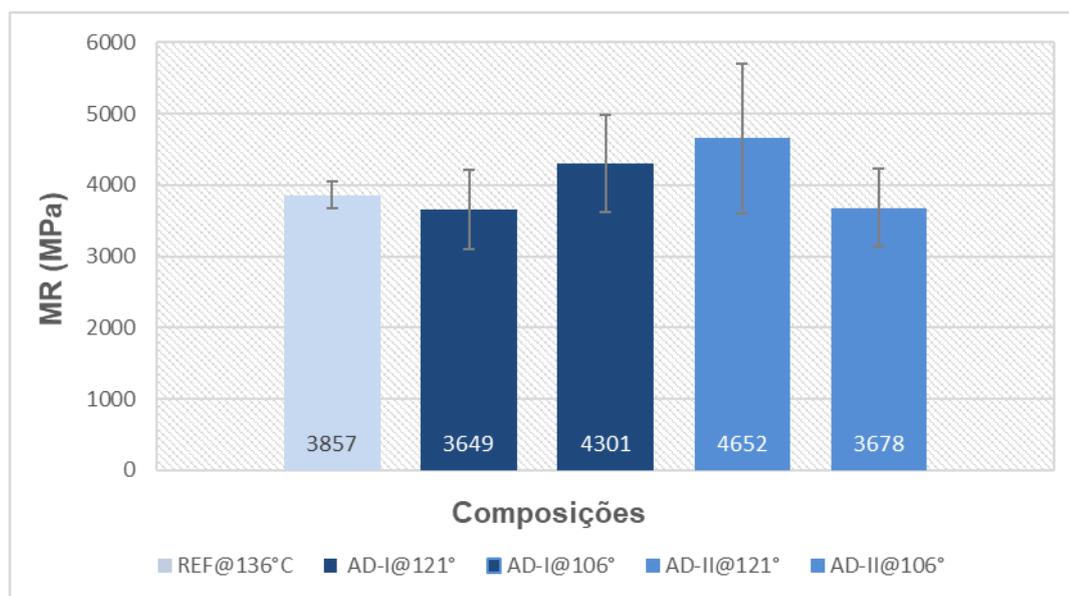


Figura 29 – Resultados de Módulo de Resiliência.

Fonte: Autora (2022).

Os valores de MR, apresentados na Figura 29, mostram que, todas as misturas mornas apresentaram valores próximos e adequados à mistura de referência convencional. O aumento ou a diminuição do MR implica na distribuição de tensões e deformações na estrutura do pavimento. Via de regra, misturas mais rígidas tendem a concentrar em si os esforços cíclicos e necessitam de maior resistência à fadiga para não apresentarem trincamento. (PAPAGIANNAKIS; MASSAD, 2008; MEDINA; MOTTA, 2015). Bernucci et al. (2010) citam que valores típicos de MR, a 25°C e 10 Hz, estão na faixa de 2000 a 8000 MPa. Todas as misturas estudadas apresentam valores dentro desses limites.

Boeira (2014) utilizou o CAP 50/70 em suas misturas, e encontrou valores para MR a 25°C e 10Hz entre 3742 a 7878 MPa e média de 5810MPa, para misturas com agregados de diferentes locais do estado. Já na dissertação de Faccin (2018) os valores obtidos para MR se encontram entre 4738 a 8277MPa e média 6507MPa, sendo os valores encontrados nessa pesquisa dentro do limite de faixa e também em comparação com as pesquisas citadas.

#### 4.2.4 Relação MR/RT

Bernucci et al. (2010) descreve que a razão entre esses dois parâmetros é utilizada como um fator na vida de fadiga das misturas, agregando informações de rigidez e resistência. Para os autores, o mais desejável é um valor pequeno de razão, dado que com frequência se procura baixa rigidez para evitar elevada absorção de tensões que levem ao trincamento precoce do revestimento, além da alta resistência à tração, que em geral, quanto maior resistência a ruptura há uma maior resistência à fadiga. A Tabela 17 demonstra os resultados obtidos na relação MR/RT e a Figura 30 representa graficamente os resultados desta razão.

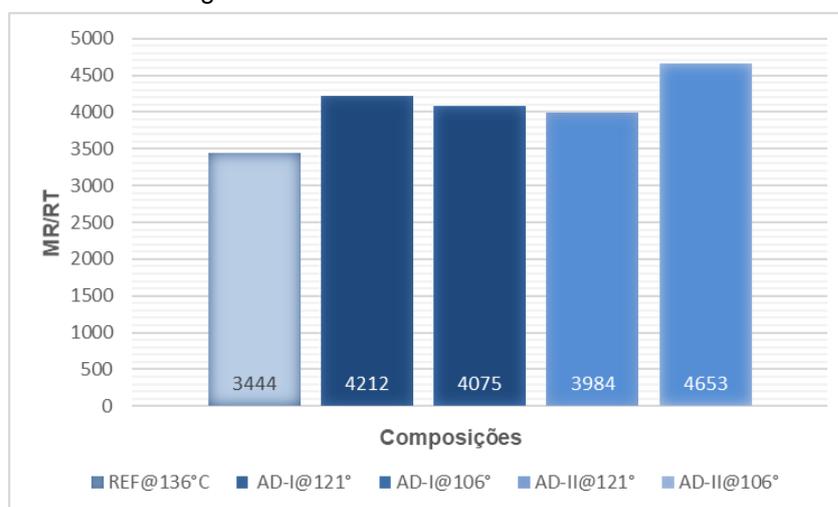
Tabela 17 – Resultados da relação MR/RT.

Misturas	MR (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	MR/RT
REF@136°C	3857	1,12	3444
AD-I@121°	3649	0,87	4212
AD-I@106°	4301	1,06	4075
AD-II@121°	4652	1,17	3984
AD-II@106°	3678	0,79	4653

Fonte: Autora (2022).

A análise desta relação foi avaliada por Granich (2010), e neste contexto os resultados não significam perda ou ganho de desempenho das misturas, que segundo o autor, uma relação de MR/RT alta ou baixa é designada de acordo com um caso isolado de aplicação. Como exemplos, o tipo de tráfego, clima ou o tipo da estrutura.

Figura 30 – Resultados da razão MR/RT.



Fonte: Autora (2022).

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo de misturas mornas e aplicação da tecnologia e relativamente novo no Brasil, técnica está associada a sustentabilidade e aos objetivos sustentáveis da ONU para 2030. As pesquisas para avaliar o comportamento mecânicos das misturas asfálticas normas são apresentadas em pesquisas laboratoriais, utilizações por concessionárias de rodovias, escolhendo pequenos trechos em campo para análise, assim o estudo ainda não se difundiu como uma técnica empregada no país.

A seguir serão apresentadas as conclusões finais desse trabalho, baseado nos objetivos específicos apresentados no início do trabalho e sugestão de trabalhos futuros relacionados ao tema.

### 5.1 CONCLUSÕES

O presente estudo teve como intuito avaliar o comportamento das misturas mornas a partir de ensaios laboratoriais, utilizando ligante convencional e dois aditivos surfactantes. Assim verificou a influência da redução de temperatura nas propriedades mecânicas e características volumétricas da mistura em diferentes composições. Além disso, esse trabalho também contribuiu para a sociedade, que enfrenta algumas dificuldades relacionadas aos procedimentos de serviço de execução de concreto asfáltico, entregando por meio dessa pesquisa uma certificação de técnica e possibilidades encontradas no mercado que garantam o controle de qualidade do serviço prestado.

Após a realização de ensaios tecnológicos dos matérias granulares como: abrasão “Los Angeles”, sanidade, equivalente de areia, densidade e massa específica e absorção. Foi possível afirmar através dos resultados encontrados, valores que não ultrapassam os limites das especificações, desse modo, qualificando os agregados para utilização em misturas asfálticas.

Como conclusão da determinação da porcentagem de ligante utilizado nesse projeto, através de dosagem e método Marshall, foi estabelecido como critério a ser atendido um valor correspondente ao volume de vazios de 4%, sendo esse o valor intermediário na faixa. Dessa forma o teor encontrado por interpolação a ser utilizado foi de 5,8% de ligante convencional e 0,4% do aditivo surfactante com relação ao ligante.

Por fim, quanto a reduções de temperatura de compactação, apresentada nas cinco composições da mesma mistura, apresentam como conclusões práticas, suas propriedades mecânicas mantidas em mesmos patamares da mistura referência. No entanto, é importante ressaltar o comportamento contraditório dos aditivos empregados, que nas diferentes reduções de 15°C e 30°C, apresentam resultados dos ensaios mecânicos diferentes quando observados por redução de temperatura. Mas emancipado dessa observação, ambos aditivos cedidos funcionam e podem ser empregados como uma solução nos serviços de pavimentação.

#### 4.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Durante a elaboração desse trabalho surgiram mais indicações de continuidade dessa pesquisa como:

- Realizar mais ensaios mecânicos para verificar o comportamento desses da mistura, em suas diferentes composições de redução de temperatura de compactação como: Módulo Complexo (E) para avaliar rigidez, Flow Number (FN) e Fadiga à Tração-Compressão uniaxial para avaliar danos permanentes;
- Verificar o comportamento das misturas asfálticas mornas com outros complementos como: material fresado, ligantes com DOPE ou RAP, ou comparar com outro aditivo;
- Avaliação de custos dos aditivos em relação aos fatores de redução da temperatura de usinagem e compactação e ganhos de crédito de carbono;

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA BRASIL, 2022. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2021-07/operadoras-de-saneamento-privadas-atendem-15-da-populacao>. Acesso em: 07 mar. 2022.
- ASPHALT INSTITUTE. **The Asphalt Handbook**. MS-4. 7th edit. Asphalt Institute, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 26: Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro, 2001.
- BALBO, José Tadeu. Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração. 1. Ed. Oficina de textos. São Paulo. 2007. 558 p.
- BERNUCCI, L.; MOTTA, L. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 504 f. 3ª Reimpressão. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2010.
- BOHN, K.A. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero**. 2017. 82p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.
- 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.
- 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.
- BOEIRA, Fernando Dekeper. **Estudo do comportamento de concretos asfálticos com diferentes tipos de agregados e cales**. 2014. 148p. Dissertação (Mestrado em Engenharia - Construção Civil e Preservação Ambiental) - UFSM, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.
- CAVALLARI, J. M.; ZWACK, L. M.; LANGE, C. R.; KERRICK, R., F. MCCLEAN, M., D. **Temperature-dependent emission concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons in paving and built-up roofing asphalts**. In: The Annals of Occupational Hygiene Volume 56, Issue 2Pp. 148-160. Oxford University Press. Oxford, 2012.
- CERATTI, J. A. P; REIS, R. M. M. **Manual de dosagem de concreto asfáltico**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 151p.

CERVARICH, M. **Foaming the Asphalt New Warm-mix Technique Challenges onventional Wisdom** —Hot Mix Asphalt Technology Volume 12, Number 4, p 23-24, National Asphalt Pavement Association, Lanham, 2007.

CHOWDHURY, A.; BUTTON, J. W. **A Review of Warm Mix Asphalt**. Texas Transportation Institute. Technical report. Springfield, Virginia: National Technical Information Service, December 2008.

CROTEAU, J.-M.; TESSIER, B. **Warm Mix Asphalt Paving Technologies: a Road Builder's Perspective**. Annual Conference of the Transportation Association of Canada. 2008.

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.

DAER – Departamento Autônomo de Estradas e Rodagem. **Concreto Asfáltico (Especificação de serviço)**. DAER-ES-P 16/91 Porto Alegre, 1991.

DAPPER, H. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas a quente e mornas com utilização de asfalto borracha**. 2020. 137p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. DNIT 031/2006 - ES. **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro – RJ, 2006.

EAPA – European Asphalt Pavement Association. **The use of Warm-Mix Asphalt**. 2014.

EOS – ORGANIZAÇÃO E SISTEMAS, 2022. Disponível em: <https://www.eosconsultores.com.br/empresas-de-saneamento-basico/>. Acesso em: 07 mar. 2022.

FACCIN, C. **Concretos asfálticos em utilização no Rio Grande do Sul: comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente**. 2018. 222p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

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.

HANZ, A. J.; BAHIA, H. U. **Asphalt Binder Contribution to Mixture Workability and Application of Asphalt Lubricity Test to Estimate Compactability Temperatures for Warm-Mix Asphalt**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2371, p. 87–95. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2013.

MEDINA, J. e MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 574p. 2005.

MELLO, D. **Avaliação da adição de Evotherm no comportamento de misturas asfálticas em laboratório e no desempenho em campo**. 2012. 259p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

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.

MOCELIN, D et al. **Evaluation of workability of warm mix asphalt through CDI parameter and air voids**. Transport Infrastructure And Systems, [s.l.], p.335-342, 8 mar. 2017. CRC Press/Balkema.

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

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.

PAPAGIANNAKIS, A. T.; MASSAD, E. A. 2008. **Pavement design and materials**. 542p. Hoboken: John Wiley & Sons. 2008.

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.

PERKINS, S. W. **Synthesis of Warm Mix Asphalt Paving Strategies for Use in Montana Highway Construction**. Report N° FHWA/MT-09-009/8117-38. The State of Montana Department of Transportation in cooperation with The U.S Department of Transportation Federal Highway Administration. USA, 2009.

POSSEBON, E. P. **Estudo laboratorial das propriedades mecânicas de misturas com diferentes cimentos asfálticos de petróleo produzidos no Brasil**. 2018. 156p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

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

PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C. **Warm-mix asphalt: Best Practices.** Quality Improvement, Series 125. Lanham: NAPA. 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. 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.

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.

RUBIO, M.C.; MARTÍNEZ, G.; BAENA, L.; MORENO, F. **Warm mix asphalt: an overview.** Journal of Cleaner Production 24 76-84 (2012).

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

SABITA. Manual 32: **Best practice guideline for warm mix asphalt.** ISBN 978- 1-8974968-55-1. South Africa, 2011.

SANTOS, G. F. **Avaliação das melhorias em misturas asfálticas densas à quente através da incorporação de dois tipos de cales produzidas na Região Sul do Brasil.** 2019. 103p. Trabalho de Conclusão (Obtenção do Título de Engenheiro Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí 2019.

SCHUSTER, S. L. **Estudo do Comportamento a Fadiga de Misturas Asfálticas por meio da Teoria Viscoelástica de Dano Contínuo.** 2018. 270p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

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

SOUSA FILHO, A. C. **Produção de misturas asfálticas mornas pela inserção de zeólitas.** 2006. 85p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

ZAUMANIS M. **Warm mix asphalt investigation.** Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Kongens Lyngby, 2010.