

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

FELIPE TAKAO RICIERI HIRATA

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DOS PARÂMETROS DE DOSAGEM DE  
MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO PMF E CBUQ**

JOINVILLE

2018

FELIPE TAKAO RICIERI HIRATA

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DOS PARÂMETROS DE DOSAGEM DE  
MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO PMF E CBUQ**

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

2018



FELIPE TAKAO RICIERI HIRATA

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DOS PARÂMETROS DE DOSAGEM DE  
MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO PMF E CBUQ**

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, 20 de novembro de 2018

---

Prof<sup>a</sup>. Me. Valéria Bennack  
Coordenadora do Curso Engenharia Civil de Infraestrutura  
UFSC  
Centro Tecnológico de Joinville

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Breno Salgado Barra  
Orientador  
UFSC  
Centro Tecnológico de Joinville

---

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

---

Prof. Dr. Leto Momm  
UFSC  
Centro Tecnológico de Joinville

## AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente à Deus, que sempre olhou por mim e nunca deixou que nada me fizesse algum mal, agradeço também por ter colocado em minha vida pessoas incríveis, amigos que levo para toda vida e uma família que sempre me apoiou e me deu suporte para que eu pudesse estar aqui hoje, realizando um sonho.

Aos meus pais, Antonio Massato Hirata e Cleudinei Ricieri Hirata, por todo esforço e sacrifício realizado para proporcionar educação, saúde e incontáveis momentos de alegrias, pelas lições e valores que moldaram meu caráter, pelos bons exemplos e principalmente pelo amor que me deram. Serei eternamente grato por tudo que fizeram e fazem.

Aos meus irmãos Daniella, Rafael, Douglas e Bruno por todo apoio e carinho, pelas brigas de irmãos que nos ensinaram muito e principalmente pelo amor e conforto nos momentos difíceis, a vocês, muito obrigado.

À minha prima Carolina, companheira de apartamento e uma irmã de consideração. Agradeço por ter me apresentado a UFSC, pelo companheirismo durante todo o período da faculdade, pelo inúmeros almoços e jantares deliciosos, pelas comemorações juntos, pelo carinho de sempre, pela paciência comigo durante esse tempo, por ser a minha família em Joinville. Muito obrigado por tudo.

Ao professor Breno pela orientação durante este trabalho e pelos ensinamentos nas disciplinas regulares, pelo apoio e dedicação como professor e amigo, obrigado.

Aos colegas de laboratório Marco Eing, Rodrigo Siroma, Estéfani Clara e Leonardo Turco pelo apoio e dedicação durante as etapas deste trabalho, pelas experiências transmitidas e pela colaboração.

Aos professores Marcelo Heidemann, Helena Paula, Valéria Bennack e Paula Manica por todo aprendizado transmitido e por terem sido grandes influenciadores no desenvolvimento do meu caráter e ética profissional.

Aos professores Daniel Hastenpflug e Valéria Bennack pelo auxílio na correção gramatical e formatação neste trabalho.

Aos amigos Matheus Américo, Carlos Eduardo, Arion Fontana, Eduardo Ximenes, Gabriel Medeiros, Geandle Fagundes Neto de Luca e Marco Romanino e às amigas Bruna Nunes, Maria Eduarda, Nathalia Quadros, Thayse Pinheiro, Caroline Matos, Aline Achy e Gabriela Heinzen por todo apoio durante a faculdade, pelos grupos de estudos, pelas comemorações e todos os momentos bons vividos.

À minha namorada Miriele Michelutti por todo apoio durante esse período, paciência e compreensão nos momentos difíceis, pela amizade, companheirismo e pelo amor recíproco.

Aos membros da equipe InfraTec por todo apoio moral e colaboração quando precisei, pelos momentos de descontração que aliviavam o estresse, pelos litros de café que deram energia, e pelas amizades feitas e fortalecidas dentro dos laboratórios.

Aos membros do time Bohemios pelas vitórias e derrotas juntos, mas principalmente pelo companheirismo que fez desse time uma família, obrigado por tudo.

Aos amigos Victor Hugo, Felipe Souza, Gustavo Ramos, Diego Rebelo e João Daniel pela amizade construída durante os últimos períodos da faculdade, os grupos de estudos e de trabalhos, os momentos de descontração e a torcida pelo sucesso de cada um.

Aos amigos de infância que até hoje se fazem presentes na minha vida, são provas de que uma amizade verdadeira supera o tempo e a distância. Obrigado por todo apoio e momentos bons que vivemos juntos.

À empresa Rudnick Minérios Ltda pelo fornecimento dos materiais pétreos utilizados nesta pesquisa.

À empresa CBB Asfaltos de Curitiba/PR pelo fornecimento do material betuminoso utilizado nesta pesquisa.

“A dedicação, com o tempo, supera a inteligência.”

**Provérbio japonês, autor desconhecido.**

## RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é avaliar comparativamente os efeitos da variação granulométrica nos parâmetros de dosagem de misturas asfálticas densas e semi-densas do tipo Pré-Misturado a Frio (PMF), em relação a uma formulação densa de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Para tanto, as misturas asfálticas a frio e o CBUQ foram concebidas a partir da mesma metodologia de formulação, isto é, pelo princípio do método teórico com a utilização da equação de Füller-Talbot. Entretanto, as misturas a frio semi-densas foram diferenciadas em sua composição granulométrica, quando comparadas às misturas frias densas, em razão da retirada das frações retida e passante nas peneiras de abertura 4,86mm e 0,075mm, respectivamente. E quanto à mistura convencional densa, tem-se que esta foi formulada a mesma composição granulométrica densa à da mistura a frio, com granulares de mesma origem, entretanto, obtida de pesquisa previamente realizada, para fins de comparação ao desempenho dos indicadores de dosagem das misturas produzidas a frio. Os aglutinantes utilizados nas formulações foram: emulsão asfáltica catiônica RL-1C para PMF e ligante betuminoso 30/45 em sua forma pura para o CBUQ. Os granulares provêm de maciço rochoso de gnaiss, oriundo da região metropolitana de Joinville/SC, enquanto os materiais betuminosos foram fornecidos por distribuidora localizada na cidade de Curitiba/PR. A caracterização dos materiais pétreos foi procedida levando em conta principalmente os aspectos relacionados à distribuição granulométrica, desgaste por abrasão, morfologia, sanidade e adesividade ao ligante betuminoso. No que tange aos materiais betuminosos, os parâmetros considerados foram: resíduo asfáltico, peneiramento, viscosidade Saybolt-Furol, sedimentação, carga de partícula e mistura com cimento. A dosagem ótima do teor de ligante betuminoso utilizado em cada caso foi determinada a partir da metodologia Marshall, pois é a oficialmente adotada no Brasil. Os resultados obtidos corroboram às tendências indicadas em estudos prévios, em que misturas PMF apresentam resistência mecânica inferior ao CBUQ, da ordem de 2,7 e 3,0 vezes para as formulações semi-densa e densa, respectivamente. Neste contexto, verifica-se que apesar de terem sido obtidos resultados tecnicamente viáveis, segundo os parâmetros normativos vigentes no Brasil, os PMF devem ser utilizados considerando determinadas limitações de aplicações práticas, como condições de tráfego com intensidade não elevada, e com volumetria de média a baixa, a fim de evitar a degradação precoce da estrutura de pavimento no campo.

**Palavras-chave:** CBUQ. Misturas asfálticas. Parâmetros de dosagem. PMF.



## ABSTRACT

The aim of this work is to compare the effects of the granulometric mixture on the dosage parameters of dense and semi-dense asphalt mixtures pre-mixed with cold (PMF) in relation to a dense formulation of hot-bituminous concrete (CBUQ). For this purpose, cold asphalt mixtures and CBUQ were conceived using the same formulation methodology, that is, by the principle of the theoretical method using the Füller-Talbot equation. However, the cold semi-dense mixtures were differentiated in their granulometric composition, when compared to the cold dense mixtures, due to the removal of the retained and passing fractions in the opening sieves 4,86mm and 0,075mm, respectively. As for the conventional dense mixture, it has been formulated in the same granulometric form to the dense cold mixture, with aggregate of the same origin, however, obtained from previous research of the indicators of dosage of mixtures produced in the cold. The binders used in the formulations were: cationic asphalt emulsion RL-1C for PMF and bituminous binder 30/45 in its pure form for CBUQ. The granulates come from a rocky gneiss massif from the metropolitan region of Joinville / SC, while the bituminous materials were supplied by a distributor located in the city of Curitiba / PR. The characterization of the stony materials was carried out considering mainly the aspects related to the granulometric distribution, wear by abrasion, morphology, sanity and adhesiveness to bituminous binder. Regarding bituminous materials, the parameters considered were: asphaltic residue, sieving, Saybolt-Furol viscosity, sedimentation, particle loading and cement mixes. The optimum dosage of bituminous binder content used in each case was determined using the Marshall methodology, since it is officially adopted in Brazil. The results obtained corroborate the tendencies indicated in previous studies, in which PMF blends have lower mechanical resistance to CBUQ, of the order of 2.7 and 3.0 times for the semi-dense and dense formulations, respectively. In this context, it is verified that although technically feasible results have been obtained, according to the normative parameters in force in Brazil, the PMFs should be used considering certain limitations of practical applications, such as traffic conditions with non-high intensity and with average volumetry the low, in order to avoid the early degradation of the pavement structure in the field.

**Keywords:** Asphalt mixtures. CBUQ. Parameters of dosage. PMF.

## LISTA DE ABREVIACÕES

%p	-	Porcentagem passante
%V	-	Teor de Vazios
AAF	-	Areia Asfalto a Frio
ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADP	-	Asfalto Diluído de Petróleo
ANP	-	Agência Nacional de Petróleo
CA	-	Concreto Asfáltico
CAP	-	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	-	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CL	-	Cura Lenta
CM	-	Cura Média
CNT	-	Confederação Nacional dos Transportes
CP	-	Corpo de Prova
CPA	-	Camada Porosa de Atrito
CR	-	Cura Rápida
CS <sub>2</sub>	-	Dissulfeto de Carbono
cSt	-	CentiStoke
d	-	Abertura da peneira
D	-	Abertura da peneira que passa 100% em mm
D <sub>ap</sub>	-	Densidade Aparente
DEINFRA	-	Departamento Estadual de Infraestrutura
DER	-	Departamento de Estrada de Rodagem
DER-ES	-	Departamento de Estrada de Rodagem - Especificação de Serviço
DMN	-	Diâmetro Máximo Nominal
DNER	-	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNER-ES	-	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - Especificação de Serviço
DNER-ME	-	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - Método de Ensaio
DNIT	-	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DNIT-ES	- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – Especificação de Serviço
$D_r$	- Densidade Real
EAP	- Emulsão Asfáltica de Petróleo
EM	- Estabilidade Marshall
EUA	- Estados Unidos da América
$H_2S$	- Ácido Sulfídrico
kgf	- Quilograma Força
LA	- Lama Asfáltica
LDTPav	- Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação
MR	- Módulo de Resiliência
MRAF	- Micro Revestimento Asfáltico a Frio
MVR	- Massa Volumétrica Real
n	- Expoente
NBR	- Norma Brasileira
PCP	- Peneira de Controle Primário
PMF	- Pré Misturado a Frio
PMFA	- Pré Misturado a Frio Aberto
PMFD	- Pré Misturado a Frio Denso
PMFsD	- Pré Misturado a Frio Semi-denso
PMQ	- Pré Misturado a Quente
PR	- Paraná
RASF	- Resíduo Asfáltico (alta resistência)
RL-1C	- Ruptura Lenta Menos Viscosa Catiônica
RM-1C	- Ruptura Média Menos Viscosa Catiônica
RR-1C	- Ruptura Rápida Menos Viscosa Catiônica
RR-2C	- Ruptura Rápida Mais Viscosa Catiônica
RT	- Resistência à Tração
RV	- Resistência de Vácuo
SBR	- Styrene-butadiene-rubber
SBS	- Styrene-butadiene-styrene
SC	- Santa Catarina
SMA	- Stone Matrix Asphalt

TSS	-	Tratamento Superficial Simples
UFSC	-	Universidade Federal de Santa Catarina
VAM	-	Vazios no Agregado Mineral
V <sub>v</sub>	-	Volume de Vazios
$\eta$	-	Viscosidade Dinâmica
$\mu$	-	Viscosidade Cinemática
$\rho$	-	Massa Específica
$\rho_w$	-	Densidade da Água

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 2.1 - Camadas de uma estrutura de pavimentos.
- Figura 2.2 - Classificação das misturas asfálticas segundo processo de usinagem.
- Figura 2.3 - Exemplo esquemático das classificações granulométricas das misturas.
- Figura 2.4 - Revestimento asfáltico tipo PMF em via urbana.
- Figura 2.5 - Revestimento areia asfalto a frio em via urbana.
- Figura 2.6 - Aplicação de lama asfáltica como manutenção preventiva.
- Figura 2.7 - Aplicação de MRAF para enchimento de trilhas de roda.
- Figura 2.8 - Aplicação de MRAF para melhorar a aderência pneu-pavimento.
- Figura 2.9 - Faixas granulométricas para PMF
- Figura 2.10 - Usina estacionária para PMF.
- Figura 2.11 - Usina móvel para PMF.
- Figura 2.12 - Esquema do processo de fabricação de emulsão asfáltica.
- Figura 2.13 - Representação esquemática de um moinho coloidal de preparação dos glóbulos de asfalto para fabricação de emulsão.
- Figura 2.14 - Aplicação de emulsão asfáltica em serviço de imprimação.
- Figura 2.15 - Exemplo de curvas granulométricas de diferentes misturas a quente.
- Figura 2.16 - Corpo de prova extraído da pista mostrando a composição do revestimento asfáltico.
- Figura 2.17 - Representação esquemática de uma usina asfáltica por batelada.
- Figura 2.18 - Representação esquemática de uma usina asfáltica contínua.
- Figura 3.1 - Classificação dos granulares para pavimentação
- Figura 3.2 - Representação convencional de curvas granulométricas
- Figura 3.3 - Duas curvas granulométricas enquadradas na faixa C do DNER
- Figura 3.4 - Diagonal 0-0'
- Figura 3.5 - Exemplos de curvas de distribuição granulométrica
- Figura 3.6 - Segmentos de retas
- Figura 3.7 - Pontos de intersecção com a diagonal
- Figura 3.8 - Exemplo de curva granulométrica teórica

- Figura 4.1 - Classificação geológica da jazida Rudnick
- Figura 4.2 - Comparação entre a faixa B e a curva teórica densa calculada
- Figura 4.3 - Comparação entre a faixa D e a curva teórica semidensa calculada
- Figura 4.4 - Comparação entre as curvas teóricas densa e semidensa
- Figura 4.5 - Frações graúdas (a), frações miúdas (b), mistura de grãos com ligante (c) e adição dos finos na mistura (d)
- Figura 4.6 - Amostra desagregada (a), pesagem da amostra seca (b), agitação para retirada de bolhas (c), pesagem do conjunto (d)
- Figura 4.7 - Conjunto na máquina de vácuo (a), pesagem final do conjunto (b)
- Figura 4.8 - (a) Separação das frações, (b) emulsão asfáltica de ruptura lenta, (c) período de ruptura
- Figura 4.9 - (a) Conjunto de compactação, (b) adição da mistura no molde, (c) golpes com a espátula, (d) adição do papel filtro no topo do conjunto
- Figura 4.10 - (a) Posicionar molde no soquete de compactação, (b) aplicação dos golpes de compactação, (c) período em estufa, (d) período de resfriamento
- Figura 4.11 - (a) Macaco hidráulico para extração, (b) posicionamento do molde, (c) extração do corpo de prova
- Figura 4.12 - Corpos de prova extraídos
- Figura 4.13 - (a) Medição da altura e (b) pesagem dos CPs
- Figura 4.14 - (a) Período em estufa, (b) acomodação do CP no molde de compressão e (c) leitura durante o processo de rompimento
- Figura 5.1 - Envolvimento do material pétreo das misturas densas para os teores: (a) 4,22%, (b) 4,54% e (c) 5,50%
- Figura 5.2 - Envolvimento do material pétreo das misturas semidensas para os teores: (a) 3,90% e (b) 4,22%
- Figura 5.3 - Teores das misturas densas: (a) 6,00%, (b) 8,50% e (c) 10,0%
- Figura 5.4 - Coloração das misturas conforme período de ruptura para mistura densa com 8,50% de ligante. (a) Logo após a mistura, (b) 24 horas após a mistura e (c) 96 horas após a mistura

- Figura 5.5 - Resultados das misturas Densas e Semidensas
- Figura 5.6 - Resultados da mistura convencional com CBUQ

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 2.1 - Classificação das emulsões segundo Regulamento Técnico da Associação Nacional de Petróleo (ANP)
- Tabela 2.2 - Classificação de acordo com a viscosidade cinemática a 60°C
- Tabela 2.3 - Especificação do ADP de Cura Rápida
- Tabela 2.4 - Especificação do ADP de Cura Média
- Tabela 2.5 - Faixas granulométricas dos granulares para CBUQ
- Tabela 3.1 - Faixas granulométricas do DNIT
- Tabela 4.1 - Caracterização do material granular
- Tabela 4.2 - Caracterização da EAP – RL-1C
- Tabela 4.3 - Curva Teórica: Densa
- Tabela 4.4 - Curva Teórica: Semidensa
- Tabela 5.1 - Condições de vazios, estabilidade e fluência
- Tabela 5.2 - Teores de ligante utilizados
- Tabela 5.3 - Massa volumétrica real das misturas semidensas, não compactadas
- Tabela 5.4 - Massa volumétrica real das misturas densas, não compactadas
- Tabela 5.5 - Resumo dos resultados nos teores ótimos de ligante



## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1.	OBJETIVOS DA PESQUISA	12
1.1.1.	Objetivo Geral	12
1.1.2.	Objetivos Específicos	12
1.2.	PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO	12
1.3.	DELIMITAÇÃO DO ESPAÇO DA PESQUISA	13
1.4.	RELEVÂNCIA DO TEMA	14
1.5.	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
<b>2.</b>	<b>MISTURAS ASFÁLTICAS</b>	<b>16</b>
2.1.	MISTURAS PMF	20
2.1.1.	EMULSÃO ASFÁLTICA DE PETRÓLEO (EAP)	23
2.1.2.	ASFALTO DILUÍDO DE PETRÓLEO (ADP)	26
2.2.	MISTURAS CBUQ	29
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIAS PARA FORMULAÇÃO DA CURVA GRANULOMÉTRICA</b>	<b>33</b>
3.1.	MÉTODO POR TENTATIVA	34
3.2.	MÉTODO GRÁFICO DE RUTHFUCHS	36
3.3.	MÉTODO BAILEY	38
3.4.	MÉTODO TEÓRICO	39
<b>4.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>41</b>
4.1.	MATERIAL PÉTREO	41
4.2.	LIGANTE BETUMINOSO	42
4.3.	CURVA GRANULOMÉTRICA	43
4.4.	ENSAIOS LABORATORIAIS	46
4.4.1.	MASSA VOLUMÉTRICA REAL (MVR)	46
4.4.2.	METODOLOGIA MARSHALL	49
<b>5.</b>	<b>RESULTADO DOS ENSAIOS</b>	<b>55</b>
5.1.	MVR	55
5.2.	ENSAIO MARSHALL	59
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	<b>63</b>
	REFERÊNCIAS	64

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2017), apesar da importância do modal rodoviário para a economia do Brasil, a malha viária pavimentada ainda é muito pequena quando comparada com a extensão total de rodovias. Em sua totalidade, as rodovias somam 1.720.756 km, e desses, 12,3% são pavimentadas, 78,6% são rodovias não pavimentadas e 9,1% são rodovias planejadas. Entre os principais tipos de camadas asfálticas utilizadas no Brasil estão o Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) e o Pré-Misturado a Frio (PMF).

Senço (2001) define a mistura PMF como produto, em usina, de granulares minerais – grão e miúdo – e asfalto diluído ou emulsão asfáltica, espalhado e comprimido a frio. De acordo com DER/PR (DEPARTAMENTO de ESTRADA de RODAGEM/PR ES-P 23/2005) a mistura asfáltica PMF não deve ser aplicada em temperaturas ambientes abaixo de 10°C e em dias de chuvas.

As misturas de CBUQ são produtos da mistura convenientemente proporcionada de granulares de vários tamanhos e cimento asfáltico de petróleo (CAP). Os materiais devem ser aquecidos em temperatura previamente definidas, em função das características viscosidade-temperatura do ligante (BERNUCCI et al., 2010).

Tanto as misturas PMF como as misturas CBUQ podem ser de graduação aberta, densa ou descontínua, classificadas de acordo com o teor de vazios presente na mistura. (BERNUCCI et al., 2010; SANTANA, 1992).

Quando comparado ao CBUQ, o PMF possui inúmeras vantagens, como menor custo dos equipamentos, a possibilidade de armazenamento da mistura e a degradação ambiental inferior. O menor custo se dá por não ser empregado energia para aquecimento dos materiais, bem como pela composição com emulsão asfáltica de petróleo (EAP) de valor comercial inferior ao CAP (SANTOS, 2002; GUIMARÃES e LOURES, 2015).

Segundo Guimarães e Loures (2015) o CBUQ é 67% mais caro que o PMF, analisando apenas os custos unitários de usinagem, tornando assim o PMF uma opção atraente, com menor custo no processo produtivo. Em estudo comparativo do CBUQ e PMF, desenvolvido pelos mesmos autores, foram analisados os parâmetros de Estabilidade Marshall (EM), Resistência à Tração (RT), Módulo de Resiliência (MR) e Volume de Vazios (Vv).

Foi observada uma grande diferença no comportamento mecânico entre as misturas, concluindo-se que o PMF é viável apenas para solicitações de tráfego leve e durante sua

evolução, atendendo também a tráfego médio. O PMF pode ser utilizado como revestimento, camada de regularização, base de pavimento, tapa-buracos, conservação e recapeamento, enquanto que o CBUQ pode ser empregado a qualquer tipo de solicitação de tráfego (SANTOS, 2002; GUIMARÃES e LOURES, 2015).

Dado o exposto, este trabalho consistiu em realizar análise comparativa dos parâmetros de dosagem de misturas asfálticas PMF e CBUQ, em laboratório.

## 1.1. OBJETIVOS DA PESQUISA

### 1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar, comparativamente, em âmbito laboratorial, os parâmetros de dosagem de misturas asfálticas PMF e CBUQ.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

Os seguintes objetivos específicos foram traçados para que fosse atingido o objetivo geral desta pesquisa:

- Caracterização dos granulares e da emulsão asfáltica RL-1C;
- Definição da curva granulométrica das misturas asfálticas;
- Determinação da dosagem ótima de emulsão RL-1C para cada mistura estudada, a partir da metodologia Marshall;
- Avaliação comparativa das formulações de PMF à mistura convencional de CBUQ.

## 1.2. PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO

Os materiais para o desenvolvimento da pesquisa foram fornecidos por empresas parceiras do Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav), localizado no Campus de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Os granulares foram fornecidos pela empresa Rudnick Minérios Ltda., situada na região metropolitana de Joinville/SC, já o insumo betuminoso (emulsão asfáltica RL-1C), pela

empresa CBB Asfaltos, de Curitiba/PR, que também abastece a região norte do estado de Santa Catarina.

Para o material granular, foram utilizados resultados de pesquisa anterior no qual foi analisado o mesmo material utilizado para este trabalho. Os ensaios procedidos foram de desgaste por abrasão Los Angeles, durabilidade à solução de Sulfato de Sódio Anidro, índice de forma (lamelaridade), adesividade e massas específicas real e aparente, seguindo as especificações normativas.

No que diz respeito ao material betuminoso, os resultados de caracterização foram disponibilizados pela empresa fornecedora. Onde foram executados os ensaios de resíduo asfáltico, peneiramento, viscosidade Saybolt-Furol, sedimentação, carga de partícula e mistura com cimento.

A curva granulométrica foi definida a partir dos parâmetros normativos teóricos, utilizando a equação de Füller-Talbot. A dosagem do teor ótimo de ligante betuminoso das misturas PMF foi determinada pela metodologia Marshall, oficialmente adotada no Brasil para esta finalidade.

Para avaliar as propriedades das misturas asfálticas, foram moldados 80 corpos de prova, subdivididos em 35 unidades para misturas semi-densas e 45 para misturas densas. A quantidade de material utilizado para a realização dos ensaios foi de aproximadamente 10 litros de emulsão asfáltica RL-1C e 110 kg de granulares.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios supracitados, foi possível analisar de maneira comparativa os parâmetros físicos e de resistência mecânica e estabelecer conclusões e recomendações de aplicabilidade e restrições para cada uma das formulações concebidas, alcançando os objetivos da pesquisa.

### 1.3. DELIMITAÇÃO DO ESPAÇO DA PESQUISA

O presente trabalho limita-se à execução de procedimentos e interpretação de resultados em âmbito laboratorial. Logo, não foram realizados testes e análises em campo. Ainda, as conclusões obtidas são válidas para as condições específicas deste estudo.

A pesquisa foi integralmente desenvolvida no Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), onde se encontram disponíveis todos os recursos necessários para a sua execução.

#### 1.4. RELEVÂNCIA DO TEMA

Os requisitos técnicos e de qualidade de um pavimento asfáltico serão atendidos com um projeto adequado tanto da estrutura do pavimento quanto da dosagem da mistura asfáltica. Portanto, deve ter capacidade de resistir aos esforços mecânicos aplicados pelas cargas solicitantes, a fim de propiciar durabilidade ao pavimento durante o período de projeto para o qual foi projetado, garantindo intervenções mínimas necessárias (BERNUCCI, 2010; CNT, 2017).

A camada de revestimento de um pavimento é aquela que recebe a ação direta do tráfego. Seu objetivo é atender as condições de rolamento quanto ao conforto, segurança e economia de custos com a operação dos veículos. A ausência de critérios técnicos adequados para a definição do tipo de material a ser utilizado em cada caso, bem como a escolha equivocada do método de formulação, podem ser apontadas como uma das principais causas para a degradação precoce das estruturas de pavimento no Brasil (CNT, 2017; ANDRADE, 2018).

Na cidade de Joinville, é facilmente perceptível o estado crítico geral da malha viária local pavimentada, sobretudo das camadas de revestimento, compreendendo diversos defeitos como fissuras, trincas, trilhas de rodas, buracos e ondulações, causando sensações desagradáveis de desconforto e insegurança aos usuários.

A consequência imediata desta ausência de conservação é o aumento das solicitações dos serviços de manutenção e/ou reconstrução das estruturas de pavimento pela sociedade. E normalmente o aporte do erário público municipal não dispõe dos recursos necessários em caixa para a execução destas demandas.

Entre os tipos de misturas asfálticas mais utilizados no Brasil estão o Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) e o Pré-Misturado a Frio (PMF). O primeiro é corriqueiramente aplicado nas obras de pavimentação nacional, oriundo de processos de usinagem e compactação que atingem elevadas temperaturas, acima de 130°C (SANTANA, 1992).

Ainda segundo Santana (1992) o PMF é aplicado em escala menor, normalmente em obras urbanas, sob a alegação de menor custo de produção, maior facilidade de aplicação e menor impacto ambiental. Esta técnica permite trabalhar com derivados do ligante betuminoso convencional (emulsões ou asfaltos diluídos de petróleo) em temperaturas ambiente ou muito baixas, em torno de 50°C a 60°C.

Entretanto, é necessário ter em conta que processos de usinagem e compactação de misturas asfálticas distintos, acarretam em materiais com condições de desempenho mecânico variados. Isto normalmente limita o uso do PMF aos serviços de manutenção de pavimentos, como revestimento de ruas e estradas de baixo volume de tráfego ou ainda como camada de ligação (*binder*) com superposição de CBUQ nas estruturas de pavimento. Já o CBUQ pode ser aplicado em condições mais abrangentes e severas de solicitação (BERNUCCI et al., 2010).

Neste contexto, este trabalho teve por objetivo avaliar as propriedades físicas e mecânicas de formulações de misturas asfálticas do tipo PMF e CBUQ, e a partir dos resultados obtidos estabelecer comparativos entre alguns parâmetros e verificar eventuais limitações de empregabilidade do PMF.

Os resultados visam garantir a aplicação correta das misturas PMF, evitar gastos futuros em manutenção e/ou reconstrução de pavimentos na cidade e proporcionar conforto e segurança aos usuários.

## 1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

A organização do presente trabalho apresenta a seguinte forma:

Capítulo 1: Introdução do tema, deixando o leitor integrado ao contexto geral da pesquisa.

Capítulo 2: Discorre sobre as conceituações gerais de misturas asfálticas de forma específica sobre os aspectos técnicos dos tipos PMF e CBUQ.

Capítulo 3: Apresenta as metodologias existentes para a formulação das curvas granulométricas das misturas asfálticas, evidenciando as razões pela escolha do método teórico de Füller-Talbot entre as alternativas pesquisadas.

Capítulo 4: Aborda a caracterização dos materiais utilizados na composição das misturas asfálticas, bem como a curva granulométrica selecionada e os ensaios laboratoriais executados para obtenção dos parâmetros necessários à análise dos materiais.

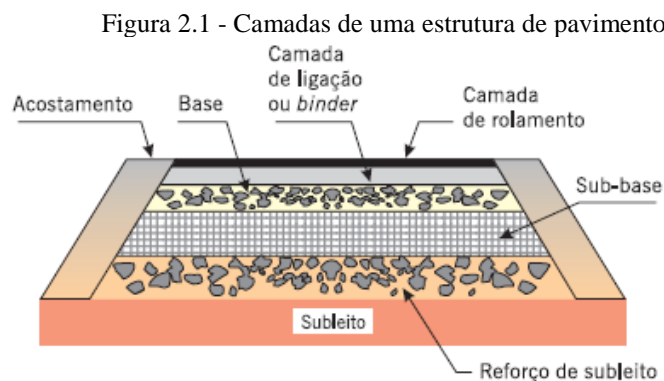
Capítulo 5: Apresenta os resultados encontrados durante a pesquisa e ensaios laboratoriais realizados, assim como as considerações em relação aos resultados.

Capítulo 6: Discorre sobre as conclusões e recomendações de pesquisas futuras acerca do tema abordado, levando em consideração os resultados encontrados e observações durante o presente trabalho.

## 2. MISTURAS ASFÁLTICAS

Na maioria dos pavimentos brasileiros usa-se como revestimento, de maneira geral, misturas asfálticas compostas por granulares de frações de diversos tamanhos e formas, e ligantes asfálticos de forma adequadamente proporcionada e processada. Eventualmente são incorporados aditivos ou adições, que garantem ao serviço executado os requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico (BARRA, 2009; BERNUCCI et al., 2010).

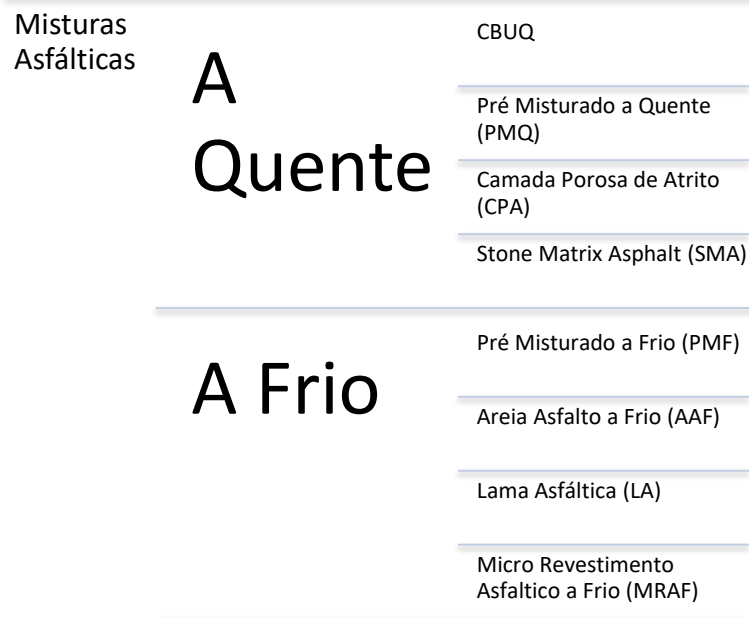
Na prática, as misturas asfálticas podem ser utilizadas nas estruturas dos pavimentos, tanto como camada de rolamento quanto na forma de camada de ligação entre a superfície e as camadas subjacentes de suporte (BARRA, 2005). A figura 2.1 apresenta uma composição de estrutura de pavimento.



Fonte: Bernucci (2010, p. 10).

Santana (1992) resume a classificação das misturas asfálticas a partir de três critérios: processo, estrutura interna e teor de vazios. De acordo com o processo, o material pode ser empregado em temperaturas diferentes: a quente ou a frio. Já a estrutura interna pode conter arranjo granulométrico ou não. E por último a classificação quanto ao teor de vazios, podendo ser tipificadas em aberto, semidenso ou denso. A figura 2.2 apresenta a classificação segundo o processo de mistura.

Figura 2.2 - Classificação das misturas asfálticas segundo processo de usinagem.



Fonte: Adaptado de Oliveira et al. (2014, p. 18).

A classificação pelo teor de vazios é exemplificada na figura 2.3, segundo Ceratti (2015).

Figura 2.3 - Exemplo esquemático das classificações granulométrica das misturas.



Fonte: Ceratti et al. (2015, p. 19).

Segundo Santos (2002) os PMQs podem ser usados como camada de regularização, como base e como revestimento, já os PMFs, podem ser utilizados como revestimento, base, regularização e como reforço de pavimento. A utilização do PMF como camada de revestimento é ilustrada na figura 2.4 a seguir.



Figura 2.4 - Revestimento asfáltico tipo PMF em via urbana.



Fonte: Teixeira et al. (2010, p. 109).

Areia asfalto a frio é utilizado normalmente em serviços de tapa-buracos, regularização da camada superficial e camada final de revestimento asfáltico em vias de baixo tráfego (figura 2.5).

Figura 2.5 - Revestimento areia asfalto a frio em via urbana.



Fonte: Teixeira et al. (2010, p. 119).

A principal aplicação de lama asfáltica é em serviços de manutenção de pavimento com desgaste superficial de pequeno grau de trincamento, agindo como elemento de impermeabilização e rejuvenescimento da condição funcional do pavimento, ilustrado na figura 2.6 (TEIXEIRA et al., 2010).

Figura 2.6 - Aplicação de lama asfáltica como manutenção preventiva.



Fonte: Bernucci et al. (2010, p. 186).

O micro revestimento asfáltico é uma mistura a frio (MRAF) de emulsão asfáltica modificada por polímeros SBR e SBS, sua principal aplicação é na manutenção preventiva, ou seja, em pavimentos que necessitam de rejuvenescimento e melhorias nas condições de aderência pneu-pavimento e que não apresentam problemas estruturais (TEIXEIRA et al., 2010). A figura 2.7 ilustra a aplicação do MRAF.

Figura 2.7 - Aplicação de MRAF para enchimento de trilhas de roda.



Fonte: Teixeira et al. (2010, p. 89).

A figura 2.8 ilustra a aplicação do MRAF, com macro textura grossa para melhorar a aderência pneu-pavimento.

Figura 2.8 - Aplicação de MRAF para melhorar a aderência pneu-pavimento.



Fonte: Teixeira et al. (2010, p. 90).

Tendo como objetivo geral a avaliação comparativa entre duas misturas asfálticas, PMF e CBUQ, o próximo capítulo dedica-se a tratar de definições, variações que podem ser encontradas para cada mistura e considerações acerca da aplicabilidade de ambas.

## 2.1. MISTURAS PMF

Conforme Santana (1992) os PMFs com emulsões asfálticas catiônicas começaram a ser desenvolvidos nos EUA na década de 1950, com graduação mais aberta. Inicialmente foram utilizados nas camadas de base e em seguida como revestimentos, recebendo tratamento superficial simples (TSS). No Brasil utilizou-se em escala industrial para camadas de regularização e de base e em seguida para revestimentos a partir de 1966, mas foi em 1980 que ocorreu a generalização do uso de PMFs na forma de graduação mais densa em revestimentos delgados.

O PMF pode ser definido como produto resultante da mistura, em usina, de granulares minerais graúdos, miúdo e material de enchimento, misturas com Asfalto Diluído de Petróleo (ADP) ou Emulsão Asfáltica de Petróleo (EAP) à temperatura ambiente. Podendo ser utilizado em camada de regularização, base de revestimento, em operações de conservação e manutenção e como camada de revestimento em ruas e estradas de baixo volume de tráfego (SENÇO, 2001; BERNUCCI et al, 2010).

Santana (1992), define PMF e o classifica quanto à graduação dos materiais, da seguinte forma:

- Pré Misturado a Frio (PMF) – é a mistura preparada, em usina apropriada, com granular graúdo (acompanhado ou não de granular miúdo e fíler) e ligante

asfáltico (geralmente em forma de emulsão asfáltica catiônica), espalhada e compactada na pista a temperatura ambiente, podendo-se aquecer ou não o ligante e/ou granular, podendo ser usada em revestimento e base;

- Pré Misturado a Frio Aberto (PMFA) – é o PMF com pouca ou nenhuma quantidade de granular miúdo e fíler, ficando após a compactação com grande teor de vazios, entre 22 e 34%;
- Pré Misturado a Frio Semi-Denso (PMFsD) – é o PMF com quantidade média de granular miúdo e com pouco fíler, ficando após a compactação com um médio teor de vazios, entre 15 e 22%;
- Pré Misturado a Frio Denso (PMFD) – é o PMF com apreciável quantidade de granular miúdo, podendo conter ou não fíler, ficando após a compactação com um teor de vazios relativamente baixo, entre 9 e 15%.

A figura 2.9 apresenta as faixas granulométricas de acordo com a Norma do DNER-ME 083 (1998).

Figura 2.9 - Faixas granulométricas para PMF

Faixas granulométricas para pré misturados a frio							
Peneira de malha quadrada		Porcentagem passando, em peso					Tolerâncias da faixa de projeto
ABNT	Abertura, mm	A	B	C	D	E	
1"	25,4	100	-	100	-	-	± 7
3/4"	19,1	75-100	100	95-100	100	100	± 7
1/2"	12,7	-	75-100	-	95-100	85-100	± 7
3/8"	9,5	30-60	35-70	40-70	45-80	70-90	± 7
nº 4	4,8	10-35	20-40	20-40	25-45	30-60	± 5
nº 10	2,00	5-20	10-20	10-25	15-30	20-45	± 5
nº 200	0,074	0-2	0-2	0-5	0-5	2-6	± 2
Tipo PMF		PMFA		PMSD		PMFD	

Fonte: DNER-ME 083 (1998).

Os PMFs podem ser misturados em usinas estacionárias, com maior capacidade de produção. Geralmente possuem silos individuais para armazenamento dos granulares graúdos, miúdos e fíler, que são transportados por correias até o misturador onde ocorre a injeção da emulsão, dosada por medidores de vazão (TEIXEIRA et al., 2010). A figura 2.10 apresenta uma usina estacionária de PMF.

Figura 2.10 - Usina estacionária para PMF.



Fonte: Teixeira et al. (2010, p. 107).

Podem ainda ser misturados em usinas móveis, que proporcionam rapidez e agilidade à obra, podendo ser transportado para o canteiro de obras em poucas horas. São utilizados para serviços de pequeno porte como conservação corretiva em serviços de tapa-buracos (TEIXEIRA et al., 2010). A figura 2.11 apresenta uma usina móvel para PMF.

Figura 2.11 - Usina móvel para PMF.



Fonte: Teixeira et al. (2010, p. 108).

A espessura da camada compactada de PMF deve possuir entre 1,5 a 3,0 vezes o tamanho máximo do granular, para evitar desagregações prematuras ou deformações/ondulações. Não deverá ultrapassar 70mm, sendo que para espessuras maiores a aplicação e compactação deverão ser feitas em duas camadas, espalhadas e compactadas à temperatura ambiente (SENÇO, 2001).

O espalhamento pode ser realizado com vibroacabadora ou até mesmo motoniveladora, o que é conveniente para pavimentação urbana de ruas de pequeno tráfego.

Devido à facilidade de produção, estocagem, transporte, aplicação e manuseio no campo é uma excelente solução para vias de tráfego médio e leve (CERATTI et al., 2015).

Segundo Senço (2001) os principais ligantes betuminosos utilizados para o pré misturado a frio são a emulsão asfáltica de petróleo (EAP) e asfalto diluído de petróleo (ADP). A especificação técnica do DNER-ES 390 (1999) inclui a possibilidade do uso de emulsão asfáltica modificada por polímeros.

### 2.1.1. EMULSÃO ASFÁLTICA DE PETRÓLEO (EAP)

Segundo Teixeira et al. (2010), historicamente a Patente de Invenção nº 202021, registrada pelo químico inglês Hugh Alan Mackay em 9 de maio de 1922, marcou o ponto de partida para uma nova geração de ligantes asfálticos rodoviários. Em 1951, na França, a empresa Esso colocou à disposição do mercado as emulsões catiônicas. Os mesmos autores apresentam três formas de liquefazer o cimento asfáltico de petróleo, são elas, por aquecimento, por solubilização com solventes derivados do petróleo e por dispersão em água.

Teixeira et al. (2010) discorre que as emulsões asfálticas se tornaram uma excelente alternativa para obras de pavimentação. Devido a possibilidade de manuseio à temperatura ambiente, a versatilidade de emprego e a facilidade de armazenamento, além do menor custo de produção e menor risco social durante o processo de fabricação.

Contudo Ziyani (2013) alerta para o fato de que as misturas feitas com emulsão asfáltica apresentam propriedades mecânicas inferiores às misturas a quente. Não existe um método universal para formulação dessas misturas, além do fato de que a obtenção de um material apropriado depende fortemente dos fenômenos físico-químicos na interface emulsão/granular.

As EAPs são produzidas pela dispersão dos glóbulos de asfalto que saem do moinho e caem em uma solução de água já misturada com o agente emulsificante. Outros aditivos e adições podem ser inseridos, dependendo da finalidade específica daquela emulsão. Apresentam composição química variável conforme sua utilização, geralmente compostas por 30% a 50% de água, 50% a 70% de cimento asfáltico e 0,1% a 2,5% de agentes aglutinantes (BERNUCCI et al. 2010; TEIXEIRA et al., 2010).

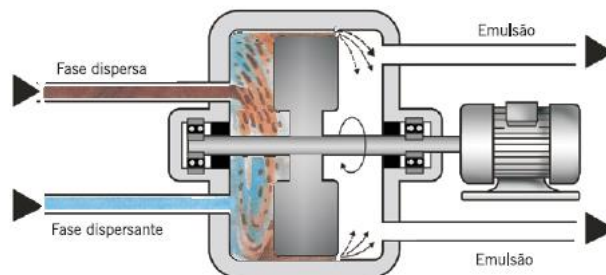
As figuras 2.12 e 2.13 ilustram o processo de usinagem das emulsões asfálticas.

Figura 2.12 - Esquema do processo de fabricação de emulsão asfáltica.



Fonte: CBB Asfalto (2018).

Figura 2.13 - Representação esquemática de um moinho coloidal de preparação dos glóbulos de asfalto para fabricação de emulsão.



Fonte: Bernucci et al. (2010, p. 82).

Segundo Ceratti et al. (2015) as emulsões podem ainda ser modificadas por polímeros, sendo os mais utilizados a borracha de butadieno estireno (SBR) e o estireno butadieno estireno (SBS), ambos pertencentes à classe dos elastômeros. Os polímeros agregam efeitos significativos nos resultados do teste de ductilidade, além de proporcionarem maior retorno elástico à emulsão, menor envelhecimento, melhor coesão e maior durabilidade.

As emulsões podem ser classificadas de acordo com a ruptura ou a quebra da EAP a qual ocorre devido à mudança do pH da emulsão, a evaporação da água e a adsorção do tensoativo pelos granulares minerais. A tabela 2.1 apresentam as classificações das EAP's (CERATTI et al., 2015).

Tabela 2.1 - Classificação das emulsões segundo Regulamento Técnico da Associação Nacional de Petróleo (ANP).

RR	- Ruptura rápida.
RM	- Ruptura média.
RL	- Ruptura lenta.
EAI	- Emulsão asfáltica para imprimação.
LA e LAN	- Emulsões asfálticas de ruptura lenta catiônica e de carga neutra, respectivamente, para serviço de lama asfáltica.
LARC	- Emulsão asfáltica catiônica de ruptura controlada para serviço de lama asfáltica.
RR1C-E	- Emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida modificada por polímeros elastoméricos, essa emulsão é especialmente indicada para serviços de pintura de ligação entre as camadas do pavimento.
RREC-E	- Emulsão asfáltica catiônica de ruptura rápida modificada por polímeros elastoméricos, essa emulsão é especialmente indicada para serviços de tratamentos superficiais e macadame betuminoso por penetração.
RM1C-E	- Emulsão asfáltica catiônica de ruptura média modificada por polímeros elastoméricos, essa emulsão destina-se para aplicação em serviços de pré misturados a frio (PMF).
RC1C-E	- Emulsão asfáltica catiônica de ruptura controlada modificada por polímeros elastoméricos, seu maior campo de aplicação é em microrrevestimento asfáltico a frio.
RL1C-E	- Emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta modificada por polímeros elastoméricos, seu maior campo de aplicação é em pré misturados a frio (PMF) denso.

Fonte: Adaptado de Ceratti et al. (2015, p. 17).

As emulsões asfálticas possibilitam a execução de praticamente todas as camadas asfálticas existentes numa estrutura de pavimento. Desde a execução de pavimentos novos, até a construção de camadas destinadas à recuperação e ao rejuvenescimento da camada de rolamento (TEIXEIRA et al., 2010). Santos (2002) indica a utilização das emulsões de acordo com os tipos de serviço onde serão empregadas, como segue:

- Pintura de ligação: RR-1C, RR-2C e RM-1C;
- Tratamento superficiais simples, duplo e triplo: RR-1C e RR-2C;
- Macadame betuminoso: RR-1C e RR-2C;



- PMF: RM-1C e RL-1C;
- Solo betume: RL-1C e LA-1C;
- Reciclagem a frio: emulsões asfálticas catiônicas com agente rejuvenescimento;
- Micro revestimento: emulsões catiônicas com polímeros.

Em geral as emulsões são aplicadas por caminhões espargidores a uma taxa definida previamente de acordo com a finalidade da aplicação, podendo ser aplicado simultaneamente ou não com o granular. A compactação é feita por rolos de pneus com pressão variável (TEIXEIRA et al., 2010). A figura 2.14 apresenta uma aplicação de emulsão asfáltica em serviços de imprimação.

Figura 2.14 - Aplicação de emulsão asfáltica em serviço de imprimação.



Fonte: Teixeira et al. (2010, p. 62).

### 2.1.2. ASFALTO DILUÍDO DE PETRÓLEO (ADP)

Também conhecidos como *cutbacks*, são produzidos a partir da diluição do CAP com solventes a base de querosene, nafta ou gasolina cuja finalidade é reduzir a viscosidade e a temperatura do ligante. São usados principalmente na imprimação das camadas de base dos pavimentos (CERATTI et al., 2015).

No Brasil são fabricados dois tipos de asfalto diluído, o de cura média e o de cura rápida, classificados de acordo com o tempo necessário para que ocorra a perda dos voláteis que depende da natureza do diluente utilizado. Os asfaltos diluídos são internacionalmente classificados em (BERNUCCI, 2010; SANTANA, 1992):

- Cura rápida (CR) – cujo solvente é a nafta ou gasolina;
- Cura média (CM) – cujo solvente é o querosene;
- Cura lenta (CL) – cujo solvente é óleo leve.

Os mesmos autores citam outra forma de avaliação e nomenclatura, de acordo com a faixa de viscosidade cinemática, como exemplo o CM30, é um asfalto diluído de cura média cuja faixa de viscosidade a 60°C começa em 30cSt. A viscosidade cinemática ( $\mu$ ) é definida pela relação entre a viscosidade dinâmica ( $\eta$ ) e a massa específica ( $\rho$ ), conforme equação 2.1.

Equação 2.1 - Viscosidade cinemática.

$$\mu = \frac{\eta}{\rho}$$

Onde:

$\eta$  - em Poise (P)

$\rho$  - em g/cm<sup>3</sup>

$\mu$  - em Poise/g/cm<sup>3</sup> = Stoke (St)

No caso dos asfaltos diluídos, os líquidos são newtonianos, portanto pode-se estabelecer uma relação entre a viscosidade cinemática e viscosidade técnica de Saybolt-Furol que depende somente da temperatura. A viscosidade é definida como o tempo (em segundos) que leva para escoar 60cm<sup>3</sup> do líquido a T°C através de um orifício padrão (SANTANA, 1992). A tabela 2.2 resume a classificação de acordo com o autor.

Tabela 2.2 - Classificação do asfalto diluído de acordo com a viscosidade cinemática a 60°C.

<b>ADP</b>	<b><math>\mu</math> 60° (cSt)</b>	<b>CAP*</b>	<b>Diluyente*</b>
- CM - 30	30 - 60	52	48
CR - 70 ; CM - 70	70 - 140	63	37
CR - 250 ; CM - 250	250 - 500	70	30
CR - 800 ; CM - 800	800 - 1600	82	18
CR - 3000 ; CM - 3000	3000 - 6000	86	14

\* percentagem volumétrica médias

Fonte: Santana (1992, p. 87).

O principal uso do asfalto diluído é no serviço de imprimação de camadas de base de pavimentos (DNER-ES 306/1997), sendo também possível a utilização desse produto em serviços de tratamento superficial. Porém devido a problemas de segurança e meio ambiente o uso desse material em serviços por penetração vem sendo reduzido (BERNUCCI et al., 2010).

A Resolução nº 30 de 9 de outubro de 2007 classifica os asfaltos diluídos de Cura Rápida em CR-70 e CR-250 e os de Cura Média em CM-30 e CM-70. As tabelas 2.3 e 2.4 resumem as especificações para cada classificação dos ADP's.

Tabela 2.3 - Especificações do ADP de Cura Rápida.

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE		MÉTODO	
		CR-70	CR-250	ABNT NBR	ASTM
Água, máx	% vol	0,2	0,2	14236	D 95
Viscosidade cinemática a 60°C	cSt	70-140	250-500	14756	D 2170
	OU				
Viscosidade Saybolt-Furol (s):				14950	D 88
- a 50°C	SSF	60-120	-		
- a 60°C	SSF	-	125-250		
Ponto de fulgor, mín	°C	-	27	5765	D 3143
Destilação até 360°C, %volume total destilado, mín:				14856	D 402
- a 190°C	% vol	10	-		
- a 225°C	% vol	50	35		
- a 260°C	% vol	70	60		
- a 316°C	% vol	85	80		
- resíduo a 360°C, por diferença, mín	% vol	55	65		
Viscosidade a 60°C (2)	P	600-2.400	600-2.400	5847	D 2171
Betume, mín. (2)	% massa	99	99	14855	D 2042
Ductibilidade a 25°C, mín. (1) (2)	cm	100	100	6293	D 113

(1) Se a ductibilidade obtida a 25° for menor do que 100 cm, o asfalto diluído estará especificado se a ductibilidade a 15,5°C for maior do que 100 cm.

(2) Ensaios realizados no resíduo da destilação.

Fonte: ANP (2007, p. 3).

Tabela 2.4 - Especificações do ADP de Cura Média.

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE		MÉTODO	
		CM-30	CM-70	ABNT NBR	ASTM
Água, máx	% vol	0,2	0,2	14236	D 95
Viscosidade cinemática a 60°C	cSt	30-60	70-140	14756	D 2170
OU					
Viscosidade Saybolt-Furol (s):				14950	D 88
- a 50°C	SSF	75-150	-		
- a 60°C	SSF	-	60-120		
Ponto de fulgor, mín	°C	38	38	5765	D 3143
Destilação até 360°C, %volume total destilado, mín:				14856	D 402
- a 225°C	% vol	25	20		
- a 260°C	% vol	40-70	20-60		
- a 316°C	% vol	75-93	65-90		
- resíduo a 360°C, por diferença, mín	% vol	50	55		
Viscosidade a 60°C (2)	P	300-1.200	300-1.200	5847	D 2171
Betume, mín. (2)	% massa	99,00	99,00	14855	D 2042
Ductibilidade a 25°C, mín. (1) (2)	cm	100	100	6293	D 113

(1) Se a ductibilidade obtida a 25° for menor do que 100 cm, o asfalto estará especificado se a ductibilidade a 15,5°C for maior do que 100 cm.

(2) Ensaio realizado no resíduo da destilação.

Fonte: ANP (2007, p. 3).

## 2.2. MISTURAS CBUQ

Segundo Bernucci et al. (2010) um dos tipos mais empregados no Brasil é o Concreto Asfáltico (CA) também denominado concreto betuminoso usinado à quente (CBUQ). Pode ser definido como o revestimento flexível resultante das misturas a quente, em usina apropriada, de granular mineral graduado, material de enchimento (fíler) e material betuminoso, espalhado e comprimido a quente (SENÇO, 2001).

Segundo Santana (1992) os CAPs têm suas propriedades dependentes da natureza do petróleo de origem e do processo de obtenção. No Brasil, o principal processo de refino é o da destilação a vácuo – que fornece um resíduo denominado Resíduo de Vácuo (RV). Em menor proporção, o processo de desasfaltação por solvente – onde se trata o RV com solventes obtendo-se óleos desasfaltados e como resíduo tem-se o Resíduo Asfáltico (RASf).

Bernucci et al. (2010) alertam para o fato do ligante asfáltico CAP apresentar certo grau de risco a saúde, devendo-se cumprir práticas de uso. Por ser utilizado sempre em temperaturas altas durante o transporte, estocagem e processamento, é necessário o emprego de equipamentos especiais de proteção individual para manuseio.

Segundo os mesmos autores, as emissões de vapores visíveis e de fumaça começam a ser percebidas a temperaturas em torno de 150°C. Por serem compostas por hidrocarbonetos e pequena quantidade de H<sub>2</sub>S, se acumulados em locais fechados, como tanques de estocagem, podem ser letais caso não haja ventilação adequada.

De acordo com Santana (1992), os CAPs são materiais termosensíveis e viscoelásticos. São classificados pela consistência definida à certa temperatura e velocidade de aplicação de carga ou uma dada velocidade de deformação, podendo ser CAP-30/45, CAP-50/60, CAP-85/100 e CAP-150/200.

Na produção do CBUQ são incorporados granulares graúdos – pedra britada – granular miúdo – areia, pó de pedra ou mistura de ambos – e material de enchimento – cimento, pó de pedra, pó de calcário e similares (SENÇO, 2001).

Conforme Bernucci et al. (2010) graças ao arranjo de partículas com graduação bem-graduada, a quantidade de ligante asfáltico requerida para cobrir as partículas e ajudar a preencher os vazios não deve ser elevada. A mistura necessita ainda de vazios com ar após a compactação em torno de 3 a 5%, nas camadas de rolamento, e de 4 a 6% nas camadas de ligação para evitar deformações por fluência devido ao tráfego. A tabela 2.5 apresenta as faixas granulométricas segundo DNIT.

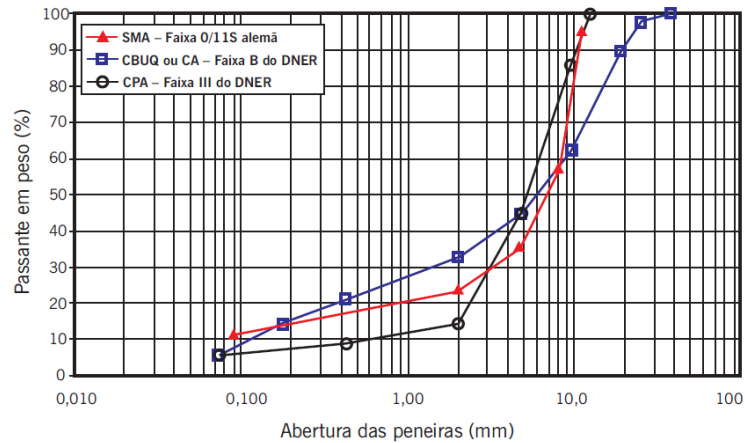
Tabela 2.5 - Faixas granulométricas dos granulares para CBUQ.

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%
Asfalto solúvel no CS2(+) (%)		4,0 - 7,0 Camada de ligação (Binder)	4,5 - 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 - 9,0 Camada de rolamento	+/- 0,3%

Fonte: DNIT-ES 031, (2006, p. 5).

Segundo Bernucci et al. (2010) a composição do arranjo granulométrico das misturas pode resultar em curvas granulométricas diferentes. A figura 2.15 ilustra três curvas granulométricas para misturas a quente.

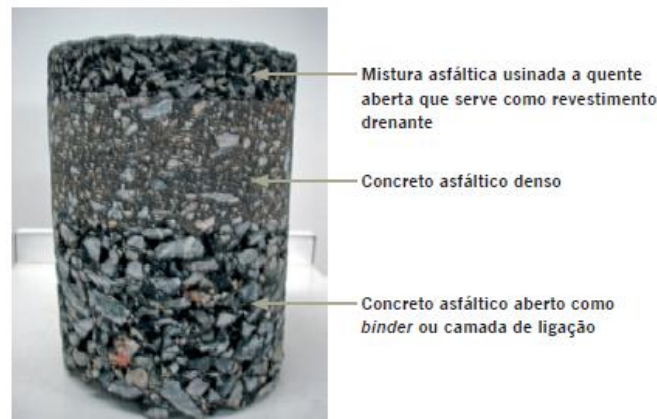
Figura 2.15 - Exemplo de curvas granulométricas de diferentes misturas a quente.



Fonte: Bernucci et al. (2010, p. 160).

A figura 2.16 ilustra as diferentes graduações que podem ser encontradas nas misturas asfálticas a quente.

Figura 2.16 - Corpo de prova extraído da pista mostrando a composição do revestimento asfáltico.

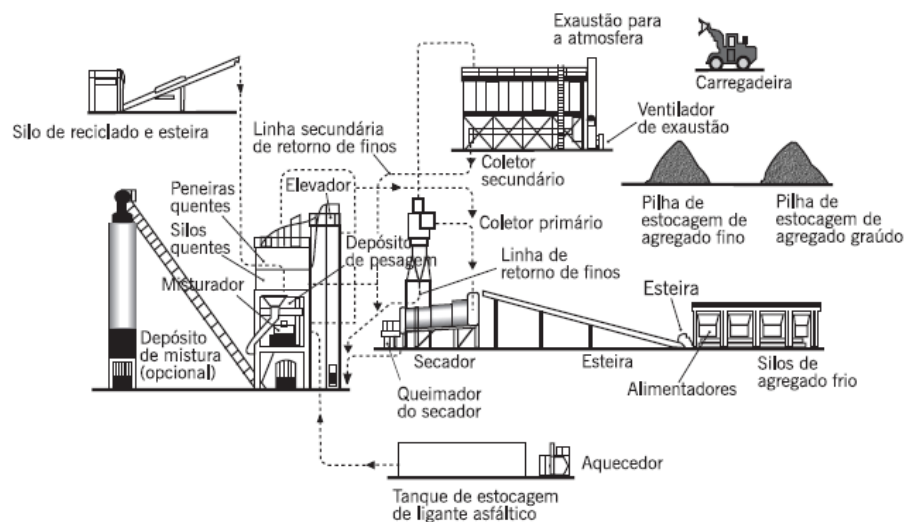


Fonte: Bernucci et al. (2010, p. 161).

A especificação de serviço do DNIT-ES 031 (2006) especifica o uso dos seguintes tipos de cimento asfáltico de petróleo: CAP-30/45, CAP-50/70 e CAP-85/100. Em relação aos granulares graúdos devem ter desgaste Los Angeles inferior a 50% (DNER-ME 035/1998), o granular miúdo pode ser areia, pó-de-pedra ou mistura de ambos e o material de enchimento (fíler) deve ser constituído por materiais minerais finamente divididos, como cimento Portland, Cal extinta, pós-calcários, cinza volante, etc.

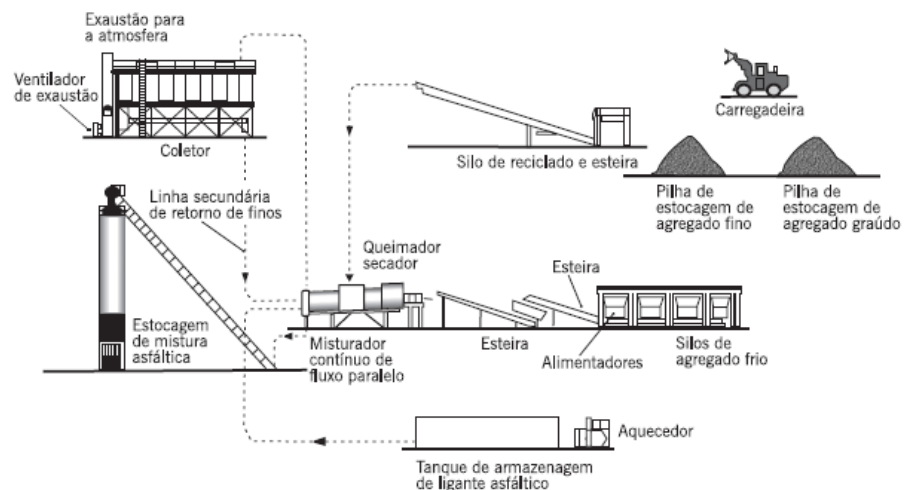
As usinas para produção do CBUQ variam em capacidade de produção e processo de produção, podendo ser de dois tipos. As usinas por batelada ou gravimétrica, produzem quantidades unitárias de misturas, e as usinas de produção contínua ou *Drum-Mixer*, que como o próprio nome sugere, tem produção contínua (BERNUCCI et al., 2010). As figuras 2.17 e 2.18 apresentam esquematicamente os tipos de usinas para produção de CBUQ.

Figura 2.17 - Representação esquemática de uma usina asfáltica por batelada.



Fonte: Bernucci et al. (2010, p. 374).

Figura 2.18 - Representação esquemática de uma usina asfáltica contínua.



Fonte: Bernucci et al. (2010, p. 375).

Assim como nos pré misturados a frio, as misturas a quente também podem receber adições em suas formulações para atingir determinados requisitos de projetos, como resistência e permeabilidade. Abaixo são mostrados os principais tipos de modificações por polímeros e suas aplicações (CERATTI et al., 2015).

### 3. METODOLOGIAS PARA FORMULAÇÃO DA CURVA GRANULOMÉTRICA

A Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 9935 (2005) determina a terminologia de agregado como, material sem forma ou volume definidos, inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassa e concreto. Quando associados a ligantes asfálticos, o granular escolhido deve apresentar propriedades de modo a suportar tensões impostas na superfície do pavimento e também em seu interior (BERNUCCI et al., 2010).

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) a granulometria do granular, representada pela curva de distribuição granulométrica, é uma das características que asseguram estabilidade ao pavimento, em função do maior atrito interno obtido pelo entrosamento das partículas, desde a mais graúda à partícula mais fina. O mesmo manual ainda classifica os granulares utilizados para pavimentação segundo a natureza, tamanho dos grãos e distribuição dos grãos, apresentado na figura 3.1.

Figura 3.1 - Classificação dos granulares para pavimentação.

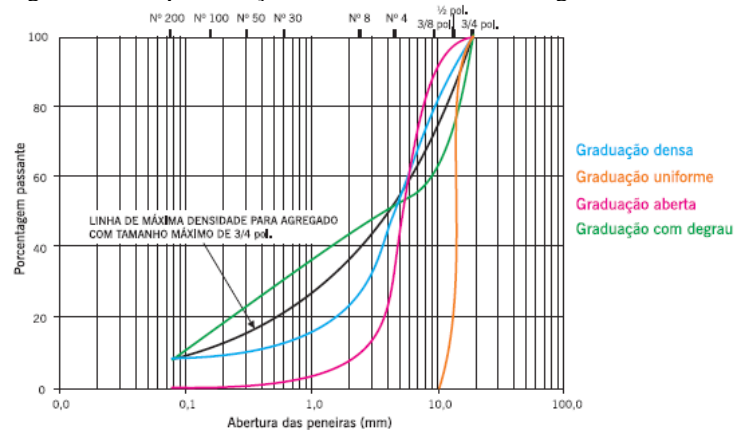
Classificação dos Granulares	<b>Natureza</b>	Natural - pedregulho, seixos, britas, areias, etc.
		Artificial - escória de alto forno, argila calcionada, argila expandida.
	<b>Tamanho</b>	Graúdo - material retido na peneira nº 10 (2,0mm)
		Miúdo - material que passa na peneira nº 10 e fica retido na peneira nº 200.
		Enchimento - material que passa pelo menos 65% na peneira nº 200.
	<b>Gradação</b>	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: Manual de Pavimentação do DNIT (2006, p. 78), adaptado pelo autor.

A figura 3.2 apresenta as diferentes curvas granulométricas para as gradações segundo Bernucci et al. (2010).



Figura 3.2 - Representação convencional de curvas granulométricas



Fonte: Bernucci et al. (2010, p. 123).

As principais características dos granulares para pavimentação são resistência à abrasão, durabilidade do granular pelo emprego de Sulfato de Sódio ou Magnésio, índice de forma (grãos), adesividade ao ligante betuminoso, resistência à água e massa específica. Há diversos métodos para determinação da composição granulométrica para uma mistura asfáltica, como por exemplo, o método gráfico de Rothfuchs, método por tentativa, método Bailey e o método Teórico de Fuller-Talbot (SANTANA, 1992; SENÇO, 2007).

Conforme Cunha (2004) o desempenho, a curto, médio e longo prazo de uma mistura asfáltica está relacionado com sua graduação, devendo ser considerada o primeiro passo para a elaboração de uma mistura asfáltica. A graduação afeta em quase todas as propriedades importantes de uma mistura asfáltica, como a estabilidade, a durabilidade, a permeabilidade, a trabalhabilidade, a resistência à fadiga, as deformações permanentes e aos danos causados pela umidade.

### 3.1. MÉTODO POR TENTATIVA

De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT), a granulometria a ser empregada nas misturas asfálticas deve respeitar os limites da faixa proposta pela especificação de serviço do DNIT-ES 031 (2006). Se faz uso do método por tentativa para o ajuste das curvas granulométricas e estas podem variar de acordo com a aplicação da mistura.

O método por tentativa é totalmente empírico, ou seja, baseia-se em acertos e erros da estimativa percentual a serem utilizadas em cada faixa granulométrica. Por esse motivo o

método possibilita que diferentes curvas granulométricas sejam enquadradas nos limites das faixas normatizadas pelo DNIT (ANDRADE, 2018).

Segundo Barra (2005) a qualidade dos granulares distribuídos pelas centrais de britagem e peneiramento, por apresentarem frações mal definidas em seus diâmetros, podem prejudicar a formação de arranjos granulométricos formadores de curvas contínuas. Isto acarreta em aproximações das curvas junto aos limites superiores e inferiores das faixas normatizadas.

Na tabela 3.1 são apresentadas as faixas granulométricas normatizadas pelo DNIT.

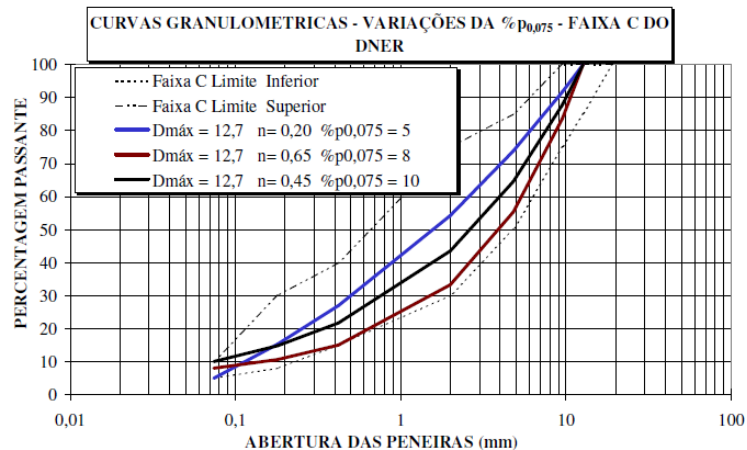
Tabela 3.1 - Faixas granulométricas do DNIT.

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	
	Asfalto solúvel no CS2(+) (%)	Camada de ligação (Blinder)	Camada de ligação e rolamento	Camada de rolamento	+/- 0,3%

Fonte: DNIT (2006, p. 5)

A figura 3.3 apresenta um exemplo de curvas diferentes dentro da mesma faixa normativa.

Figura 3.3 - Duas curvas granulométricas enquadradas na faixa C do DNER



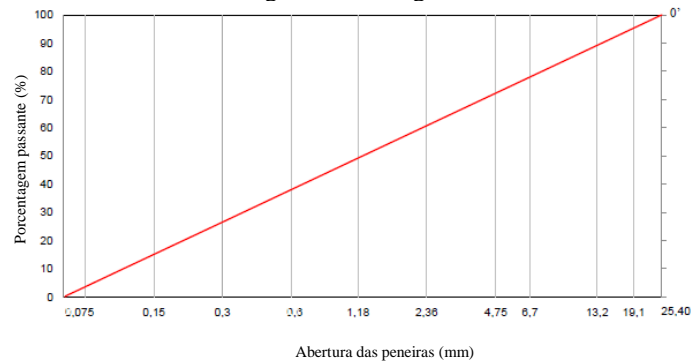
Assim como o DNIT, outros órgãos regionais podem normatizar faixas granulométricas, como por exemplo, o Departamento Estadual de Infraestrutura de Santa Catarina (DEINFRA/SC), que apresenta faixas com variações se comparadas às faixas do DNIT, e deve levar em consideração a função da utilização da mistura para a escolha da faixa a ser utilizada. Segundo Siroma (2016), a necessidade de se obter estruturas de pavimentos de melhor qualidade tem resultado na criação de “faixas de trabalho” utilizadas por empresas, que consistem na redução dos intervalos limites fixados pela norma, visando à obtenção de curvas com menor variação.

### 3.2. MÉTODO GRÁFICO DE ROTHFUCHS

Segundo Senço (2007) é um método gráfico que permite encontrar a curva granulométrica média da mistura a partir da faixa granulométrica especificada, segundo o procedimento:

- Em um papel milimetrado, marcam-se, na vertical, as porcentagens que passam, de 0 a 100%, em cada peneira;
- Sobre a horizontal de porcentagem que passa igual a 100%, marca-se um ponto O', arbitrário. Traça-se a diagonal OO', que irá representar a granulometria desejada para a mistura;
- A abertura das peneiras é determinada na escala horizontal, levantando-se linhas verticais para cada peneira, de tal modo que a ordenada obtida sobre a reta OO' corresponda às porcentagens que passam nesta peneira para a mistura desejada (figura 3.4);

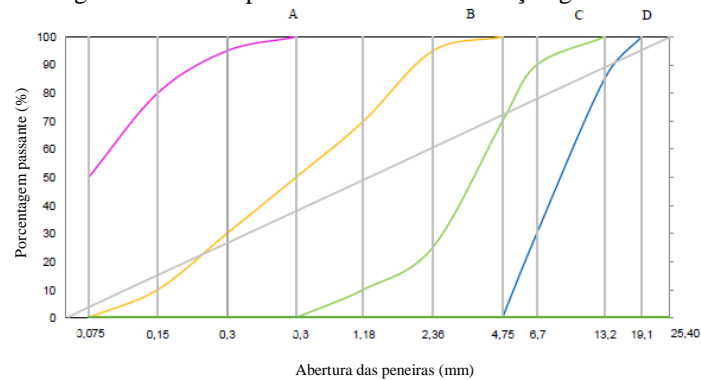
Figura 3.4 - Diagonal 0-0'.



Fonte: Andrade (2018, p. 71).

- d) Traçam-se então, as curvas de distribuição granulométrica dos materiais a misturar (figura 3.5);

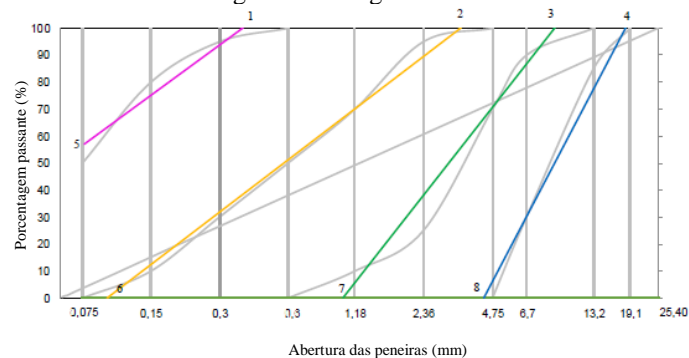
Figura 3.5 - Exemplo de curvas de distribuição granulométrica



Fonte: Andrade (2018, p. 72).

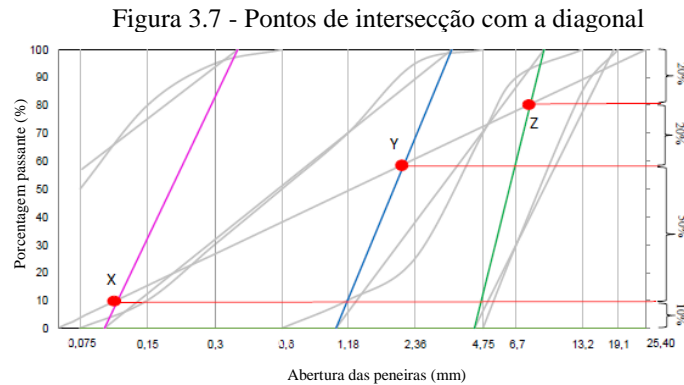
- e) A seguir, com uma régua, traça-se sobre a curva de cada material uma reta, de tal maneira que as áreas situadas nos dois lados da reta sejam aproximadamente iguais. Dessa forma são determinadas as retas 1-5, 2-6, 3-7 e 4-8 (figura 3.6);

Figura 3.6 - Segmentos de retas



Fonte: Andrade (2018, p. 73).

- f) Para finalizar, ligam-se os pontos 1-6, 2-7 e 3-8. Os pontos X, Y e Z de interseção com a diagonal OO', fornecem as proporções com que os materiais componentes devem entrar na mistura, ou seja, a granulometria média desejada (figura 3.7).



Fonte: Andrade (2018, p. 74).

### 3.3. MÉTODO BAILEY

Desenvolvido em 1980 pelo engenheiro Robert Bailey, do Departamento de Illinois (IDOT), o método de seleção da granulometria tenta unir os benefícios das misturas densas com os benefícios das misturas descontínuas. Esse método faz a seleção da distribuição relacionando diretamente as características de compactação de cada fração, com os vazios no agregado mineral (VAM) e com os vazios da mistura (Vv). A estrutura de granulares é selecionada buscando maior intertravamento entre os granulares graúdos e pode ser usado com qualquer método de dosagem de misturas asfáltica (CUNHA, 2004 apud VAVRIK, et al. 2002).

De acordo com Mendes (2011) os dois princípios básicos do método são o arranjo de granulares e a definição de granulares graúdos e miúdos. Para o método Bailey o granular graúdo é aquele que forma vazios quando colocados em um volume definido e o granular miúdo é aquele capaz de preencher os vazios criados pelos granulares graúdos.

Ainda segundo Mendes (2011) é necessário que seja definido um diâmetro máximo nominal (DMN), que segundo a especificação Superpave, é a primeira peneira acima da peneira que retém mais que 10% do material. A partir da definição do DMN pode-se então determinar a peneira de controle primário (PCP), considerada como a peneira com diâmetro de abertura mais próximo do resultado da equação 3.1.

Equação 3.1 - Peneira de controle primário.

$$PCP = DMN \times 0,22$$

Onde:

PCP - peneira de controle primário;

DMN - diâmetro máximo nominal.

Segundo Cunha (2004), as misturas a partir desse método apresentam arranjo granulométrico com alta estabilidade e alterando a quantidade de granulares graúdos e finos na mistura pode-se obter um VAM adequado para garantir boa durabilidade.

### 3.4. MÉTODO TEÓRICO

Segundo Barra (2009) a metodologia de cálculo de curvas granulométricas teóricas possibilita que se tenha de maneira racional, um controle exato das frações dos materiais utilizados na composição dos arranjos granulométricos das misturas asfálticas. O que propicia um preenchimento gradual e adequado dos vazios formados pelos granulares de maiores dimensões, além de um desperdício menor de material.

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. Através da equação 3.2, é possível calcular o percentual de cada fração correspondente a 100% das partículas passantes, levando em conta o diâmetro em todas as peneiras (DNIT, 2006).

Equação 3.2 - Porcentagem que passa na peneira de menor diâmetro.

$$\%p_{200} = a * \left(\frac{d}{D}\right)^n$$

Onde:

%p - percentagem em peso que passa na peneira de abertura d (menor diâmetro);

a - constante, tomada igual a 100;

d - abertura de uma dada peneira, em mm;

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

n - expoente, obtido pela equação 3.3.

Equação 3.3 - número n.

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

Onde:

n - expoente;

d - abertura de uma dada peneira, em mm;

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

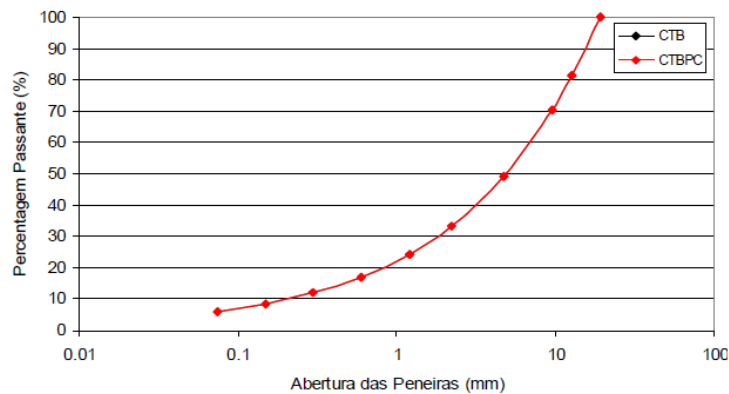
O método racional utiliza diâmetros bem definidos ao longo da formulação e composição da curva granulométrica, por este motivo dispensa o uso de enquadramento de faixas como é feito no método por tentativa. Além disso as frações resultantes das equações supracitadas, tendem a gerar curvas granulométricas contínuas, com melhor proporção entre grãos e conseqüentemente maior preenchimento dos vazios (ANDRADE, 2018).

O exponencial “n” indica se a curva é aberta, densa, ou tipo macadame, conforme especificação a seguir (DNIT,2006):

- Granular de graduação densa:  $0,35 < n > 0,55$ ;
- Granular de graduação aberta:  $0,55 < n > 0,75$ ;
- Granular tipo macadame:  $D \approx 2d$ ;  $n \approx 1,00$ .

Conforme Bernucci et al. (2010) as graduações densas tendem a oferecer maior estabilidade ao pavimento devido maior contato entre os granulares e baixos teores de vazios. A figura 3.8 apresenta o exemplo de uma curva granulométrica pelo método teórico.

Figura 3.8 - Exemplo de curva granulométrica teórica.



Fonte: Barra (2009, p. 157).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

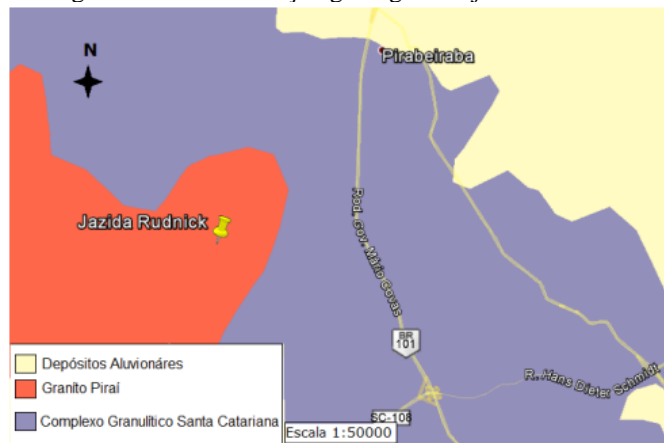
Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados para a pesquisa, assim como os procedimentos de caracterização dos materiais pétreos e betuminosos que compõem as misturas asfálticas, a curva granulométrica que foi utilizada e os ensaios laboratoriais para aferição dos parâmetros de resistência mecânica.

### 4.1. MATERIAL PÉTREO

O material pétreo utilizado neste trabalho é oriundo da empresa Rudnick Minérios S. A., localizada na zona industrial, Rua Anaburgo, nº5271. A jazida encontra-se na zona de transição do Complexo Granulítico Santa Catarina e o Granito Piraí conforme figura 4.1. Foram utilizados neste trabalho os resultados de caracterização encontrados por Eing (2018) em sua pesquisa e os resultados são apresentados na tabela 4.1.



Figura 4.1 - Classificação geológica da jazida Rudnick.



Fonte: Meurer (2015, p. 20).

Tabela 4.1 - Caracterização do material granular.

Ensaio	Normativa	Resultado obtido em laboratório	Limite
Desgaste por abrasão Los Angeles	DNER-ME 035/98 e DNER-ME 37/97	17,5%	$\leq 50\%$
Índice de Forma	ABNT NBR 7809/2006	0,6	$\geq 0,5$
Resistência ao ataque químico (Durabilidade)	DNER-ME 089/94 e DNER-ME 37/97	5,30%	$\leq 12\%$
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%	$\leq 1,0\%$
Absorção	-	0,5%	

Fonte: Eing (2018).

De acordo com os resultados encontrados por Meurer (2015) os materiais pétreos da jazida Rudnick Minérios podem ser utilizados em obras de pavimentação.

#### 4.2.LIGANTE BETUMINOSO

A caracterização do material betuminoso foi realizada pela empresa CBB Asfaltos, e fornecido em forma de Certificado de Análise, cujos resultados dos ensaios de caracterização são apresentados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Caracterização da EAP - RL-1C.

Características	Unidade	Método de Ensaio	Resultados	Limites	
				Mínimo	Máximo
Resíduo Asfáltico	% (m/m)	NBR 14376	60,9	60	-
Viscosidade Saybolt Furol, 25°C	ssf	NBR 14491	16	-	90
Peneiramento, retido na peneira 0,84mm	% (m/m)	NBR 14393	0	-	0,1
Sedimentação, 5 dias, diferença do resíduo entre topo e fundo	% (m/m)	NBR 6570	2,3	-	5
Carga da Partícula	-	NBR 6567	Positiva	Positiva	
Mistura com Cimento	%	NBR 6297	1,8	-	2

Fonte: CBB Asfaltos (2018).

A utilização de emulsão asfáltica catiônica RL-1C para esta pesquisa foi definida a partir de vários critérios técnicos avaliados e resumidos por Santana (1992). Onde, recomenda-se a emulsão de ruptura lenta para misturas PMF com graduação densa e semidensa, devido ao alto teor de finos na mistura. Pelo seu processo de ruptura e relação de adesividade com o material pétreo, que ocorrem mais por reação química entre o emulsificante e o granular e menos pela evaporação da água, enquanto que, nas emulsões aniônicas, se dá o contrário.

#### 4.3.CURVA GRANULOMÉTRICA

Para esta pesquisa foi utilizado o Método Racional, baseado na equação de Füller-Talbot. O método permite a determinação de uma curva granulométrica bem definida e se baseia na fixação dos diâmetros máximo e mínimo dos granulares utilizados na composição da mistura.

Foram escolhidas duas graduações para estudo do PMF, sendo a graduação densa (faixa B) e a semi-densa (faixa D), com o objetivo de obter maior controle quanto aos teores de vazios e assim, obter misturas com maior estabilidade. Segundo a especificação de serviço do DNIT-ES 153 (2010), os percentuais de vazios para misturas PMF devem estar entre 5% e 30%.

Para a graduação semi-densa foram retiradas a fração retida na peneira N°4 (4,8mm) e a fração passante na peneira N°200 (0,075mm) para que a curva se encaixasse na faixa D respeitando os teores de vazios normativos.

As tabelas 4.3 e 4.4 apresentam as curvas granulométricas a partir da equação de Füller-Talbot que foram utilizadas para formulação das misturas para esta pesquisa.

Tabela 4.3 - Curva Teórica: Densa

Peneira (mm)	% passante		
19,1	100,00		
12,7	81,30	Expoente (n)	0,51
9,5	70,10	%p <sub>200</sub> :	6
4,8	49,60	D <sub>máx</sub> (mm):	19,1
2,2	33,40	% Vazios:	menor que 10%
1,2	24,50		
0,6	17,20		
0,3	12,10		
0,15	8,50		
0,075	6,00		
Fundo	0,00		

Fonte: Autor.

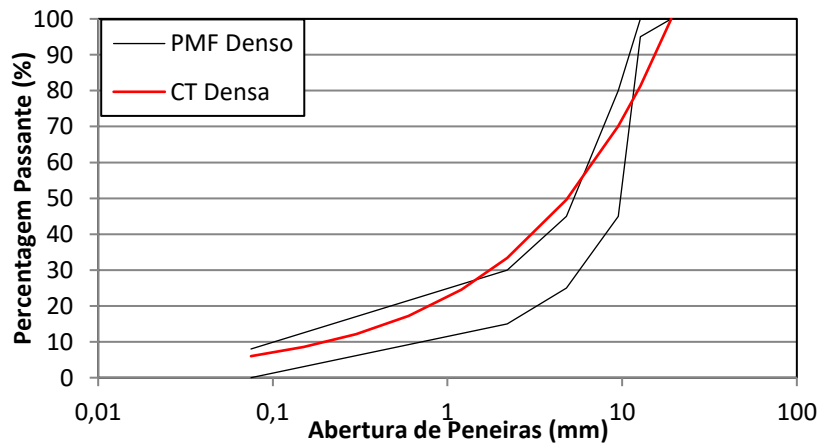
Tabela 4.4 - Curva Teórica: Semidensa.

Peneira (mm)	% passante		
19,1	100,00		
12,7	81,30	Expoente (n)	0,51
9,5	70,10	%p <sub>200</sub> :	6
2,2	33,40	D <sub>máx</sub> (mm):	19,1
1,2	24,50	% Vazios:	10% a 20%
0,6	17,20		
0,3	12,10		
0,15	6,00		
0,075	0,00		

Fonte: Autor.

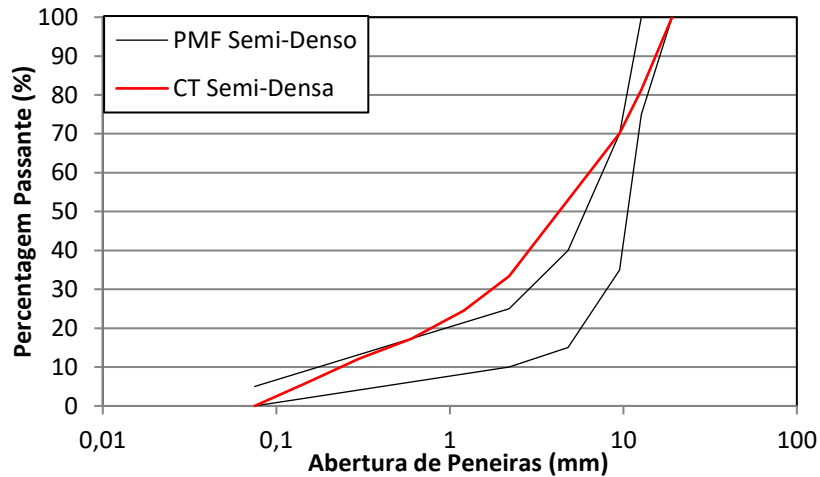
As figuras 4.2, 4.3 e 4.4 apresentam as faixas B e D normatizadas pelo DNIT e a curva granulométrica calculada para cada graduação.

Figura 4.2 - Comparação entre a faixa B e a curva teórica densa calculada.



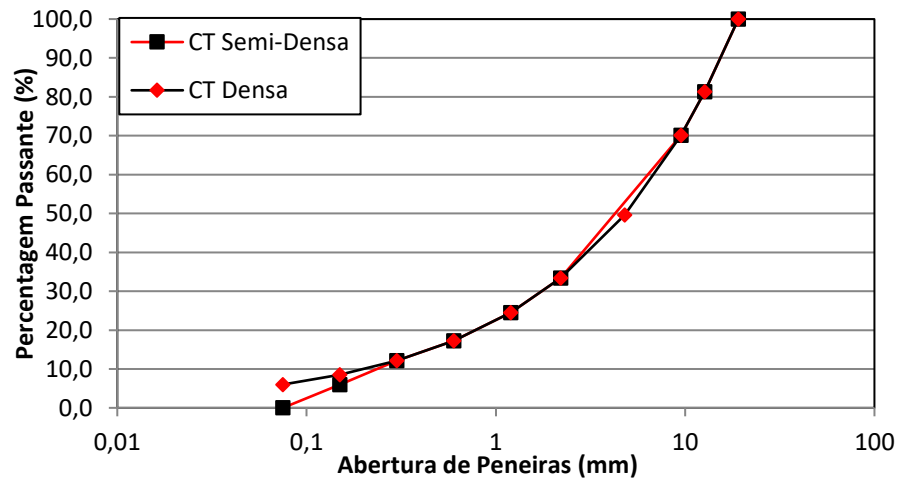
Fonte: Autor.

Figura 4.3 - Comparação entre a faixa D e curva teórica semidensa calculada.



Fonte: Autor.

Figura 4.4 - Comparação entre as curvas teóricas densa e semidensa.



Fonte: Autor.

A partir dos gráficos é possível analisar que as curvas calculadas não se encaixam totalmente dentro das faixas especificadas pelo DNIT. Justifica-se este fato pela escolha do método teórico para composição das curvas granulométricas, que leva em consideração o diâmetro máximo do granular e o percentual passante na peneira de menor diâmetro, enquanto que as faixas do DNIT se aplicam à metodologia por tentativa.

As curvas densas e semidensa se diferenciam pela ausência da fração retida na peneira N°4 e na fração passante na peneira N°200 nas misturas semidensas, para que esta atenda aos teores de vazios normatizados pela Norma DER/PR-ES 23 (2005).

#### 4.4. ENSAIOS LABORATORIAIS

Este capítulo apresenta os métodos e ensaios realizados em laboratório para aferição dos parâmetros mecânicos das misturas PMF. Todos os ensaios foram realizados no LDTPav do CTJ da Universidade Federal de Santa Catarina.

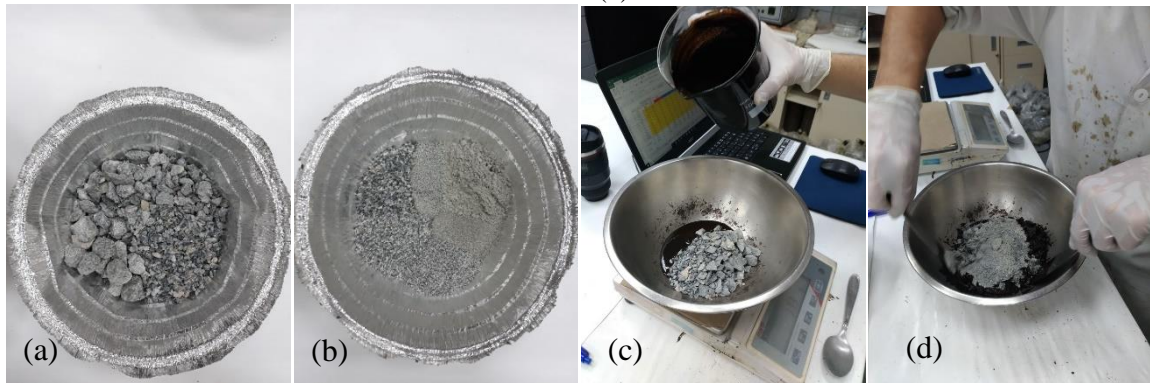
A obtenção das dosagens das misturas PMF e da densidade real das misturas se deram por meio do ensaio de Massa Volumétrica Real (MVR), normatizado pela ABNT NBR 15619 (2016). O teor ótimo de ligante betuminoso foi obtido através dos procedimentos de dosagem da metodologia Marshall, normatizado pelo método de ensaio DNER-ME 043 (1995). Barra (2009) alerta quanto ao procedimento de compactação do método, sendo este por impacto de um soquete sobre a amostra, enquanto que em campo a compactação é feita por amassamento.

##### 4.4.1. MASSA VOLUMÉTRICA REAL (MVR)

Para realização do ensaio foram produzidas duas amostras para cada teor de ligante, com massa igual a 635 gramas (g). A dosagem das misturas obedece às curvas granulométricas, apresentadas no capítulo anterior, e a quantidade de material pétreo foi corrigido de acordo com o percentual de ligante para cada amostra.

Para preparação das amostras inicialmente foram separadas as frações graúdas, passantes na peneira 19,1mm e retidas na peneira 2,2mm, sendo das frações miúdas, passantes na peneira 2,2mm até o recipiente do fundo, e acondicionadas em recipientes distintos. A mistura procede com a mistura das frações graúda e o ligante asfáltico. Após o envolvimento de todas as partículas graúdas pelo ligante é então adicionada a fração miúda, revolvendo a mistura até que todas as partículas estejam envolvidas pelo ligante. A figura 4.5 apresenta o processo de mistura das amostras.

Figura 4.5 - Frações graúdas (a), frações miúdas (b), mistura de graúdos com ligante (c) e adição dos finos na mistura (d).



Fonte: Autor.

O segundo passo foi a ruptura da emulsão asfáltica, as misturas foram acondicionadas em recipiente limpo e deixadas em temperatura ambiente por período suficiente para que ocorresse a ruptura do ligante asfáltico. Após a ruptura, o material pode ser submetido ao ensaio.

Para o ensaio foi utilizado um frasco Erlenmeyer com rolha, previamente calibrado, sendo determinado seu peso e volume. Inicialmente a mistura foi desagregada, para que não houvesse presença de grumos, e feito a pesagem da amostra seca. Em seguida pesou-se o conjunto (frasco mais rolha), preenchido com aproximadamente 800ml de água. A mistura então foi adicionada dentro do frasco, com água, e feito uma breve agitação com uma haste metálica para retirada do excesso de bolhas de ar, ao final, pesou-se o conjunto (frasco, rolha, água e amostra).

Após as pesagens iniciais, o conjunto (frasco, água e amostra) foi levado para a máquina de vácuo por um período de 20 minutos. Passados essa etapa, retirou-se novamente o excesso de bolhas de ar com a haste metálica, com cuidado para que não houvesse perda de material durante o processo. A última pesagem foi feita após a colocação da rolha e preenchimento com água até o menisco da mesma. As figuras 4.6 e 4.7 apresentam o procedimento descrito acima.

Figura 4.6 - Amostra desagregada (a), pesagem da amostra seca (b), agitação para retirada de bolhas (c) e pesagem do conjunto (d).



Fonte: Autor.

Figura 4.7 - Conjunto na máquina de vácuo (a) e pesagem final do conjunto (b).



Fonte: Autor.

O cálculo da densidade real das misturas foi obtido pela equação 4.1.

Equação 4.1 - Densidade máxima teórica real.

$$D_r = \frac{m_3 - m_2}{v - (m_4 - m_0 - m_1/\rho_w)}$$

Onde:

$D_r$  - densidade real, em  $\text{g/cm}^3$ ;

$m_0$  - massa da amostra seca, em g;

$m_1$  - massa do frasco vazio com rolha (calibrado), em g;

$m_2$  - massa do frasco com rolha e água, em g;

$m_3$  - massa do frasco com rolha, água e amostra, em g;

$m_4$  - massa do frasco com rolha, água até o menisco e amostra, após o vácuo, em g;

$v$  - volume do frasco, calibrado, em  $\text{cm}^3$ ;

$\rho_w$  - densidade da água, em  $\text{g/cm}^3$ ;

Por fim, a densidade da mistura não compactada foi obtida pela média aritmética entre as densidades das duas amostras de cada teor de ligante. É importante ressaltar que a diferença admissível entre as densidades das amostras de cada teor foi de menos que  $0,01\text{g/cm}^3$ , as amostras com diferença maior foram refeitas.

O ensaio MVR possibilitou determinar os teores iniciais de ligante que foram utilizados na metodologia Marshall, e a densidade real das misturas foi parâmetro de entrada para determinação do volume de vazios, calculado no subitem a seguir.

#### 4.4.2. METODOLOGIA MARSHALL

O método de ensaio DNER-ME 107 (1994) tem por objetivo fixar o modo para determinação de dois parâmetros de misturas betuminosas a frio, com emulsão asfáltica, são eles, a estabilidade Marshall, resistência máxima à compressão radial, e a fluência Marshall, deformação total apresentada pelo corpo de prova desde a aplicação da carga inicial nula até a carga máxima.

A partir das observações realizadas durante o ensaio MVR, foram estabelecidos 9 teores de ligante para as misturas densas e 7 teores para as misturas semi-densas. As quantidades de material pétreo para cada teor foram calculadas a partir das porcentagens estabelecidas nas curvas granulométricas, corrigindo em peso, o teor de ligante para cada fração. Cada corpo de prova com massa total de 1200 gramas.

Determinadas as quantidades de material para cada mistura, foi procedido então a separação das amostras para os corpos de prova (CPs). A separação das frações, graúdas e miúdas, e mistura dos granulares com o ligante seguiu as mesmas etapas do ensaio MRV, descritos no subitem 4.4.1.

Para a metodologia Marshall foram moldados 5 CPs para cada teor de ligante, o método de ensaio DNER-ME 107 (1994) prevê no mínimo três para cada dosagem. Após feito as misturas do material pétreo com a emulsão asfáltica, foi deixado à cura em temperatura ambiente por 45 minutos, sendo o período de 60 minutos estipulado como máximo, no caso de adoção de emulsão asfáltica de ruptura lenta. A figura 4.8 apresenta o processo descrito anteriormente.



Figura 4.8 - (a) Separação das frações, (b) emulsão asfáltica de ruptura lenta e (c) período de cura.



Fonte: Autor.

Após o período de ruptura, se iniciou o processo de compactação. Montou-se o conjunto formado pela base do soquete, molde e colar, em seguida foi inserido na parte inferior do conjunto uma folha de papel filtro, para que não houvesse aderência do ligante à base do soquete. Colocou-se a mistura toda de uma vez dentro do molde e com uma espátula foram aplicados 15 golpes nas bordas e 10 golpes no centro do molde, afim de acomodar a mistura no molde e eliminar possíveis vazios durante a compactação. Os granulares maiores foram posicionados na parte central do molde e outra folha de papel filtro foi inserida no topo do conjunto. A figura 4.9 apresenta os passos citados acima.

Figura 4.9 - (a) Conjunto de compactação, (b) adição da mistura no molde, (c) golpes com a espátula e (d) adição do papel filtro no topo do conjunto.



Fonte: Autor.

O próximo passo foi acomodar o conjunto no soquete de compactação, e aplicar 75 golpes em cada face do CP. Após compactado, o CP foi levado à estufa por 24 horas à temperatura de 60°C, ainda dentro do molde, essa etapa visou acelerar o processo de ruptura da

emulsão. Passado as 24 horas, o CP foi deixado resfriar à temperatura ambiente por 3 horas, sendo 2 horas o mínimo exigido. Conforme figura 4.10.

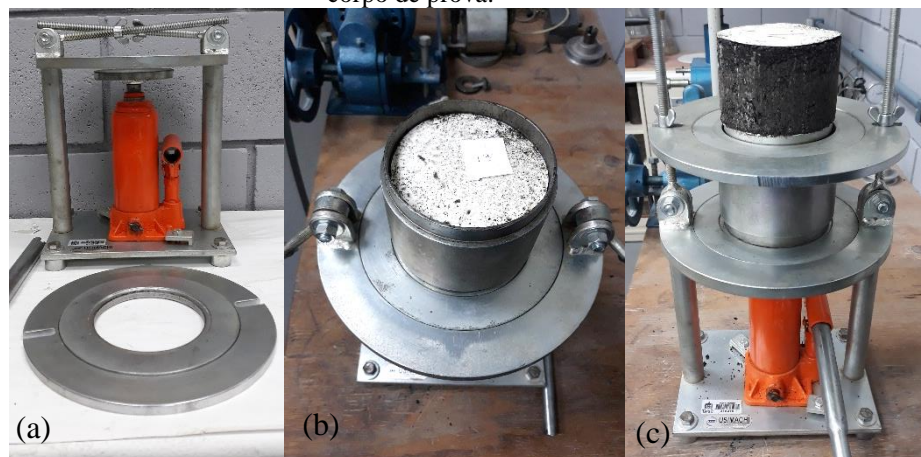
Figura 4.10 - (a) Posicionar molde no soquete de compactação, (b) aplicação dos golpes de compactação, (c) período em estufa e (d) período de resfriamento.



Fonte: Autor.

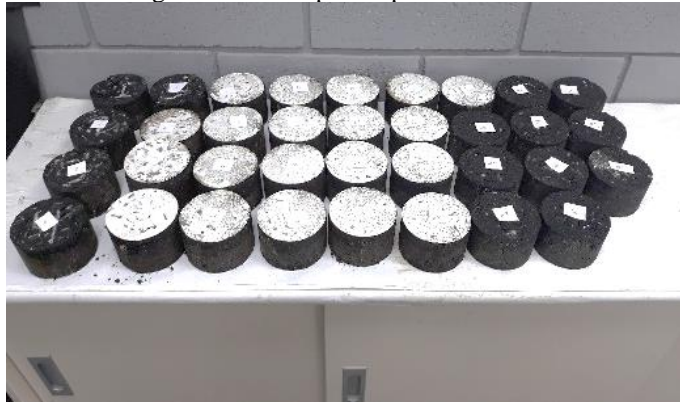
Após o resfriamento, se fez então a extração do CP do molde com o auxílio de um extrator hidráulico. Os CPs foram posicionados em uma superfície limpa, lisa e plana. As figuras 4.11 e 4.12 apresentam os equipamentos e passos supracitados.

Figura 4.11 - (a) Macaco hidráulico para extração, (b) posicionamento do molde e (c) extração do corpo de prova.



Fonte: Autor.

Figura 4.12 - Corpos de prova extraídos.



Fonte: Autor.

Após a extração, os CPs foram medidos em quatro posições diametralmente opostas para determinação da altura, a partir da média aritmética das leituras, tomando os devidos cuidados quanto a movimentação e manuseio dos mesmos, afim de evitar possíveis desagregações e perda de material. Os CPs foram então pesados ao ar e os valores anotados para determinação da densidade volumétrica aparente. A figura 4.13 apresenta os procedimentos citados acima.

Figura 4.13 - (a) Medição da altura e (b) pesagem dos CPs.



Fonte: Autor.

Terminado os passos anteriores foi então calculada a densidade volumétrica aparente ( $D_{ap}$ ), a partir da equação 4.2.

Equação 4.2 - Densidade aparente.

$$D_{ap} = \frac{P}{\pi * R^2 * H}$$

Onde:

$D_{ap}$  - densidade aparente, em g/cm<sup>3</sup>;

P - peso do corpo de prova, em g;

R - raio do molde, em cm;

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

Com os resultados do MVR e  $D_{ap}$  foi possível determinar o teor de vazios (V%) da mistura, conforme equação 4.3.

Equação 4.3 - Teor de vazios.

$$V(\%) = \frac{MVR - D_{ap}}{MVR} * 100$$

Onde:

V(%) - teor de vazios, em porcentagem;

MVR - massa volumétrica real, em g/cm<sup>3</sup>;

$D_{ap}$  - densidade aparente, em g/cm<sup>3</sup>.

O passo seguinte foi medição dos parâmetros de estabilidade e fluência Marshall. De acordo com a norma DNER-ME 117 (1994) os CPs devem ser previamente parafinados e colocados em estufa por um período de 2 horas a uma temperatura de 40°C, o espaço de tempo entre a retirada da estufa e rompimento do CP não deve exceder 30 segundos.

O CP foi colocado no molde de compressão, este previamente limpo e com os pinos-guia lubrificadas, e levado à prensa juntamente com o medidor de fluência já na posição de ensaio. A prensa foi operada para garantir que seu êmbolo se elevasse com velocidade de 50mm por minuto, continuamente, até o rompimento do CP. A figura 4.14 apresenta os passos citados acima.

Figura 4.14 - (a) Período em estufa, (b) acomodação do PC no molde de compressão e (c) leitura durante o processo de rompimento.



Fonte: Autor.

A leitura observada no defletômetro foi anotada e convertida para quilograma-força (kgf) e foi anotada como “Estabilidade Lida”, cujo valor foi corrigido, multiplicando-o por um fator de correção que é função da espessura do CP, conforme tabela disponível na norma DNER-ME 107 (1994), o valor corrigido foi calculado pela equação 4.4.

Equação 4.4 - Fator de correção da estabilidade Marshall.

$$f = 927,27 * h^{-1,64}$$

Onde:

f - fator de correção;

h - espessura do corpo de prova, em milímetros.

O valor da estabilidade Marshall foi obtido então pela multiplicação da “Estabilidade Lida” pelo fator de correção.

Os dois parâmetros, estabilidade e fluência, foram medidos simultaneamente durante o processo descrito. Para determinação da fluência Marshall, durante a aplicação da carga foi utilizado um extensômetro, fixado no topo do molde de compressão de onde foram retirados duas leituras, uma anterior ao carregamento e outra logo após a ruptura do CP. A fluência também é conhecida como a deformabilidade do corpo de prova e representa a variação do tamanho da amostra entre o instante anterior ao carregamento e o instante exato da ruptura.

Os resultados do ensaio assim como os gráficos obtidos são mostrados e discutidos no capítulo 5.

## 5. RESULTADO DOS ENSAIOS

Este capítulo apresenta os resultados e discussões acerca dos ensaios realizados nesta pesquisa, assim como os parâmetros físicos mínimos exigidos pela Norma DNIT-ES 153 (2010). Através da análise dos resultados obtidos pela metodologia Marshall foi determinado o teor ótimo de ligante para cada uma das misturas analisadas. A tabela 5.1 apresenta os parâmetros mecânicos mínimos e máximos exigidos por norma para PMF.

Tabela 5.1 - Condições de vazios, estabilidade e fluência.	
Porcentagem de Vazios (%)	5 a 30
Estabilidade, mínima	250 kgf (75 golpes)
Fluência, mm	2,0 - 4,5

Fonte: DNIT-ES 153 (2010), adaptado pelo autor.

### 5.1.MVR

Como explanado anteriormente, o ensaio MVR foi ferramenta essencial para determinação dos teores de ligantes de trabalho. Segundo proposto por Barra (2009), os teores iniciais de trabalho, tanto para as misturas densas como semidensas, foram: 3,90%, 4,22%, 4,54%, 4,86%, 5,18% e 5,50%.

A partir da análise tátil e visual durante os ensaios e período de ruptura da emulsão, no decorrer dos ensaios, houve a necessidade de alteração de alguns teores devido à dificuldade de envolvimento dos granulares durante a mistura das amostras. Com o objetivo de se obter melhor envolvimento do material pétreo nas misturas, para as misturas densas foram excluídos todos os teores iniciais e adicionados os seguintes teores: 6,00%, 6,50%, 7,00%, 7,50%, 8,00%, 8,50%, 9,00%, 9,50% e 10,00%. Para as misturas semidensas foram excluídos os teores 3,90% e 4,22% e adicionados os teores 6,00%, 6,50% e 7,00%.

A tabela 5.2 apresenta os teores de trabalho utilizados após a alteração.

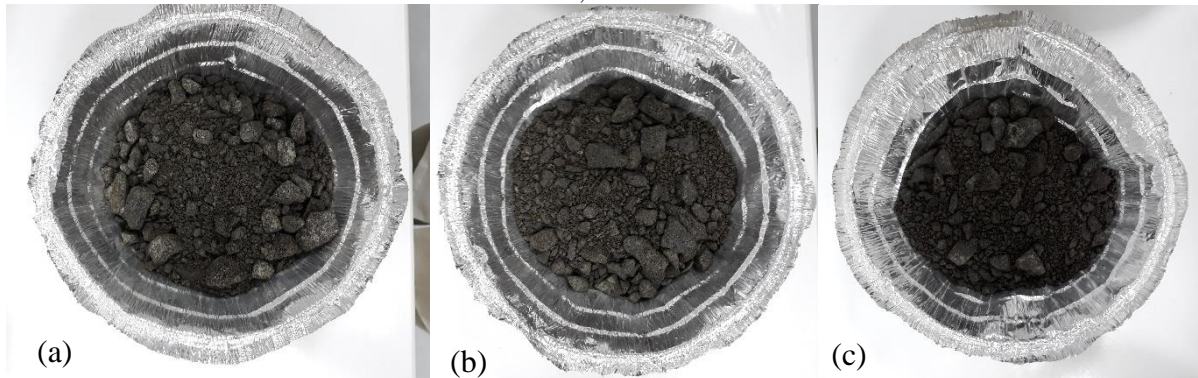
Tabela 5.2 - Teores de ligante utilizados.

Iniciais	Utilizados	
	Denso	Semidenso
3,90	6,00	4,54
4,22	6,50	4,86
4,54	7,00	5,18
4,86	7,50	5,50
5,18	8,00	6,00
5,50	8,50	6,50
	9,00	7,00
	9,50	
	10,00	

Fonte: Autor.

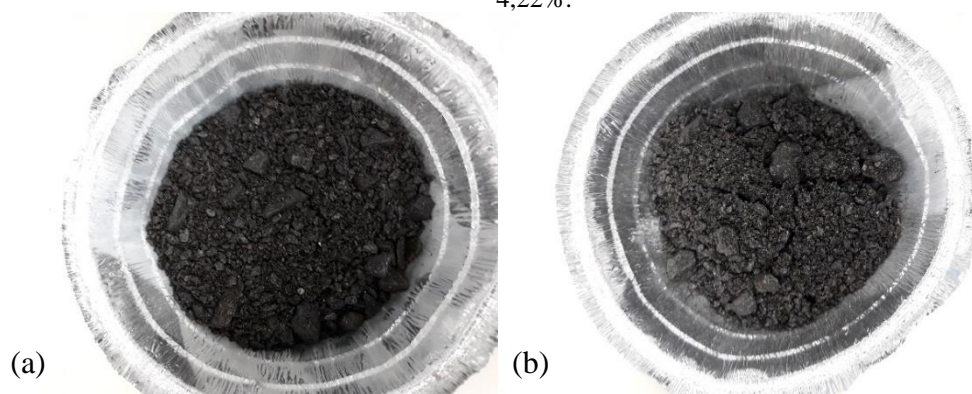
As figuras 5.1 e 5.2 apresentam as condições de envolvimento do material pétreo pelo ligante para os teores iniciais das misturas.

Figura 5.1 - Envolvimento do material pétreo das misturas densas para os teores: (a) 4,22%, (b) 4,54% e (c) 5,50%.



Fonte: Autor.

Figura 5.2 - Envolvimento do material pétreo das misturas semidensas para os teores: (a) 3,90% e (b) 4,22%.

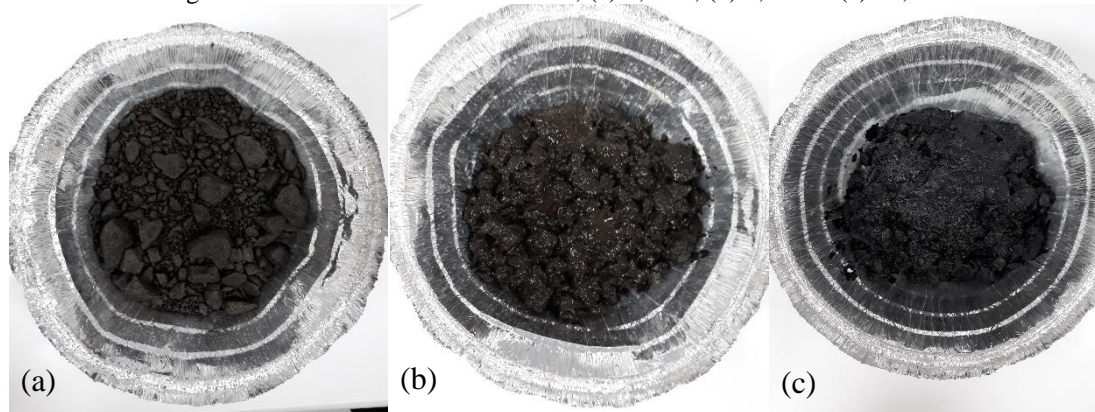


Fonte: Autor.

Analisando a tabela 5.2, o número de teores utilizados é maior que os propostos inicialmente. Por ser o primeiro estudo utilizando emulsão asfáltica realizado dentro do LDTPav optou-se por fazer uma varredura maior, ampliando a área de abrangência da pesquisa a fim de se obter maior representatividade dos resultados.

A figura 5.3 apresenta diferentes teores das misturas densas, sendo possível visualizar que nos teores de 8,50% a 10,0% houve o envolvimento satisfatório dos granulares pela emulsão asfáltica, o que melhorou trabalhabilidade da mistura.

Figura 5.3 - Teores das misturas densa, (a) 6,00%, (b) 8,50% e (c) 10,0%.



Fonte: Autor.

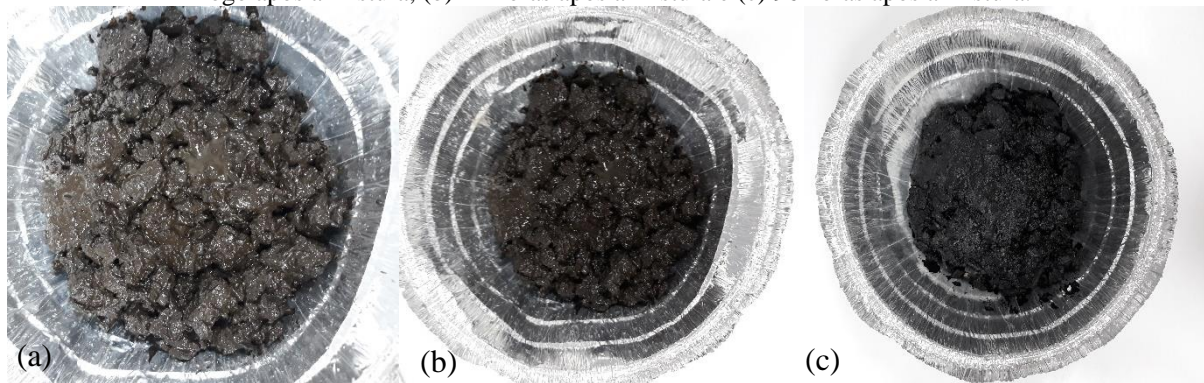
Durante o ensaio notou-se que para as misturas densas o período necessário para ruptura da emulsão foi maior, variando de 48 horas nos teores 6,00% e 6,50%, 72 horas nos teores 7,00%, 7,50% e 8,00%, 96 horas nos 8,50% e 9,00%, e 120 horas nos teores 9,50% e 10,00%. Já para as misturas semidensas o período de ruptura foi de 48 horas para todos os teores.

O período de ruptura foi definido pela análise visual das misturas, logo após a mistura do material pétreo e ligante, as misturas apresentaram uma coloração marrom, evoluindo para uma coloração preta com o decorrer da ruptura. Os ensaios foram realizados somente quando as misturas apresentaram a coloração preta, ou seja, o processo de ruptura da emulsão estava completo.

A figura 5.4 ilustra a coloração das misturas de acordo com o período de ruptura.



Figura 5.4 - Coloração das misturas conforme período de ruptura para mistura densa com 8,50% de ligante. (a) Logo após a mistura, (b) 24 horas após a mistura e (c) 96 horas após a mistura.



Fonte: Autor.

As tabelas 5.3 e 5.4 apresentam as densidades reais das misturas determinadas a partir do ensaio.

Tabela 5.3 - Massa volumétrica real das misturas semidensas, não compactadas.

Teor de ligante (%)	Misturas Semi-densas				Período de Ruptura (horas)
	Amostra 1	Amostra 2	Diferença	Média	
4,54	2,601	2,602	0,001	2,602	48
4,86	2,599	2,596	0,003	2,589	48
5,18	2,584	2,583	0,001	2,583	48
5,50	2,568	2,573	0,005	2,571	48
6,00	2,563	2,568	0,005	2,565	48
6,50	2,562	2,557	0,005	2,559	48
7,00	2,541	2,544	0,003	2,542	48

Fonte: Autor.

Tabela 5.4 - Massa volumétrica real das misturas densas, não compactadas.

Teor de ligante (%)	Misturas Densas				Período de Ruptura (horas)
	Amostra 1	Amostra 2	Diferença	Média	
6,0	2,596	2,593	0,003	2,595	48
6,5	2,580	2,575	0,005	2,577	48
7,0	2,573	2,565	0,008	2,569	72
7,5	2,551	2,548	0,003	2,550	72
8,0	2,543	2,539	0,004	2,541	72
8,5	2,529	2,523	0,006	2,526	96
9,0	2,506	2,514	0,008	2,511	96
9,5	2,496	2,495	0,001	2,496	120
10,0	2,480	2,474	0,006	2,477	120

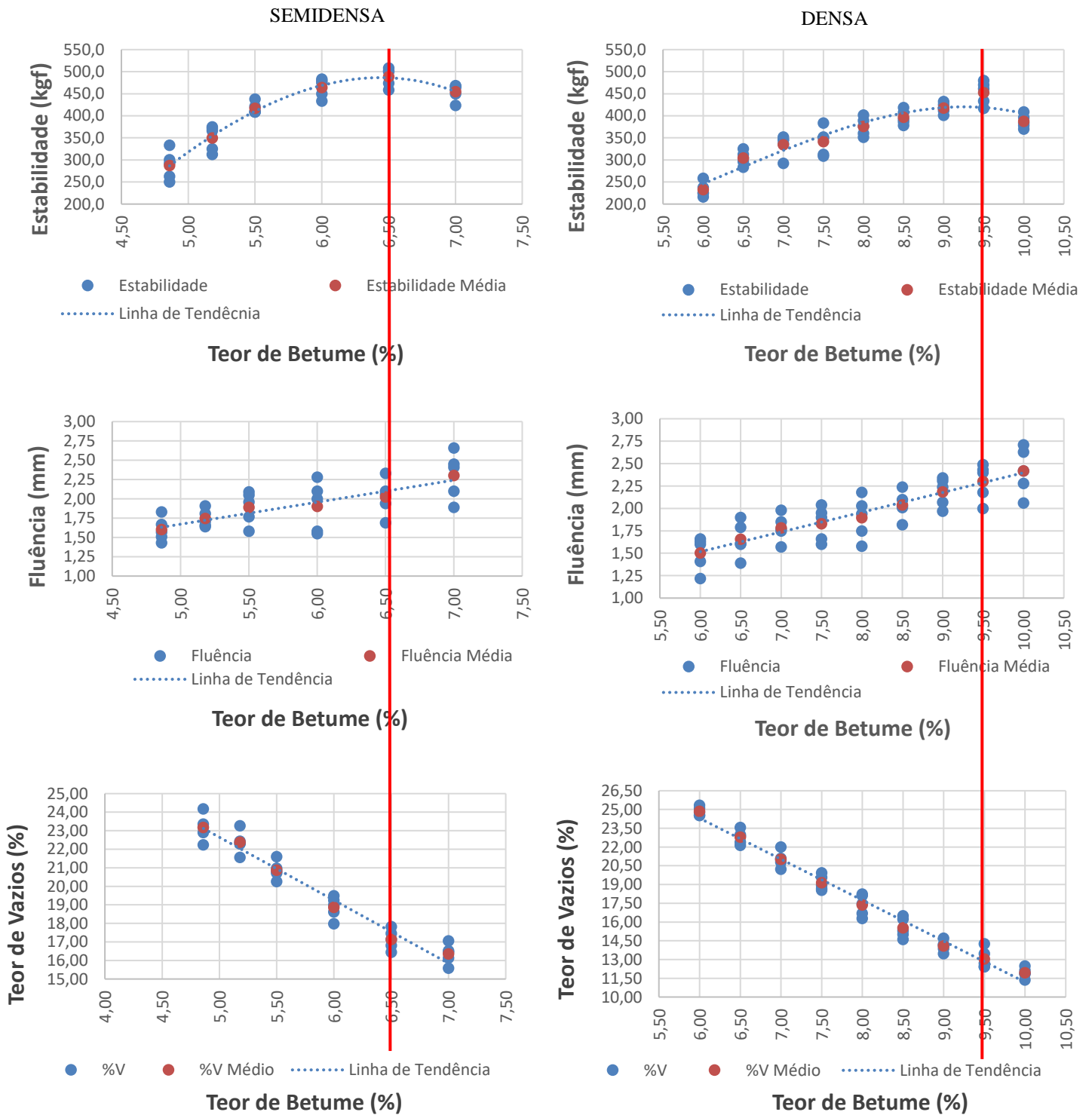
Fonte: Autor.

Os resultados do ensaio MVR são parâmetros de entrada para obtenção dos demais parâmetros da metodologia Marshall, apresentado anteriormente.

### 5.2. ENSAIO MARSHALL

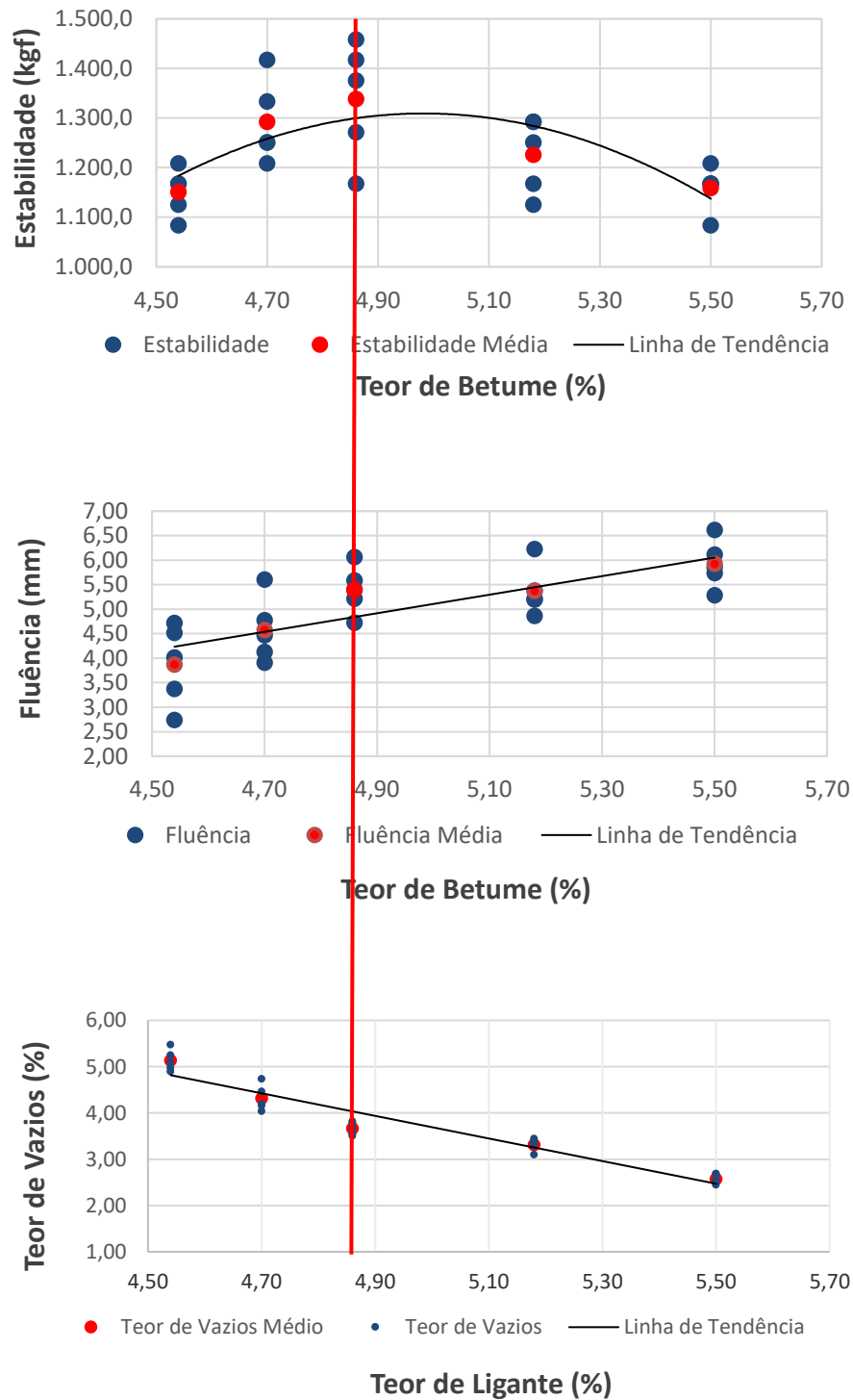
As figuras 5.5 e 5.6 a seguir, apresentam os resultados obtidos pela metodologia Marshall para este trabalho.

Figura 5.5 - Resultados das misturas Densas e Semidensas.



Fonte: Autor.

Figura 5.6 - Resultados da mistura convencional com CBUQ.



Fonte: Eing, 2018.

A partir da análise dos resultados dos gráficos, tem-se que os teores ótimos de trabalho das misturas encontram-se em 9,50% e 6,50%, para as misturas PMF densa e semi-densa, respectivamente, respeitados os limites preconizados pela Norma do DNIT-ES 153 (2010).

Vale ressaltar que os teores ótimos supracitados foram definidos a partir da análise dos gráficos e de outros aspectos como a trabalhabilidade da mistura, integridade dos CPs em relação a desagregação pós compactação e quantidade de ligante absorvida pelo papel-filtro. Quanto à mistura CBUQ, o teor ótimo definido por EING (2018) foi de 4,86%. A tabela 5.5 apresenta os valores obtidos nos teores ótimos de betume.

Tabela 5.5 - Resumo dos resultados nos teores ótimos

	PMF		CBUQ (Eing, 2018)
	Semidenso	Denso	
<b>Estabilidade (kgf) - 75 golpes</b>	500,00	450,00	1350,00
<b>Fluência (mm)</b>	2,10 - 2,15	2,25	5,50
<b>%V</b>	17 - 18	13,00	3,20
<b>Teor ótimo de Betume (%)</b>	6,50	9,50	4,86

Fonte: Autor.

Os teores de 4,86% e 5,50%, da mistura semidensa, apresentaram valores de fluência menores que o mínimo estabelecido pela norma para 75 golpes (tabela 5.5), por este motivo foram excluídos dos resultados finais apresentados.

Analisando os teores de vazios, nota-se que nos primeiros teores de dosagem das misturas densas os valores são maiores, se comparado aos primeiros teores dosados para as misturas semidensas, pois, em observações durante a pesquisa, verificou-se que a quantidade de emulsão utilizada inicialmente nas misturas densas foi insuficiente para promover o envolvimento completo dos granulares. Portanto, os teores de vazios encontrados estão relacionados aos próprios vazios do granular mineral e não aos vazios resultantes da mistura asfáltica. A insuficiência de ligante asfáltico nesses teores refletiu na trabalhabilidade da mistura, resultando numa mistura com aspecto “esfarelado”, e também nos resultados de fluência.

Ao passo que se aproxima dos teores ótimos de trabalho, a condição de vazios das misturas apresenta os valores esperados, ou seja, menores teores de vazios nas misturas densa e maiores nas misturas semidensas. Em geral, todos os teores de ligante, em ambas as misturas apresentaram teores de vazios dentro da faixa de trabalho preconizado pela Norma DNIT-ES 153 (2010) (tabela 5.5).

Santana (1992) apresenta os limites classificatórios para os PMFs quanto ao %V e alerta que há grande evolução desses valores no decorrer da ruptura. Os valores para misturas densas estão entre 9,0% e 15,0%, para as misturas semidensas estão entre 15,0% e 22,0%, ou seja, os resultados obtidos nesta pesquisa estão dentro de suas classificações.

Uma observação importante deve ser feita a respeito dos teores de vazios, que de acordo com os resultados obtidos apresentaram valores elevados, tanto nas misturas semidensas como nas densas, quando comparado à mistura convencional estudada por Eing (2018). Este fato se deve à natureza do ligante utilizado nesta pesquisa, a emulsão asfáltica, apresentar menor viscosidade que o ligante convencional (CAP), por esta razão há uma maior dificuldade no preenchimento dos vazios da mistura e por consequência há necessidade de maiores teores para que haja bom envolvimento dos granulares minerais pelo ligante.

Além da viscosidade do ligante, o processo de ruptura das misturas utilizando emulsão asfáltica influencia nos teores de vazios, uma vez que se dá pela evaporação da água presente em sua composição, no contato com a superfície do granular mineral. Neste contexto, foi observado durante esta pesquisa que houve perda de massa das amostras, em razão da evaporação da água, num período de 48 até 120 horas nos teores das misturas densas, o que contribuiu para a geração de vazios tanto nas misturas semidensas como nas densas.

Vale ressaltar que os altos teores de vazios obtidos não caracterizam as misturas PMF como drenantes, pois, não são significativos para que se estabeleça este tipo de classificação, em razão de estarem abaixo de 18%. Ainda, foi possível observar que a característica dos vazios resultantes do processo de ruptura da emulsão culminara em microaberturas, as quais provavelmente impedem a formação de vazios comunicantes suficientes.

Guimarães e Loures (2015) realizaram uma análise em vias pavimentadas com PMF denso utilizando emulsão asfáltica catiônica RL-1C e concluíram que após a evaporação da água e com a compactação executada pelo tráfego de veículos, o teor de vazios diminuiu, atingindo valores próximos aos de misturas a quente.

Em relação aos resultados referentes à estabilidade e fluência, nas misturas semidensas notou-se valores ligeiramente maiores que nas misturas densas, comparando os mesmos teores de ligante, este resultado é justificado pois, a ruptura por compressão diametral, como é o caso da metodologia Marshall, favorece misturas que possuam granulometria mais graúda em sua composição, ou seja, no processo de ruptura por amassamento, os granulares graúdos com bom intertravamento, como é o caso, oferecem maior resistência à ruptura e menor deslocamento em relação à fluência.

Ainda, referente à estabilidade dos teores ótimos das misturas PMF, os resultados obtidos são da ordem de três vezes menos aos determinados por Eing (2018) para a mistura CBUQ, sendo que esta última apresenta teor de vazios em 3,7% e fluência 5,50mm (tabela 5.5), em razão da maior viscosidade do CAP 30/45 em relação à emulsão RL-1C.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados da presente pesquisa comprovam, e corroboram com as tendências já existentes sobre a utilização do PMF em obras de pavimentação asfáltica, ou seja, de acordo com os resultados obtidos, as misturas asfálticas a frio com EAP, atendem às especificações de trabalho conforme a norma do DNIT, nos teores ótimos, e podem ser utilizadas como camadas de base e de revestimento de pavimentos, porém há um grande defasagem de resistência quando comparadas com as misturas convencionais CBUQ.

Da análise dos resultados também é possível verificar que as misturas semidensas apresentam resultados ligeiramente maiores que as misturas densas, em função dos parâmetros da metodologia Marshall, o que caracteriza uma vantagem para sua utilização, pois, além de um aporte menor de finos na mistura tem-se a redução no consumo de emulsão asfáltica. Vale ressaltar que mesmo sendo superior às misturas densas, as misturas semidensas com EAP ainda apresentam resultados inferiores à mistura CBUQ.

Recomenda-se a partir dos resultados da presente pesquisa, a utilização do PMF em obras de pavimentação, porém, com muito cuidado em relação ao estudo de tráfego prévio, não sendo recomendado à utilização em vias com tráfego intenso de veículos e em vias com canalização do trânsito, como vias exclusivas de ônibus, rotatórias e cruzamentos.

Outro aspecto relevante quanto à utilização do PMF é referente aos teores de vazios encontrados na pesquisa, por serem valores elevados, a mistura parece muito suscetível à desagregação precoce pela ação da água ao longo do tempo e à deformação permanente, devendo-se preservar em relação a solicitações intensas.

Apesar de ser a metodologia oficial adotada pelo DNIT, a metodologia Marshall não representa fielmente as condições de compactação e ruptura das misturas asfálticas como acontecem em campo, portanto, recomenda-se a continuação dessa pesquisa, para validação dos resultados encontrados, utilizando ensaios mais adequados e que representem mais adequadamente a relação campo/laboratório, como a metodologia francesa de dimensionamento de pavimentos.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. **Resolução N° 30**. Rio de Janeiro, 2007, 5p. Disponível em: <<http://www.abeda.org.br/wp-content/uploads/2018/04/RESOLU%C3%87%C3%83O-ANP-N%C2%BA-30-DE-9.10.2007-DOU-10.10.2007-Especifica%C3%A7%C3%A3o-ADPs.pdf>>. Acesso em: 30 abr. 2018.
- ANDRADE, Viviane Dias. **Influência da formulação de esqueletos minerais na deformação permanente de misturas de concreto asfáltico densas**. 2018. 167p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2018.
- ARALDI, Gustavo Bressiani. **Impacto da formulação de diferentes matrizes granulométricas na dosagem de misturas asfálticas densas**. 2017. 61 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia de Infraestrutura, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935**. Agregados – terminologia. Rio de Janeiro, 1987, 6p. Disponível em: <<https://www.abntcolecao.com.br/normavw.aspx?ID=86085>>. Acesso em: 30 abr. 2018.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15619**: Misturas asfálticas – determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas. Rio de Janeiro, 2016, 13 p. Disponível em: <<https://www.abntcolecao.com.br/normavw.aspx?ID=358735>>. Acesso em: 05 set. 2018.
- BARRA, Breno Salgado. **Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas**. 2009. Volume único, 327p. 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 o emprego do pó calcário**. 2005. 202 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.
- BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 3. ed. Rio de Janeiro: PETROBRÁS: ABEDA. 2010.
- CERATTI, Jorge Augusto Pereira et al. **Utilização de Ligantes Asfálticos em Serviços de Pavimentação**. Rio de Janeiro: ABEDA. 2015.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Transportes rodoviários: Por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** Brasília: CNT, 2017.
- CUNHA, Marcos Bottene. **Avaliação do método Bailey de seleção granulométrica de agregados para misturas asfálticas**. 2004. 118 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

DEPARTAMENTO DE ESTRADA DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANA (DEN/PR). **DER/PR - ES-P 21:** Pavimentação: Concreto asfáltico usinado à quente - Especificação de serviço. Curitiba, 2005. 18 p. Disponível em: <[http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/p\\_21\\_2005.pdf](http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/p_21_2005.pdf)>. Acesso em: 02 set. 2018.

\_\_\_\_\_. **DER/PR - ES-P 23:** Pavimentação: pré misturado a frio. Curitiba, 2005. 18 p. Disponível em: <[http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/PDF/pdf\\_Pavimentacao/ES-P23-05Pre-misturadoFrio.pdf](http://www.der.pr.gov.br/arquivos/File/PDF/pdf_Pavimentacao/ES-P23-05Pre-misturadoFrio.pdf)>. Acesso em: 02 set. 2018.

DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUTURA DO ESTADO DE SANTA CATARINA (DEINFRA). **DEINFRA - ES-P 02:** Pavimentação: camadas estabilizadas granulometricamente. Florianópolis, 2016. 9 p. Disponível em: <<http://www.deinfra.sc.gov.br/doctecnicos>>. Acesso em: 02 set. 2018.

\_\_\_\_\_. **DEINFRA - ES-P 05:** Pavimentação: camadas de misturas asfálticas usinadas a quente. Florianópolis, 2016. 17 p. Disponível em: <<http://www.deinfra.sc.gov.br/doctecnicos>>. Acesso em: 02 set. 2018.

\_\_\_\_\_. **DEINFRA - ES-P 06:** Pavimentação: camadas de misturas asfálticas usinadas a frio. Florianópolis, 2016. 11 p. Disponível em: <<http://www.deinfra.sc.gov.br/doctecnicos>>. Acesso em: 02 set. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADA DE RODAGEM (DNER). **DNER - ES 306:** Pavimentação - imprimação – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 1997. 6 p. Disponível em: <[http://www1.dnit.gov.br/arquivos\\_internet/ipr/ipr\\_new/normas/DNER-ES306-97.pdf](http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/normas/DNER-ES306-97.pdf)>. Acesso em: 24 abr. 2018.

\_\_\_\_\_. **DNER - ES 386:** Pavimentação - pré misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito. Rio de Janeiro, 1999. 15 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dner-es386-99.pdf>>. Acesso em 24 abr. 2018.

\_\_\_\_\_. **DNER - ES 390:** Pavimentação - pré misturado a frio com emulsão modificada por polímero. Rio de Janeiro, 1999. 14 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dner-es390-99.pdf>>. Acesso em 24 abr. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADA DE RODAGEM (DNER). **DNER - ME 002:** Emulsão asfáltica - carga de partícula - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998. 4 p. Disponível em: <[http://www1.dnit.gov.br/arquivos\\_internet/ipr/ipr\\_new/normas/DNER-ME002-98.pdf](http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/normas/DNER-ME002-98.pdf)>. Acesso em: 02 de set. 2018.

\_\_\_\_\_. **DNER - ME 004:** Material betuminoso - Determinação da viscosidade Saybolt Furol a alta temperatura método da película delgada. Rio de Janeiro, 1994. 2 p. Disponível em: <[http://www.ippuc.org.br/cd\\_caderno\\_de\\_encargos/volume%2003\\_PDF/DNER-ME%20004-94.pdf](http://www.ippuc.org.br/cd_caderno_de_encargos/volume%2003_PDF/DNER-ME%20004-94.pdf)>. Acesso em: 02 set. 2018.

\_\_\_\_\_. **DNER - ME 006:** Emulsão asfáltica - determinação de sedimentação. Rio de Janeiro, 2000. 4 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me006-00.pdf>>. Acesso em: 02 set. 2018.

\_\_\_\_\_. **DNER - ME 007:** Emulsão asfáltica - determinação de ruptura método de mistura com cimento. Rio de Janeiro, 1994. 2 p. Disponível em:



<[http://www.ippuc.org.br/cd\\_caderno\\_de\\_encargos/volume%2003\\_PDF/DNER-ME%20007-94.pdf](http://www.ippuc.org.br/cd_caderno_de_encargos/volume%2003_PDF/DNER-ME%20007-94.pdf)>. Acesso em: 02 set. 2018.

\_\_\_\_\_. **DNER - ME 035:** Agregados - determinação de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998. 6 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me035-98.pdf/view>>. Acesso em: 20 set. 2018.

\_\_\_\_\_. **DNER - ME 043:** Misturas Betuminosas a quente - Ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995. 11 p. Disponível em: <[http://www.ippuc.org.br/cd\\_caderno\\_de\\_encargos/volume%2003\\_PDF/DNER-ME%20043-95.pdf](http://www.ippuc.org.br/cd_caderno_de_encargos/volume%2003_PDF/DNER-ME%20043-95.pdf)>. Acesso em: 25 ago. 2018.

\_\_\_\_\_. **DNER - ME 107:** Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica – ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1994. 9 p. Disponível em: <[http://www.ippuc.org.br/cd\\_caderno\\_de\\_encargos/volume%2003\\_PDF/DNER-ME%20107-94.pdf](http://www.ippuc.org.br/cd_caderno_de_encargos/volume%2003_PDF/DNER-ME%20107-94.pdf)>. Acesso em: 20 set. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE (DNIT). **DNIT - ES 031:** Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006. 14 p. Disponível em: <[http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit031\\_2006\\_es.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit031_2006_es.pdf)>. Acesso em: 06 mai. 2018.

\_\_\_\_\_. **DNIT - ES 112:** Pavimentos Flexíveis - Concreto asfáltico com asfalto-borracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending”. Rio de Janeiro, 2009. 13 p. Disponível em: <[http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit112\\_2009\\_es.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit112_2009_es.pdf)>. Acesso em: 06 mai. 2018.

\_\_\_\_\_. **DNIT - ES 153:** Pavimentação asfáltica - Pré misturado a frio com emulsão catiônica convencional. Rio de Janeiro, 2010. 11 p. Disponível em: <[http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit153\\_2010\\_es.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit153_2010_es.pdf)>. Acesso em: 06 mai. 2018.

\_\_\_\_\_. **DNIT - ES 165:** Emulsões asfálticas para pavimentação. Rio de Janeiro, 2013. 5 p. Disponível em: <[http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-material-em/dnit165\\_2013\\_em.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-material-em/dnit165_2013_em.pdf)>. Acesso em 08 mai. 2018.

\_\_\_\_\_. **DNIT - ES 317:** Pavimentos flexíveis - Pré misturado a frio. Rio de Janeiro, 1997. 11 p. Disponível em: <<http://www1.dnit.gov.br/normas/PAV%20Flexiveis%20-%20Pre-Misturado%20a%20Frio.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE (DNIT). **DNIT - ME 155:** Material asfáltico - Determinação da penetração - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010. 7 p. Disponível em: <[http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit155\\_2010\\_me.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit155_2010_me.pdf)>. Acesso em: 02 set. 2018.

\_\_\_\_\_. **DNIT - ME 131:** Materiais asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola. Rio de Janeiro, 2010. 6 p. Disponível em: <[http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit131\\_2010\\_me.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit131_2010_me.pdf)>. Acesso em: 02 set. 2018.

\_\_\_\_\_. **DNIT - ME 136: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral.** Rio de Janeiro, 2010. 6 p. Disponível em: <[http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit136\\_2010\\_me.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dnit136_2010_me.pdf)>. Acesso em: 30 ago. 2018.

EING, Marco Antônio. **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, 2016.

GUIMARÃES, Antonio Carlos R.; LOURES, Rita de Cássia B. A. Utilização de misturas asfálticas usinadas à frio. In: XXIX CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA EM TRANSPORTE DA ANPET, 2015, Ouro Preto. **Anais...** p. 1-10. Rio de Janeiro: Anpet, 2015.

MENDES, Larissa de Oliveira. **Utilização do método Bailey para a seleção de agregados em dosagem de misturas asfálticas.** 2011. 131 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2011.

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, Leto. **Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico.** 1998. 259 p. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). São Paulo, 1998.

OLIVEIRA, Daniela Dutra de et al. **Estudo comparativo de concreto betuminoso a quente com diferentes tipos de ligante na região metropolitana de Goiânia.** 2014. 70 p. Trabalho de Conclusão de Curso II (Graduação) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

SANTANA, Humberto. **Manual de pré-misturado a frio.** Rio de Janeiro. Instituto Brasileiro de Petróleo - Comissão de asfalto, 1992.

SANTOS, Marcelo Adanilci dos. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas betuminosas a frio via ensaios de laboratórios.** 2002. 84 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2002.

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

\_\_\_\_\_. **Manual de técnicas de pavimentação.** 2. ed. São Paulo: PINI, 2007. v. 1.

SIROMA, Rodrigo Shigueiro. **Estudo da utilização de areia descartada de fundição (adf) na formulação e no desempenho mecânico de misturas de concreto asfáltico.** 2016. 135 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia de Infraestrutura, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2016.

TEIXEIRA, Luiz Henrique et al. **Manual de básico de emulsões asfálticas.** 2. ed. Rio de Janeiro. ABEDA, 2010.

ZIYANI, Layella. **Etude des phénomènes physico-chimiques à l'interface émulsion de bitume/substrat minéral – Application à la formulation de Bétons Bitumineux à l'Emulsion (BBE)**. 2013. 227 p. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Para L'ingénieur, École Doctorale: Sciences Pour L'ingénieur, Géosciences, Architecture, Institut Français Des Sciences Et Technologies Des Transports, de L'aménagement Et Des Réseaux (ifsttar), França, 2016.