

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

LEONARDO AQUILES TURCO

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO DIÂMETRO MÁXIMO DE CURVAS
GRANULOMÉTRICAS NOS PARÂMETROS DE DOSAGEM E FUNCIONALIDADE
DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

Joinville

2021

LEONARDO AQUILES TURCO

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO DIÂMETRO MÁXIMO DE CURVAS
GRANULOMÉTRICAS NOS PARÂMETROS DE DOSAGEM E FUNCIONALIDADE
DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel no Curso de
Graduação em Engenharia Civil de
Infraestrutura do Centro Tecnológico de
Joinville da Universidade Federal de Santa
Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Breno Salgado Barra

Joinville

2021

LEONARDO AQUILES TURCO

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO DIÂMETRO MÁXIMO DE CURVAS
GRANULOMÉTRICAS NOS PARÂMETROS DE DOSAGEM E FUNCIONALIDADE
DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 04 de agosto de 2021.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eng. Breno Salgado Barra
Orientador/Presidente
Centro Tecnológico de Joinville - UFSC

Prof. Dr. Eng. Yader Alfonso Guerrero Pérez
Membro
Centro Tecnológico de Joinville - UFSC

Prof. Dr. Fís. Alexandre Mikowski
Membro
Centro Tecnológico de Joinville - UFSC

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me proporcionar o dom da vida, conceder sabedoria e discernimento para todos os momentos vividos até aqui.

Aos meus pais, Celui e Ivanei, por sonharem comigo meus sonhos, me fornecendo a oportunidade de estudar longe de casa e ir em busca dos meus desejos. Obrigado por entenderem minha ausência e por estarem sempre, de alguma maneira, perto de mim, para que a saudade não apertasse tanto.

À minha esposa Bruna, por ser meu refúgio e paz em todos os momentos. Muito obrigado, meu amor, por todo suporte e a ajuda também com a realização dos ensaios.

Agradeço também aos meus sogros, Lourenço e Terezinha, por todo apoio e incentivo, sempre me tratando como um segundo filho.

Ao meu orientador Breno, por compartilhar comigo suas experiências e me proporcionar um aprendizado acerca do tema.

Ao meu amigo Felipe Hirata, por me auxiliar na realização dos ensaios deste trabalho.

Agradeço também aos meus amigos Fredi Cenci, Rudimar Althof e Eduardo dos Anjos, por serem a minha família aqui durante todos esses anos de faculdade.

À Rudnick Minérios e à CBB Asfaltos, pela concessão dos materiais para a realização desta pesquisa.

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é avaliar os efeitos da variação do diâmetro máximo de curvas granulométricas nos parâmetros de dosagem e funcionalidade de misturas asfálticas densas usinadas a quente. Para tanto, a composição granular das misturas asfálticas foi formulada a partir do método teórico, fazendo uso da equação de Fuller-Talbot. Foram definidas três curvas granulométricas, em que o parâmetro variável foi o diâmetro máximo do granular, a saber: 19,1 mm, 12,7 mm e 9,5 mm. O ligante betuminoso utilizado para a elaboração das misturas asfálticas foi o cimento asfáltico de petróleo (CAP) 50/70. Os granulares utilizados são oriundos de jazida localizada na região metropolitana da cidade de Joinville/SC, provenientes de maciço rochoso de gnaiss. O teor ótimo de ligante betuminoso para cada uma das diferentes misturas asfálticas foi determinado com base na metodologia Marshall, devido ser homologada oficialmente no Brasil. As dosagens testadas em cada formulação foram as seguintes: 4,22%, 4,54%, 4,86%, 5,18%, 5,50%, 5,82% e 6,14%. Ensaio complementares como altura da mancha de areia e drenabilidade também foram realizados, a fim de avaliar o comportamento funcional das misturas asfálticas, como a rugosidade superficial e a capacidade de escoamento da água sobre as suas composições. De acordo com a campanha experimental realizada, a curva granulométrica com o diâmetro máximo dos granulares de 19,1 mm apresentou os melhores resultados de resistência mecânica e funcionais entre todas as misturas asfálticas testadas, compreendendo maior drenabilidade e rugosidade superficial, além de menor consumo de ligante betuminoso no teor ótimo de dosagem determinado, em que pese os cuidados a serem considerados quanto ao empirismo da metodologia Marshall adotada.

Palavras-chave: Curvas granulométricas. Diâmetro máximo. Misturas Asfálticas.

ABSTRACT

The main aim of this research is to evaluate the effects of the variation with regards to the maximum granular size of aggregate gradations on the dosage and functional parameters of dense hot asphalt mixes. For achieving this purpose, the granulometric curves were formulated based on a theoretical method, with use of Füller-Talbot equation. Three granulometric curves were established, in which the only variability was related to the maximum diameter, such as: 19.1mm, 12.7mm and 9.5mm. The asphalt binder taken into account for dosing the asphalt mixes was classified by penetration test as 50/70. The granular fractions were extracted from a quarry located in the metropolitan region of Joinville/SC, provided by a gneissic massive rock. The optimum binder content for each aggregate gradation was determined by using the Marshall methodology, due to be officially homologated in Brazil. The binder contents tested for each formulation were 4.22%, 4.54%, 4.86%, 5.18%, 5.50%, 5.82% and 6.14%. Complimentary tests were carried out, so-called sand path height and drainability, in order to evaluate functional properties of the asphalt mixes, such as surface roughness and run off capacity. According to the experimental campaign, the granulometric curve with maximum diameter of 19.1 mm presented the best results, with regards to mechanical strength and functional parameters, comprising higher surface roughness and drainability, besides lower asphalt binder consumption at the optimum content, although some care is needed about the empirical context of the Marshall methodology adopted.

Keywords: Aggregate gradation. Maximum diameter. Asphalt mixes.

LISTA DE ABREVIações

| | | |
|-------|---|---|
| %V | - | Teor de vazios |
| ABNT | - | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| AFNOR | - | Association Française de Normalisation |
| CAP | - | Cimento asfáltico de petróleo |
| CPs | - | Corpos de prova |
| CT | - | Curva teórica |
| CTJ | - | Centro Tecnológico de Joinville |
| Dmáx | - | Diâmetro máximo |
| DNER | - | Departamento Nacional de Estradas de Rodagem |
| DNIT | - | Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte |
| MVA | - | Massa volumétrica aparente |
| MVR | - | Massa volumétrica real |
| RBV | - | Relação betume/vazios |
| UFSC | - | Universidade Federal de Santa Catarina |
| VAM | - | Vazios do agregado mineral |
| VCB | - | Vazios cheios com betume |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Fluxograma de execução da pesquisa..... | 12 |
| Figura 2 - Diferentes curvas granulométricas enquadradas na faixa C do DNER..... | 18 |
| Figura 3 - Processo de destilação fracionária do CAP..... | 20 |
| Figura 4 - Curvas granulométricas formuladas..... | 26 |
| Figura 5 - Separação das frações grossas e finas..... | 30 |
| Figura 6 - Utensílios utilizados no processo de mistura..... | 30 |
| Figura 7 - Inserção da mistura asfáltica no interior dos moldes..... | 31 |
| Figura 8 - Soquete Marshall automático utilizado..... | 32 |
| Figura 9 - Visão geral dos corpos de prova produzidos..... | 34 |
| Figura 10 - Corpos de prova imersos em água..... | 36 |
| Figura 11 - Corpo de prova na prensa hidráulica para ruptura..... | 36 |
| Figura 12 - Comparação dos corpos de prova (a) antes e (b) depois do rompimento. | 37 |
| Figura 13 - Ensaio de MVR..... | 38 |
| Figura 14 - Equipamento utilizado durante o ensaio de MVR..... | 39 |
| Figura 15 - Execução do ensaio de mancha de areia..... | 40 |
| Figura 16 - Drenômetro utilizado durante os ensaios sobre corpos de prova Marshall. | 42 |
| Figura 17 - Resultados dos ensaios da dosagem Marshall para a CT-01..... | 45 |
| Figura 18 - Resultados dos ensaios da dosagem Marshall para a CT-02..... | 46 |
| Figura 19 - Resultados dos ensaios da dosagem Marshall para a CT-03..... | 47 |
| Figura 20 - Variação da deformação ϵ_6 em função do diâmetro máximo..... | 50 |
| Figura 21 - Variação da deformação ϵ_6 em função do ensaio realizado..... | 51 |
| Figura 22 - Resultado do ensaio de mancha de areia para CT-01..... | 53 |
| Figura 23 - Resultado do ensaio de mancha de areia para CT-02..... | 53 |
| Figura 24 - Resultado do ensaio de mancha de areia para CT-03..... | 54 |
| Figura 25 - Resultado do ensaio de drenabilidade para CT-01..... | 55 |
| Figura 26 - Resultado do ensaio de drenabilidade para CT-02..... | 56 |
| Figura 27 - Resultado do ensaio de drenabilidade para CT-03..... | 56 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Classificação dos granulares usados na pavimentação..... | 16 |
| Tabela 2 - Faixas granulométricas do DNIT..... | 17 |
| Tabela 3 - Caracterização do material pétreo..... | 23 |
| Tabela 4 - Caracterização do ligante betuminoso CAP 50/70..... | 24 |
| Tabela 5 - Apresentação das curvas granulométricas e diâmetros máximos..... | 25 |
| Tabela 6 - Curvas granulométricas utilizadas..... | 26 |
| Tabela 7 - Quantidades para cada fração na composição da CT-01..... | 28 |
| Tabela 8 - Quantidades para cada fração na composição da CT-02..... | 29 |
| Tabela 9 - Quantidades para cada fração na composição da CT-03..... | 29 |
| Tabela 10 - Ilustração dos corpos de prova para as curvas teóricas (CT)..... | 33 |
| Tabela 11 - Massas totais das amostras para a execução dos ensaios de MVR..... | 37 |
| Tabela 12 - Classes de textura superficial em função da altura da mancha de areia. | 41 |
| Tabela 13 - Limites normativos estabelecidos pelo DNIT..... | 44 |
| Tabela 14 - Teor ótimo de betume para cada curva granulométrica testada..... | 48 |
| Tabela 15 - Resultados do ensaio da altura da mancha de areia nos teores ótimos de betume..... | 52 |
| Tabela 16 - Resultados de drenabilidade..... | 55 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 9 |
| 1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA..... | 10 |
| 1.1.1 Objetivo Geral | 10 |
| 1.1.2 Objetivos Específicos | 10 |
| 1.2 PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO..... | 11 |
| 1.3 DELIMITAÇÃO DO ESPAÇO DA PESQUISA..... | 13 |
| 1.4 RELEVÂNCIA DO TEMA | 13 |
| 1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO | 14 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 15 |
| 2.1 GRANULARES APLICADOS À PAVIMENTAÇÃO | 15 |
| 2.2 MÉTODOS GRANULOMÉTRICOS..... | 16 |
| 2.2.1 Método Por Tentativa | 17 |
| 2.2.2 Método Teórico | 18 |
| 2.3 LIGANTES ASFÁLTICOS | 19 |
| 2.4 A INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO MÁXIMO DOS GRANULARES DA CURVA GRANULOMÉTRICA EM MISTURAS ASFÁLTICAS..... | 20 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS | 23 |
| 3.1 MATERIAL PÉTREO..... | 23 |
| 3.2 LIGANTE BETUMINOSO | 24 |
| 3.3 CURVA GRANULOMÉTRICA..... | 24 |
| 3.4 MÉTODO DE DOSAGEM MARSHALL | 27 |
| 3.5 MASSA VOLUMÉTRICA REAL (MVR) | 37 |
| 3.6 ALTURA DA MANCHA DE AREIA | 39 |
| 3.7 DRENABILIDADE | 41 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 44 |
| 4.1 ENSAIO MARSHALL..... | 44 |
| 4.2 ALTURA DA MANCHA DE AREIA | 52 |
| 4.3 DRENABILIDADE | 54 |
| 5 CONCLUSÕES | 58 |
| REFERÊNCIAS..... | 60 |

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o Ministério da Infraestrutura (BRASIL, 2018a), o modal rodoviário é o principal meio de transporte no Brasil, tanto para cargas como para passageiros. Entretanto, Andrade (2018) afirma que uma quantidade significativa da malha rodoviária é danificada por diversos motivos, a saber: cargas excessivas por eixo, má formulação das misturas asfálticas, falta de manutenção nas rodovias e falhas nos projetos.

Apesar da grande dependência de rodovias no Brasil, o cenário preocupante em que se encontra a infraestrutura nacional é ocasionado pela insuficiência de investimentos no setor, além do uso de técnicas obsoletas de projeto e construção.

Para embasar este contexto em números, tem-se que dos 57,2 mil quilômetros de rodovias federais pavimentadas no Brasil, sob administração do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), apenas 33,7 mil (59%) são consideradas em bom estado de conservação, de acordo com o Índice de Condição da Manutenção (ICM) (BRASIL, 2018b).

Corroborando com esse cenário, o Tribunal de Contas da União (TCU) a partir do Acórdão nº 328/2013, revelou que os empreendimentos rodoviários apresentam problemas estruturais precocemente, em média, sete meses após a entrega da obra (BRASIL, 2013).

Barra (2005) aponta que o modelo de elaboração do arranjo estrutural dos granulares recomendada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) se vale da tentativa de enquadramento da composição granulométrica dentro de limites, denominados faixas, estabelecidos como aceitáveis.

A utilização do conceito de faixa granulométrica permite o enquadramento de diferentes curvas em seus limites, gerando assim misturas asfálticas que apresentam comportamentos distintos, podendo tanto ser bons como ruins. Uma forma de obter curvas granulométricas bem definidas é se utilizando da equação de Fuller-Talbot, onde é possível calcular a distribuição quantitativa de cada fração a ser utilizada, com base no percentual de material passante através da peneira de menor diâmetro da curva granulométrica e do diâmetro máximo do granular (BÚRIGO, 2015).

As propriedades dos concretos asfálticos são afetadas em decorrência do tamanho máximo dos granulares utilizados. Em relação às propriedades mecânicas

das misturas asfálticas, o aumento do tamanho dos granulares aumenta a resistência à tração e o seu módulo resiliente, mas tem pouco efeito na avaliação do parâmetro de estabilidade do ensaio Marshall (BROWN e BASSET, 1990).

Momm (1998) corrobora a tendência de maiores valores do módulo de rigidez complexo para formulações de concretos asfálticos com maior tamanho máximo na curva granulométrica. Entretanto, complementa que estas composições tenderam a suportar deformações menores para se romperem à fadiga. Foi atribuída a esta condição, o fato dos granulares maiores tornarem os concretos asfálticos mais rígidos, e por consequência, a suportarem deformações menores, ensejando a necessidade de maiores espessuras de concreto asfáltico nas estruturas de pavimento.

Desta forma, a principal contribuição deste trabalho consiste em avaliar a influência da variação do diâmetro máximo de curvas granulométricas na formulação de misturas asfálticas densas, utilizando o método teórico de Füller-Talbot, em relação aos parâmetros de dosagem pela metodologia Marshall, e funcionalidade, a partir da realização de ensaios complementares como altura da mancha de areia de drenabilidade.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência da variação do diâmetro máximo de curvas granulométricas nos parâmetros de dosagem e funcionalidade de misturas asfálticas densas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Definir as curvas granulométricas de trabalho, a partir da metodologia teórica, com a utilização da equação de Füller-Talbot;
- Selecionar os materiais constituintes das formulações de misturas asfálticas, tomando em conta as suas caracterizações previamente definidas;
- Executar os procedimentos laboratoriais de dosagem das misturas asfálticas, a partir do método Marshall;

- Verificar os indicadores funcionais das misturas asfálticas formuladas, como a altura da mancha de areia e drenabilidade;
- Definir o teor ótimo de betume para cada formulação testada, com base nos parâmetros de dosagem estabelecidos pela metodologia Marshall;
- Avaliar comparativamente as formulações testadas.

1.2 PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO

Nesta pesquisa, foram utilizados materiais de empresas que possuem parceria com o Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav), localizado no Campus de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Os granulares foram disponibilizados pela empresa Rudnick Minérios Ltda., localizada em Joinville/SC. O ligante betuminoso foi proveniente da CBB Asfaltos, empresa situada em Curitiba/PR.

No que diz respeito tanto à caracterização das frações granulares quanto do ligante betuminoso foram utilizados resultados de pesquisas anteriores (EING, 2018; ZAGOLIN, 2016), pois utilizaram as mesmas matrizes e lotes amostrais desta pesquisa.

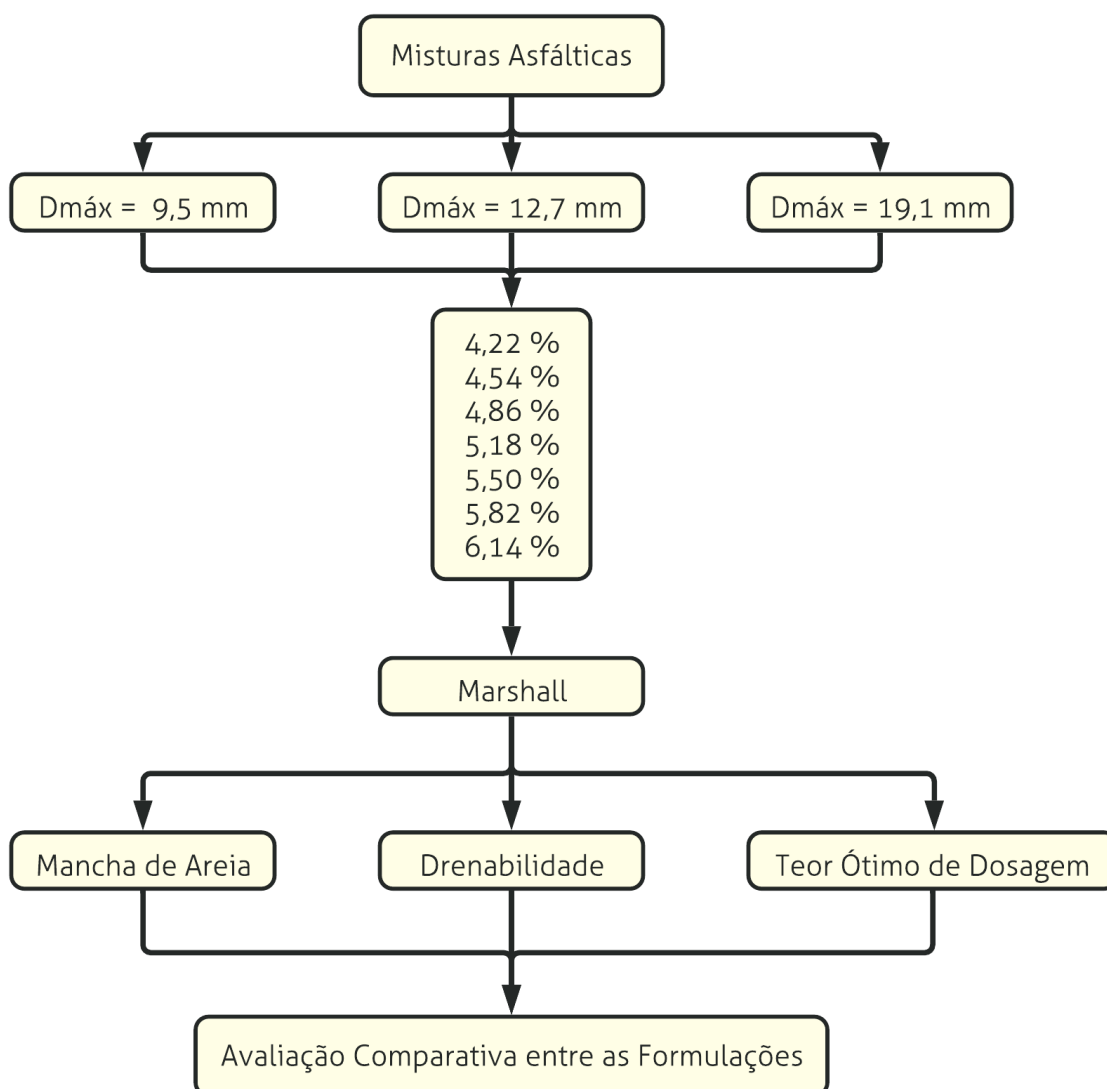
As curvas granulométricas foram definidas de acordo com a metodologia racional, fazendo uso da equação de Füller-Talbot. Utilizou-se a metodologia de dosagem Marshall (DNER-ME 043, 1995), adotada como oficial pelos órgãos oficiais no Brasil, para a determinação do teor ótimo de ligante. Foi ainda avaliada a macrotextura do pavimento, a partir do ensaio de altura da mancha de areia (AFNOR NF P 98-216-1, 1993) e de drenabilidade (AFNOR NF P 98-254-3, 1993) sobre a superfície dos corpos de prova.

Para analisar as propriedades das misturas asfálticas, foi moldado um total de 105 corpos de prova, subdivididos em 3 curvas granulométricas com diferentes diâmetros máximos de granulares (19,1 mm; 12,7 mm e 9,5 mm), compreendendo 7 teores de betume distintos, a saber: 4,22%, 4,54%, 4,86%, 5,18%, 5,50%, 5,82% e 6,14%. Esta variação também foi baseada nos trabalhos de Eing (2018) e Zagolin (2016), tendo sido acrescentados os dois últimos percentuais mencionados nesta pesquisa, devido a maior variação de curvas granulométricas formuladas.

Os parâmetros funcionais das misturas asfálticas, como a mancha de areia e a drenabilidade, foram determinados sobre a superfície dos corpos de prova moldados, a fim de que fosse possível construir curvas de tendência do comportamento das formulações acerca da rugosidade e da capacidade de escoamento da água, indicadores que contribuem na melhoria de aspectos como o aumento da aderência pneu-pavimento nas situações de frenagem e redução na ocorrência de hidroplanagem e do efeito *spray*.

A Figura 1 ilustra o fluxograma estabelecido para a execução da pesquisa.

Figura 1 - Fluxograma de execução da pesquisa.



Fonte: Autor (2021)

Foram utilizados aproximadamente 137 kg de material pétreo e 7,5 kg de ligante betuminoso.

Dos resultados obtidos foram procedidas as discussões técnicas, bem como as respectivas conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

1.3 DELIMITAÇÃO DO ESPAÇO DA PESQUISA

A presente pesquisa limitou-se à execução de procedimentos e interpretação de resultados em âmbito laboratorial, não tendo sido executados testes e análises de campo. As conclusões obtidas a partir dos resultados alcançados são válidas apenas para as condições especificadas neste trabalho.

A pesquisa foi totalmente realizada no Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), no Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav), o qual dispõe de todos os recursos necessários para a sua realização.

1.4 RELEVÂNCIA DO TEMA

Conhecer as características dos pavimentos de concreto asfáltico e como estes se comportam é de extrema importância. Logo, quando são dimensionados e construídos, utilizando materiais de boa qualidade e métodos adequados, não devem apresentar nenhum tipo de problema no transcurso de suas vidas de serviço (HAAS; HUDSON; ZANIEWSKI, 1994).

Segundo Balbo (2007), as manifestações de defeitos que os pavimentos apresentam podem estar relacionadas aos materiais componentes da estrutura da mistura asfáltica.

De La Roche (1996) afirma que apesar da mistura de concreto asfáltico herdar a viscoelasticidade dos ligantes betuminosos que contêm, o seu comportamento é profundamente afetado por outros fatores, entre eles a composição granulométrica, o tipo e a forma dos grãos. Logo, tem-se que o diâmetro máximo dos granulares utilizados no arranjo granulométrico das misturas asfálticas, afeta tanto as propriedades mecânicas quanto as características funcionais dos pavimentos.

A macrotextura das misturas asfálticas, que apresenta um predomínio sobre a aderência pneu-pavimento, é proporcional ao diâmetro dos granulares

utilizados e a sua distribuição espacial na estrutura interna da mistura asfáltica. Entretanto, o mesmo não é verdadeiro para todas as propriedades mecânicas, sobretudo a fadiga (MOMM, 1998).

Neste contexto, este trabalho visa ao auxílio no entendimento do quanto a variação das composições granulométricas podem influenciar nos parâmetros de dosagem e funcionalidade de misturas asfálticas densas.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A seguir, é apresentada a estrutura e organização deste trabalho, conforme cada capítulo:

Capítulo 1: apresenta a introdução do trabalho, trazendo o contexto geral das aplicações, bem como os objetivos da pesquisa.

Capítulo 2: discorre sobre a revisão bibliográfica acerca do tema proposto, compreendendo as referências encontradas na literatura técnica.

Capítulo 3: aborda os materiais e métodos utilizados para a execução da pesquisa.

Capítulo 4: apresenta os resultados obtidos e respectiva discussão técnica.

Capítulo 5: trata das conclusões da pesquisa e de sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Concretos asfálticos são o resultado da mistura adequada de cimentos asfálticos e materiais rochosos granulares, devidamente aquecidos e compactados (MOMM, 1998).

Entre os diversos componentes constituintes das misturas asfálticas encontram-se os agregados, denominação genérica para os materiais pétreos utilizados na pavimentação, os quais são responsáveis por conceder estabilidade e coesão à estrutura (MEURER, 2015).

Segundo Bernucci et al. (2010) é grande a variedade de materiais granulares passíveis de serem utilizados em revestimentos asfálticos, entretanto, muitas fontes se tornam inviáveis devido a características específicas requeridas ao granular para sua utilização.

Os materiais pétreos empregados na pavimentação devem ser materiais inertes, granulares, sem forma e dimensões definidas, que comportem propriedades adequadas para suportar as tensões impostas na superfície do pavimento e também, em seu interior (SENÇO, 2001).

A seguir serão apresentados alguns os conceitos teóricos acerca do tema de misturas asfálticas densas e a sua relação com os materiais constituintes.

2.1 GRANULARES APLICADOS À PAVIMENTAÇÃO

Os agregados podem ser classificados, segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), conforme a natureza, tamanho e distribuição dos grãos, apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação dos granulares usados na pavimentação.

| | | |
|--|----------|---|
| Classificação dos granulares | Natureza | Natural - pedregulho, seixos, britas, areias, etc. |
| | | Artificial - escória de alto forno, argila calcinada, argila expandida. |
| | Tamanho | Graúdo - material retido na peneira nº 10 (2,0mm). |
| | | Miúdo - material que passa na peneira nº10 e fica retido na peneira nº 200. |
| | | Enchimento - material que passa pelo menos 65% na peneira 200. |
| | Gradação | Densa - material de granulometria contínua e bem graduada. |
| Aberto - material de granulometria contínua, bem graduada, mas com deficiência de finos. | | |
| Tipo macadame - granulometria uniforme com diâmetro máximo aproximadamente o dobro do diâmetro mínimo. | | |

Fonte: adaptado de Manual de Pavimentação do DNIT (2006, p. 78).

As características essenciais dos granulares utilizados para a produção de pavimento de concreto asfáltico são: a dureza, a sanidade, a adesividade ao ligante betuminoso, a forma e o tamanho (MOMM, 1998).

A dureza está relacionada com a resistência ao choque e ao desgaste do pavimento decorrido da ação do tráfego e movimento de partículas. Ambas as propriedades são avaliadas através de ensaios normalizados pelo DNER, como o ensaio Los Angeles e Treton (DNIT, 2006).

A sanidade diz respeito a resistência ao intemperismo que o granular possui, sendo avaliada através da imersão do agregado em uma solução padrão de sulfato de sódio ou magnésio (DNIT, 2006).

2.2 MÉTODOS GRANULOMÉTRICOS

Existem diversos métodos para a determinação do esqueleto estrutural de uma mistura de concreto asfáltico, como por exemplo, o método por tentativa e o método Teórico de Fuller-Talbot (SENÇO, 2001; MOMM, 1998).

2.2.1 Método Por Tentativa

O método por tentativa é um método empírico, uma vez que tem por base apenas uma estimativa das porcentagens que serão utilizadas para cada fração do agregado (BÚRIGO, 2015).

De posse da granulometria de todos os materiais a serem utilizados para a composição do esqueleto mineral do concreto asfáltico, serão estimadas porcentagens para cada um destes materiais, onde o somatório das frações passantes em cada peneira deverá estar dentro dos limites requeridos.

O DNIT estabelece os limites para as faixas granulométricas através da especificação de serviço do DNIT-ES 031 (2006), os quais estão apresentados na Tabela 2. A escolha de cada faixa a ser utilizada varia de acordo com a aplicação da mistura asfáltica.

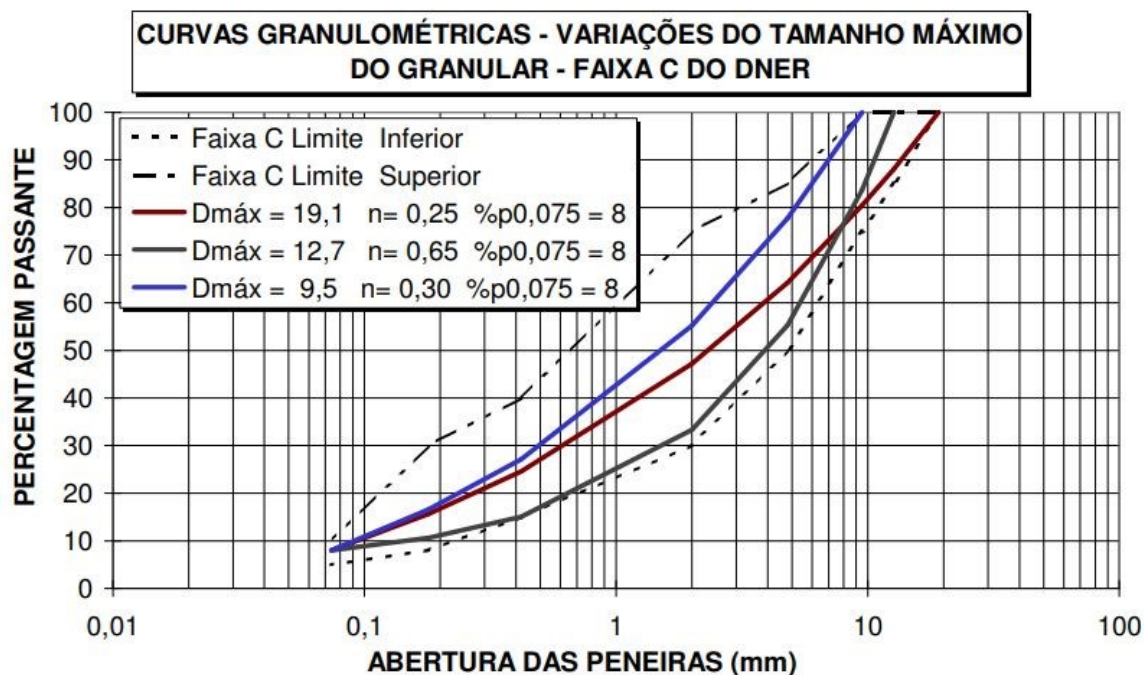
Tabela 2 - Faixas granulométricas do DNIT.

| Peneira de malha | | % em massa, passando | | | |
|--------------------------------|---------------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------|-------------|
| Série ASTM | Abertura (mm) | A | B | C | Tolerâncias |
| 2" | 50,8 | 100 | - | - | - |
| 1 1/2" | 38,1 | 95 - 100 | 100 | - | +/- 7% |
| 1" | 25,4 | 75 - 100 | 95 - 100 | - | +/- 7% |
| 3/4" | 19,1 | 60 - 90 | 80 - 100 | - | +/- 7% |
| 1/2" | 12,7 | - | - | 80 - 100 | +/- 7% |
| 3/8" | 9,5 | 35 - 65 | 45 - 80 | 70 - 90 | +/- 7% |
| Nº 4 | 4,8 | 25 - 50 | 28 - 60 | 44 - 72 | +/- 5% |
| Nº 10 | 2 | 20 - 40 | 20 - 45 | 22 - 50 | +/- 5% |
| Nº 40 | 0,42 | 10 - 30 | 10 - 32 | 8 - 26 | +/- 5% |
| Nº 80 | 0,18 | 5 - 20 | 8 - 20 | 4 - 16 | +/- 3% |
| Nº 200 | 0,075 | 1 - 8 | 3 - 8 | 2 - 10 | +/- 2% |
| | | 4,0 - 7,0 | 4,5 - 7,5 | 4,5 - 9,0 | +/- 0,3% |
| Asfalto solúvel no CS2 (+) (%) | | Camada de ligação (Blinder) | Camada de ligação e rolamento | Camada de rolamento | |

Fonte: adaptado de DNIT (2006, p. 5)

As grandes variações de porcentagens passante em todas as peneiras evidenciam que é possível obter misturas asfálticas que apresentem diferentes comportamentos e que sejam enquadradas dentro de uma mesma faixa normativa, como é apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Diferentes curvas granulométricas enquadradas na faixa C do DNER



Fonte: Momm (1998, p.36)

Barra (2005) aponta que um dos motivos para que o método por tentativas se torne falho, é que os granulares oriundos das centrais de britagem e peneiramento, apresentam frações mal definidas, acarretando uma heterogeneidade de diâmetros dos granulares.

2.2.2 Método Teórico

De acordo com Barra (2009), a metodologia de cálculo de curvas granulométricas teóricas possibilita a obtenção, de maneira racional, de um controle exato das frações dos materiais utilizados na composição dos arranjos estruturais das misturas asfálticas, propiciando um preenchimento gradual e adequado dos vazios formados pelos granulares de maiores dimensões.

Através da equação de Fuller-Talbot, é calculado o percentual de cada fração correspondente a 100% das partículas passantes, considerando a variação do diâmetro que ocorre em todas as peneiras (DNIT, 2006).

$$\%p = a \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad (1)$$

onde:

%p – percentagem em peso que passa na peneira de abertura d;

a – constante, tomada igual a 100;

d – abertura da peneira, em mm;

D – tamanho máximo, abertura da peneira que passa 100%, em mm;

n – expoente obtido pela equação (2).

$$n = \frac{\log(\%p_{200}) - \log(100)}{\log\left(\frac{d}{D}\right)} \quad (2)$$

onde:

n – expoente indicador de graduação da curva granulométrica;

%p₂₀₀ – percentagem de material passante na peneira de nº 200;

d – abertura da peneira de menor diâmetro da série utilizada;

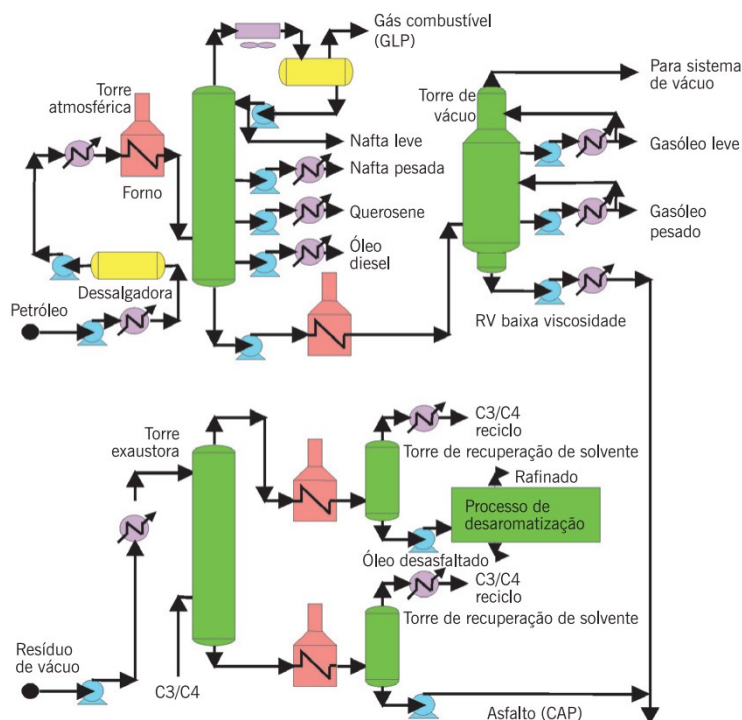
D – tamanho máximo, abertura da peneira que passa 100%, em mm.

O método racional utiliza diâmetros bem definidos ao longo da formulação e composição da curva granulométrica, por este motivo dispensa o uso de enquadramento de faixas como é feito no método por tentativa (ANDRADE, 2018).

2.3 LIGANTES ASFÁLTICOS

Os Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) são o tipo de ligante mais utilizado no Brasil e cumprem a função de ligação nos concretos asfálticos (GUERRERO, 2009). Conforme ilustra a Figura 3, são obtidos diretamente do processo de destilação fracionada do petróleo, entretanto pode ser obtido com diferentes técnicas.

Figura 3 - Processo de destilação fracionária do CAP.



Fonte: Bernucci et al (2010, p. 37).

A classificação destes materiais é feita com base nos parâmetros de penetração, ponto de amolecimento (anel e bola), índice de suscetibilidade térmica e na viscosidade de Saybolt-Furol e Brookfield (SENÇO, 2001).

Estes materiais são caracterizados por possuírem comportamento viscoelástico à temperatura ambiente e dependem da temperatura e frequência de solicitação (GUERRERO, 2013).

2.4 A INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO MÁXIMO DOS GRANULARES DA CURVA GRANULOMÉTRICA EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Lou et al. (2021) afirma que o diâmetro máximo do granular é um importante parâmetro para as misturas asfálticas, dado que influencia na distribuição e arranjo dos granulares em uma mistura asfáltica. Da mesma maneira, Momm (1998), sustenta que o diâmetro máximo dos granulares afeta tanto as características superficiais quanto as propriedades mecânicas de um pavimento de concreto asfáltico.

Tais afirmações demonstram a importância de se avaliar como o comportamento de misturas asfálticas é afetado com a variação do diâmetro máximo do granular utilizado.

Em seu estudo, Momm (1998) propôs avaliar a correlação existente entre a macrotextura da superfície de um pavimento de concreto asfáltico e o diâmetro máximo dos granulares utilizados na composição granulométrica da mistura asfáltica. A avaliação da macrotextura se deu através dos ensaios de mancha de areia e de drenabilidade.

Momm (1998) também avaliou o comportamento mecânico dos pavimentos de concreto asfáltico através da análise da deformação permanente, do módulo complexo e da fadiga.

Os resultados demonstraram que com o crescimento do diâmetro máximo dos granulares, a superfície do pavimento de concreto asfáltico apresentou um acréscimo nos valores de macrotextura, se tornando mais rugosa, e proporcionando um maior escoamento de água da superfície de contato pneu-pavimento, elevando a capacidade de drenabilidade da superfície do pavimento (MOMM, 1998).

Em relação à avaliação mecânica, Momm (1998) não encontrou variações significativas de deformação permanente ocasionadas pela variação do diâmetro máximo dos granulares. Quanto ao módulo complexo, apesar da presença de fatores mais influentes, os resultados apresentaram uma tendência de crescimento do valor do módulo complexo para diâmetros máximos maiores, resultando assim em pavimentos mais rígidos, e em decorrência disso, suportando menores deformações para se romperem à fadiga.

Outro estudo buscando investigar a influência do diâmetro máximo dos granulares no comportamento de pavimentos de concreto asfáltico foi conduzido por Liu, Hao e Xu (2017), onde foram utilizadas misturas asfálticas do tipo Stone Matrix Asphalt (SMA), caracterizada por conter uma elevada porcentagem de agregados graúdos (BERNUCCI, et al., 2010).

Além de avaliarem o desempenho mecânico através dos parâmetros de deformação permanente, ruptura à fadiga e perda de massa por impacto no ensaio de Cântabro bem como a funcionalidade através do ensaio de permeabilidade (LIU, HAO e XU, 2017).

Liu, Hao e Xu (2017) fizeram uso da metodologia de dosagem Marshall para a determinação do teor ótimo de betume para cada mistura asfáltica trabalhada, e

encontraram valores decrescentes para um aumento no diâmetro máximo dos granulares utilizados. Vazios do agregado mineral (VAM) e vazios cheio de betume (VCB) aumentaram com a diminuição do diâmetro máximo do granular.

Em relação ao desempenho mecânico, o aumento no diâmetro máximo dos granulares contribuiu para um aumento na resistência a deformação permanente de misturas asfálticas do tipo SMA. Entretanto, este aumento ocasiona pavimentos mais rígidos e menos resistentes à ruptura por fadiga (LIU, HAO e XU, 2017).

A permeabilidade é primariamente afetada pelo teor de vazios, mas sua influência também pode ser estendida para o diâmetro máximo dos agregados, onde com a sua redução notou-se uma diminuição na taxa de permeabilidade (LIU, HAO e XU, 2017).

Entre os diversos parâmetros que podem afetar as propriedades das misturas asfálticas, o estudo promovido por Lou et al. (2021) analisou a influência da granulometria, diâmetro máximo dos granulares, ligante betuminoso e adição de fibra de basalto em relação a rigidez (módulo de resiliência) do pavimento de concreto asfáltico.

Através dos ensaios de compressão diametral com tração indireta, constatou a correlação negativa existente entre o diâmetro máximo do granular utilizado na mistura asfáltica e a sua rigidez (módulo de resiliência), portanto, são menores as deformações suportadas para que os corpos de prova se rompam à fadiga. Indo ao encontro do estudo realizado por Momm (1998).

Huang et al. (2020) realizou um estudo utilizando misturas asfálticas abertas do tipo CPA (camada porosa de atrito), as quais se caracterizam por conter entre 18 e 25% de vazios com ar (DNER-ES 386, 1999). A influência que a granulometria e o tamanho dos granulares possuem na permeabilidade, através da criação de uma estrutura de poros interconectados foi avaliada.

Fazendo uso de técnicas de processamento de imagem e tomografia computadorizada, Huang et al. (2020) avaliaram propriedades dos poros, entre elas a área, a circularidade, o diâmetro equivalente e a interconectividade dos vazios para diferentes diâmetros máximos de granulares e curvas granulométricas.

A variação do diâmetro máximo dos granulares não apresentou um efeito significativo na porcentagem de poros interconectados, estando estes mais relacionados com o teor de vazios de um pavimento de concreto asfáltico (HUANG et al., 2020).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo são apresentados os materiais utilizados para o desenvolvimento da pesquisa, a elaboração das curvas granulométricas, bem como a metodologia dos ensaios laboratoriais para aferição dos parâmetros de dosagem e funcionalidade das misturas asfálticas testadas.

3.1 MATERIAL PÉTREO

O material pétreo é proveniente da empresa Rudnick Minérios Ltda., localizada na região metropolitana da cidade de Joinville/SC. Foram considerados os resultados de caracterização obtidos por Eing (2018), devido ter sido utilizado o mesmo lote amostral (Tabela 3).

Tabela 3 - Caracterização do material pétreo.

| Ensaio | Normativa <i>apud</i> Eing (2018) | Resultado obtido em laboratório | Limite |
|--|--------------------------------------|------------------------------------|--------|
| Desgaste por abrasão Los Angeles | DNER-ME 035/98 e DNER-ME 37/97 | 17,50% | ≤ 50% |
| Índice de Forma | ABNT NBR 7809/2006 | 0,6 | ≥ 0,5 |
| Resistência ao ataque químico (Durabilidade) | DNER-ME 089/94 e DNER-ME 37/97 | 5,30% | ≤ 12% |
| Adesividade ao agregado graúdo | DNER-ME 78/94 | Má | - |
| Equivalência de areia | DNER-ME 54/97 | 78% | - |
| Teor de material pulverulento | DNER-ME 266/97 e DNER-ME 37/97 | 0,4 | ≤ 1,0% |
| Absorção | - | 0,50% | - |

Fonte: adaptado de Eing (2018, p.23).

A adesividade do material granular foi atestada como má. Entretanto, se trata de uma condição já esperada, pois de acordo com Siroma (2016) após efetuar análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS), além de Fluorescência (DRF) e Difração de Raio-X (DRX), foi verificada uma predominância de Dióxido de Silício ($\text{Si}^4\text{O}_2^{2-}$) na composição da rocha gnáissica utilizada ($\cong 60\%$), acarretando uma matriz fortemente eletronegativa, e por consequência, repelente à carga elétrica predominante ($> 80\%$) da matriz

Carbônica (C⁻⁴) de mesma característica eletronegativa do ligante betuminoso (LEITE e MENEZES, 2003).

De qualquer modo, é importante esclarecer que nesta pesquisa não foram utilizados aditivos ou adições para corrigir o problema referente à adesividade entre os materiais, a fim de que não houvesse qualquer influência sobre o desempenho real das misturas asfálticas formuladas.

3.2 LIGANTE BETUMINOSO

O ligante betuminoso utilizado foi o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70 produzido pela refinaria REPLAN da Petrobrás, localizada em Paulínia/SP, mas distribuído à região sul do país pela CBB Asfaltos Ltda., com sede em Curitiba/PR.

Os parâmetros de caracterização do ligante asfáltico foram obtidos por Zagolin (2016) (Tabela 4), tendo sido utilizado o mesmo lote amostral nesta pesquisa.

Tabela 4 - Caracterização do ligante betuminoso CAP 50/70.

| Ensaio | Normativa <i>apud</i> Zagolin (2016) | Resultado Quantitativo | Limite |
|-----------------------------------|--|---|-----------------|
| Ponto de amolecimento Anel e Bola | DNIT-ME 131/2010 | 49°C | > 46°C |
| Penetração | DNIT-ME 155/2010 | 52 (0,1mm) | 50-70 |
| Índice de Pfeiffer e Van Doormaal | Resolução nº19 de 11/07/2005 da Agência Nacional do Petróleo (ANP) | -1,5 | de -1,5 até 0,7 |
| Viscosidade Saybolt-Furol | ABNT NBR 14950/2003 | Compactação: 137°C a 142°C Usinagem: 148°C a 153°C | - |
| Massa Específica Real | ABNT NBR 6296/2012 | 1,007 g/cm ³ | - |

Fonte: adaptado de Zagolin (2016).

3.3 CURVA GRANULOMÉTRICA

As curvas granulométricas foram calculadas utilizando o método teórico, com o uso das Equações 1 e 2 de Fuller-Talbot apresentadas no tópico 2.2.2.

Foram concebidas três curvas granulométricas distintas, denominadas curvas teóricas (CT), em que foi fixada a percentagem de material passante na peneira com

abertura de 0,075 mm, e variou-se o diâmetro máximo do granular utilizado em cada formulação de mistura asfáltica, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Apresentação das curvas granulométricas e diâmetros máximos.

| Curva granulométrica | Parâmetros | |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | %p ₂₀₀ (%) | D _{máx} (mm) |
| CT-01 | 6,0 | 9,5 |
| CT-02 | 6,0 | 12,7 |
| CT-03 | 6,0 | 19,1 |

Fonte: Autor (2021).

A escolha do percentual de 6,0% passante na peneira de abertura 0,075 mm foi realizada com base na pesquisa de Momm (1998), em que após extenso estudo bibliográfico e laboratorial, verificou que as curvas granulométricas densas formuladas por métodos teóricos que apresentaram os melhores resultados mecânicos e funcionais, tinham percentual passante na peneira 0,075 mm entre 5,0% e 7,0%.

A Tabela 6 apresenta a distribuição percentual das frações pétreas para cada curva granulométrica. O diâmetro máximo do granular em cada caso é representado pela percentagem passante de 100% do material, na maior abertura da malha de peneira da série escolhida pelo projetista.

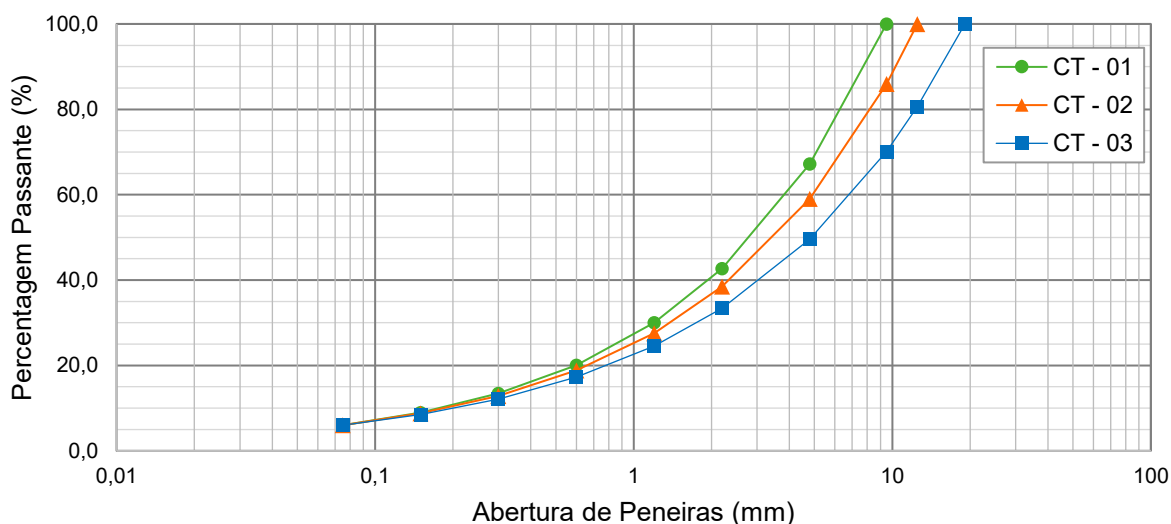
Tabela 6 - Curvas granulométricas utilizadas.

| CT-01 | | CT-02 | | CT-03 | |
|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
| Peneira (mm) | % Passante | Peneira (mm) | % Passante | Peneira (mm) | % Passante |
| - | - | - | - | 19,1 | 100,0 |
| - | - | 12,7 | 100,0 | 12,7 | 80,6 |
| 9,5 | 100,0 | 9,5 | 86,0 | 9,5 | 70,1 |
| 4,8 | 67,3 | 4,8 | 59,1 | 4,8 | 49,6 |
| 2,2 | 42,7 | 2,2 | 38,5 | 2,2 | 33,4 |
| 1,2 | 30,1 | 1,2 | 27,6 | 1,2 | 24,5 |
| 0,6 | 20,1 | 0,6 | 18,8 | 0,6 | 17,2 |
| 0,3 | 13,4 | 0,3 | 12,9 | 0,3 | 12,1 |
| 0,15 | 9,0 | 0,15 | 8,8 | 0,15 | 8,5 |
| 0,075 | 6,0 | 0,075 | 6,0 | 0,075 | 6,0 |

Fonte: Autor (2021).

As curvas granulométricas formuladas são ilustradas na Figura 4.

Figura 4 - Curvas granulométricas formuladas.



Fonte: Autor (2021).

Observando a Figura 4, é possível perceber a variação na trajetória das curvas granulométricas, em razão da modificação do diâmetro máximo do granular, acarretando em três formulações distintas, condição indicada pelos expoentes 'n' de 0,58 (CT-01); 0,55 (CT-02) e 0,51 (CT-03), determinados com o uso da Equação 2. Logo, as disposições gráficas ilustradas juntamente com a Tabela 6 demonstram que

a CT-01 possui maior aporte de frações finas em sua composição, seguida pela CT-02 e CT-03, nesta ordem.

Assim, as considerações discorridas anteriormente são corroboradas pelo critério de Duriez previsto na Equação 3 (Manuel LPC, 2007), o qual leva em conta a distribuição percentual granulométrica das formulações para cálculo das superfícies específicas das misturas asfálticas. Neste contexto, a ordem decrescente das superfícies específicas é a seguinte: 11,88 m²/kg (CT-01), 11,54 m²/kg (CT-02) e 11,12 m²/kg (CT-03), respectivamente.

$$100\Sigma = 0,25G + 2,3S + 12s + 150f \quad (3)$$

onde:

Σ – superfície específica (m²/kg);

G – percentagem de granulares na curva superior a 6,3 mm;

S – percentagem de granulares na curva entre 6,3 mm e 0,250 mm;

s – percentagem de granulares na curva entre 0,250 mm e 0,063 mm;

f – percentagem de granulares na curva abaixo de 0,063 mm.

3.4 MÉTODO DE DOSAGEM MARSHALL

O engenheiro Bruce Marshall, do *Mississippi State Highway Department*, desenvolveu na década de 1930 uma metodologia para a dosagem de ligantes betuminosos em misturas asfálticas (BARRA, 2005).

Esta metodologia foi difundida mundialmente após ser aperfeiçoada por estudos realizados em pistas experimentais de aeroportos conduzidas pelo *U.S. Army Corps of Engineers* (LEANDRO, 2016). A partir de então foi denominada como metodologia Marshall.

O seu princípio básico é moldar corpos de prova cilíndricos com o uso da compactação por impacto, a partir de um soquete de prova, visando à determinação do teor ótimo de ligante betuminoso das misturas asfálticas, considerando parâmetros físicos e mecânicos próprios, de modo a satisfazer as especificações normativas de um projeto (SENÇO, 2001).

Este método é atualmente homologado como oficial no Brasil pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNER-ME 043, 1995), razão pela qual foi utilizado nesta pesquisa.

Para a escolha do teor ótimo de ligante, é necessário a determinação dos parâmetros físicos e mecânicos, a saber: estabilidade (resistência máxima à ruptura por compressão diametral), fluência (deformação do corpo de prova durante o processo de ruptura), teor de vazios (%V), massa específica volumétrica aparente (MVA) e real (MVR), vazios cheios com betume (VCB), vazios do agregado mineral (VAM) e relação betume/vazios (RBV) dos corpos de prova (UNISESKY, 2018).

Os corpos de prova dosados devem apresentar massa total de 1200 gramas. As quantidades para cada fração são determinadas pelas distribuições fracionárias percentuais das curvas granulométricas (Tabela 6).

A preparação das amostras se inicia com a definição dos teores de betume que serão utilizados. Como foram formuladas três curvas granulométricas distintas, foi preciso definir uma ampla faixa de trabalho quanto aos percentuais de teor de betume. Os valores escolhidos foram 4,22%; 4,54%; 4,86%; 5,18%; 5,50%; 5,82% e 6,14%, baseados nas pesquisas de Eing (2018) e Zagolin (2016), em razão de terem estudado a dosagem da curva granulométrica CT-03, com objetivos distintos ao desta pesquisa. Porém, em relação às referências citadas foram ainda acrescentados os dois últimos percentuais de dosagem listados.

Após definidos os teores de betume, foi realizado o cálculo da quantidade, em gramas, que cada fração irá compor no arranjo granulométrico da mistura asfáltica, compreendendo o conjunto dos materiais a massa total já mencionada de 1200 g por unidade. As Tabelas 7 a 9 apresentam as quantidades para cada fração na composição das amostras das curvas teóricas.

Tabela 7 - Quantidades para cada fração na composição da CT-01.

| Teor de ligante (%) | 4,22 | 4,54 | 4,86 | 5,18 | 5,50 | 5,82 | 6,14 |
|---------------------|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Ligante (g) | 50,6 | 54,5 | 58,3 | 62,2 | 66,0 | 69,8 | 73,7 |
| Peneiras (mm) | Quantidade por fração (g) | | | | | | |
| 4,8 | 376,4 | 375,1 | 373,9 | 372,6 | 371,3 | 370,1 | 368,8 |
| 2,2 | 281,8 | 280,8 | 279,9 | 278,9 | 278,0 | 277,0 | 276,1 |
| 1,2 | 145,8 | 145,3 | 144,9 | 144,4 | 143,9 | 143,4 | 142,9 |
| 0,6 | 114,5 | 114,1 | 113,7 | 113,4 | 113,0 | 112,6 | 112,2 |
| 0,3 | 76,5 | 76,3 | 76,0 | 75,8 | 75,5 | 75,3 | 75,0 |
| 0,15 | 51,2 | 51,0 | 50,8 | 50,7 | 50,5 | 50,3 | 50,1 |
| 0,075 | 34,2 | 34,1 | 34,0 | 33,9 | 33,7 | 33,6 | 33,5 |
| Fundo | 69,0 | 68,7 | 68,5 | 68,3 | 68,0 | 67,8 | 67,6 |
| Total | 1200,0 | 1200,0 | 1200,0 | 1200,0 | 1200,0 | 1200,0 | 1200,0 |

Fonte: Autor (2021).

Tabela 8 - Quantidades para cada fração na composição da CT-02.

| Teor de ligante (%) | 4,22 | 4,54 | 4,86 | 5,18 | 5,50 | 5,82 | 6,14 |
|---------------------|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Ligante (g) | 50,6 | 54,5 | 58,3 | 62,2 | 66,0 | 69,8 | 73,7 |
| Peneiras (mm) | Quantidade por fração (g) | | | | | | |
| 9,5 | 161,0 | 160,5 | 159,9 | 159,4 | 158,9 | 158,3 | 157,8 |
| 4,8 | 309,4 | 308,3 | 307,3 | 306,3 | 305,2 | 304,2 | 303,2 |
| 2,2 | 236,9 | 236,1 | 235,3 | 234,5 | 233,7 | 232,9 | 232,1 |
| 1,2 | 125,3 | 124,9 | 124,5 | 124,1 | 123,7 | 123,2 | 122,8 |
| 0,6 | 100,4 | 100,1 | 99,7 | 99,4 | 99,1 | 98,7 | 98,4 |
| 0,3 | 68,6 | 68,4 | 68,1 | 67,9 | 67,7 | 67,4 | 67,2 |
| 0,15 | 46,8 | 46,7 | 46,5 | 46,4 | 46,2 | 46,1 | 45,9 |
| 0,075 | 32,0 | 31,9 | 31,8 | 31,7 | 31,6 | 31,5 | 31,4 |
| Fundo | 69,0 | 68,7 | 68,5 | 68,3 | 68,0 | 67,8 | 67,6 |
| Total | 1200,0 | 1200,0 | 1200,0 | 1200,0 | 1200,0 | 1200,0 | 1200,0 |

Fonte: Autor (2021).

Tabela 9 - Quantidades para cada fração na composição da CT-03.

| Teor de ligante (%) | 4,22 | 4,54 | 4,86 | 5,18 | 5,50 | 5,82 | 6,14 |
|---------------------|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Ligante (g) | 50,6 | 54,5 | 58,3 | 62,2 | 66,0 | 69,8 | 73,7 |
| Peneiras (mm) | Quantidade por fração (g) | | | | | | |
| 12,7 | 222,6 | 221,9 | 221,1 | 220,4 | 219,7 | 218,9 | 218,2 |
| 9,5 | 120,6 | 120,2 | 119,8 | 119,4 | 119,0 | 118,5 | 118,1 |
| 4,8 | 236,2 | 235,4 | 234,6 | 233,8 | 233,0 | 232,2 | 231,5 |
| 2,2 | 186,5 | 185,8 | 185,2 | 184,6 | 184,0 | 183,3 | 182,7 |
| 1,2 | 101,6 | 101,3 | 100,9 | 100,6 | 100,3 | 99,9 | 99,6 |
| 0,6 | 83,6 | 83,4 | 83,1 | 82,8 | 82,5 | 82,3 | 82,0 |
| 0,3 | 58,8 | 58,6 | 58,4 | 58,2 | 58,0 | 57,8 | 57,6 |
| 0,15 | 41,4 | 41,2 | 41,1 | 41,0 | 40,8 | 40,7 | 40,5 |
| 0,075 | 29,1 | 29,0 | 28,9 | 28,8 | 28,7 | 28,6 | 28,5 |
| Fundo | 69,0 | 68,7 | 68,5 | 68,3 | 68,0 | 67,8 | 67,6 |
| Total | 1200,0 | 1200,0 | 1200,0 | 1200,0 | 1200,0 | 1200,0 | 1200,0 |

Fonte: Autor (2021).

Os granulares, depois de pesados, são separados entre frações grossas (diâmetros maiores que 2,2 mm) e finas (diâmetros menores que 2,2 mm) em recipientes apropriados para armazenamento, que possam suportar elevadas temperaturas e serem de fácil manipulação. Para tanto, foram utilizados recipientes de alumínio, do tipo marmitta (Figura 5).

Figura 5 - Separação das frações grossas e finas.



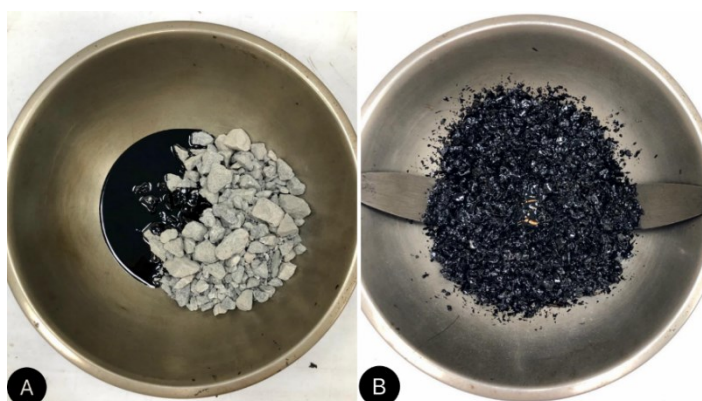
Fonte: Autor (2021).

A temperatura adotada para o processo de usinagem do CAP 50/70 foi de 150°C, estando dentro do intervalo definido na Tabela 4. Os granulares foram usinados a 163°C.

Este acréscimo de 13°C para os granulares é aplicado em razão da troca de calor com que ocorre entre os materiais durante o processo de mistura. Assim, para propiciar bom envolvimento do ligante betuminoso sobre a superfície dos granulares e evitar falta de trabalhabilidade na execução das amostras, tem-se que o intervalo de 10°C a 15°C é utilizado para este fim (DNIT, 2006).

Todos os materiais previstos na composição das misturas asfálticas devem ser condicionados nas temperaturas de usinagem estabelecidas, incluindo o recipiente e as espátulas utilizadas para homogeneizar os materiais (Figura 6).

Figura 6 - Utensílios utilizados no processo de mistura.



Fonte: Autor (2021).

Após realizado o completo envolvimento de todas as frações granulares com o ligante betuminoso, a mistura asfáltica é acondicionada nos recipientes de alumínio e levada à estufa na temperatura de compactação por duas horas. Para esta pesquisa, a temperatura de 140°C foi escolhida, também de acordo com o intervalo especificado na Tabela 4.

Este período de repouso por duas horas na estufa garante que a mistura asfáltica atinja a condição de temperatura homogênea para a realização do processo de compactação. É importante que os moldes a serem utilizados para a confecção dos corpos de prova também sejam mantidos na mesma temperatura de compactação da amostra.

Uma vez as misturas asfálticas estando homogêneas à temperatura de compactação, é realizada a inserção das amostras no interior dos moldes (Figura 7), aplicando-se 15 golpes de espátula na região periférica e 10 golpes na parte central com intuito de que ocorra uma pré acomodação da mistura asfáltica no molde.

Figura 7 - Inserção da mistura asfáltica no interior dos moldes.



Fonte: Autor (2021).

As amostras são então compactadas por impacto, compreendendo 75 golpes em cada uma das faces do corpo de prova, com uso de um soquete padrão (Figura 8), nesta pesquisa controlado eletricamente, o que elimina a dependência da energia do operador e proporciona uniformidade da força aplicada.

Figura 8 - Soquete Marshall automático utilizado.



Fonte: Autor (2021).

Após a compactação, e decorrido tempo suficiente para que a amostra não tenha resfriado completamente, é procedida a extração do molde.

Para maior amostragem dos resultados, foram confeccionados 5 corpos de prova para cada teor de betume, acima do mínimo de 3 exigidos pela norma DNER-ME 043 (1995).

Foi produzido um total de 105 corpos, compreendendo os 7 teores de betume para cada uma das três curvas granulométricas. A

Tabela 10 apresenta a disposição de cada curva teórica (CT) com seus respectivos corpos de prova, bem como os diâmetros máximos e os teores de ligantes.

Tabela 10 - Ilustração dos corpos de prova para as curvas teóricas (CT).

| Curva | Teor de ligante | Corpos de Prova | Curva | Teor de ligante | Corpos de Prova | Curva | Teor de ligante | Corpos de Prova |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| CT 01 - 9,5 mm | 4,22% | CP 01 | CT 02 - 12,7 mm | 4,22% | CP 36 | CT 03 - 19,1 mm | 4,22% | CP 71 |
| | | CP 02 | | | CP 37 | | | CP 72 |
| | | CP 03 | | | CP 38 | | | CP 73 |
| | | CP 04 | | | CP 39 | | | CP 74 |
| | | CP 05 | | | CP 40 | | | CP 75 |
| | 4,54% | CP 06 | | CP 41 | CP 76 | | | |
| | | CP 07 | | CP 42 | CP 77 | | | |
| | | CP 08 | | CP 43 | CP 78 | | | |
| | | CP 09 | | CP 44 | CP 79 | | | |
| | | CP 10 | | CP 45 | CP 80 | | | |
| | 4,86% | CP 11 | | CP 46 | CP 81 | | | |
| | | CP 12 | | CP 47 | CP 82 | | | |
| | | CP 13 | | CP 48 | CP 83 | | | |
| | | CP 14 | | CP 49 | CP 84 | | | |
| | | CP 15 | | CP 50 | CP 85 | | | |
| | 5,18% | CP 16 | | CP 51 | CP 86 | | | |
| | | CP 17 | | CP 52 | CP 87 | | | |
| | | CP 18 | | CP 53 | CP 88 | | | |
| | | CP 19 | | CP 54 | CP 89 | | | |
| | | CP 20 | | CP 55 | CP 90 | | | |
| | 5,50% | CP 21 | | CP 56 | CP 91 | | | |
| | | CP 22 | | CP 57 | CP 92 | | | |
| | | CP 23 | | CP 58 | CP 93 | | | |
| | | CP 24 | | CP 59 | CP 94 | | | |
| | | CP 25 | | CP 60 | CP 95 | | | |
| | 5,82% | CP 26 | | CP 61 | CP 96 | | | |
| | | CP 27 | | CP 62 | CP 97 | | | |
| | | CP 28 | | CP 63 | CP 98 | | | |
| | | CP 29 | | CP 64 | CP 99 | | | |
| | | CP 30 | | CP 65 | CP 100 | | | |
| | 6,14% | CP 31 | | CP 66 | CP 101 | | | |
| | | CP 32 | | CP 67 | CP 102 | | | |
| | | CP 33 | | CP 68 | CP 103 | | | |
| | | CP 34 | | CP 69 | CP 104 | | | |
| | | CP 35 | | CP 70 | CP 105 | | | |

Fonte: Autor (2021).

A determinação dos teores ótimos de ligante para as misturas asfálticas requer que a massa específica volumétrica aparente (MVA) dos corpos de prova seja determinada (Equação 4). Neste contexto, o peso e as dimensões dos corpos de prova

foram tomados, para o cálculo volumétrico das MVA. A Figura 9 ilustra uma visão geral dos corpos de prova produzidos.

$$MVA = \frac{P}{\pi * R^2 * H} \quad (4)$$

onde:

MVA – massa específica volumétrica aparente, em g/cm³;

P - peso do corpo de prova, em g;

R - raio do molde, em cm;

H - altura média do corpo de prova, em cm.

Figura 9 - Visão geral dos corpos de prova produzidos.



Fonte: Autor (2021).

Com os corpos de provas moldados foram realizadas primeiramente as determinações dos demais parâmetros físicos de dosagem, como Teor de Vazios (%V) (Equação 5), Vazios Cheios com Betume (VCB) (Equação 6), Vazios do Agregado Mineral (VAM) (Equação 7) e Relação Betume/Vazios (RBV) (Equação 8).

$$\%V = \frac{MVR - MVA}{MVR} * 100 \quad (5)$$

onde:

MVR – massa específica volumétrica real, em g/cm³;

MVA – massa específica volumétrica aparente, em g/cm³.

$$\%VCB = \frac{MVA * \% \text{ ligante}}{d \text{ ligante}} \quad (6)$$

onde:

VCB – vazios cheios com betume, em %;

MVA – massa específica volumétrica aparente, em g/cm³;

%ligante – teor de ligante betuminoso, em %;

d_{ligante} – massa específica real do ligante betuminoso, em g/cm³ (Tabela 4).

$$\%VAM = \%V + \%VCB \quad (7)$$

onde:

VAM – vazios do agregado mineral, em %;

V – teor de vazios, em %;

VCB – vazios cheios com betume, em %.

$$\%RBV = \frac{\%VCB}{\%VAM} * 100 \quad (8)$$

onde:

RBV – relação betume/vazios, em %;

VAM – vazios do agregado mineral, em %.

Além disso, foram executados ensaios não destrutivos para a avaliação dos parâmetros funcionais das misturas asfálticas, como altura da mancha de areia e drenabilidade, os quais serão abordados em tópicos subsequentes. Ato contínuo foi realizado o procedimento de ruptura das unidades, a fim de obter os valores de estabilidade e fluência.

A ruptura dos corpos de prova ocorreu após imersão em água, pelo período de 30 minutos, a uma temperatura de 60°C em estufa (Figura 10).

Figura 10 - Corpos de prova imersos em água.



Fonte: Autor (2021).

Decorrido o período de imersão dos corpos de prova, tem-se que foram conduzidos à prensa hidráulica (Figura 11) para estabelecimento da carga de ruptura (estabilidade) e respectiva deformação (fluência) sob esforço de compressão diametral.

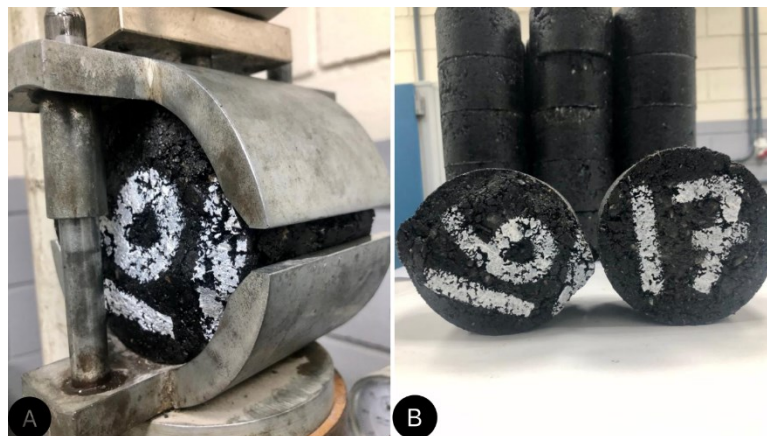
Figura 11 - Corpo de prova na prensa hidráulica para ruptura.



Fonte: Autor (2021).

A Figura 12 apresenta o momento da ruptura do corpo de prova na prensa hidráulica, bem como a comparação antes e depois do procedimento ocorrido.

Figura 12 - Comparação dos corpos de prova (a) antes e (b) depois do rompimento.



Fonte: Autor (2021).

3.5 MASSA VOLUMÉTRICA REAL (MVR)

O objetivo deste ensaio é determinar a massa volumétrica real da mistura asfáltica, que consiste em uma das variáveis necessárias ao cálculo do volume de vazios, considerado como um dos parâmetros para a escolha do teor ótimo de betume pelo método de dosagem Marshall (UNISESKY, 2018).

Para o ensaio de MVR (ABNT NBR 6296, 2012) são necessárias duas amostras para cada teor de betume, as quais devem ser confeccionadas especificamente para este ensaio.

As massas totais das amostras utilizadas variam conforme a distribuição granulométrica de cada mistura asfáltica, sendo 50 vezes o valor do diâmetro máximo considerado em cada caso (Tabela 11). A composição das frações segue a mesma proporção percentual estabelecida às curvas granulométricas (Tabela 6).

Tabela 11 - Massas totais das amostras para a execução dos ensaios de MVR.

| Amostras | $D_{\text{máx}}$ (mm) | Massa total da amostra (g) |
|----------|-----------------------|----------------------------|
| CT-01 | 9,5 | 475 |
| CT-02 | 12,5 | 625 |
| CT-03 | 19,1 | 955 |

Fonte: Autor (2021).

Inicialmente, de forma semelhante ao ensaio Marshall, a mistura asfáltica após o completo envolvimento dos granulares pelo ligante betuminoso, é espalhada em uma bandeja onde permanece até que se atinja a temperatura ambiente. Em seguida, é realizada a desgrumação da mistura em estado solto para a tomada do peso seco amostral (m_0).

Um conjunto de frasco Erlenmeyer com rolha (Figura 13), de volume e peso (m_1) conhecidos, e previamente calibrado, é utilizado como meio de acondicionamento da amostra durante o ensaio.

Figura 13 - Ensaio de MVR.



Fonte: Autor (2021).

Tomam-se também os pesos do conjunto frasco e rolha, preenchido com aproximadamente 800 ml de água (m_2). A mistura solta e desgrumada é transferida para dentro do frasco de maneira cuidadosa, evitando a perda de massa durante este processo, registrando-se posteriormente o peso (m_3).

O conjunto amostral é então colocado no interior de um dessecador, devidamente vedado, em que uma bomba de vácuo é acionada a uma pressão de 350 mmHg por um período de 2 horas. Após essa etapa, recoloca-se a rolha acoplada ao frasco e preenche-se com água até o menisco da rolha, tomando-se a pesagem de todo este conjunto (m_4). A Figura 14 ilustra a visão geral do equipamento utilizado na determinação da MVR.

Figura 14 - Equipamento utilizado durante o ensaio de MVR.



Fonte: Autor (2021).

Finalizado o processo de aferição das medidas necessárias, a massa volumétrica real (MVR) de cada mistura asfáltica é determinada com base na média de duas amostras para cada teor de betume, a partir Equação 9.

$$MVR = \frac{m_3 - m_2}{v - [m_4 - m_0 - (m_1 / \rho_w)]} \quad (9)$$

onde:

MVR – massa volumétrica real, em g/cm³;

m₀ – massa da amostra seca, em g;

m₁ – massa do frasco vazio com rolha (calibrado), em g;

m₂ – massa do frasco com rolha e água, em g;

m₃ – massa do frasco com rolha, água e amostra, em g;

m₄ – massa do frasco com rolha, água até o menisco e amostra, após o vácuo, em g;

v – volume do frasco, calibrado, em cm³;

ρ_w – densidade da água, em g/cm³ (1,0 g/cm³).

3.6 ALTURA DA MANCHA DE AREIA

O ensaio de mancha de areia (AFNOR NF P 98 216-1, 1993) é utilizado para avaliar a macrotextura da mistura asfáltica, caracterizando a superfície do pavimento em relação a sua rugosidade superficial, no que tange aos aspectos de aderência pneu-pavimento (ANDRADE, 2018).

Utiliza uma amostra padrão com 25 cm³ de uma areia calibrada, ou seja, com densidade conhecida é disposta em forma de monte sobre a superfície da mistura asfáltica. De posse de um soquete com base circular emborrachada, fazem-se movimentos circulares sobre o montante do material, espalhando-o até que não seja mais possível propagar o círculo em formação (MEURER FILHO, 2001 e BARRA, 2005).

Nesta pesquisa, devido à pequena superfície dos corpos de prova Marshall, foi necessária a adaptação da quantidade de areia utilizada, comportando o volume de 1,0 cm³ de uma areia calibrada com densidade de 2,6 g/cm³, o que corresponde a 2,6 g de amostra por unidade ensaiada. Para o cálculo do diâmetro da mancha de areia foi utilizada a média aritmética de três medidas equidistantes. A Figura 15 ilustra o procedimento executado.

Figura 15 - Execução do ensaio de mancha de areia.



Fonte: Autor (2021).

A Equação 10 é utilizada para a determinação da altura da mancha de areia das misturas asfálticas.

$$HS = \frac{4 \cdot V}{\pi(D_m)^2} \quad (10)$$

onde:

HS - altura média da macrotextura (cm);

V - volume de areia a ser espalhado;

D_m - diâmetro médio do espalhamento da areia (cm).

Quanto maior for o diâmetro da mancha de areia espalhada, menor será o valor da rugosidade superficial (UNISESKY, 2018). A rugosidade da mistura é avaliada para garantir a maior aderência pneu-pavimento, trazendo segurança aos usuários.

Como referência para a verificação deste parâmetro foi utilizada a classificação de Pasquet (1968), conforme apresenta a Tabela 12.

Tabela 12 - Classes de textura superficial em função da altura da mancha de areia.

| Classes | Características Superficiais | Altura da mancha de areia (mm) | Observações |
|---------|------------------------------|--------------------------------|---|
| A | Texturas muito finas | $H < 0,2$ | Superfícies não desejáveis |
| B | Texturas finas | $0,2 \leq H < 0,4$ | Superfícies a serem usadas preferencialmente em áreas urbanas |
| C | Texturas médias | $0,4 \leq H < 0,8$ | Estendido a superfícies com tráfego de 80 km/h a 120 km/h |
| D | Texturas rugosas | $0,8 \leq H < 1,2$ | Estendido a superfícies com tráfego acima de 120 km/h |
| E | Texturas muito rugosas | $H \geq 1,2$ | Superfícies a serem utilizadas apenas em condições especiais (zonas de clima muito frio e presença de gelo) |

Fonte: Adaptado de Pasquet (1968).

3.7 DRENABILIDADE

O objetivo do ensaio de drenabilidade (AFNOR NF P 98 254-3, 1993) é verificar a eficiência da mistura asfáltica com relação ao escoamento superficial da água.

Este ensaio é executado com um equipamento denominado drenômetro (Figura 16). Constitui um cilindro acrílico ou de material similar transparente, com dimensões de aproximadamente 114,3 mm de diâmetro. Na extremidade de contato do tubo com a superfície de teste, há um anel de borracha por onde escoam a água através de um orifício circular com 50 mm (BARRA, 2009).

Figura 16 - Drenômetro utilizado durante os ensaios sobre corpos de prova Marshall.



Fonte: Unisesky (2018, p. 57).

O cilindro mencionado possui duas marcações referenciais em seu comprimento com distância conhecida, neste caso 24,0 cm, mantendo a mesma coluna d'água para todos os corpos de prova. Antes do início do ensaio, faz-se o tamponamento com rolha do orifício que possui contato com a superfície de prova, a fim de que o cilindro possa ser preenchido com água até próximo de sua extremidade superior.

Um anel de chumbo de 10 kg é colocado no entorno do cilindro para proporcionar uma melhor vedação da superfície de contato e maior estabilidade ao drenômetro.

Em seguida, retira-se a rolha de tamponamento e cronometra-se o tempo que a coluna d'água leva para percorrer a distância de uma marca até a outra, enquanto a água escoar sobre a superfície da mistura asfáltica. A drenabilidade é avaliada pelo tempo de escoamento entre as marcas mencionadas.

Cabe ressaltar que o ensaio de drenabilidade foi concebido para ser realizado em campo. Logo, o seu uso em corpos de prova Marshall, que apresentam uma pequena área superficial pode conduzir a resultados que não simulam a real condição do pavimento. Porém, a condição de tendência relativa dos resultados permanece válida, assim como para os ensaios de mancha de areia.

Para cada corpo de prova, tomam-se três medições do tempo de escoamento da coluna d'água. A média aritmética da drenabilidade das cinco unidades por teor de ligante foi considerada como aquela característica de uma dada mistura asfáltica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e as discussões oriundas da campanha experimental realizada.

4.1 ENSAIO MARSHALL

Nos gráficos das Figura 17 a 19, os pontos marcados com um "x" vermelho indicam as médias de cada parâmetro físico para um determinado teor de ligante. Também são expostas faixas verdes que representam os limites estabelecidos pela norma DNIT-ES 031 (2006) aos parâmetros Teor de Vazios (%V) e Relação Betume/Vazios (%RBV), conforme apresentados na Tabela 13.

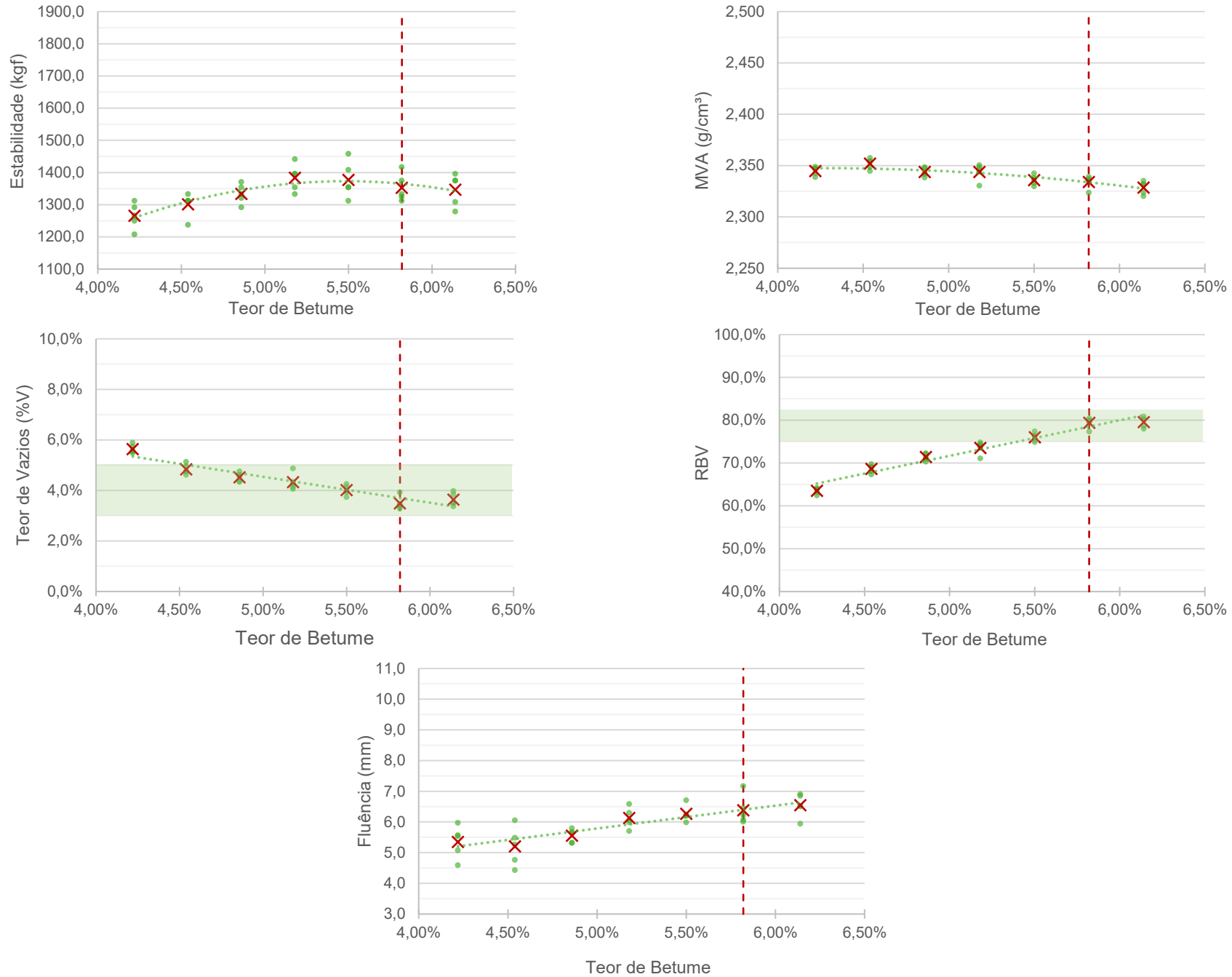
Tabela 13 - Limites normativos estabelecidos pelo DNIT.

| Parâmetro | DNIT-ES 031/2006 |
|---------------------------|------------------|
| Teor de vazios (%) | 3 a 5 |
| Relação betume/vazios (%) | 75 – 82 |
| Estabilidade mínima (kgf) | 500 |

Fonte: adaptada de DNIT (2006).

Ainda nas Figura 17 a 19, tem-se que a linha vermelha vertical que intercepta todos os gráficos, representa o teor ótimo de ligante para cada formulação testada. Temos que a linha pontilhada que representa a tendência dos resultados.

Figura 17 - Resultados dos ensaios da dosagem Marshall para a CT-01.



Fonte: Autor (2021).

Figura 18 - Resultados dos ensaios da dosagem Marshall para a CT-02.

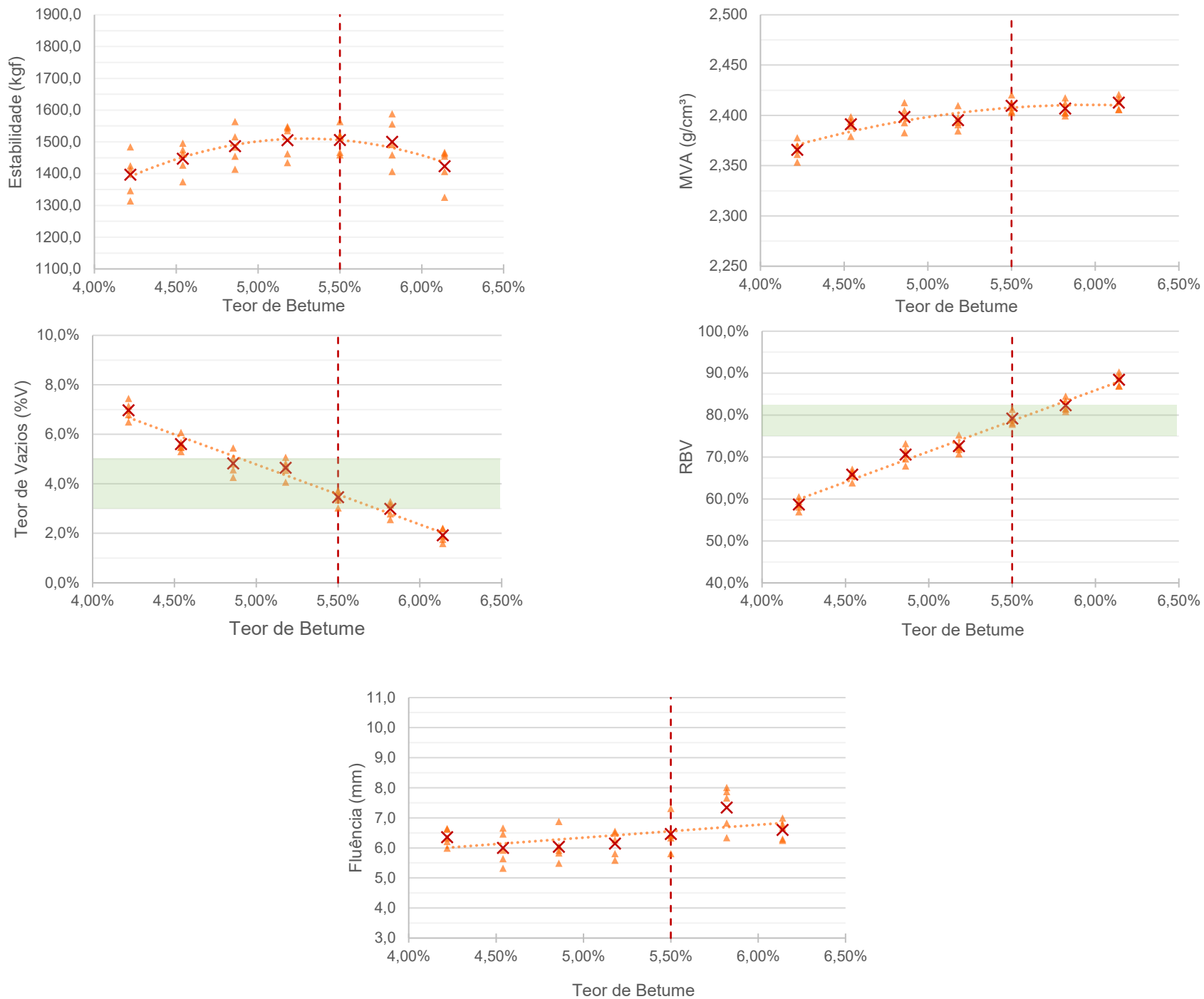
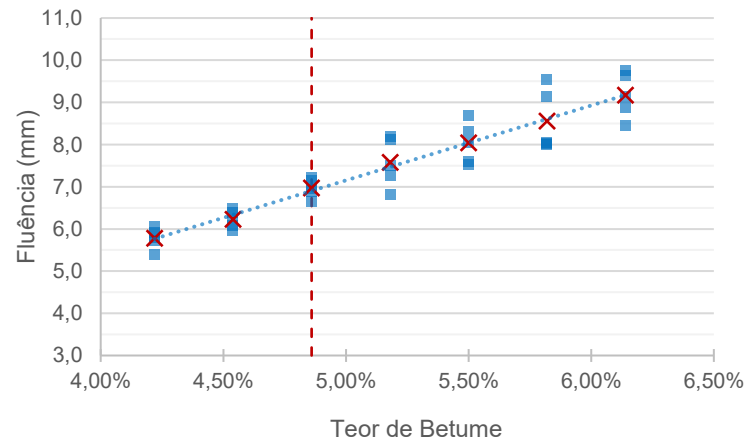
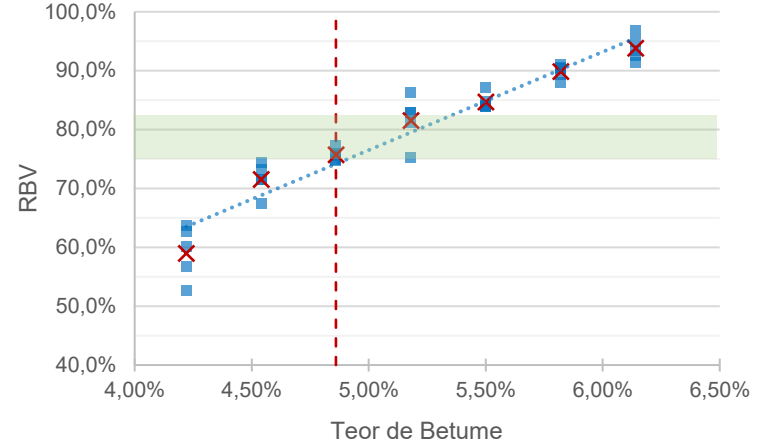
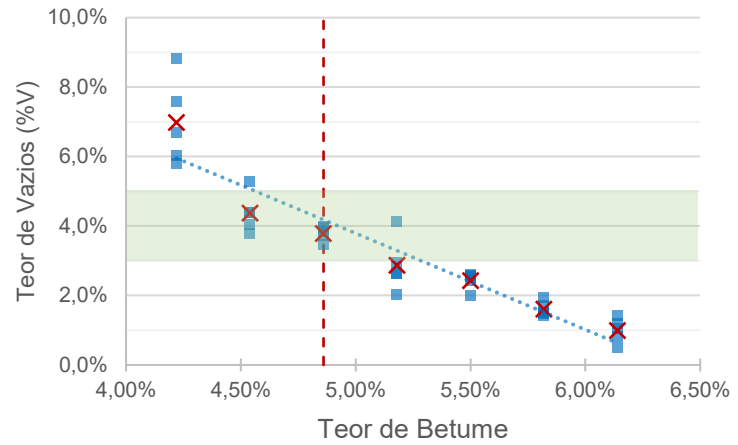
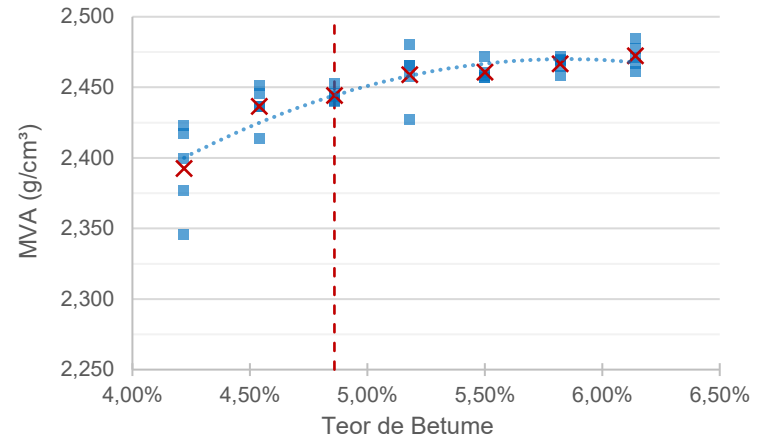
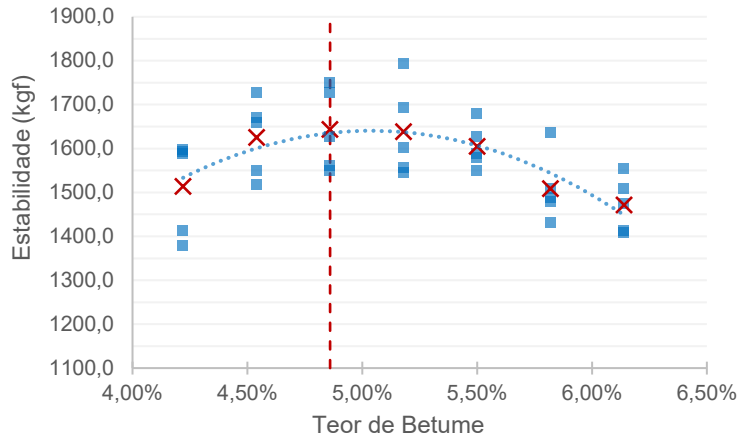


Figura 19 - Resultados dos ensaios da dosagem Marshall para a CT-03.



Em razão do caráter empírico, baixa sensibilidade e acurácia do método Marshall na determinação dos parâmetros de dosagem das misturas asfálticas, a determinação dos teores ótimos de betume se deu a partir da análise dos resultados apresentados nos gráficos das Figura 17 a 19, em conjunto com observações realizadas durante o procedimento de mistura das formulações. Neste âmbito, observou-se entre outros aspectos, principalmente a trabalhabilidade ao executar o envolvimento das frações granulares ao ligante betuminoso, bem como o brilho na superfície dos corpos de prova após a moldagem.

Cabe ressaltar que o método Marshall faz uso do procedimento de compactação por impacto, etapa em que podem ser geradas quebras de frações granulares no interior dos corpos de prova, ocasionando alterações na integridade estrutural das frações pétreas, na densidade aparente e, conseqüentemente, no volume de vazios, acarretando variações em relação às condições originais dos materiais especificados, conforme demonstrado por Siroma (2016).

A Tabela 14 apresenta as curvas granulométricas testadas, em relação ao diâmetro máximo do granular utilizado e o respectivo teor de trabalho ótimo determinado.

Tabela 14 - Teor ótimo de betume para cada curva granulométrica testada.

| Amostras | $D_{m\acute{a}x}$ (mm) | Teor ótimo de betume (%) |
|----------|------------------------|--------------------------|
| CT-01 | 9,5 | 5,82 |
| CT-02 | 12,5 | 5,50 |
| CT-03 | 19,1 | 4,86 |

Fonte: Autor (2021).

Analisando os valores obtidos para as três diferentes formulações, tem-se que a mistura asfáltica CT-03, utilizando agregados com diâmetro máximo de 19,1 mm, apresentou os melhores resultados em relação ao consumo de ligante, devido à menor área de superfície específica, abordada no tópico 3.3, bem como os maiores valores obtidos nos parâmetros de estabilidade e fluência, os quais estão relacionados diretamente ao desempenho mecânico dos corpos de provas testados, no contexto da metodologia Marshall.

A curva com $D_{m\acute{a}x}$ de 9,5 mm, em função de apresentar maior concentração de frações finas entre todas as formulações testadas, faz com que a superfície específica da composição granulométrica da mistura asfáltica CT-01 seja a mais elevada, conseqüentemente necessitando de uma quantidade maior de ligante

betuminoso para o envolvimento dos granulares. Como resultado, têm-se um aumento da lubrificação das faces de contato direto dos grãos, acarretando na diminuição dos valores de estabilidade para o mesmo teor testado quando comparados às formulações com maior diâmetro máximo.

Isto se explica em razão de que o procedimento de ruptura do ensaio Marshall é realizado à compressão diametral dos corpos de prova, o que favorece as curvas granulométricas compostas por partículas mais robustas, devido possuírem maior resistência a este tipo de solicitação, em função da maior inércia que exige maior intensidade de carga aplicada para se atingir a ruptura do material.

Em contrapartida, um aspecto curioso merece ser destacado quanto à fluência dos corpos de prova, pois menores foram os valores observados para os mesmos teores, à medida que os diâmetros máximos diminuíram, quando a princípio, e por analogia às tendências dos resultados de estabilidade, esperava-se o contrário.

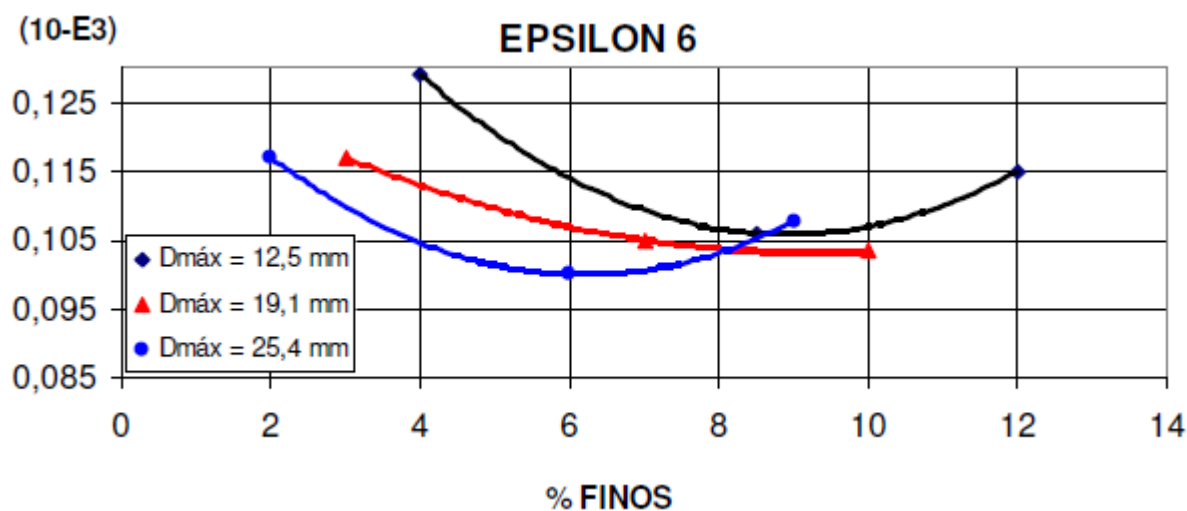
Ocorre que na dinâmica de ruptura do ensaio Marshall, isto é, considerando uma carga monotônica de aplicação da força à compressão diametral, verifica-se que em razão dos granulares de maior robustez possuírem maior resistência ao colapso quando submetidos à esforços de compressão diametral, maior será o tempo de aplicação do carregamento para que haja o rompimento do corpo de prova. Consequentemente, maior será o tempo de deslocamento do material para que sucumba aos esforços aplicados, ou seja, maior será a fluência observada durante o procedimento.

A situação inversa é observada nas curvas granulométricas com menor diâmetro, pois o aumento do consumo de ligante devido a maior superfície específica da curva acarreta em maior efeito lubrificante no contato grão a grão, diminuindo a resistência ao cisalhamento dos granulares no momento da aplicação dos esforços, levando os corpos prova ao rompimento mais precoce, diminuindo o tempo de deslocamento, ou seja, a fluência, durante o procedimento.

Todavia, as tendências de comportamento obtidas nesta pesquisa não são corroboradas totalmente pela pesquisa executada por Momm (1998), pois concluiu que as composições com maior diâmetro máximo tenderam a suportar deformações menores de ruptura por fadiga (ϵ_6) (Figura 20), em razão dos granulares maiores apesar de tornarem os concretos asfálticos mais rígidos, os conduzem a uma tendência de comportamento mais frágil, logo, suportando deformações menores,

ensejando a necessidade de maiores espessuras de concreto asfáltico nas estruturas de pavimento.

Figura 20 - Variação da deformação ε_6 em função do diâmetro máximo.

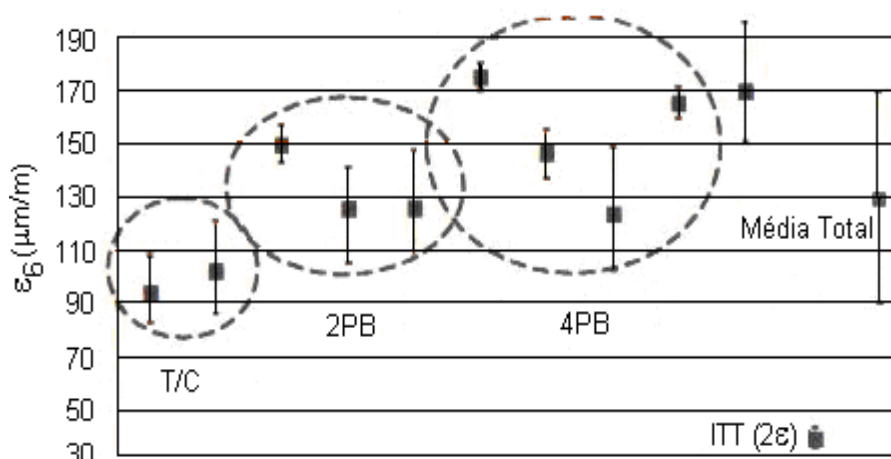


Fonte: Momm (1998, p. 196).

Cabe esclarecer, contudo, que a pesquisa de Momm (1998) foi executada a partir de ensaios de módulo complexo e fadiga realizados com corpos de prova trapezoidais à flexão alternada, com controle do deslocamento em modo contínuo, de acordo com a metodologia francesa, detentora de estreita relação campo/laboratório entre 0,9 e 1,3 (MANUEL LPC, 2007). Portanto, com acurácia e confiabilidade cientificamente comprovadas, ao contrário do ensaio Marshall, que é realizado com o controle da força e com mecanismo de ruptura por compressão diametral, ou seja, sem qualquer relação com as condições de solicitação dos pavimentos observadas no campo.

Di Benedetto et al. (2003) também demonstraram após um estudo interlaboratorial de caráter internacional, que os ensaios executados com o controle da força à compressão diametral, a partir da aplicação de esforços de tração indireta (ITT) sobre corpos de prova oriundos de moldagem no ensaio Marshall, apontaram os piores resultados quanto à deformação ε_6 , correspondente à ruptura por fadiga de misturas asfálticas para o critério universal de 10^6 ciclos de solicitação. Para tanto, foram realizados estudos comparativos com diversas geometrias submetidas a testes com o controle da deformação, a saber: tração/compressão, dois pontos (2PB), três pontos (3PB) e quatro pontos (4PB) (Figura 21).

Figura 21 - Variação da deformação ε_6 em função do ensaio realizado.



Fonte: Di Benedetto et al. (2003).

De acordo com Doan (1977), as tendências obtidas por estes diferentes modos de sollicitação (força e deslocamento controlados) são opostas, podendo ser explicadas pelos princípios dos mecanismos utilizados no decorrer dos ensaios:

- Durante os ensaios realizados com o controle do deslocamento, a taxa do dano progressivo do material permanece moderada. Logo, o domínio de sollicitação será mais próximo da condição de linearidade e o tempo de propagação das fissuras é mais elevado;
- No caso dos ensaios realizados à força controlada, ocorre exatamente o contrário, pois a taxa do dano progressivo do material é acelerada no decorrer do ensaio. Portanto, o domínio de sollicitação será fortemente não linear e o tempo da propagação das fissuras é pequeno.

Estas condições esclarecem as razões pelas quais a metodologia Marshall dispõe de deficiência quanto os aspectos de acurácia, sensibilidade à variação dos níveis de carregamento aplicados e, portanto, de forte cunho empírico e sem qualquer relação campo/laboratório. Logo, deve-se ter muito cuidado ao interpretar de forma tácita os resultados obtidos em seu contexto de execução.

4.2 ALTURA DA MANCHA DE AREIA

Os resultados do ensaio da altura da mancha de areia obtidos para os teores ótimos de betume indicados pelo ensaio Marshall, considerando cada uma das curvas granulométricas testadas são apresentados na Tabela 15, assim como a sua classificação macrotextural.

Tabela 15 - Resultados do ensaio da altura da mancha de areia nos teores ótimos de betume.

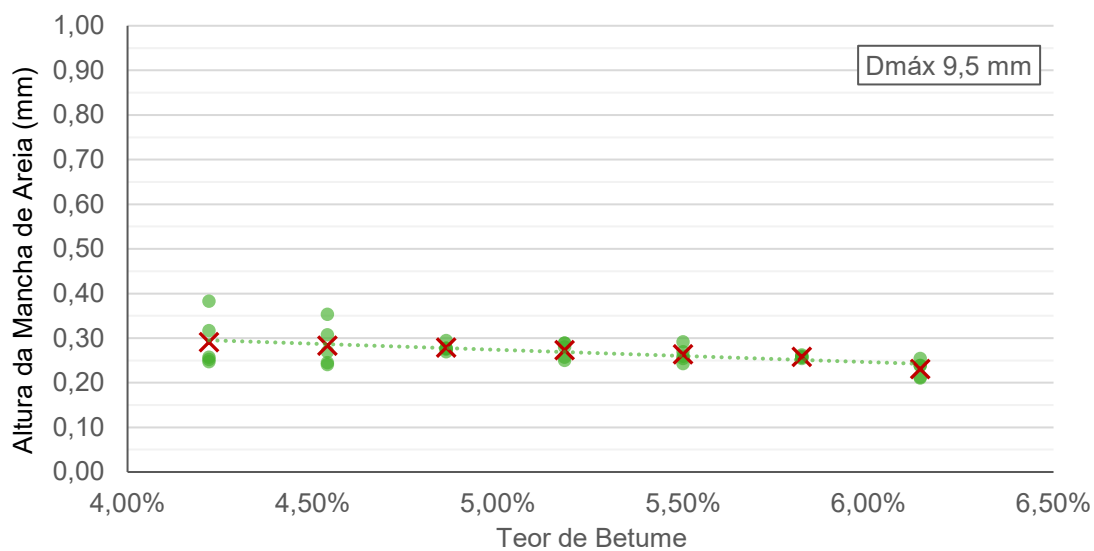
| Amostra | D _{máx} (mm) | Teor ótimo de betume (%) | Atura da mancha de areia (mm) | Macrotextura |
|---------|-----------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------|
| CT-01 | 9,5 | 5,82 | 0,26 | Fina |
| CT-02 | 12,5 | 5,50 | 0,30 | Fina |
| CT-03 | 19,1 | 4,86 | 0,46 | Média |

Fonte: Autor (2021).

A partir dos dados apresentados na Tabela 15, tem-se que as misturas CT-01 e CT-02 enquadraram-se na classificação textural fina, de acordo com Pasquet (1968) (Tabela 12), sendo indicadas para utilização preferencial em vias urbanas, enquanto a CT-03 atingiu a condição textural média, habilitando-a para aplicação em superfícies sujeitas a tráfego com velocidades entre 80 km/h e 120 km/h, compreendendo, portanto, vias de categoria nobre, como as rodovias federais de elevado tráfego.

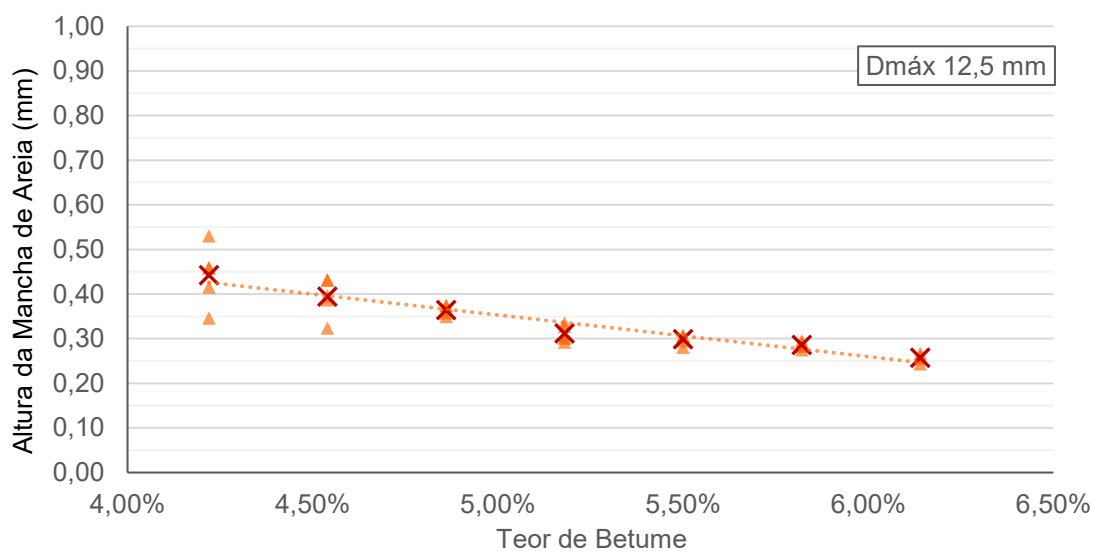
Estes valores corroboram o fato de que quanto maior o diâmetro máximo da curva granulométrica das misturas asfálticas densas, mais rugosa será a macrotextura superficial, e que com o aumento do teor de betume para uma mesma formulação, ocorre a diminuição desta rugosidade, devido ao preenchimento gradual dos canais de curtosse formados na superfície do material pelo ligante betuminoso, conforme ilustram as Figura 22 a 24.

Figura 22 - Resultado do ensaio de mancha de areia para CT-01.



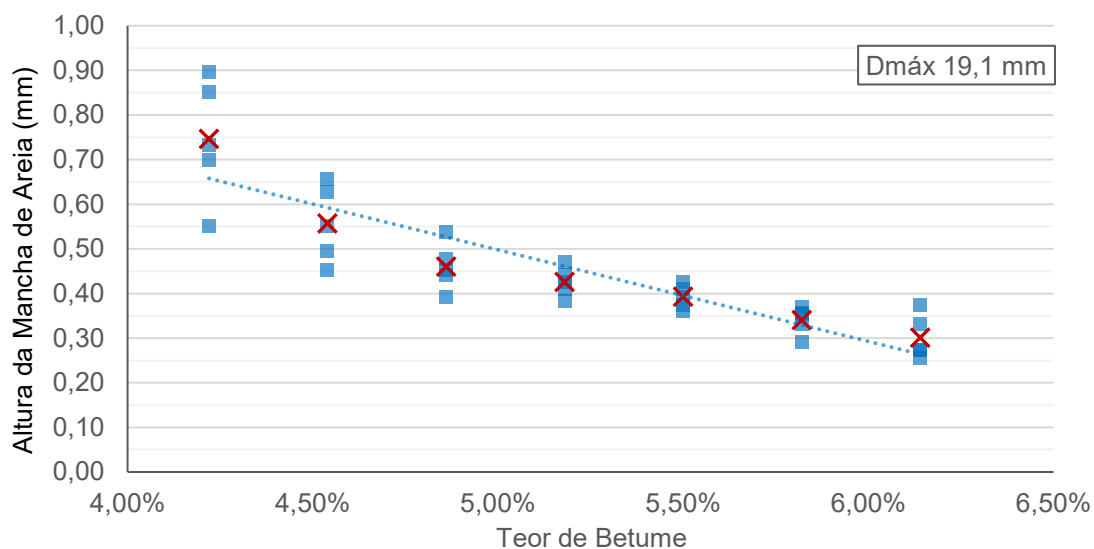
Fonte: Autor (2021).

Figura 23 - Resultado do ensaio de mancha de areia para CT-02.



Fonte: Autor (2021).

Figura 24 - Resultado do ensaio de mancha de areia para CT-03.



Fonte: Autor (2021).

Ainda, verifica-se que a perda de rugosidade superficial é mais sensível para misturas que possuem maior diâmetro máximo, em razão da menor superfície específica da curva granulométrica, ocasionando maior impacto no preenchimento dos canais de curtos superficiais do que em condições contrárias.

Contudo, em razão do severo processo de compactação imposto pelo método Marshall, através do método de compactação por impacto, que como já discorrido anteriormente, ocasiona a quebra de granulares, principalmente os localizados na superfície do corpo de prova, aliado a pequena superfície dos corpos de prova produzidos, temos que a rugosidade superficial, isto é, a macrotextura das misturas asfálticas é bastante afetada, em relação às condições reais de execução das camadas asfálticas no campo.

Logo, os resultados obtidos nesta pesquisa devem ser considerados no âmbito da tendência relativa e não absoluta, possibilitando uma avaliação particular para esta pesquisa nos limites da razoabilidade.

4.3 DRENABILIDADE

Os resultados de drenabilidade obtidos para os teores ótimos de betume, para cada uma das curvas granulométricas testadas são apresentados na Tabela 16.

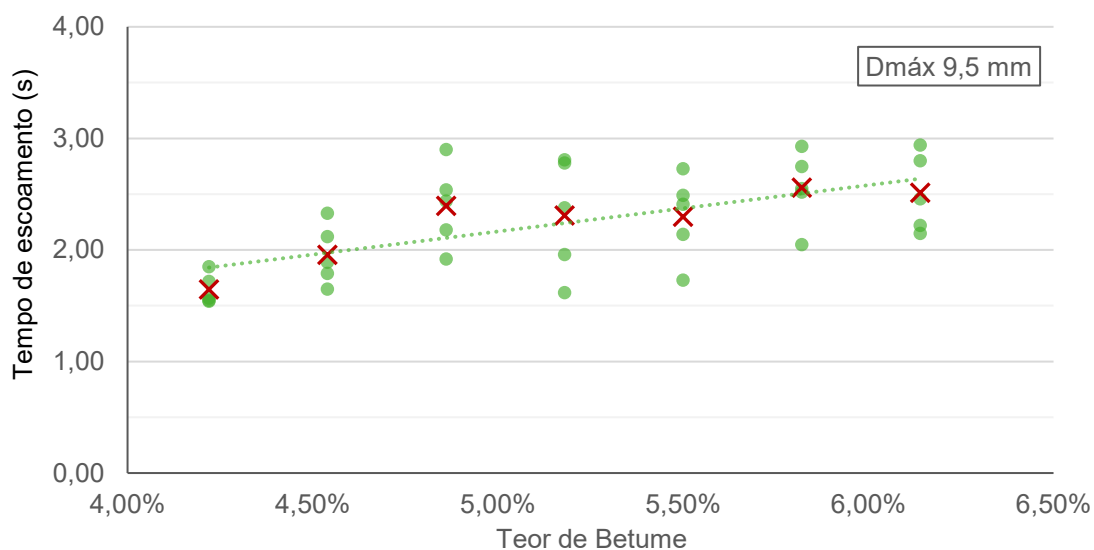
Tabela 16 - Resultados de drenabilidade.

| Amostra | D _{máx} (mm) | Teor ótimo de betume (%) | Drenabilidade (cm/s) |
|---------|-----------------------|--------------------------|----------------------|
| CT-01 | 9,5 | 5,82 | 0,94 |
| CT-02 | 12,5 | 5,50 | 1,58 |
| CT-03 | 19,1 | 4,86 | 2,30 |

Fonte: Autor (2021).

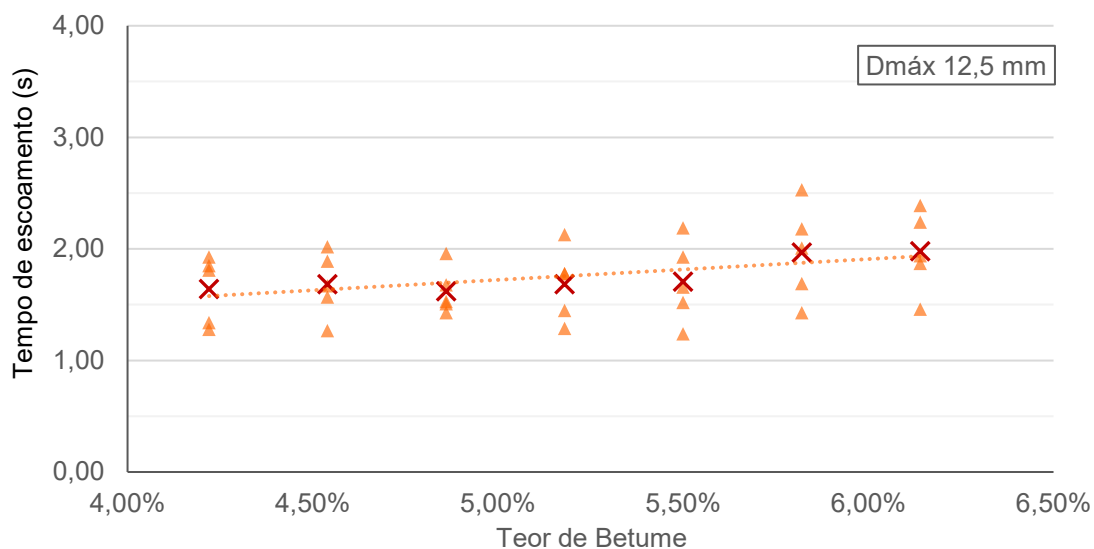
Em condição análoga à macrotextura superficial, verifica-se que a drenabilidade das misturas asfálticas é maior à medida que os diâmetros máximos das curvas granulométricas aumentam. Entretanto, com o aumento do teor de betume, ocorre a diminuição da capacidade de escoamento devido à redução dos canais de curtos que constituem a rugosidade superficial destes materiais, como é possível observar nas Figura 25 a 27.

Figura 25 - Resultado do ensaio de drenabilidade para CT-01.



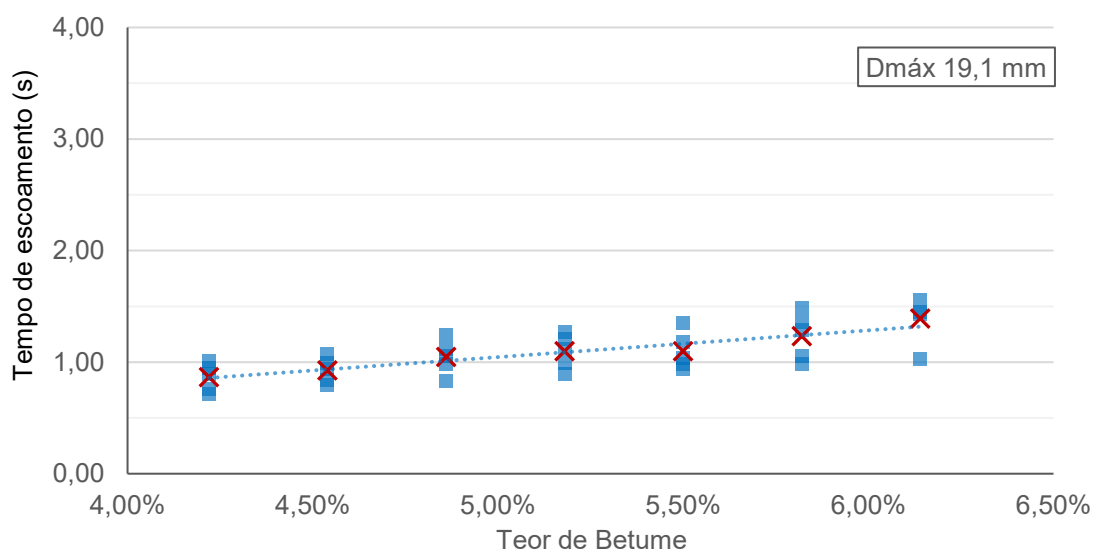
Fonte: Autor (2021).

Figura 26 - Resultado do ensaio de drenabilidade para CT-02.



Fonte: Autor (2021).

Figura 27 - Resultado do ensaio de drenabilidade para CT-03.



Fonte: Autor (2021).

Os resultados apresentados demonstram coerência com o grau de macrotextura verificado no ensaio de mancha de areia, uma vez que os menores tempos de escoamento foram observados para os menores teores de betume, isto é, nas condições de maiores rugosidades, bem como os tempos de escoamento em geral foram menores para as formulações com maior diâmetro máximo.

Ainda assim, os tempos de escoamento obtidos para os teores ótimos de betume em todos os casos estão abaixo de três segundos, sendo uma escala de valores bem aceitável para fins de aplicação em rodovias, pois indica rápida retirada

da água precipitada sobre a superfície do pavimento, evitando a formação de lâminas d'água que possam gerar o fenômeno da hidroplanagem e o efeito spray.

De toda forma, valem as mesmas considerações discorridas ao final do tópico 4.2, que discorre sobre os resultados da altura da mancha de areia, em relação às tendências relativas e não absolutas dos valores apresentados.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos experimentalmente e das análises realizadas neste trabalho, pode-se concluir que:

- À medida que o diâmetro máximo dos granulares de uma mistura asfáltica diminui, a superfície específica do material aumenta, ou seja, aumenta a quantidade de área por unidade de peso;
- Quanto maior a superfície específica de uma mistura asfáltica, maior será a quantidade de ligante necessária para envolver completamente o material, devido à maior presença de frações finas nas composições granulométricas;
- A macrotextura diminui com a redução do diâmetro máximo dos granulares da mistura asfáltica, em razão da redução dos canais de curtosse formados na superfície destes materiais, situação que se agrava com aumento progressivo do teor de betume;
- Quanto à drenabilidade, seu comportamento é proporcional à rugosidade superficial da mistura asfáltica. Ou seja, quanto maior a rugosidade, maior será a velocidade de escoamento da água. Porém, à medida que ocorre o aumento do teor de betume, há a diminuição da capacidade de escoamento superficial da água, em razão da diminuição da macrotextura;
- A curva CT-01, com diâmetro máximo de 9,5 mm, apresentou maior consumo de ligante betuminoso, menor resistência à ruptura, menor rugosidade superficial e maior tempo de escoamento por drenabilidade, situações acarretadas principalmente pela menor superfície específica do arranjo granulométrico, sendo a condição mais propícia para a ocorrência de fenômenos de hidroplanagem no campo;
- Em contrapartida, a curva CT-03, com diâmetro máximo de 19,1 mm, compilou as condições do cenário oposto ao descrito para a curva CT-01, indicando pelos critérios metodológicos aplicados, ser a melhor formulação entre todas as misturas asfálticas testadas;
- Contudo, conforme discorrido e demonstrado no capítulo 4, em que pese os resultados apresentados nesta pesquisa, deve-se ter muito cuidado em considerar de forma direta e definitiva as tendências apontadas por estudos derivados da metodologia Marshall, ainda que seja utilizada de forma oficial atualmente no Brasil, devido ao cunho fortemente empírico, além da ausência de sensibilidade, acurácia e

confiabilidade na avaliação do comportamento viscoelástico linear das misturas asfálticas pelo controle da força e, por conseguinte, sem relação campo/laboratório estabelecida.

Neste contexto, como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de uma campanha experimental utilizando metodologias com maior compatibilidade às condições de solicitação das misturas asfálticas observadas no campo, a fim de que se possa verificar se os resultados desta pesquisa corroboram ou não às tendências apresentadas.

A metodologia francesa, que possui estreita e comprovada relação campo/laboratório é a mais indicada neste aspecto, compreendendo os ensaios de habilidade de compactação na Prensa de Compactação Giratória, resistência à ação da água no ensaio de Duriez, resistência à deformação permanente, módulo complexo e resistência à fadiga, no domínio frequencial com o controle do deslocamento.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 6296/2012. **Produtos betuminosos semissólidos - Determinação da massa específica e densidade relativa**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020.

AFNOR NF P 98 254-3. **Mesure de propriétés liées à la perméabilité des matériaux des mélanges hydrocarbonés – partie 3: essai au drainomètre de chantier**. Association Française de Normalisation, 1993.

AFNOR NF P 98 216-1. **Mesure de propriétés liées à la texture des mélanges hydrocarbonés: essai de mesure de la hauteur au sable**. Association Française de Normalisation, 1993.

ANDRADE, V. D. **Influência da formulação de esqueletos minerais na deformação permanente de misturas de concreto asfáltico densas**. 2018. 167 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2018.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 560 p.

BARRA, B. S. **Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas**. 2009. Volume único, 327 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Centro Tecnológico Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

_____. **Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas densas utilizando materiais do estado do Pará com emprego de pó calcário**. 2005. 202 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 3. ed. Rio de Janeiro: PETROBRÁS: ABEDA. 2010.

BRASIL. Tribunal de Contas da União. **Acórdão nº 328/2013**. Plenário. Relator: Ministro José Múcio Monteiro. Sessão de 27/02/2013. Disponível em: <<https://contas.tcu.gov.br/sagas/SvIVisualizarRelVotoAcRtf?codFiltro=SAGAS-SESSAO-ENCERRADA&seOcultarPagina=S&item0=450081>>. Acesso em: 10 abr. 2020.

BRASIL (2018a), **Anuário Estatístico dos Transportes: 2010-2018**. Ministério da Infraestrutura. Brasília, DF. 53 p. Disponível em <http://www.infraestrutura.gov.br>. Acesso em junho de 2020.

BRASIL (2018b), **Índice de Condição de Manutenção 2018: DNIT divulga avaliação das rodovias federais pavimentadas**. Ministério da Infraestrutura. Brasília, DF. Disponível em <http://transportes.gov.br>. Acesso em junho de 2020.

BROWN, E. R.; BASSETT, C. E. Effects of maximum aggregate size on rutting potential and other properties of asphalt-aggregate mixtures. **Transportation Research Record**, v. 1259, p. 107-119, 1990.

BÚRIGO, A. S. **Influência da formulação de esqueletos minerais no comportamento mecânico de misturas de concreto asfáltico**. 2015. 60 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia de Infraestrutura, Centro de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

De La ROCHE, C. **Module de rigidite et comportement en fatigue des enrobés bitumineux: expérimentations et nouvelles perspectives d'analyse**. Thèse de Doctorat. École Central de Paris, 217 p. Paris, France, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADA E RODAGEM. ES 386/1999. **Pavimentação – pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito**. Rio de Janeiro, 1999, 15 p.

_____. DNER - ME 043: **Misturas Betuminosas a quente - Ensaio Marshall**. Rio de Janeiro, 1995. 11 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT - ES 031. **Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2006. 14 p.

_____. **Manual de Pavimentação**. Rio De Janeiro, 2006, 278 p.

DI BENEDETTO, H.; BAAJ, H.; PRONK, A. & LUNDSTRÖM, R. **Fatigue of Bituminous Mixtures: different approaches and RILEM Group contribution**, in Proceedings of the 6th International RILEM Symposium; pp. 15-38. Zurich, Switzerland, 2003.

DOAN, T. H. **Les études de fatigue des enrobés bitumineux au LCPC**. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° Spécial V, pp. 215-228, 1977.

EING, M. A. **Análise da incorporação de cinza volante e pesada em dosagens de misturas asfálticas densas**. 2018. 71 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso Civil de Engenharia de Infraestrutura, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2018.

GUERRERO, Y. A. **Estudo da Aplicabilidade do Ultra-Som na Avaliação das Propriedades do Concreto Asfáltico**. 2009. 184 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

_____. **Avaliação do desempenho mecânico e reológico de misturas asfálticas mornas**. 2013. 327 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

HAAS, R.; HUDSON, W. R.; ZANIEWSKI, J. P. **Modern pavement management**. Malabar, Fla: Krieger Publishing Company, 1994.

HUANG, W.; CAI, X.; LI, X.; CUI, W.; WU, K. Influence of Nominal Maximum Aggregate Size and Aggregate Gradation on Pore Characteristics of Porous Asphalt Concrete. **Materials**, [S.L.], v. 13, n. 6, p. 1355, 17 mar. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma13061355>.

LEANDRO, R. P. **Avaliação do comportamento mecânico de corpos de prova de misturas asfálticas a quente resultantes de diferentes métodos de compactação**. 2016. 289 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

LEITE, L. F. M. e MENEZES, S.M.C. **Efeito da composição química dos ligantes na resistência ao descolamento de misturas asfálticas**. In: *XVII Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET*, CD-ROM, Rio de Janeiro, RJ, Novembro 2003.

LIU, H.; HAO, P.; XU, J. Effects of Nominal Maximum Aggregate Size on the Performance of Stone Matrix Asphalt. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 7, n. 2, p. 126, 26 jan. 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/app7020126>.

LOU, K.; WU, X.; XIAO, P.; KANG, A.; WU, Z.; XIA, Y. Comprehensive Study about Effect of Basalt Fiber, Gradation, Nominal Maximum Aggregate Size and Asphalt on the Anti-Cracking Ability of Asphalt Mixtures. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 11, n. 5, p. 2289, 4 mar. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/app11052289>.

MANUEL LPC. **Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés**. Groupe de Travail RS. "Formulation des enrobés". 199 p. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris, France, 2007.

MEURER FILHO, E. **Estudo de granulometria para concretos asfálticos drenantes**. 2001. 181 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

MEURER, P. **Caracterização de Materiais Rochosos do Norte de Santa Catarina para fins de Aplicação em Obras de Pavimentação**. 2015. 92 p. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville/SC, 2015.

MOMM, L. **Estudo dos Efeitos da Granulometria Sobre a Macrotextura Superficial do Concreto Asfáltico e Seu Comportamento Mecânico**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). São Paulo (SP), 1998.

PASQUET, A. **Champagne nationale de glissance 1967 in France**. In: COLOOQUE INTERNATIONAL SUR LA GLISSANCE ET LA CIRCULATION SUR ROUTES MOUILÉES. **Proceedings...** Berlin, Alemanha, 1968.

SENÇO, W. de. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: PINI, 2001. v. 2.

SIROMA, R. S. **Estudo comparativo e aplicado sobre a influência da utilização da areia descartada de fundição (ADF) na formulação e no desempenho mecânico de misturas de concreto asfáltico**. Relatório Final de Iniciação Científica apresentado ao Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) da Universidade Federal de Santa Catarina. PIBIC/UFSC, 132 p. Joinville/SC, 2016.

UNISESKY, C. R. **Proposta de formulação de misturas asfálticas do tipo BBDr e BBTM**. 2018. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.

ZAGOLIN, P. A. **Influência do tipo de ligante betuminoso na dosagem e no comportamento de fluência e estabilidade de misturas asfálticas densas**. 2016. 54 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia de Infraestrutura, Centro de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.