

ALICE SERAFIM BÚRIGO

**INFLUÊNCIA DA FORMULAÇÃO DE ESQUELETOS MINERAIS
NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS DE
CONCRETO ASFÁLTICO**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Centro de Engenharias da Mobilidade
(CEM) da Universidade Federal de Santa
Catarina (UFSC), Campus Joinville, como
requisito parcial para a obtenção do título de
Engenheiro de Infraestrutura.**

**Joinville - SC
2015**

INFLUÊNCIA DA FORMULAÇÃO DE ESQUELETOS MINERAIS NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS DE CONCRETO ASFÁLTICO

ALICE SERAFIM BÚRIGO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Engenharias da Mobilidade (CEM) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Joinville, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Infraestrutura.

Curso: Engenharia de Infraestrutura

Orientador: Prof. Dr. Breno Salgado Barra

**Joinville - SC
2015**

BÚRIGO, Alice Serafim; BÚRIGO, A. S.

Influência da Formulação de Esqueletos Mineraiis no Comportamento Mecânico de Misturas de Concreto Asfáltico.
Joinville, 2015, volume único, 60p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura),
Curso de Graduação em Engenharia de Infraestrutura,
Centro de Engenharias da Mobilidade (CEM) – Campus Joinville
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Orientador: Prof. Dr. Breno Salgado Barra

Defesa: 01/07/2015

Palavras-chave: comportamento mecânico, misturas asfálticas, esqueleto mineral,
dosagem, granulometria.

**INFLUÊNCIA DA FORMULAÇÃO DE ESQUELETOS MINERAIS NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS DE CONCRETO
ASFÁLTICO**

Este trabalho foi julgado para a obtenção do título de Graduado em Engenharia de Infraestrutura, e aprovado em sua forma final pela banca examinadora perante o curso de Engenharia de Infraestrutura da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Joinville.


Prof.ª. Dr.ª. Carolina Brandão Pereira.
UFSC – Campus Joinville
Centro de Engenharias da Mobilidade (CEM)
Coordenadora do Curso Engenharia de Infraestrutura

Comissão Examinadora:


Prof. Dr. Breno Salgado Barra
Orientador
UFSC – Campus Joinville
Centro de Engenharias da Mobilidade (CEM)


Prof. Dr. Yader Alfonso Guerrero Pérez
UFSC – Campus Joinville
Centro de Engenharias da Mobilidade (CEM)


Prof.ª. Claudia Celene Zago Nery
UDESC – Centro de Ciências Tecnológicas (CCT)
Departamento de Engenharia Civil (DEC)

Joinville, 01 de Julho de 2015

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais Ivan e Tânia por todas as oportunidades que me foram concedidas, pela educação que sempre foi prioridade e por todo carinho e apoio durante minha jornada na graduação, principalmente por me proteger e me mostrar os verdadeiros e bons valores dentro da essência familiar.

À minha irmã, Elisa, que sempre me apoiou, confortou e me aconselhou durante esse período, que serviu de guia e exemplo durante meus anos de graduação.

Ao meu avô Venicius Búrigo, por sempre ser um exemplo de humildade e respeito, por ter construído nossa família com muito amor e união, por todas as histórias sempre muito bem guardadas, tenho orgulho imenso de ser sua neta!

À minha avó Eloyda Búrigo que a cada dia me faz lembrar o quão importante é zelar pela família.

À minha avó Maria Serafim (*in memoriam*), que mesmo por não ter me acompanhado durante esses anos de graduação, foi uma pessoa importantíssima em minha formação como pessoa.

À empresa envolvida neste trabalho, principalmente ao Pablo A. Silveira, pela colaboração, auxílio, disponibilidade de materiais e por estar sempre presente quando necessário.

Aos meus amigos que neste período tão importante de nossas vidas me apoiaram e incentivaram durante todos esses anos juntos, me divertiram quando o desânimo aparecia e entenderam quando estive ausente, pelo companheirismo nos estudos e compartilhamento de conhecimentos.

Ao meu professor e orientador Breno, por ter me apresentado à área de pavimentação e ter feito com que esse contato fosse cada vez mais interessante e produtivo, por estar sempre presente, me ajudando, guiando e corrigindo sempre que necessário para conclusão deste trabalho.

“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende.”

Leonardo da Vinci

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIACÕES	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
CAPÍTULO 1	
INTRODUÇÃO	01
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	01
1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA	02
1.2.1. Objetivo Geral	02
1.2.2. Objetivos Específicos	02
1.3. PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO	03
1.4. DELIMITAÇÕES DO ESPAÇO DA PESQUISA	04
1.5. IMPORTÂNCIA DO TEMA: JUSTIFICATIVAS	04
1.6. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	06
CAPITULO 2	
MÉTODOS PARA FORMULAÇÃO DOS ESQUELETOS MINERAIS	07
2.1. MÉTODO POR TENTATIVAS	07
2.2. MÉTODO RACIONAL	12
CAPÍTULO 3	
MATERIAIS E CURVAS GRANULOMÉTRICAS UTILIZADAS	16
3.1. MATERIAIS: CARACTERIZAÇÃO E PROPRIEDADES	16
3.1.1. Agregados Minerais	16
3.1.1.1. Diabásio	17
3.1.1.2. Areia	23
3.1.2. Ligante Betuminoso	24
3.2. CURVAS GRANULOMÉTRICAS SELECIONADAS	28
3.2.1. Curva Granulométrica por Tentativa	28

3.2.2. Curva Granulométrica Racional	31
3.2.3. Comparação das Curvas Granulométricas	33
CAPÍTULO 4	
ENSAIOS LABORATORIAIS	36
4.1. ENSAIO MARSHALL	36
4.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA	45
CAPÍTULO 5	
RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
5.1. ENSAIO MARSHALL	48
5.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA	
CAPÍTULO 6	
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	55
REFERÊNCIAS	58

LISTA DE ABREVIações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CP	Curva Prática
CT	Curva Teórica
DEINFRA	Departamento Estadual de Infraestrutura
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ES	Especificação de Serviço
IP	Índice de Pfeiffer e Van Doormaal (Suscetibilidade Térmica)
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LTI	Laboratório de Técnicas em Infraestrutura
ME	Método de Ensaio
NBR	Norma Brasileira
PR	Paraná
RBV	Relação Betume/Vazios
S.A.	Sociedade Anônima
SBM	Sul Brasileira de Mineração
SC	Santa Catarina
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
%V	Percentual de Vazios
VAM	Volume de Vazios do Agregado Mineral
VCB	Vazios Cheios de Betume

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -	Faixa "C" DNIT	09
Figura 2.2 -	Curva granulométrica prática enquadrada na Faixa "C" DNIT (adaptado de BARRA, 2005)	11
Figura 2.3 -	Curva granulométrica teórica (BARRA, 2009)	15
Figura 3.1 -	Britagem Rio Maior – Urussanga/SC	16
Figura 3.2 -	Peneiramento do agregado mineral (a) quarteamento e (b) agitador de peneiras.	17
Figura 3.3 -	Granulometria do agregado mineral diabásio	18
Figura 3.4 -	Ensaio de massa específica real do agregado	19
Figura 3.5 -	Ensaio abrasão Los Angeles	20
Figura 3.6 -	Ensaio de durabilidade	21
Figura 3.7 -	Ensaio de adesividade	22
Figura 3.8 -	Ensaio de absorção	23
Figura 3.9 -	Granulometria dos agregados minerais	23
Figura 3.10 -	Imagens microscópicas de alta resolução ampliadas em 31 vezes das partículas de (a) areia natural e (b) diabásio britado	24
Figura 3.11 -	Ensaio de penetração	25
Figura 3.12 -	Ensaio ponto de amolecimento anel e bola	26
Figura 3.13 -	Ensaio de viscosidade Saybolt-Furol	27
Figura 3.14 -	Curva de viscosidade Saybolt-Furol do CAP 50/70	28
Figura 3.15 -	Curva Prática (SETEP, 2013)	29
Figura 3.16 -	Comparação das curvas práticas, com (CP) e sem areia (CP')	30
Figura 3.17 -	Curva Teórica (CT) (BARRA, 2009)	33
Figura 3.18 -	Curvas granulométricas das misturas asfálticas em relação à faixa D do DEINFRA	34
Figura 4.1 -	Aparelho de compactação de corpos de prova ensaio Marshall	37
Figura 4.2 -	Processo de mistura do esqueleto mineral ao ligante betuminoso	38

Figura 4.3 -	Procedimento para modelagem dos corpos de prova	39
Figura 4.4 -	Extração dos corpos de prova	39
Figura 4.5 -	Corpos de prova Marshall	40
Figura 4.6 -	Determinação da massa específica aparente – pesagem hidrostática	42
Figura 4.7 -	Corpos de prova imersos em água	44
Figura 4.8 -	Rompimento dos corpos de prova	45
Figura 4.9 -	Ensaio de compressão diametral de corpo de prova cilíndrico (DNIT-ME 136/2010)	46
Figura 4.10 -	Execução do ensaio de resistência à tração indireta	47
Figura 5.1 -	Representação gráfica dos parâmetros do ensaio Marshall: (a) Estabilidade; (b) Fluência; (c) Densidade Aparente; (d) Teor de Vazios; (e) Vazios Cheios com Betume (VCB); (f) Vazios do Agregado Mineral (VAM); e (g) Relação Betume/Vazios (RBV).	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Faixas granulométricas para pavimentos flexíveis (DNIT-ES 031, 2006)	08
Tabela 2.2 - Faixa Granulométrica para Concreto Asfáltico Usinado a Quente (DEINFRA-SC-ES-P-05/92, 1992)	09
Tabela 2.3 - Composição granulométrica de uma curva prática (adaptado de BARRA, 2005)	10
Tabela 2.4 - Composição granulométrica de uma curva teórica (BARRA, 2009)	14
Tabela 3.1 - Parâmetros de caracterização do agregado mineral diabásio	18
Tabela 3.2 - Parâmetros de caracterização do ligante betuminoso	25
Tabela 3.3 - Composição da curva granulométrica formulada pelo método de tentativa (SETEP, 2013)	29
Tabela 3.4 - Composição da curva granulométrica formulada pelo método de tentativa sem a presença de frações de areia	30
Tabela 3.5 - Composição da curva granulométrica formulada pelo método racional (BARRA, 2009)	32
Tabela 3.6 - Distribuição das frações granulométricas do esqueleto mineral	33
Tabela 5.1 - Resumo dos valores médios obtidos no ensaio Marshall das curvas CT e CP, em relação aos valores normativos de referência	48
Tabela 5.2 - Resultados da média dos valores de resistência à tração indireta das misturas asfálticas CT e CP	54

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho tange à análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas densas concebidas a partir de esqueletos minerais formulados por dois diferentes métodos: tentativa e teórico. O método por tentativa é utilizado tradicionalmente na produção de misturas asfálticas no Brasil, visando o enquadramento das formulações em faixas granulométricas normatizadas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), dispondo-se via de regra de granulares com graduações demasiadamente heterogêneas e mal definidas em suas composições provenientes dos processos de beneficiamento nas pedreiras, dificultando tanto o controle de produção quanto a obtenção de qualidade do esqueleto mineral formulado, conseqüentemente produzindo não raro misturas asfálticas com desempenhos mecânicos indesejáveis. O método teórico proposto utiliza a equação de Talbot, a partir da fixação de parâmetros característicos da curva granulométrica que se deseja formular, levando em conta a produção de frações individuais correspondentes a cada malha da série de peneiras escolhida pelo projetista, sem a necessidade de utilização de faixa granulométrica. Para tanto, um estudo de caso experimental em laboratório foi procedido para comparação dos resultados referentes a cada tipo de formulação do esqueleto mineral. Ensaios de caracterização tanto do agregado como do ligante betuminoso foram realizados para adquirir um maior conhecimento das propriedades dos materiais utilizados, a saber: rocha de origem diabásica e areia natural provenientes da região sul do Estado de Santa Catarina e ligante betuminoso CAP 50/70 oriundo de Araucária, no Estado do Paraná. A metodologia Marshall, em função de ser oficialmente utilizada no Brasil, foi escolhida para estabelecer a dosagem ótima do ligante betuminoso e a determinação da resistência das misturas asfálticas. Complementarmente foram realizados ensaios de tração indireta. Os resultados obtidos indicam maior eficiência de uma mistura asfáltica quando o esqueleto mineral é concebido a partir do método teórico, pois resulta em um maior controle da formulação e conseqüentemente atribui à mistura um melhor desempenho mecânico.

Palavras-chave: comportamento mecânico, misturas asfálticas, esqueleto mineral, dosagem, granulometria.

ABSTRACT

The main aim of this research is to analyze the mechanical behavior of dense asphalt mixes regarding aggregate gradations formulated by two different methods: by trial and theoretical. The method by trial is traditionally used for formulating asphalt mixes in Brazil, intending to obtain granulometric curves with percent fractions that respect the limits standardized by Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), in which these aggregate gradations normally contain expressive heterogeneity regarding the particle sizes of the amounts crushed in the quarries, harming as the production control as the quality of the mineral arrangement obtained, normally undesirable. As a result, it is not rare to verify asphalt mix formulations with unsuitable mechanical performance in the field. Otherwise, the theoretical method proposed in this research is applied by using Talbot's Equation by fixing characteristic parameters of the granulometric curve to be formulated, taking into account the production of individual granular fractions, i.e., corresponding to particles sizes retained on each sieve mesh chosen by the designer, with no need to use standardized limits. The laboratory campaign was proceeded by comparison between the results related to by trial and theoretical methods. They were carried out characterization tests with the aggregates, as well as with the asphalt binder, in order to get more knowledge on the properties regarding the materials tested, such as: diabasic crushed rock and natural sand extracted from southern region of Santa Catarina State, besides the asphalt binder qualified by penetration test as 50/70 supplied by a refinery plant located in Araucária, at Paraná State. The Marshall dosage method was chosen to determine the optimum asphalt binder content, due to be the official technical procedure adopted in Brazil. In addition, indirect tensile tests were realized to aid in the final optimum content choice. The results obtained indicate better efficiency of the asphalt mix formulated with use of theoretical method than that based on by trial principles, in order to improve the aggregate gradation control and to assign best mechanical performance to the asphalt mixes.

Key-words: mechanical behavior, asphalt mixes, aggregate gradation, dosage, granulometry.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O transporte rodoviário no Brasil hoje é o principal meio de transporte do país, tanto de carga como de passageiros, o que influencia diretamente em sua economia. Uma quantidade significativa da malha rodoviária é danificada por diversos motivos, como por exemplo, cargas excessivas sobre o pavimento, má formulação de misturas asfálticas, falta de manutenção nas rodovias, falhas de projeto, etc (MORILHA, 2004).

As condições do transporte rodoviário deveriam ser diretamente proporcionais à qualidade das vias, ou seja, quando se dispõe de uma estrada de alta qualidade, o transporte atende adequadamente à trilogia: segurança, conforto e economia. A má formulação tanto da dosagem, como do esqueleto mineral da mistura asfáltica de uma estrada gera desconforto para o usuário além de ser mais suscetível a acidentes e também necessitada de manutenções precoces. Por esse motivo, há necessidade constante de estudos relacionados à formulação de misturas asfálticas (BARRA, 2005).

A composição dos agregados e do ligante betuminoso na mistura asfáltica influencia diretamente na sua qualidade e longevidade. A fim de se alcançar uma mistura ideal, é necessário um maior conhecimento dos materiais envolvidos. A qualidade do esqueleto mineral é muito importante, visto que os agregados compõem uma grande parcela da mistura asfáltica, assim como o ligante betuminoso, que é o responsável pela consistência da mistura e quando dosado ao teor ótimo, induz um bom comportamento mecânico.

A presente pesquisa visa avaliar a eficiência de uma dosagem bem formulada, com um maior controle do traço do agregado por definir um esqueleto mineral mais adequado e que proporcione maior resistência à mistura asfáltica, e assim, resultar em um pavimento de maior qualidade.

Um estudo de caso foi realizado, onde foram comparadas formulações de curvas granulométricas de uma mistura asfáltica desenvolvida por uma empresa e outra baseada na pesquisa de BARRA (2009).

O trabalho desenvolvido foi de cunho experimental, baseado em resultados de ensaios de laboratório utilizando materiais (ligante betuminoso e agregado) disponibilizados pelo laboratório da SETEP CONSTRUÇÕES S.A., que fica localizado na empresa Sul Brasileira de Mineração (SBM) (pertencente ao grupo SETEP). Os resultados foram comparados com dados laboratoriais resultantes de um projeto de mistura asfáltica realizado pela empresa em uma de suas obras.

1.2. OBJETIVOS DA PESQUISA

1.2.1. Objetivo Geral

Realizar, através de ensaios laboratoriais, um estudo comparativo quanto ao comportamento mecânico de misturas de concreto asfáltico, a partir da formulação de esqueletos minerais compostos por curvas granulométricas levando em conta o método por tentativa e o método racional e assim, avaliar qual a proposta de mistura é mais adequada para um melhor desempenho mecânico na camada de rolamento.

1.2.2. Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são:

- Compor esqueletos granulométricos utilizando os métodos de formulação racional e por tentativa, sob a forma comparativa, a partir de um estudo de caso prático.
- Analisar, através do desempenho mecânico das misturas asfálticas formuladas, a influência da composição granulométrica;
- Indicar qual mistura asfáltica é mais apropriada para aplicação na camada de rolamento, dependendo das condições de desempenho mecânico.

1.3. PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO

Para fins de comparação entre duas misturas asfálticas com diferentes formulações, uma empresa que trabalha no ramo de pavimentação foi escolhida para realização de um estudo de caso. A empresa SETEP CONSTRUÇÕES S.A. atua na região sul do Brasil executando obras tanto para prefeituras como para o Departamento Estadual de Infraestrutura (DEINFRA). Tem sua sede na cidade de Criciúma/SC e presta serviços especializados na área da construção rodoviária, engenharia civil, engenharia de agrimensura, produção e vendas de massa asfáltica e materiais britados.

Para a realização dos estudos laboratoriais, materiais granulares (brita e areia) foram disponibilizados pelo laboratório da SETEP localizado na empresa Sul Brasileira de Mineração (SBM) (pertencente ao grupo SETEP) na cidade de Urussanga/SC, assim como o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP 50/70), de agora em diante denominado de ligante betuminoso, proveniente da refinaria REPAR da empresa PETROBRÁS S.A. localizada no município de Araucária/PR. Com os materiais disponíveis, foram realizados ensaios de caracterização do agregado e do ligante betuminoso para o conhecimento de suas propriedades. O laboratório da SETEP CONSTRUÇÕES S.A. também disponibilizou o projeto da mistura asfáltica realizado pela empresa, com a formulação da curva granulométrica a partir do método por tentativa, que compreende a solução adotada na Rodovia SC-446 no trecho Criciúma/Forquilha - Lote 04, para comparação de resultados.

A curva granulométrica escolhida para comparação calculada com base em uma metodologia racional, constituída a partir da equação de *Füller-Talbot* tendo como referência a pesquisa de BARRA (2009). Ensaios laboratoriais foram realizados, como: ensaio Marshall, que tem a finalidade de indicar o teor ótimo de ligante betuminoso para a mistura, e o ensaio de resistência à tração indireta por compressão diametral, visando a verificação complementar do desempenho mecânico do material. Neste contexto, é importante esclarecer que a curva granulométrica por tentativa não foi reproduzida em laboratório nesta pesquisa, em que os dados resultantes do projeto SETEP (2013) foram utilizados na comparação de resultados à metodologia racional proposta.

Foram moldados 25 corpos de prova cilíndricos a partir do ensaio Marshall com a formulação do esqueleto mineral a partir do método racional. Em seguida, 6 corpos de prova foram moldados para realização do ensaio de resistência à tração indireta para fins de certificação sobre o teor de ligante betuminoso indicado como ótimo pela metodologia Marshall.

O total de material utilizado para fins de ensaios laboratoriais foram aproximadamente 85kg de agregados e 3 litros de ligante betuminoso CAP 50/70.

A partir dos resultados obtidos, foi possível verificar qual solução de formulação de mistura asfáltica é adequada e estabelecer conclusões e recomendações acerca do tema pesquisado.

1.4. DELIMITAÇÕES DO ESPAÇO DA PESQUISA

O material pétreo estudado é oriundo da pedreira Sul Brasileira de Mineração (SBM) localizada no km 10 + 800 LD, da rodovia SC-446 na jazida Rio Maior no município de Urussanga, no Estado de Santa Catarina, sendo a pedreira de propriedade da empresa SETEP CONSTRUÇÕES S.A.. A areia grossa é proveniente do Areal Rudimar Coral, na cidade de Morro da Fumaça, também pertencente ao Estado supracitado.

O ligante betuminoso CAP 50/70 é produzido na refinaria REPAR no município de Araucária (Empresa da PETROBRÁS S.A.), no Estado do Paraná, e foi fornecido pelo laboratório da empresa SETEP CONSTRUÇÕES S.A.

A campanha experimental foi desenvolvida na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Joinville, mais especificamente no Laboratório de Técnicas em Infraestrutura (LTI), onde foram executados os ensaios de caracterização tanto dos agregados quanto do ligante, e também os ensaios Marshall e de resistência à tração indireta por compressão diametral.

1.5. IMPORTÂNCIA DO TEMA: JUSTIFICATIVAS

As misturas de concreto asfáltico formuladas no Brasil, de um modo geral, vêm sendo concebidas a partir de uma metodologia empírica, em que as curvas granulométricas que compõem os esqueletos minerais são obtidas por tentativa

de enquadramento dos percentuais referentes às graduações dos agregados produzidos nas centrais de britagem, em relação aos limites normativos de faixas granulométricas homologadas pelas especificações técnicas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) ou dos respectivos órgãos estaduais e municipais responsáveis pelas obras de infraestrutura. Essas faixas granulométricas compreendem uma amplitude exacerbada em seus limites percentuais correspondentes às zonas de abrangência dos materiais a serem utilizados para suas composições (BARRA, 2005).

Dentro de uma mesma faixa considerada, pode haver variações nas concepções e no desempenho das misturas asfálticas, pois ela comporta diferentes formulações nos limites de sua amplitude, o que pode acarretar em produções de misturas com baixos padrões de qualidade e assim, refletir em um comportamento mecânico precário no campo, verificado em estruturas de pavimento com vida útil bastante reduzida em relação ao período estipulado em projeto (MOMM, 1998).

Ainda, algumas dificuldades são encontradas no cenário produtivo e comercial do Brasil quanto aos insumos utilizados nas obras de pavimentação, as quais contribuem decisivamente para o agravamento dos fatores descritos anteriormente, tais como: o beneficiamento deficiente dos granulares quanto à homogeneidade dos tamanhos das frações correspondentes a uma determinada graduação, a morfologia variável dos grãos obtidos nas pedreiras, a disponibilidade de areias de cava portadoras de frações com morfologia esférica e superfície lisa, além da utilização de ligantes betuminosos normalmente suscetíveis à severidade dos gradientes térmicos característicos dos climas tropicais e subtropicais predominantes no país.

Neste contexto, tem-se que o Estado de Santa Catarina convive cotidianamente com as mesmas situações do cenário nacional descrito. Desta forma, com o intuito de contribuir com soluções para as problemáticas do Estado, mais especificamente de sua região sul, a presente pesquisa avalia comparativamente o comportamento mecânico de duas misturas asfálticas, a partir de esqueletos minerais formulados com base em uma metodologia racional, com o uso da Equação de *Füller-Talbot*, em relação à metodologia

empírica por tentativa utilizada normalmente em serviços de pavimentação na região referida.

1.6. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A pesquisa está dividida em capítulos, onde:

- Capítulo 1:** introdução ao tema abordado na pesquisa, deixando o leitor a par do problema, objetivos e justificativa do autor.
- Capítulo 2:** abordagem das metodologias de formulação dos esqueletos minerais utilizados na composição das misturas de concreto asfáltico estudadas.
- Capítulo 3:** caracterização e propriedades dos materiais utilizados e considerações sobre as curvas granulométricas;
- Capítulo 4:** procedimentos laboratoriais para fins de avaliação do comportamento mecânico das misturas asfálticas. Os ensaios realizados e suas correspondentes normas são relatados;
- Capítulo 5:** expõe os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais e discorre sobre as análises dos parâmetros determinados;
- Capítulo 6:** apresenta as conclusões referentes à pesquisa realizada, bem como estabelece recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

MÉTODOS PARA FORMULAÇÃO DOS ESQUELETOS MINERAIS

Há diversos tipos de métodos para projetar uma mistura asfáltica desejando a obtenção de uma composição do esqueleto mineral como, por exemplo, método por tentativas, método algébrico, método gráfico de Rothfuchs, etc (SENÇO, 2008).

Para atingir a finalidade do trabalho, apenas dois métodos serão apresentados, o método utilizado no projeto da empresa (SETEP, 2013) que é o método por tentativas e o método proposto neste trabalho, o método racional (BARRA, 2005).

2.1. MÉTODO POR TENTATIVAS

No Brasil, é comum o emprego do método Marshall para a dosagem de misturas asfálticas, ou seja, definição do teor ótimo de ligante que deve ser adicionado ao agregado para que a mistura atenda os requisitos normativos prescritos na Especificação de Serviço de pavimentos flexíveis (DNIT-ES 031, 2006).

Esse método de dosagem é regido pela norma DNER-ME 043/95 (1995) e será apresentado no Capítulo 4.

A composição do esqueleto mineral da mistura asfáltica é determinada a partir de alguns métodos, como mencionado anteriormente. O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), é o órgão brasileiro que impõe o uso do método por tentativas para compor a curva granulométrica, e preconiza faixas granulométricas para o enquadramento dessa curva.

Primeiramente é necessária a escolha da faixa granulométrica que será utilizada para que a mistura seja enquadrada e assim, aceita para aplicação em obra. Segundo o Departamento Estadual de Infraestrutura (DEINFRA) (DEINFRA-SC-ES-P-05/92, 1992), a faixa granulométrica a ser adotada deverá ser selecionada em função da utilização prevista para a mistura asfáltica, ou

seja, se a mesma for aplicada em camadas, por exemplo, de rolamento, ligação ou reperfilagem.

A Tabela 2.1 mostra a relação das faixas que o DNIT dispõe para serem escolhidas para o enquadramento.

Tabela 2.1 - Faixas granulométricas para pavimentos flexíveis (DNIT-ES 031, 2006).

Abertura de Peneira		Percentagem 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	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	2,0	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%

O DEINFRA também recomenda algumas faixas e elas são diferentes das do DNIT. As variadas opções de faixas do DEINFRA são apresentadas na Tabela 2.2. O projeto executado pela empresa (SETEP, 2013), por exemplo, utilizou a faixa “D” do DEINFRA. No exemplo que será mostrado a diante, foi escolhida a faixa “C” do DNIT.

Tabela 2.2 - Faixa Granulométrica para Concreto Asfáltico Usinado a Quente (DEINFRA-SC-ES-P-05/92, 1992).

Abertura de Peneira		Porcentagem passando em peso (%)					
ASTM	(mm)	A	B	C	D	E	F
2"	50,8	100	-	-	-	-	-
1 1/2"	38,1	95 - 100	100	-	-	-	-
1"	25,4	75 - 100	95 - 100	-	-	-	-
3/4"	19,1	60 - 90	80 - 100	100	100	100	-
1/2"	12,7	-	60 - 90	85 - 100	90 - 100	80 - 100	-
3/8"	9,5	35 - 65	45 - 80	75 - 100	76 - 93	70 - 90	100
Nº 4	4,8	25 - 50	28 - 60	50 - 85	44 - 74	50 - 70	75 - 100
Nº 10	2,0	20 - 40	20 - 45	30 - 75	25 - 55	33 - 48	50 - 90
Nº 40	0,42	10 - 30	10 - 32	15 - 40	9 - 27	15 - 25	20 - 50
Nº 80	0,18	5 - 20	8 - 20	8 - 30	4 - 17	8 - 17	7 - 28
Nº 200	0,075	1 - 8	3 - 8	5 - 10	2 - 10	4 - 10	3 - 10
Camadas		Ligação	Ligação ou rolamento	Rolamento			Reperfilagem

A partir da escolha da faixa, a composição do esqueleto mineral deverá ser definida e enquadrada na mesma. A Figura 2.1 ilustra uma faixa granulométrica (faixa C do DNIT) como exemplificação no gráfico: porcentagem passante em relação à abertura das peneiras.

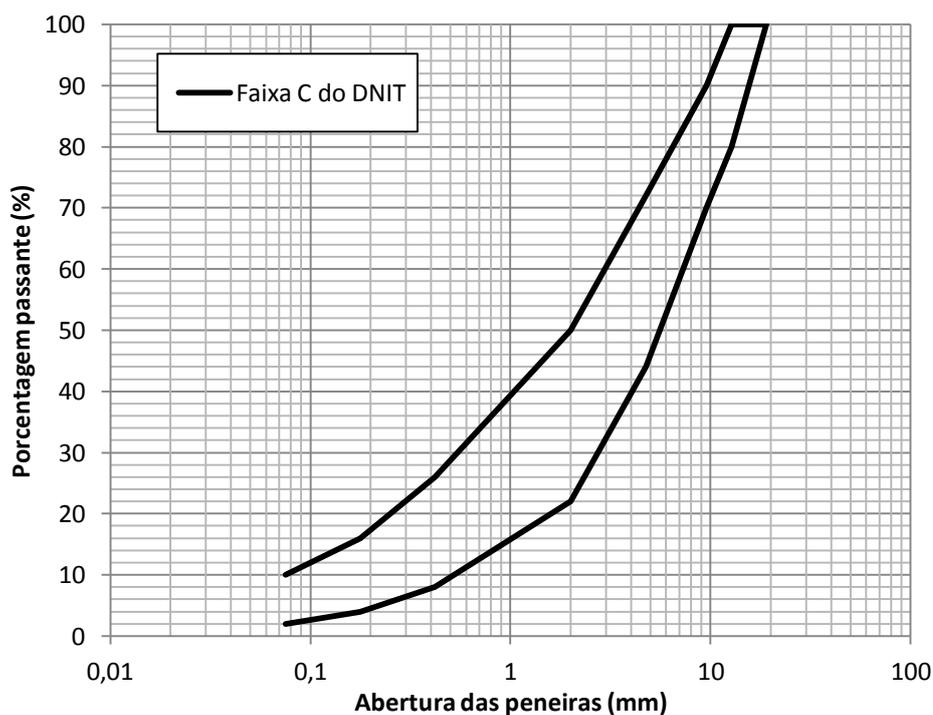


Figura 2.1 - Faixa "C" DNIT.

O método por tentativa é um método empírico, pois se baseia em erro e acerto da estimativa das percentagens a serem utilizadas de cada fração de agregado. É necessário observar a granulometria de cada material que será utilizado na mistura para montar a curva granulométrica composta da junção de várias frações a definir o esqueleto mineral.

A partir de então, são estimadas percentagens para cada granular, onde a soma de cada abertura de peneira deve estar enquadrada no correspondente valor da faixa granulométrica escolhida. Caso não ocorra de se enquadrar na faixa especificada, alguns ajustes nas percentagens devem ser feitos até que o resultado seja satisfatório.

Um dos motivos para que esse método seja falho, é a forma de comercialização dos agregados no Brasil. Dentro de uma graduação específica, por exemplo, a brita 1, há uma heterogeneidade tão forte dos diâmetros presentes nas amostras, que resultam em frações coincidentes com outras graduações comerciais, dificultando o controle da qualidade da produção, ou seja, não há uma granulometria bem definida após o processo de beneficiamento formando esqueletos minerais instáveis mecanicamente.

A Tabela 2.3 foi extraída e modificada de um estudo (BARRA, 2005) para exemplificação. Abaixo de cada agregado descrito, consta o resultado do estudo granulométrico dos mesmos e ao lado, a percentagem necessária do agregado para que a mistura resultante seja enquadrada na faixa normativa.

Tabela 2.3 - Composição granulométrica de uma curva prática (adaptado de BARRA, 2005).

Peneiras	AGREGADO "A"		AGREGADO "B"		AGREGADO "C"		AGREGADO "D"		AGREGADO "E"		Mistura	Faixa "C" DNIT	
	Brita 01	27%	Brita 00	36%	Pó de Pedra	28%	Areia	7%	Fíler	2%			
1 1/2	100	27,0	100	36,0	100	28,0	100	7,0	100	2,0	100,0	100	100
1	100	27,0	100	36,0	100	28,0	100	7,0	100	2,0	100,0	100	100
3/4	100	27,0	100	36,0	100	28,0	100	7,0	100	2,0	100,0	100	100
1/2	65,1	17,6	98,8	35,6	100	28,0	100	7,0	100	2,0	90,1	80	100
3/8	19,2	5,2	90,8	32,7	100	28,0	100	7,0	100	2,0	74,9	70	90
Nº 4	0,6	0,2	35,5	12,8	99,4	27,8	100	7,0	100	2,0	49,8	44	72
10	0,4	0,1	5,9	2,1	82,6	23,1	99,8	7,0	100	2,0	34,3	22	50
40	0,3	0,1	1,4	0,5	52,5	14,7	75,1	5,3	100	2,0	22,5	8	26
80	0,3	0,1	0,6	0,2	35,6	10,0	21,6	1,5	77,1	1,5	13,3	4	16
200	0,1	0,0	0,2	0,1	8,8	2,5	1,6	0,1	50	1,0	3,7	2	10

A Figura 2.2 a seguir ilustra o encaixe da curva granulométrica resultante na faixa “C” do DNIT.

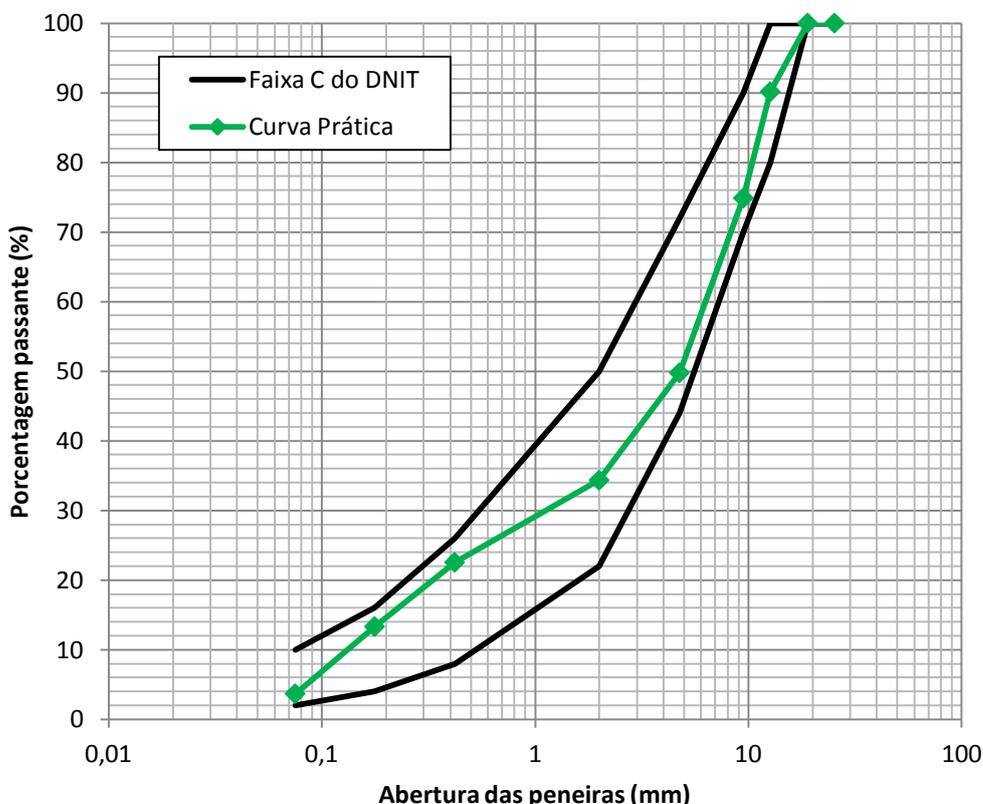


Figura 2.2 - Curva granulométrica prática enquadrada na Faixa "C" DNIT (adaptado de BARRA, 2005).

A partir da Figura 2.2 é possível extrair uma análise sobre a curva granulométrica. As curvas de cor preta mostram a delimitação da faixa “C” do DNIT, onde dentro da mesma deve-se situar a curva granulométrica resultante do método por tentativa correspondente à curva de cor verde.

“Uma curva resultante que tocasse alternadamente os limites superiores e inferiores da faixa especificada, representaria um material mal distribuído, embora, teoricamente, pudesse satisfazer essa especificação” (SENÇO, 2008; p. 278). Na Figura 2.2 é possível observar que a curva tende a encostar-se aos limites superior e inferior da faixa escolhida, ou seja, por mais que essa curva possa ser aprovada pelo órgão regulamentador, ela pode apresentar um mau comportamento mecânico.

Por esse motivo, pode-se dizer que as faixas granulométricas são muito permissíveis, com ampla possibilidade de se obter diversas composições, com

desempenhos mecânicos variados, nem sempre recomendadas para aplicações em serviços de pavimentação.

2.2. MÉTODO RACIONAL

Outra forma de escolha da composição granulométrica dos agregados na mistura asfáltica é o método racional, também conhecido como método teórico. Nesse método são determinadas as peneiras que servirão para execução do traço, a fim de que os diâmetros menores preencham gradualmente os vazios formados pelo entrosamento das partículas maiores.

Neste contexto, são fixados dois diâmetros: o diâmetro mínimo e o máximo da composição do esqueleto mineral referente à série de peneiras escolhida pelo projetista. A partir de então, é calculado o percentual de cada fração correspondente à 100% das partículas passantes, levando em conta a variação de diâmetro que ocorre em todas as peneiras, de acordo com Equação 2.1 proposta por *Füller-Talbot* (DNIT, 2006).

$$\%p = a \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad (2.1)$$

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 (mm);
- D = tamanho máximo, abertura da peneira que passa 100% (mm);
- n = expoente.

O expoente n é obtido a partir da Equação 2.2.

$$n = \frac{\log(d) - \log(100)}{\log\left(\frac{d}{D}\right)} \quad (2.2)$$

onde:

n = expoente;

d = abertura de uma dada peneira;

D = tamanho máximo, abertura da peneira que passa 100% (mm).

Os cálculos resultam numa curva contínua com maior proporção entre os grãos com um determinado expoente “ n ”, que determina se a curva é aberta, densa ou tipo macadame como descrito a seguir (DNIT, 2006):

- Agregado de graduação densa: $0,35 < n < 0,55$
- Agregado de graduação aberta: $0,55 < n < 0,75$
- Agregado tipo macadame: $D \cong 2d$; $n \cong 1,0$

A graduação densa acarreta uma estabilidade superior por causa do maior contato entre as partículas e conseqüentemente reduzidos vazios no agregado mineral. Porém, caso não houver um espaço de vazios para que o volume do ligante seja incorporado, pode causar exsudação da mistura (BERNUCCI *et al.*, 2010), suscetível a segregação, onde os agregados podem ter a tendência de ficarem soltos, comprometendo na durabilidade da mistura.

A graduação do tipo aberta funciona ao contrário, há um excesso de vazios, pois as partículas têm maior diâmetro, resultando em pouco contato entre grãos. Por isso é necessário analisar se a granulometria resultante é adequada para a obra onde será aplicada.

O método racional não emprega o uso de faixas de enquadramento como o método por tentativas, pois utiliza diâmetros bem definidos ao longo da composição do esqueleto mineral.

Para exemplificar este método, a Figura 2.3 mostra a curva resultante da aplicação da Equação 2.1.

Na Tabela 2.4 constam os valores das percentagens passantes correspondentes a cada peneira selecionada pelo projetista que foi calculada a

partir da Equação 2.1. O diâmetro fixado como o máximo (D) foi igual a 19,1mm e o mínimo (d) foi de 0,075mm. Também foi determinada a quantidade passante na peneira 0,075mm igual a 6% para obter o valor do expoente n, nesse caso, igual a 0,51, o que determina que essa curva é do tipo densa conforme apresentado no cálculo a seguir, correspondente à Equação 2.2 já apresentada.

$$n = \frac{\log(d) - \log(100)}{\log\left(\frac{d}{D}\right)} = \frac{\log(6) - \log(100)}{\log\left(\frac{0,075}{19,1}\right)} = 0,51$$

A percentagem referente a cada abertura de peneira, como comentado, é calculada a partir da Equação 2.1 de *Füller-Talbot*, o cálculo a seguir exemplifica a determinação da percentagem passante na peneira de abertura igual a 9,5 mm, em que foi utilizada a mesma lógica para obtenção dos percentuais das demais peneiras.

$$\%p = a \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n = 100 \cdot \left(\frac{9,5}{19,1}\right)^{0,51} = 70,1\%$$

Tabela 2.4 - Composição granulométrica de uma curva teórica (BARRA, 2009).

Curva granulométrica teórica	
Peneiras (mm)	% passante
19,1	100
12,7	81,3
9,5	70,1
4,76	49,4
2,2	33,4
1,2	24,5
0,6	17,2
0,3	12,1
0,15	8,5
0,075	6

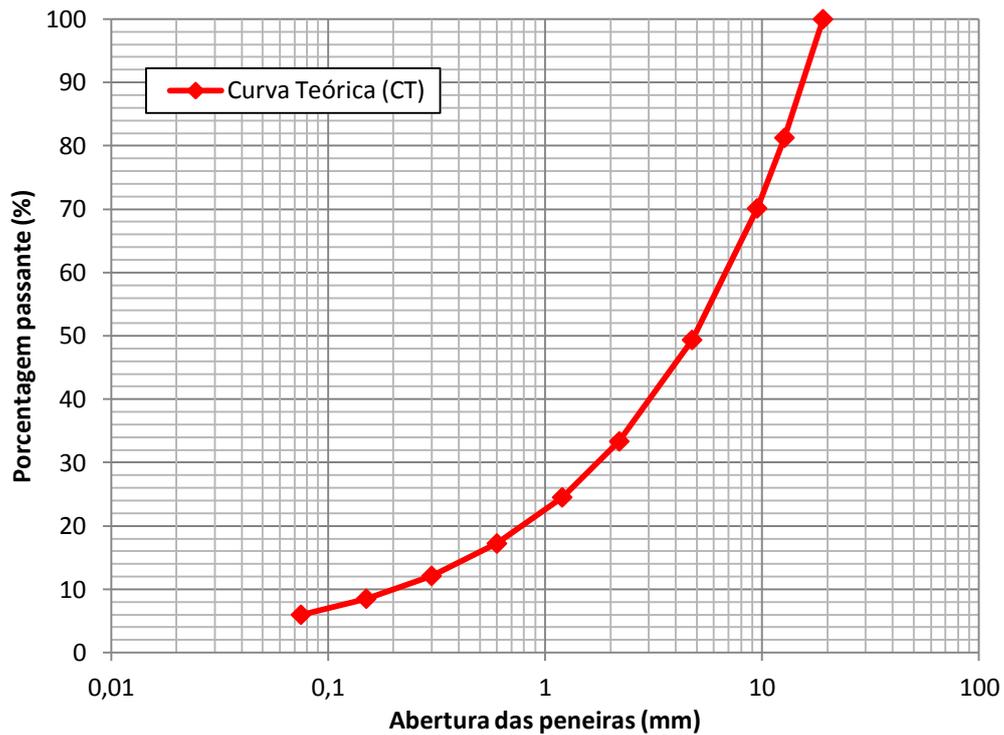


Figura 2.3 – Curva granulométrica teórica (BARRA, 2009).

Ao observar a curva granulométrica da Figura 2.3, nota-se que a trajetória da mesma é mais bem definida quando comparada à curva prática exemplificada na Figura 2.2. Esta descontinuidade bem definida da curva teórica é resultante do preenchimento gradativo dos vazios deixados pelos agregados de maior diâmetro por aqueles de menor diâmetro, de forma contínua à razão da metade dos diâmetros imediatamente superiores, sobretudo nas frações médias e finas (4,76mm a 0,075mm; Tabela 2.4), propiciando um maior controle da formulação do esqueleto mineral pelo projetista.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E CURVAS GRANULOMÉTRICAS UTILIZADAS

3.1. MATERIAIS: CARACTERIZAÇÃO E PROPRIEDADES

A seguir serão apresentadas considerações sobre alguns parâmetros de caracterização e das propriedades físicas e mecânicas dos materiais utilizados na pesquisa.

3.1.1. Agregados Minerais

O agregado mineral pétreo aplicado na mistura asfáltica realizada pela empresa (SETEP, 2013) e também na mistura formulada em laboratório é proveniente de rochas de origem diabásica. Ele é extraído na localidade de Rio Maior, município de Urussanga/SC, pela empresa Sul Brasileira de Mineração (SBM) pertencente ao grupo SETEP.



Figura 3.1 - Britagem Rio Maior – Urussanga/SC.

Além da pedra britada (brita $\frac{3}{4}$ ", pedrisco e pó de pedra) também foi utilizada areia na mistura realizada pela empresa (SETEP, 2013). A areia é proveniente do Areal Rudimar Coral no município de Morro da Fumaça/SC.

3.1.1.1. Diabásio

La SERNA e REZENDE (2009) afirmam que o diabásio, assim como o basalto, é uma rocha básica, tem alta resistência mecânica e, como suas propriedades físicas e mecânicas são boas, o uso como pedra britada é satisfatório, porém, nas frações mais finas, apresentam características indesejáveis como fragmentos achatados e angulosos.

As características apontadas no parágrafo acima foram possíveis de identificação a partir de análises de ensaios laboratoriais de caracterização do agregado. Os ensaios realizados foram: abrasão Los Angeles, durabilidade, densidade real, índice de forma, absorção e adesividade.

Em um primeiro momento, o peneiramento de cada fração foi realizado (brita $\frac{3}{4}$ ", pedrisco e pó de pedra). As aberturas das peneiras utilizadas foram: 19,10mm; 12,70mm; 9,50mm; 4,80mm; 2,20mm; 1,20mm; 0,60mm; 0,30mm; 0,15mm; 0,075mm.

A Figura 3.2 mostra o quartejamento que foi realizado antes da execução do peneiramento e também o agitador de peneiras que foi utilizado.



Figura 3.2 - Peneiramento do agregado mineral (a) quartejamento e (b) agitador de peneiras.

A Figura 3.3 mostra as curvas granulométricas de cada fração do agregado mineral resultadas do peneiramento.

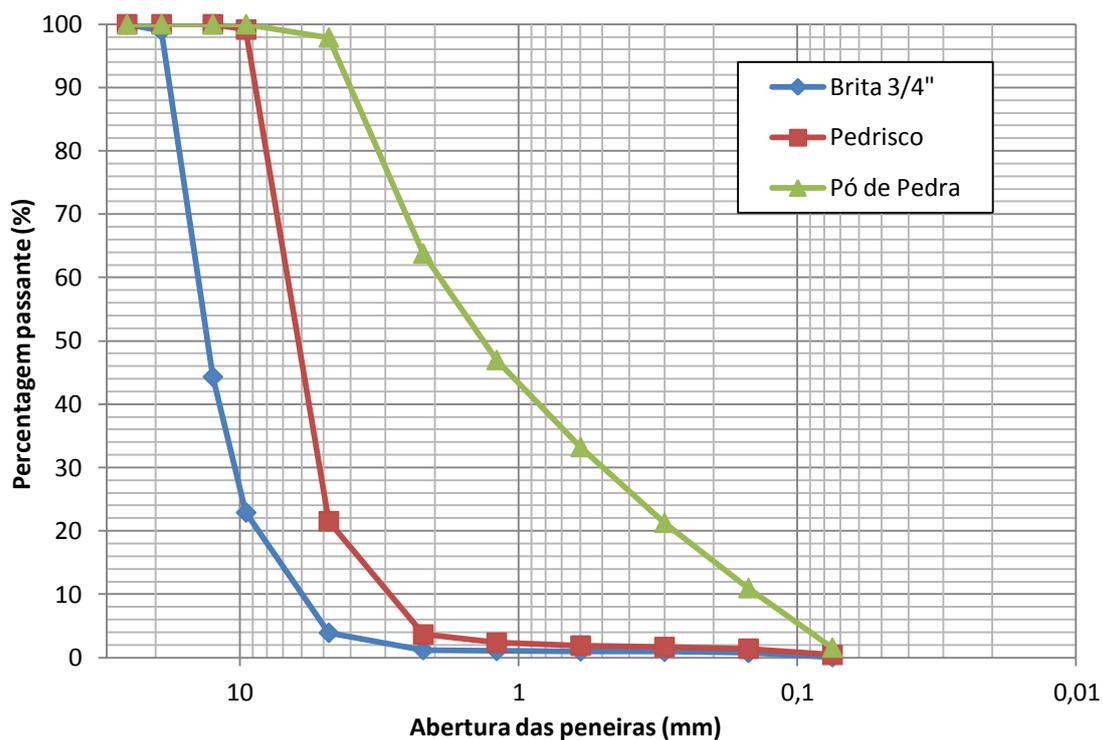


Figura 3.3 - Granulometria do agregado mineral diabásio.

A Tabela 3.1 abrange todos os ensaios de caracterização com seus respectivos resultados e limites comparativos.

Tabela 3.1 - Parâmetros de caracterização do agregado mineral diabásio.

Propriedade	Método de Ensaio	Resultados	Limites comparativos*
Perda de massa no ensaio de Abrasão Los Angeles	DNER-ME 035/98 (1998)	12,12%	< 50%
Massa Específica Real do agregado graúdo	DNER-ME 081/98 (1998)	3,016g/cm ³	-
Massa Específica Real do agregado miúdo	DNER-ME 084/95 (1995)	3,003g/cm ³	-
Perda de massa no ensaio de Durabilidade	DNER-ME 089/94 (1994)	3,08%	< 12%
Adesividade ao ligante betuminoso	DNER-ME 078/94 (1994)	Boa	Boa
Índice de forma	ABNT NBR 7809/87 (1987)	0,7	> 0,5
Absorção	DNER-ME 081/98 (1998)	0,58%	-

* DNIT-ES 031 (2006).

O ensaio de massa específica real (DNER-ME 084/95, 1995 e DNER-ME 081/98, 1998) resultou em um valor consideravelmente alto, pode-se então,

afirmar que o agregado é bastante denso, interferindo no resultado da abrasão Los Angeles e também na durabilidade, pois o material possui uma maior resistência estrutural.

A Figura 3.4 mostra as etapas do ensaio de densidade real do granular miúdo e graúdo que foi realizado com auxílio do dessecador.



Figura 3.4 – Ensaio de massa específica real do agregado.

O ensaio de abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/98, 1998) mede a capacidade que o agregado tem de resistir ao choque das cargas abrasivas aplicadas por intermédio de esferas metálicas (Figura 3.5)



Figura 3.5 – Ensaio de abrasão Los Angeles.

No que diz respeito ao ensaio de durabilidade (DNER-ME 089/94, 1994) ilustrado na Figura 3.6, tem-se que simula o processo de degradação dos agregados por ocasião de ataque químico quando expostos às intempéries nos pavimentos, utilizando normalmente soluções de Sulfato de Sódio Anidro ou de Magnésio (BERNUCCI *et al.*, 2010).



Figura 3.6 – Ensaio de durabilidade.

O diabásio, por se tratar de uma rocha normalmente pouco alterada geologicamente, com característica sã (La SERNA e REZENDE, 2009), apresenta índices reduzidos referentes aos percentuais de desgaste por abrasão e de perda por ataque das soluções de Sulfato de Sódio, conforme apresentado na Tabela 3.1.

Normativamente, o valor de 0,7, resultante do ensaio de índice de forma (ABNT NBR 7809/87, 1987), se refere à boa cubicidade em geral, porém, mesmo esse valor sendo superior ao 0,5 (limite comparativo), partículas lamelares foram detectadas na amostra, ou seja, indica que há morfologia heterogênea apresentando formas tanto lamelares quanto sub-angulares. Essa questão também influencia no desgaste, pois as partículas lamelares são mais suscetíveis à quebra.

O diabásio é um agregado mineral básico, com característica eletropositiva e por isso apresenta uma boa adesividade ao ligante betuminoso, sendo este último composto predominantemente por elementos químicos que o conferem

característica eletronegativa, o que propicia forte atração elétrica entre os componentes da mistura asfáltica, nas condições práticas (BARRA, 2005). Pelas razões expostas, durante a execução do ensaio de adesividade (DNER-ME 078/94, 1994) (Figura 3.7), não houve o descolamento da película de ligante betuminoso que envolve as partículas de agregados, dispensando a utilização de adições ou de aditivos melhoradores de adesividade (dopes).



Figura 3.7 – Ensaio de adesividade.

Quanto à absorção (DNER-ME 081/98, 1998) (Figura 3.8) verifica-se que o resultado obtido segue a tendência dos valores normalmente observados para rochas utilizadas em serviços de pavimentação (BERNUCCI *et al.*, 2010), entretanto é necessário que se verifique o quanto esta absorção pode influenciar na determinação do teor ótimo do ligante betuminoso na mistura asfáltica, principalmente no ato da mistura do esqueleto mineral com o ligante.



Figura 3.8 - Ensaio de absorção.

3.1.1.2. Areia

O projeto de mistura asfáltica realizado pela empresa SETEP (2013) utiliza areia em sua composição granulométrica. A granulometria resultante é mostrada na Figura 3.9.

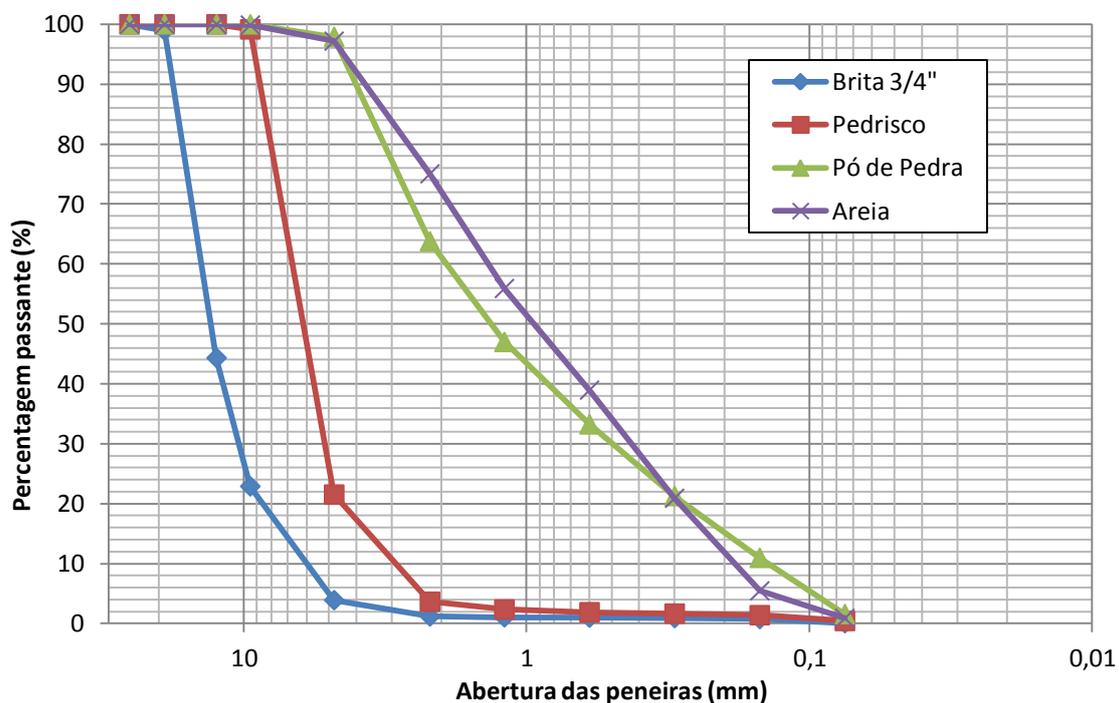


Figura 3.9 - Granulometria dos agregados minerais.

Durante os exames realizados com microscopia de alta resolução foram detectadas diversas partículas com morfologia arredondada e revestidas por

películas lisas e brilhosas de sílica (Figura 3.10 a), em relação aos granulares britados de diabásio de mesmo tamanho, mas que dispõem de uma forma subangular e textura rugosa (Figura 3.10 b). Portanto, a areia torna o entrosamento entre os grãos deficiente quanto ao intertravamento nas faces de contato, acarretando uma forte movimentação cisalhante resultante da ação do carregamento dinâmico, sendo mais suscetíveis às deformações.

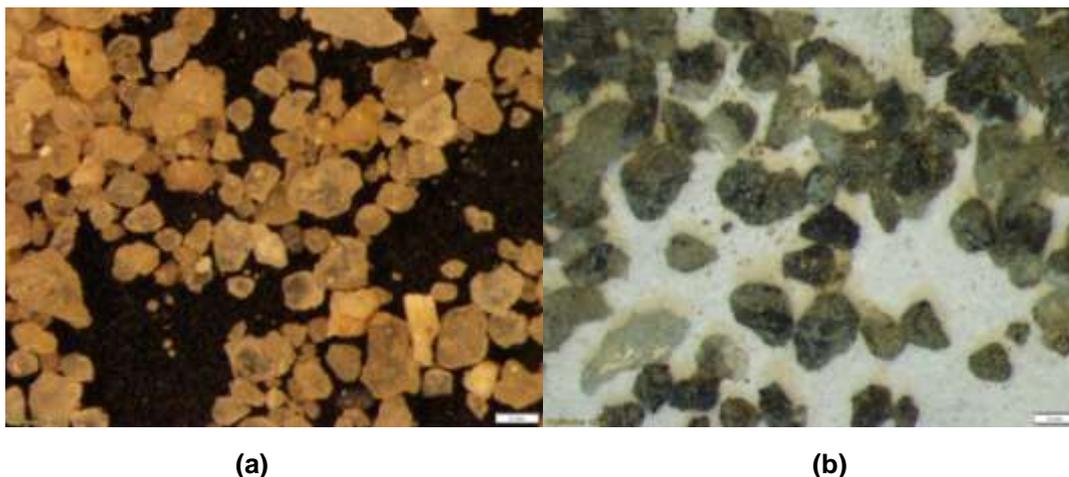


Figura 3.10 - Imagens microscópicas de alta resolução ampliadas em 31 vezes das partículas de (a) areia natural e (b) diabásio britado.

3.1.2. Ligante Betuminoso

O ligante betuminoso (CAP) é composto por hidrocarbonetos derivados da extração do petróleo.

O ligante utilizado nesta pesquisa foi o mesmo aplicado na mistura do projeto da empresa SETEP (2013), de classificação por penetração 50/70, proveniente da Refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR) da PETROBRÁS S.A., localizada no município de Araucária/PR.

Alguns ensaios de caracterização do ligante betuminoso foram realizados, como: penetração, ponto de amolecimento anel e bola, massa específica real (Tabela 3.2), e viscosidade Saybolt-Furol, a ser tratado mais adiante.

Tabela 3.2 - Parâmetros de caracterização do ligante betuminoso.

Propriedade	Método de ensaio	Resultados	Limites comparativos*
Penetração	DNIT-ME 155 (2010)	67,0 (0,1 mm)	50 a 70
Ponto de Amolecimento Anel e Bola	DNIT-ME 131 (2010)	50°C	>46°C
Massa Específica Real	ABNT NBR 6296 (2004)	1,003g/cm ³	-

* DNIT-EM 095 (2006)

O ensaio de penetração (DNIT-ME 155, 2010) ilustrado pela Figura 3.11, determina a profundidade que uma agulha penetra na amostra sob condições normativas de temperatura, tempo e carga.



Figura 3.11 - Ensaio de penetração.

O ponto de amolecimento (Figura 3.12) é determinado a partir do ensaio DNIT-ME 131 (2010) e é a temperatura a qual o ligante betuminoso amolece quando submetido ao aquecimento em condições padronizadas.

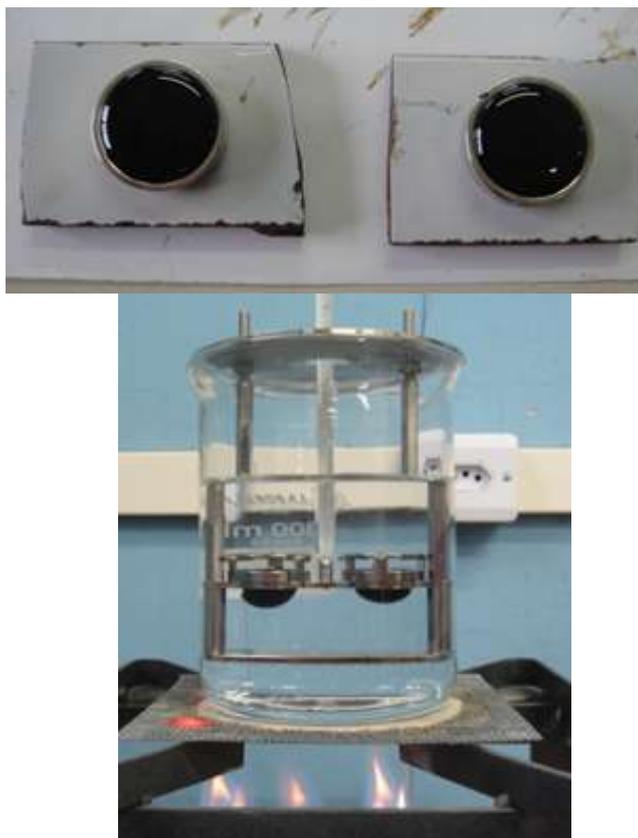


Figura 3.12 - Ensaio ponto de amolecimento anel e bola.

A partir dos resultados dos ensaios de penetração (Figura 3.11) e ponto de amolecimento (Figura 3.12), pode-se determinar o índice de suscetibilidade térmica ou índice de Pfeiffer e Van Doormaal (IP) (Equação 3.1).

$$IP = \frac{500 \cdot \log P + 20 \cdot PA - 1951}{120 - 50 \cdot \log P + PA} \quad (3.1)$$

onde:

IP = Índice de Pfeiffer e Van Doormaal;

PA = Ponto de amolecimento do CAP obtido no ensaio de anel e bola (em °C);

P = Penetração do CAP a 25°C (em 0,1 mm).

O IP varia entre -1,5 a +0,7, onde o valor próximo ao limite inferior condiz a um ligante betuminoso sensível a altas temperaturas e o valor próximo ao limite

superior se refere a um ligante com pouca suscetibilidade a altas temperaturas (BERNUCCI et.al, 2010). O IP resultante do ligante ensaiado foi igual a -0,6.

O ligante betuminoso utilizado possui baixa consistência e forte suscetibilidade térmica, pois a penetração resultou muito próxima ao limite máximo e o ponto de amolecimento próximo ao limite mínimo especificados para sua classificação: 70,0 (0,1mm) e 46°C, respectivamente conforme apresentado na Tabela 3.2.

Estes fatores combinados contribuem para a formulação de misturas asfálticas com comportamento mecânico precário em campo, principalmente no que se refere à baixa resistência às cargas aplicadas pelo tráfego, podendo acarretar a ocorrência de afundamentos nas trilhas de roda (deformações permanentes) e diminuição da vida útil do pavimento, por exemplo.

O ensaio de massa específica real (ABNT NBR 6296, 2004) foi realizado pelo ensaio do picnômetro e o resultado encontrado (Tabela 3.2) está de acordo com a característica do ligante comercializado no Brasil.

A viscosidade é uma medida da consistência do ligante betuminoso, em função do regime de escoamento a que está submetido. O ensaio foi realizado através do viscosímetro Saybolt-Furol (Figura 3.13) (DNER-ME 04/94, 1994) para fins da determinação da curva de viscosidade, a qual fornece as temperaturas de usinagem e compactação da mistura, ou seja, definição da consistência que o ligante betuminoso deve apresentar na mistura com o agregado para se obter uma boa cobertura dos mesmos e a temperatura que a mistura asfáltica deve possuir no momento da aplicação no campo (BERNUCCI *et al.*, 2010).



Figura 3.13 - Ensaio de viscosidade Saybolt-Furol.

A Figura 3.14 mostra as faixas de temperaturas correspondentes à temperatura de compactação (variação entre 135°C e 139°C) e de usinagem do ligante betuminoso (variação entre 145°C e 151°C), em que o agregado mineral deve apresentar uma temperatura variando de 10°C a 15°C acima daquela estabelecida para o ligante na curva de viscosidade (BERNUCCI *et al.*, 2010), sendo adotado geralmente o valor correspondente a 13°C no momento da usinagem.

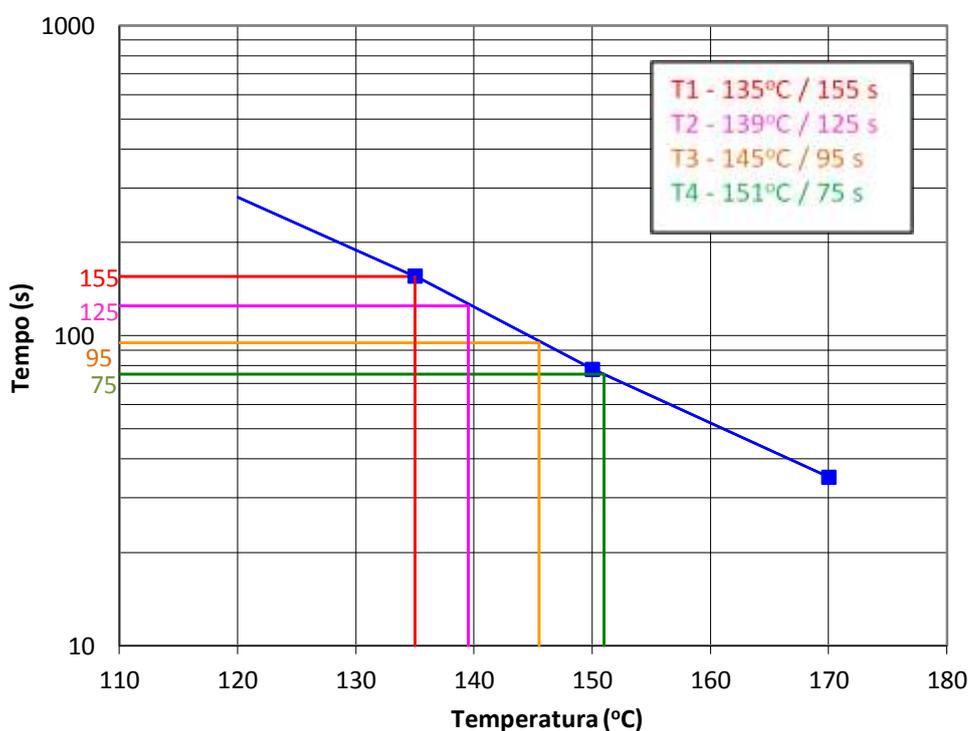


Figura 3.14 - Curva de viscosidade Saybolt-Furol do CAP 50/70.

3.2. CURVAS GRANULOMÉTRICAS SELECIONADAS

3.2.1. Curva Granulométrica por Tentativa

A curva granulométrica formulada pelo método empírico de tentativa, denominada de curva prática (CP), não foi reproduzida em laboratório nesta pesquisa, tendo sido utilizados os dados de projeto referentes à execução das obras de pavimentação da rodovia SC-446, trecho Criciúma/Forquilha

(SETEP, 2013), compreendendo granulares britados (diabásio) e frações de areia.

Conforme mencionado no Capítulo 2, a curva granulométrica formulada pelo método por tentativa deve ser enquadrada em faixas granulométricas propostas pelo órgão regulamentador competente. O projeto da mistura asfáltica de referência (SETEP, 2013) utilizou a faixa “D” do DEINFRA.

A Tabela 3.3 mostra as percentagens de cada fração do agregado pétreo e da areia com suas respectivas granulometrias e a curva resultante da mistura dessas frações. A Figura 3.15 exibe a curva granulométrica resultante enquadrada na faixa “D” do DEINFRA.

Tabela 3.3 - Composição da curva granulométrica formulada pelo método de tentativa (SETEP, 2013).

Peneiras (mm)	Brita 3/4"	14%	Pedrisco	29%	Pó de Pedra	42%	Areia	15%	Mistura	Faixa D	
19,00	100	14,0	100	29,0	100	42,0	100	15,0	100,0	100	100
12,7	55,5	7,8	100	29,0	100	42,0	100	15,0	93,8	90	100
9,50	25,2	3,5	100	29,0	100	42,0	100	15,0	89,5	76	93
4,76	0,8	0,1	8,7	2,5	96,2	40,4	98,2	14,7	57,8	44	74
2,00	0,6	0,1	1,6	0,5	62	26,0	78,7	11,8	38,4	25	55
0,42	0,6	0,1	1,3	0,4	28,7	12,1	28,9	4,3	16,9	9	27
0,18	0,5	0,1	1,1	0,3	17,1	7,2	9,3	1,4	9,0	4	17
0,075	0,3	0,0	0,7	0,2	11,5	4,8	2,9	0,4	5,5	2	10

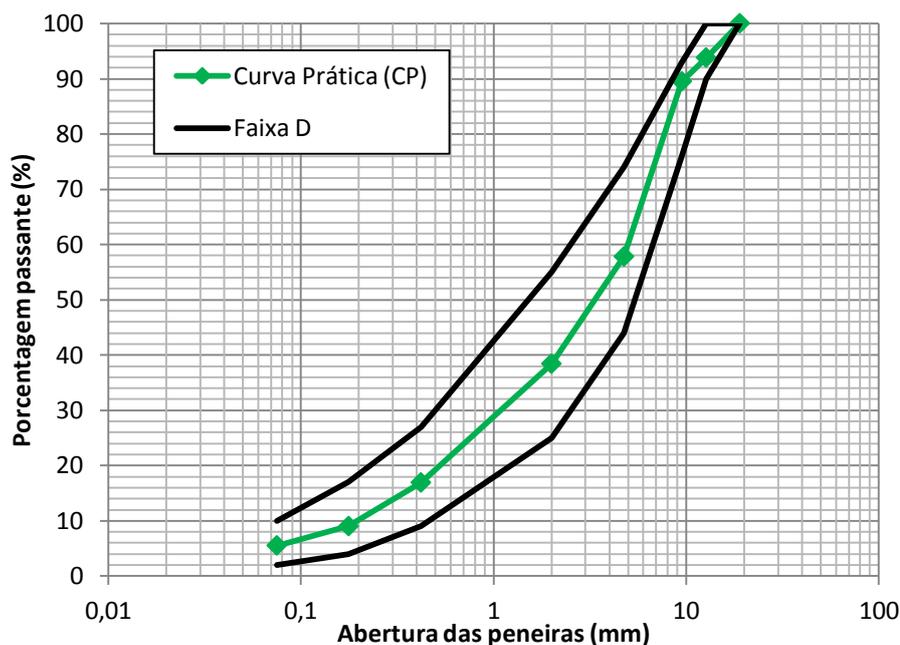


Figura 3.15 - Curva Prática (SETEP, 2013).

A curva apresentada pela Figura 3.15 utiliza areia em sua composição. Como mencionado no item 3.1.1.2, a areia causa problemas no entrosamento entre grãos tornando a mistura asfáltica deficiente quanto a deformações permanentes.

Para demonstrar a influência da areia na composição da curva granulométrica, foi realizada uma simulação retirando-se sua percentagem. Os valores foram simulados para que se chegasse o mais próximo da curva prática de referência (CP) apresentada na Tabela 3.3 e na Figura 3.15. A Tabela 3.4 exibe este resultado, recebendo a denominação de curva prática sem areia (CP') (Figura 3.16).

Tabela 3.4 - Composição da curva granulométrica formulada pelo método de tentativa sem a presença de frações de areia (adaptado SETEP, 2013).

Peneiras (mm)	Brita 3/4"	12	Pedrisco	30	Pó de pedra	58	Mistura	Faixa D	
19,00	100	12,0	100	30,0	100	58,0	100,0	100	100
12,7	55,5	6,7	100	30,0	100	58,0	94,7	90	100
9,50	25,2	3,0	100	30,0	100	58,0	91,0	76	93
4,76	0,8	0,1	8,7	2,6	96,2	55,8	58,5	44	74
2,00	0,6	0,1	1,6	0,5	62	36,0	36,5	25	55
0,42	0,6	0,1	1,3	0,4	28,7	16,6	17,1	9	27
0,18	0,5	0,1	1,1	0,3	17,1	9,9	10,3	4	17
0,075	0,3	0,0	0,7	0,2	11,5	6,7	6,9	2	10

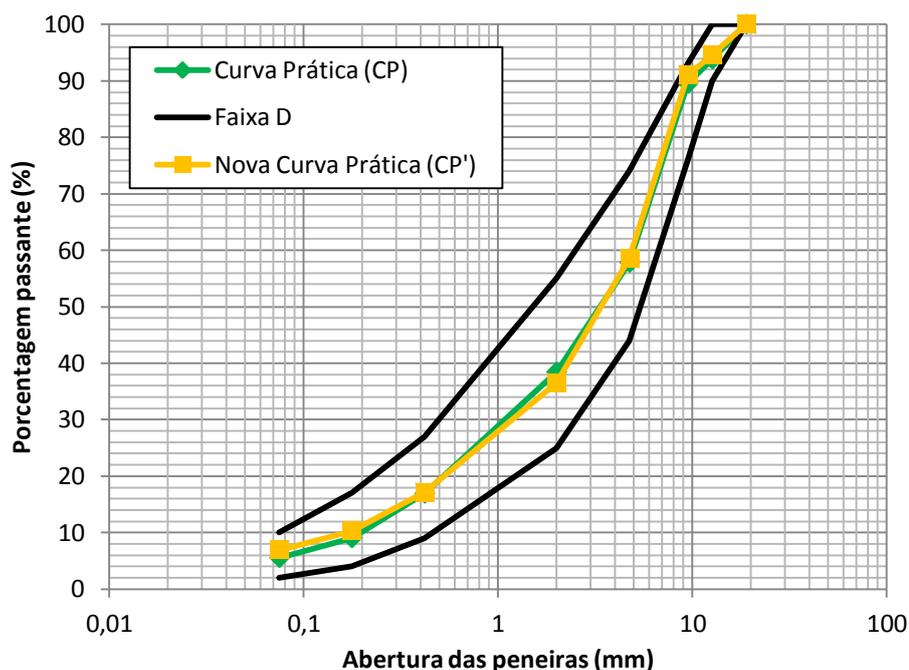


Figura 3.16 - Comparação das curvas práticas, com (CP) e sem areia (CP').

Na ausência da areia, é possível perceber que há um aumento significativo da percentagem do pó de pedra. Ao analisar a Figura 3.9, que se refere à granulometria dos agregados, pode ser comparada a granulometria do pó de pedra e da areia. Nas peneiras de menor abertura, a areia apresenta uma granulometria mais grossa, e nas aberturas intermediárias é mais fina, isso faz com que a sua inserção corrija o enquadramento da curva na faixa normativa, visto que se houvesse somente o uso dos agregados pétreos, a curva teria tendência a descrever uma trajetória com curvatura acentuada, tangenciando o limite inferior da faixa “D”, além de tender a escapar do limite superior da referida faixa nas menores aberturas de peneira.

Para que não houvesse isso, foi necessário aumentar a quantidade do pó de pedra a um valor de 58% na composição do esqueleto mineral. Essa percentagem é elevada e o aumento de pó de pedra na mistura asfáltica também causa problemas, pois ocasiona a presença excessiva de finos, contribuindo para a diminuição da resistência da mistura asfáltica, pois os agregados de maior diâmetro ficam em suspensão na matriz de agregados de menores diâmetros, que comporão a maior parte da formulação, causando deficiência no embricamento dos grãos, e aumentando a deformabilidade do material.

3.2.2. Curva Granulométrica Racional

No caso da curva granulométrica calculada com base na equação de *Füller-Talbot*, já mencionada no Capítulo 2, denominada de curva teórica (CT), a matriz granular foi inteiramente composta por frações granulares provenientes da mesma rocha diabásica da curva prática (CP), em que foi fixado o diâmetro máximo da série de peneiras adotada em 19,1mm e o percentual da fração granulométrica passante na malha de abertura 0,075mm em 6,0%, tendo resultado em um expoente n da ordem de 0,51, que confere a característica de uma mistura asfáltica densa, com base na pesquisa desenvolvida por BARRA (2009).

É importante esclarecer que na escolha da série de peneiras correspondente à curva teórica (CT) priorizou-se um preenchimento gradual dos vazios formados pelos granulares de maiores dimensões em relação aos de diâmetros menores

à razão da metade de seus tamanhos, principalmente no que diz respeito às sequências das frações retidas a partir da abertura de malha 9,50mm, com o intuito de gerar um entrosamento mais efetivo entre as partículas, viabilizando uma estabilidade maior do esqueleto mineral, tornando-o mais resistente à aplicação das cargas solicitantes e, conseqüentemente, menos suscetível à deformação, pois os diâmetros selecionados de forma individual evitam riscos de heterogeneidade de tamanhos em uma mesma graduação, conforme ocorre com a metodologia de tentativa.

Neste contexto, verifica-se uma deficiência na série de peneiras utilizada na curva prática (CP), pois as aberturas de malhas abaixo de 2,20mm possibilitam poucos diâmetros de transição no esqueleto mineral até atingirem o tamanho de 0,075mm, constituindo um arranjo com ausência de controle nas frações necessárias à constituição de um entrosamento intergranular que permita a obtenção de uma estabilidade maior da matriz granulométrica, e que acarreta em uma presença maior de finos.

Na Tabela 3.5 constam os resultados das percentagens referentes a cada peneira. Essas percentagens foram calculadas segundo a Equação de *Füller-Talbot* mencionada no Capítulo 2.

Tabela 3.5 - Composição da curva granulométrica formulada pelo método racional (BARRA, 2009).

Curva granulométrica teórica	
Peneiras (mm)	% passante
19,1	100
12,7	81,3
9,5	70,1
4,76	49,4
2,2	33,4
1,2	24,5
0,6	17,2
0,3	12,1
0,15	8,5
0,075	6

O resultado dessa composição é mostrado na Figura 3.17.

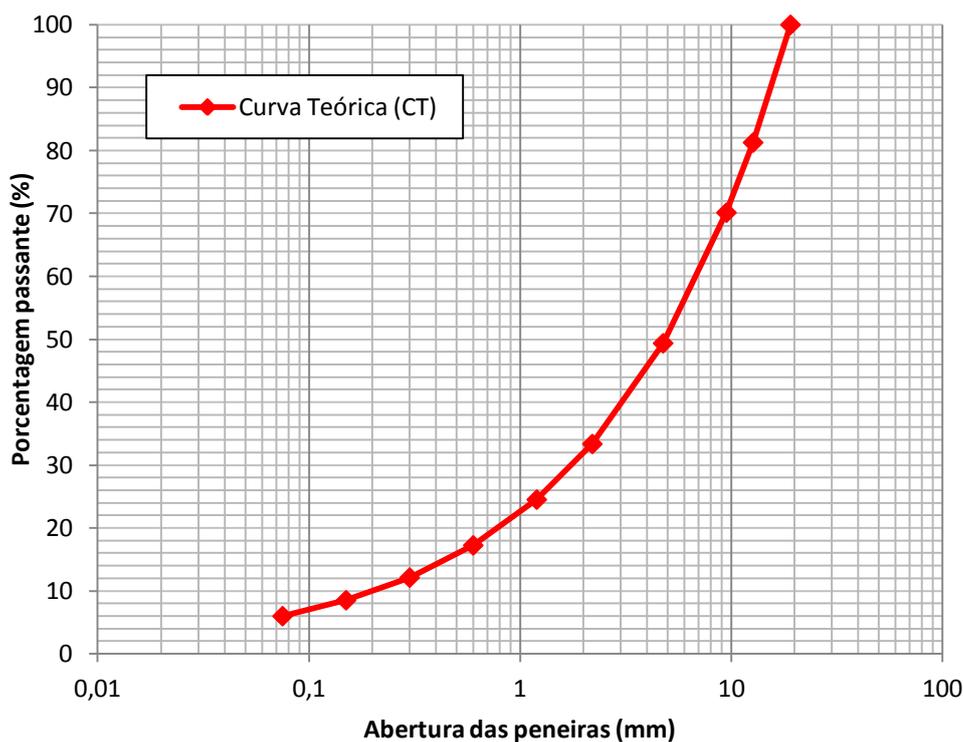


Figura 3.17 – Curva Teórica (CT) (BARRA, 2009).

3.2.3. Comparação das Curvas Granulométricas

As distribuições das frações granulométricas CP e CT são apresentadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Distribuição das frações granulométricas do esqueleto mineral.

Curva prática (CP)		Faixa D DEINFRA		Curva Teórica (CT)	
Abertura da Malha das Peneiras (mm)	Percentagem Passante (%)	Limite Superior	Limite Inferior	Abertura da Malha das Peneiras (mm)	Percentagem Passante (%)
19,10	100,0	100,0	100,0	19,10	100,0
12,70	93,80	100,0	90,0	12,70	81,30
9,50	89,50	93,0	76,0	9,50	70,10
4,76	57,80	74,0	44,0	4,76	49,40
2,20	38,40	55,0	25,0	2,20	33,40
0,42	16,90	27,0	9,0	1,20	24,50
0,18	9,00	17,0	4,0	0,60	17,20
0,075	5,50	10,0	2,0	0,30	12,10
-	-	-	-	0,15	8,50
-	-	-	-	0,075	6,00

As distribuições das frações granulométricas CP e CT são ilustradas na Figura 3.18, em relação à amplitude normativa da faixa D do DEINFRA.

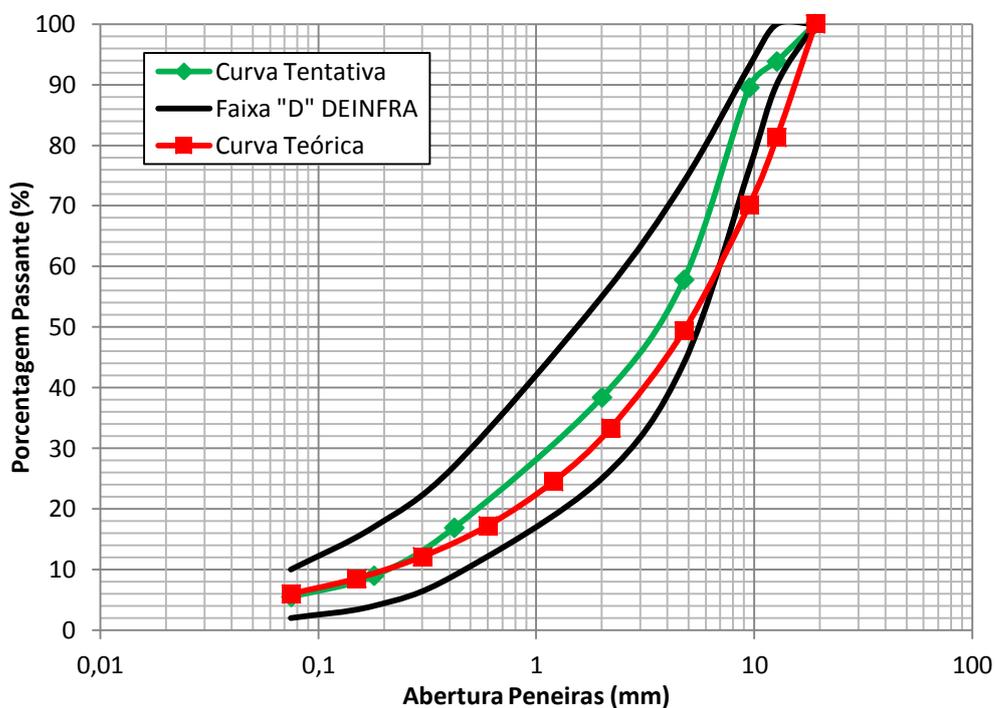


Figura 3.18 - Curvas granulométricas das misturas asfálticas em relação à faixa D do DEINFRA.

É possível observar que a curva teórica (CT) tem a sua trajetória situada fora dos limites normativos da faixa D do DEINFRA quando observadas as frações granulares de maiores diâmetros, ao passo em que as dimensões intermediárias do esqueleto mineral se encontram muito próximas aos limites inferiores da referida faixa, ao contrário do que ocorre com a curva prática (CP).

Portanto, de acordo com as normativas a serem obedecidas no uso da metodologia empírica de tentativa, tem-se que a CT não atenderia aos propósitos de formulação de misturas asfálticas, pois além das curvas deverem estar completamente inseridas na amplitude da faixa granulométrica, não é desejável que se tangencie ou se aproxime muito dos valores correspondentes aos seus limites máximos e mínimos, cumprindo um posicionamento preferencialmente situado na zona mediana da faixa de referência.

Entretanto, a curva CT não foi formulada com base na metodologia de tentativa, logo, não necessita cumprir os requisitos mencionados, estando

ilustrada na Figura 3.18 apenas sob a forma comparativa com a trajetória da curva CP.

CAPÍTULO 4

ENSAIOS LABORATORIAIS

Este capítulo aborda os métodos de ensaios laboratoriais que foram realizados durante a pesquisa, para fins de avaliação do comportamento mecânico das misturas asfálticas.

O teor ótimo do ligante betuminoso da mistura asfáltica formulada com a curva prática (CP) do projeto de referência (SETEP, 2013) foi determinado a partir dos procedimentos de dosagem Marshall (DNER-ME 043/95, 1995), sendo o mesmo utilizado para proceder à dosagem da curva teórica (CT).

Os ensaios de tração indireta (DNIT-ME 136/2010) foram executados apenas para a curva CT, a fim de complementar as análises referentes ao desempenho mecânico das misturas asfálticas, para auxílio na escolha do teor ótimo de ligante betuminoso.

4.1. ENSAIO MARSHALL

O método e o aparelho de dosagem Marshall foram criados por Bruce Marshall do *Mississippi State Highway Department* e foi adotado pelo *United States Army Corps of Engineers* (USACE), logo no começo da Segunda Guerra Mundial, com o objetivo de controle de campo de projetos e construção de aeroportos militares e determinação do teor ótimo de betume das misturas (SENÇO, 2001). Esse método é o método oficialmente adotado no Brasil para dosagem de misturas asfálticas (DNER-ME 043/95, 1995).

A determinação do teor ótimo do ligante betuminoso é procedida a partir da compactação de corpos de prova cilíndricos, em que são realizadas análises de parâmetros físicos e mecânicos referentes ao comportamento das misturas asfálticas, a saber: estabilidade, fluência, relação betume/vazios (RBV), percentagem de vazios (%V), vazios do agregado mineral (VAM) e massa específica aparente dos corpos de prova.

Os corpos de prova cilíndricos são moldados por impacto, em razão de golpes aplicados pelo soquete Marshall, com peso e altura de queda devidamente normatizados. A Figura 4.1 mostra o aparelho de compactação Marshall. O

aparelho que foi utilizado é eletromecânico, o que impede a variabilidade da energia de compactação, contribuindo para diminuição do gradiente de densidade, que seria potencialmente mais variável se realizado manualmente.



Figura 4.1 - Aparelho de compactação de corpos de prova ensaio Marshall.

O número de golpes necessários para compactação da mistura é determinado pelo método de ensaio na quantidade de 75 em cada face para camadas de revestimento e, de 50 golpes para camadas intermediárias (ligação, por exemplo).

A presente pesquisa analisa o comportamento de misturas destinadas   camada de rolamento, por isso, durante a execu o do ensaio, foram aplicados 75 golpes em cada face dos corpos de prova.

Os corpos de prova foram moldados a partir da curva granulométrica teórica estabelecida no Capítulo 3, com uma percentagem de ligante em peso, resultando em um total de 1200g cada corpo de prova. A faixa de teores utilizada foi de 4,22% a 5,18% com uma varia o de 0,32% resultando em 5 diferentes teores. A escolha dessa faixa de teores deve-se   pesquisa

realizada por BARRA (2009), essa faixa é geralmente utilizada para misturas densas.

O processo de mistura do esqueleto mineral ao ligante betuminoso (Figura 4.2) deve obedecer aos valores de temperatura de usinagem determinados na curva de viscosidade, conforme abordado no Capítulo 3 (Figura 3.10), lembrando que o agregado deve ter a sua temperatura acrescida em 13°C quando comparada à estabelecida para o ligante.



Figura 4.2 - Processo de mistura do esqueleto mineral ao ligante betuminoso.

A mistura produzida é então levada à estufa por um período de duas horas, na temperatura de compactação, também determinada na curva de viscosidade já mencionada, para permitir a aderência satisfatória do ligante betuminoso às partículas dos agregados. Os moldes cilíndricos também são aquecidos na estufa para que não haja perda de temperatura durante a compactação. O processo da colocação no molde é ilustrado na figura 4.3.



Figura 4.3 - Procedimento para modelagem dos corpos de prova.

A mistura fica retida no molde até ser possível tocá-lo com as mãos sem o auxílio de luvas, sendo executada a extração dos corpos de prova assim que possível, conforme exemplifica a Figura 4.4.



Figura 4.4 - Extração dos corpos de prova.

Para cada teor de ligante betuminoso foram moldados cinco corpos de prova, perfazendo um total de 25 unidades (Figura 4.5).



Figura 4.5 - Corpos de prova Marshall.

Todos os corpos de prova foram pesados e medidos (altura e diâmetro), para o auxílio na determinação dos resultados das grandezas: relação betume/vazios (RBV), percentagem de vazios (%V), vazios do agregado mineral (VAM) e massa específica aparente dos corpos de prova.

Também foi necessário o cálculo da massa específica real da mistura obtida pela Equação 4.1.

$$D_{real} = \frac{100}{\frac{\%P_1}{d_{graúdo}} + \frac{\%P_2}{d_{miúdo}} + \frac{\%L}{d_{ligante}}} \quad (4.1)$$

onde:

D_{real} = massa específica real da mistura;

$\%P_1$ = percentagem retida da peneira de abertura 12,7mm até 4,8mm;

$\%P_2$ = percentagem retida da peneira de abertura 2,2mm até fundo;

$\%L$ = Percentagem de ligante betuminoso na mistura.

$d_{graúdo}$ = massa específica real do agregado graúdo;

$d_{miúdo}$ = massa específica real do agregado miúdo;

d_{ligante} = massa específica real do ligante betuminoso.

A massa específica real, ou massa específica máxima teórica da mistura, além de ter sido determinada pela Equação 4.1, foi medida a partir do mesmo método de ensaio de densidade real dos agregados, pelo processo do picnômetro utilizando a Equação 4.2, com amostra da mistura asfáltica desagregada. Os valores obtidos nos diferentes métodos foram comparados e atingiram o mesmo resultado.

$$D_{\text{real}} = \frac{(c - a)}{[(b - a) - (d - c)]} \quad (4.2)$$

onde:

D_{real} = massa específica real (g/cm^3);

a = massa do picnômetro vazio (tara);

b = massa do picnômetro cheio de água até o menisco;

c = massa do picnômetro contendo a amostra;

d = massa do picnômetro contendo a amostra e cheio de água até o menisco.

Outro procedimento realizado foi a pesagem hidrostática para obter o valor de massa específica aparente da mistura (DNER-ME 117/94) que é a relação entre a massa de determinada porção de agregado e o volume ocupado pelo mesmo, nas condições de compactação e adensamento em que se encontram (SENÇO, 2001). Os corpos de prova foram revestidos com fita crepe e mergulhados em parafina para que não houvesse a penetração de água nos vazios durante a pesagem (Figura 4.6).

A massa específica aparente é determinada pela Equação 4.3.

$$D_{\text{aparente}} = \frac{m_a}{(m_p - m_i) - \left(\frac{m_p - m_a}{d_p}\right)} \quad (4.3)$$

onde:

D_{aparente} = massa específica aparente;

m_a = massa da amostra no ar;

m_p = massa da amostra parafinada ao ar;

m_i = massa da amostra parafinada imersa;
 d_p = densidade da parafina.



Figura 4.6 - Determinação da massa específica aparente – pesagem hidrostática.

O teor de vazios é a relação entre o volume de vazios e o volume total de determinada porção de agregado. Ele pode ser obtido através da Equação 4.4, onde há uma relação da densidade real e aparente da mistura do corpo de prova.

$$V(\%) = \frac{D_{real} - D_{aparente}}{D_{real}} \cdot 100 \quad (4.4)$$

onde:

V = teor de vazios;
 D_{real} = massa específica real do corpo de prova;
 $D_{aparente}$ = massa específica aparente do corpo de prova.

Vazios cheios de betume (VCB) é a relação entre o volume ocupado pelo betume total e pode ser expressa pela Equação 4.5.

$$VCB (\%) = \frac{D_{aparente} \cdot B}{D_b} \quad (4.5)$$

onde:

VCB = vazios cheio de betume;

$D_{aparente}$ = massa específica aparente;

B = percentagem de ligante betuminoso na mistura asfáltica;

D_b = densidade do ligante betuminoso.

Vazios do agregado mineral (VAM) é a soma das percentagens de vazios da mistura não preenchidos com a percentagem de vazios cheio de betume ou seja, é o percentagem total de vazios da mistura que é relacionada na Equação 4.6.

$$VAM (\%) = V + VCB \quad (4.6)$$

onde:

VAM = vazios do agregado mineral;

V = percentagem de vazios;

VCB = vazios cheio de betume.

A relação betume/vazios (RBV) é a relação entre os vazios que são cheios de betume e o total de vazios do agregado mineral como mostra a Equação 4.7.

$$RBV (\%) = \frac{VCB}{VAM} \cdot 100 \quad (4.7)$$

onde:

RBV = relação betume/vazios;

VCB = vazios cheio de betume;

VAM = vazios do agregado mineral.

A fluência é a deformação sofrida pelo corpo de prova logo antes do rompimento e estabilidade é a carga sob a qual o corpo de prova rompe quando submetido à compressão diametral. Os valores de estabilidade e fluência são adquiridos pelo computador ligado à mesa onde o corpo de prova é rompido.

Primeiramente, os corpos de prova são imersos em água e colocados na estufa por 30 minutos na temperatura de 60°C como mostra a Figura 4.7. Eles foram colocados na estufa com intervalo de 1 minuto para que todos ficassem pelo mesmo tempo. A mesa de rompimento deve ser calibrada para que os valores sejam adquiridos com precisão.



Figura 4.7- Corpos de prova imersos em água.

Depois de passado o tempo dentro da estufa, o corpo de prova é imediatamente levado à prensa do aparelho Marshall. A carga é aplicada no cilindro de compressão diametral até o rompimento do corpo de prova e é contínua ao longo da superfície. A Figura 4.8 mostra o momento da colocação do corpo de prova na prensa e a aquisição de dados a partir do rompimento dos mesmos.



Figura 4.8 - Rompimento dos corpos de prova.

Com a determinação de todos os valores desses parâmetros físicos e mecânicos mencionados, alguns gráficos são montados para ser possível encontrar o valor do teor ótimo de ligante betuminoso, que serão apresentados no Capítulo 5.

4.2. ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA

O ensaio de resistência à tração indireta por compressão diametral foi criado pelo professor Fernando Luiz Lobo B. Carneiro na cidade do Rio de Janeiro. Esse ensaio foi desenvolvido inicialmente para corpos de prova de concreto de cimento Portland e se tornou muito popular por sua rápida execução e facilidade (MEDINA, 1997).

O ensaio também é realizado para caracterização de misturas asfálticas e é regido pela norma DNIT-ME 136 (2010). Nos corpos de prova Marshall as

forças são aplicadas por frisos de carga (BERNUCCI *et al.*, 2010) como pode ser visto na Figura 4.9.

“O corpo de prova é posicionado diametralmente em relação à direção da compressão, resultando numa tração, agindo perpendicularmente ao longo do plano diametral que promove a ruptura da amostra nesta direção” (MORILHA, 2004; p. 44).

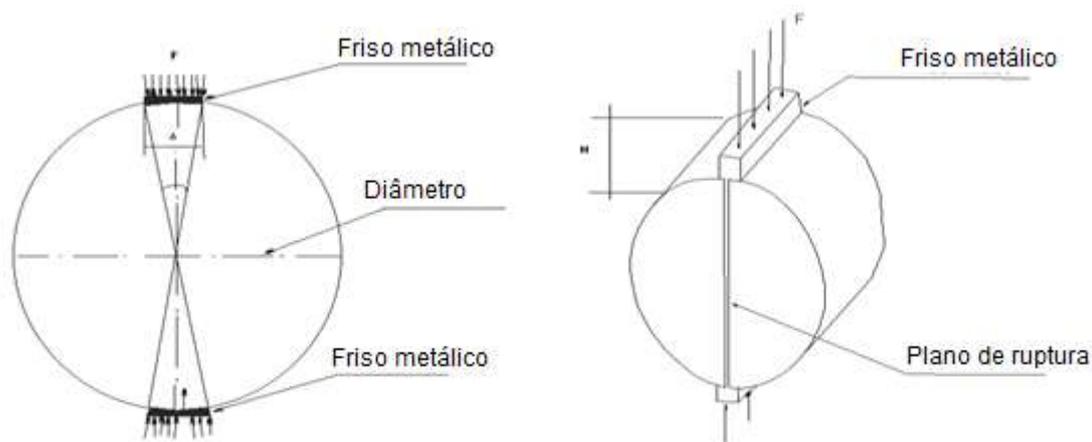


Figura 4.9 - Ensaio de compressão diametral de corpo de prova cilíndrico (DNIT-ME 136/2010).

A composição do corpo de prova com os frisos metálicos é colocada na prensa Marshall e então é realizado o ensaio (Figura 4.10) onde o valor da tensão de ruptura é fornecido. A tensão de tração é calculada a partir da Equação 4.8.

$$\sigma_R = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (4.8)$$

onde:

σ_R = resistência à tração (MPa);

F = carga de ruptura (N);

D = diâmetro do corpo de prova (cm);

H = altura do corpo de prova (cm).



Figura 4.10 - Execução do ensaio de resistência à tração indireta.

Um total de seis corpos de prova foram moldados pelo soquete Marshall, sendo três com o teor de ligante de 4,54% e três com teor de 4,86%, em que as devidas explicações para esta escolha serão tratadas no Capítulo 5.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados e as discussões provenientes dos estudos realizados a partir dos ensaios laboratoriais.

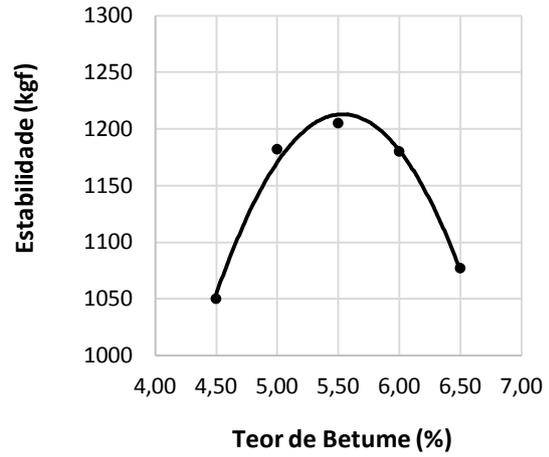
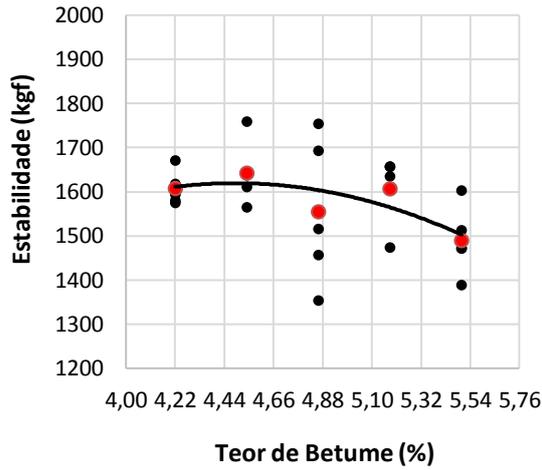
5.1. RESULTADOS DO ENSAIO MARSHALL

Os gráficos apresentados posteriormente são resultados dos parâmetros abordados no Capítulo 4. Eles são apresentados de forma comparativa por parâmetro, estando posicionados à esquerda aqueles referentes à curva CT e à direita os da curva CP (Figura 5.1 a até g). Cabe esclarecer que os gráficos da curva CP foram obtidos diretamente do projeto da rodovia SC-446 trecho Criciúma-Forquilha (SETEP, 2013), sendo fornecidos apenas os dados da média dos corpos de prova testados, enquanto que para a curva CT formulada em laboratório neste trabalho, são apresentados os dados completos e as médias dos resultados indicadas pelos pontos vermelhos, os quais foram comparados com os da curva CP (Tabela 5.1).

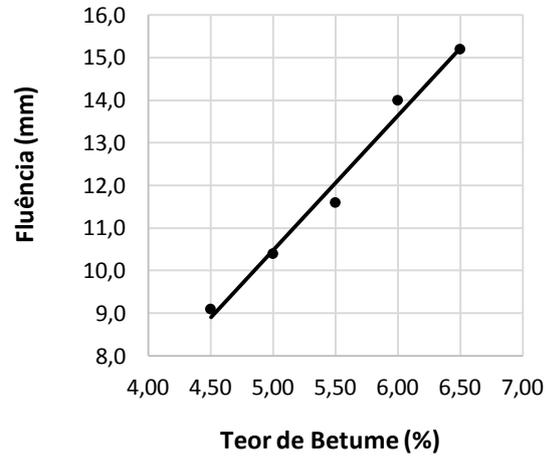
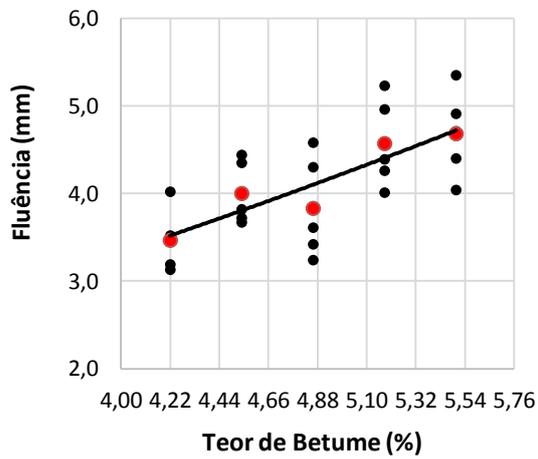
Tabela 5.1 - Resumo dos valores médios obtidos no ensaio Marshall das curvas CT e CP, em relação aos valores normativos de referência.

Misturas asfálticas	Parâmetros							
	Teor de Betume (%)	Estabilidade (kgf)	Fluência (mm)	D_{ap} (g/cm^3)	V (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)
CT	4,22	1609	3,53	2,557	7,86	10,76	18,62	57,83
	4,54	1642	4,00	2,582	6,41	11,69	18,10	64,61
	4,86	1555	3,83	2,587	5,70	12,53	18,24	68,82
	5,18	1607	4,57	2,592	4,96	13,38	18,35	72,97
	5,50	1490	4,68	2,592	4,38	14,21	18,59	76,51
CP	4,50	1050	9,10	2,538	7,27	11,22	18,49	60,68
	5,00	1182	10,4	2,560	5,64	12,57	18,21	69,04
	5,50	1205	11,6	2,572	4,35	13,90	18,25	76,15
	6,00	1180	14,0	2,565	3,79	15,12	18,91	79,96
	6,50	1077	15,2	2,552	3,44	16,29	19,74	82,56
DNIT-ES 031/2006	mín. 500	2,0 a 4,6	-	3,0 a 5,0	-	mín 16,0*	75,0 a 82,0	

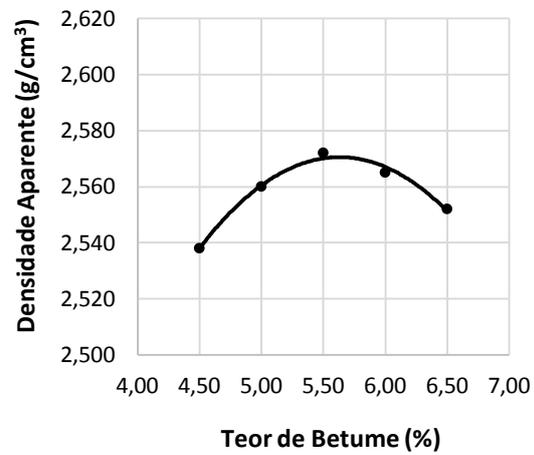
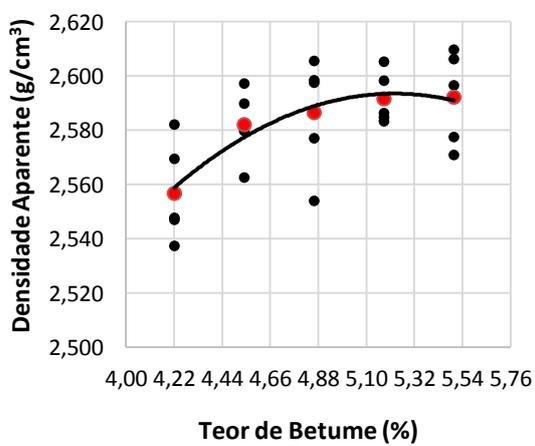
*Para curvas granulométricas com diâmetro nominal máximo = 12,7mm (caso desta pesquisa).



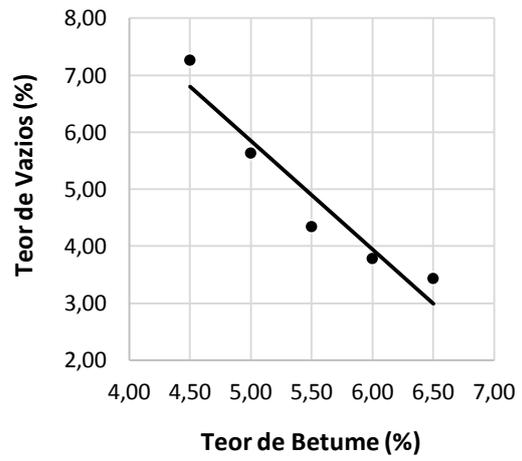
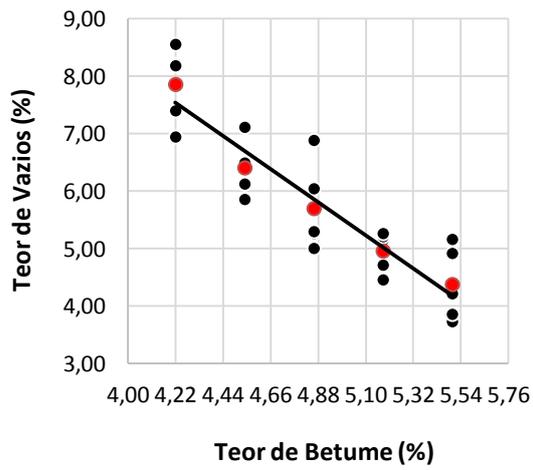
(a)



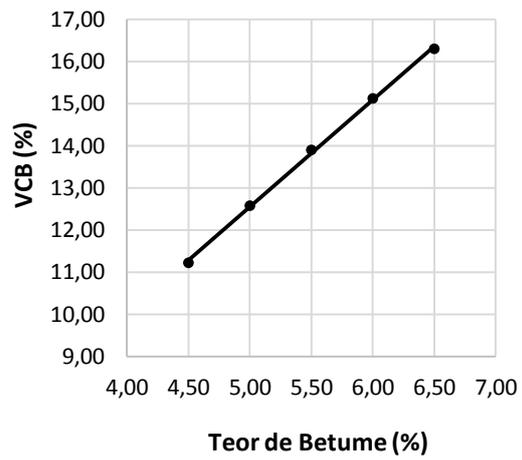
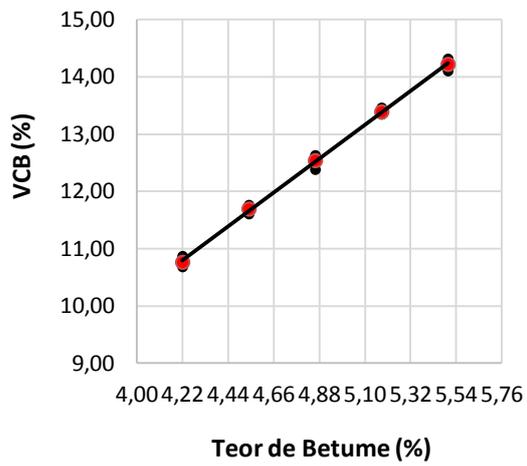
(b)



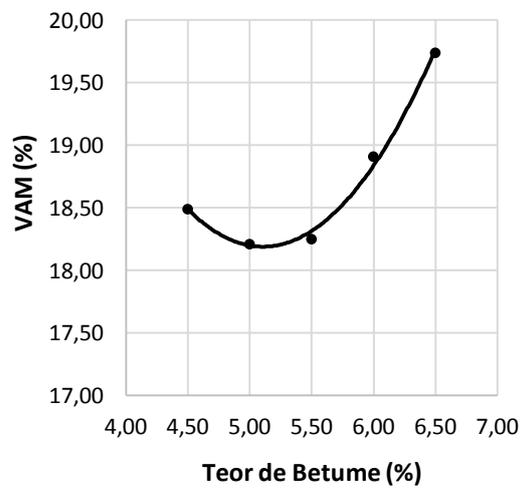
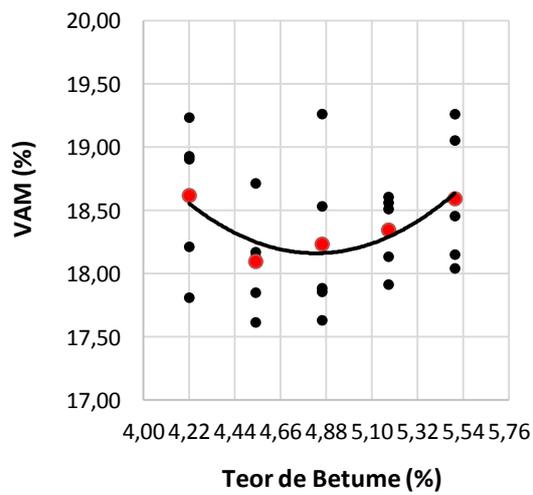
(c)



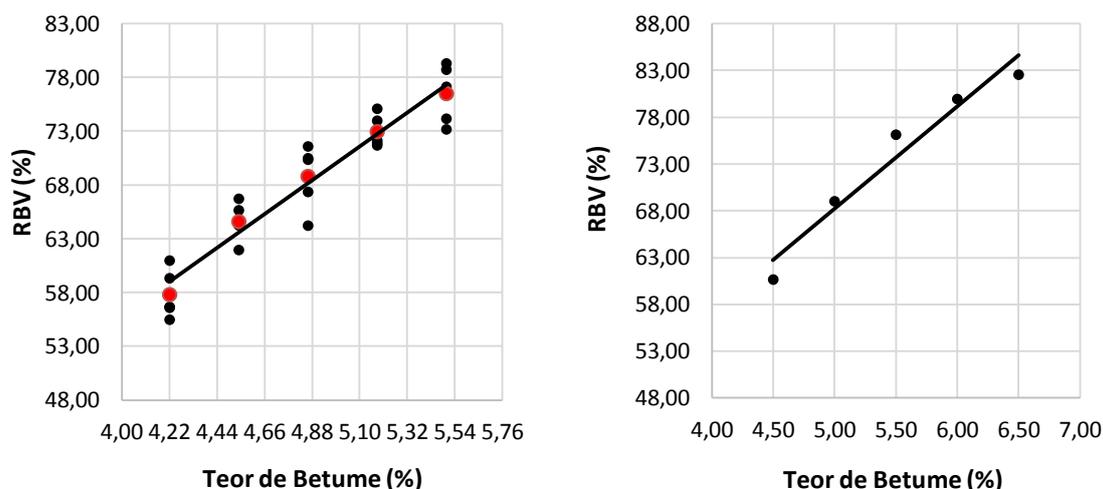
(d)



(e)



(f)



(g)

Figura 5.1 - Representação gráfica dos parâmetros do ensaio Marshall: (a) Estabilidade; (b) Fluência; (c) Densidade Aparente; (d) Teor de Vazios; (e) Vazios Cheios com Betume (VCB); (f) Vazios do Agregado Mineral (VAM); e Relação Betume/Vazios (RBV).

A partir da análise dos resultados apresentados na Tabela 5.1 e com base nas observações feitas durante o procedimento de dosagem, infere-se que o teor ótimo de ligante betuminoso da mistura asfáltica formulada com a curva CT foi determinado em 4,54%, enquanto que para a mistura da curva CP foi de 5,50% (SETEP, 2013).

Para a confirmação do teor de betume 4,54% para a mistura asfáltica CT foram considerados não apenas os valores paramétricos de referência indicados normativamente (DNIT-ES 031, 2006), mas também o aspecto das formulações durante o procedimento de mistura do esqueleto mineral ao ligante betuminoso, notadamente no que se refere ao envolvimento das partículas, bem como os resultados dos ensaios de tração indireta, abordado a diante no item 5.2.

Isto se faz necessário, pois em função da ausência de sensibilidade acurada do método Marshall às variações do teor de betume nas etapas de compactação por impacto e de ruptura por compressão diametral sob carregamento monotônico, ocorre a aplicação de severos esforços mecânicos aos corpos de prova e um distanciamento da dinâmica do ensaio em relação às condições de solicitação observadas no campo, gerando quebras de frações granulares no interior das misturas asfálticas, alterando as relações de densidade aparente,

volume de vazios e de distribuição granulométrica do esqueleto mineral originalmente formulado, o que causa modificações no comportamento mecânico destes materiais.

Portanto, analisando apenas os números absolutos obtidos nos procedimentos de ensaio, em comparação aos valores de referência, tem-se que a mistura asfáltica CT obteve em todas situações os melhores resultados, no que diz respeito principalmente aos parâmetros diretamente relacionados ao desempenho mecânico dos corpos de prova testados, isto é, estabilidade e fluência, os quais apresentaram invariavelmente maiores e menores valores, respectivamente, quando confrontados com a mistura asfáltica CP.

Esta condição confirma as constatações comentadas no Capítulo 3, no item 3.2.2, quanto à ausência de uma quantidade maior de diâmetros correspondentes às frações granulométricas intermediárias bem definidas da curva CP, entre os diâmetros 2,20mm e 0,075mm (Tabela 3.3 e Figura 3.15), que torna deficiente o preenchimento gradual dos vazios formados pelos agregados com partículas de maiores diâmetros, e aumenta a necessidade do aporte maior de grãos com tamanhos menores para o cumprimento desta função, e conseqüentemente da quantidade de ligante betuminoso necessária para o seu recobrimento, resultando em maior perda de estabilidade do esqueleto mineral. Some-se a estes fatores descritos, a presença de partículas de areia com morfologia arredondada e textura lisa na composição granulométrica da curva CP (Figura 3.10a), que contribui à perda de resistência no contato intergranular, sobretudo quando solicitada, acarretando fluência excessiva, forte diminuição do teor de vazios, aumento da relação betume/vazios (RBV) e dos vazios cheios de betume (VCB) do material, que se reflete na ocorrência precoce de deformação permanente no campo.

No caso da mistura asfáltica CT, verifica-se que em razão de dispor de uma distribuição granulométrica que abrange uma quantidade maior de diâmetros de partículas, principalmente nas frações intermediárias compreendidas entre 2,20mm a 0,075mm, e oriundos integralmente de processo de britagem de rocha, com formato subangular e superfície rugosa (Figura 3.10b), há um intertravamento mais efetivo do esqueleto mineral, resultando em boa densificação, com a formação de vazios proporcionais, sem a necessidade de excessos de partículas finas e de ligante betuminoso na composição,

garantindo maior resistência mecânica ao cisalhamento frente aos esforços aplicados, menor fluência, RBV e VCB, em relação à mistura CP.

O DNIT impõe alguns parâmetros normativos para os resultados do ensaio Marshall e também para o ensaio de tração indireta (DNIT-ES 031, 2006). Esses valores deveriam ser dotados apenas como diretrizes, pois os ensaios utilizados hoje no país são empíricos, com pouca sensibilidade quando comparado o que ocorre em laboratório e campo, por exemplo. É muito importante o conhecimento das características físicas e mecânicas dos materiais utilizados e também a observação do operador no momento da realização da mistura asfáltica para auxiliar na decisão sobre qual teor ótimo de ligante escolher.

5.2. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA

No decorrer das análises gráficas houve uma dúvida sobre qual teor ótimo de betume adotar para a mistura CT, entre os valores 4,54% e 4,86%, em razão de que determinados parâmetros indicaram valores absolutos mais favoráveis ao segundo (densidade aparente e fluência, por exemplo), situação solucionada a partir da observação do aspecto do material ainda na condição solta durante e logo após os procedimentos de mistura e, diante dos resultados obtidos no ensaio de tração indireta, em que o teor de 4,54% apresentou um envolvimento adequado dos granulares, sem a constatação de excesso de ligante betuminoso para tanto, pois não havia brilho excessivo do material após a etapa de mistura, fato corroborado pela maior resistência à tração indireta (TI) obtida pela média do resultado de 3 corpos de prova testados para cada mistura asfáltica, respectivamente (Tabela 5.2).

Tabela 5.2 - Resultados da média dos valores de resistência à tração indireta das misturas asfálticas CT.

Mistura Asfáltica	Teor de Betume (%)	Corpo de Prova (CP)	Tração Indireta (MPa)	Valor Médio Tração Indireta (Mpa)
CT	4,54	1	1,07	1,04
		2	1,01	
		3	1,04	
	4,86	1	0,98	0,92
		2	0,91	
		3	0,86	
Valor de Referência (DNIT-ES 031, 2006)				≥ 0,65

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos neste trabalho comprovam que a formulação dos esqueletos minerais é um parâmetro decisivo na obtenção de uma mistura asfáltica mais resistente aos esforços mecânicos aplicados, pois ainda que tenha sido utilizado o mesmo ligante betuminoso 50/70 na produção das misturas CT e CP, com elevada penetração (67,0 (0,1mm)) e baixo ponto de amolecimento (50°C), verificou-se que a mistura asfáltica CP apresentou piores resultados, em relação à mistura CT.

Neste contexto, tem-se que a metodologia tradicionalmente aplicada no Brasil por tentativa se mostrou deficiente do ponto de vista técnico, em razão de não permitir um controle acurado das frações heterogêneas advindas das graduações produzidas nas centrais de britagem e peneiramento, acarretando desproporções na distribuição das partículas dos esqueletos minerais, principalmente pelo excesso de materiais finos que tendem a se acumular na combinação percentual de várias graduações mal definidas, gerando misturas asfálticas sem resistência mecânica suficiente para suportar os esforços aplicados pelas cargas solicitantes.

Ainda, a solução de se utilizar frações de areia para correção de curvas granulométricas, também muito comum no Brasil, para corrigir o efeito do acúmulo de materiais finos citado no parágrafo anterior, geralmente contribui para aumentar ainda mais a heterogeneidade do esqueleto mineral e a instabilidade do contato intergranular, pois no caso deste trabalho, a areia apresenta algumas partículas com morfologia arredondada e superfície lisa, ocasionando assim, a diminuição da resistência do esqueleto mineral aos esforços gerados durante a movimentação interna do material quando solicitado, resultando em misturas asfálticas com menor resistência mecânica (estabilidade) e teor de vazios e, maior potencial de deformação (fluência), que se configura na ocorrência precoce de deformação permanente no campo.

Em contrapartida, a metodologia de formulação teórica, a partir da utilização da Equação de *Füller-Talbot*, permite um controle preciso das frações granulares que compõem a série de peneiras escolhidas pelo projetista, pois trabalha com

os diâmetros selecionados de forma individual e bem definidos por peneira, sem riscos de heterogeneidade de tamanhos em uma mesma graduação. Desta forma, tem-se um esqueleto mineral com formação de vazios proporcionais na transição de diâmetros maiores aos de menor dimensão, o que contribui para um contato intergranular mais efetivo do esqueleto mineral, e à diminuição do teor ótimo de ligante betuminoso da formulação (0,96% a menos que na mistura CP), que se reflete na obtenção de misturas asfálticas mecanicamente mais resistentes e menos suscetíveis a deformações excessivas, caso da mistura asfáltica CT quando comparada à CP, tanto na avaliação do ensaio Marshall quanto de tração indireta.

Entretanto, é importante destacar que apenas os resultados dos ensaios Marshall e de tração indireta não são suficientes para que se faça uma escolha coerente do teor ótimo de betume dosado para as misturas asfálticas, pois os esforços aplicados durante o procedimento de compactação por impacto e, de ruptura por compressão diametral sob carregamento monotônico, não reproduzem as condições de solicitação observadas no campo, em que a compactação é realizada por rolamento de rolos pneumáticos e de chapas, e a ruptura por fadiga se dá em função de microdeformações repetidas no domínio linear da viscoelasticidade dos materiais betuminosos, a partir de sinais de deformação à flexão alternada.

Portanto, os ensaios Marshall e de tração indireta são empíricos, muito pouco sensíveis e acurados na interpretação do comportamento viscoelástico das misturas asfálticas, aumentando a importância do conhecimento das propriedades dos materiais que o projetista e o operador dispõem para formulação e que, principalmente, estejam muito atentos aos procedimentos de mistura do esqueleto mineral com o ligante betuminoso, pois nesta ocasião é possível, com base na experiência e ainda que empiricamente, ter noção de quando a quantidade de ligante adicionada satisfaz a condição ótima da formulação, conforme foi confirmado pelos resultados dos ensaios de tração indireta diante da dúvida existente entre os teores de 4,54% e 4,86% para a mistura asfáltica CT, em que o primeiro foi escolhido, conforme observação prévia do operador efetuada durante o procedimento de mistura do ensaio Marshall e confirmado pelo ensaio de tração indireta.

Diante dos argumentos expostos e fundamentados nos resultados obtidos no decorrer deste trabalho, acredita-se que os valores de referência normativos indicados para o enquadramento das misturas asfálticas nos parâmetros do ensaio Marshall devem ser considerados como meras diretrizes e não condições impositivas, diante das condições de falta de correspondência dos procedimentos de compactação e de ruptura dos corpos de prova com as situações reais de campo.

Ainda, como recomendação, a metodologia de formulação dos esqueletos minerais por tentativa deve ser substituída no Brasil pelo procedimento teórico, em razão dos melhores resultados de desempenho que a primeira confere às misturas asfálticas, bem como deve-se abolir o uso de granulares com morfologias que não sejam subangulares e de textura rugosa.

Também recomenda-se a realização de outros ensaios laboratoriais como, por exemplo: deformação permanente, módulo de rigidez dinâmico (complexo) e resistência à fadiga de acordo com a metodologia francesa para complemento dos resultados obtidos.

Neste contexto, sugere-se que também seja implantada e adaptada no Brasil uma metodologia de avaliação do comportamento mecânico das misturas asfálticas que tenha estreita e comprovada relação campo/laboratório, como é verificado na metodologia francesa, por exemplo (Manuel LPC, 2007).

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas **NBR 7809/87: Agregado Graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro**. São Paulo, SP, Brasil, 1987.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6296/2004: Determinação da massa específica real de ligantes betuminosos**. São Paulo, SP, Brasil, 2004.

BARRA, B.S. **Avaliação da Ação da Água no Módulo Complexo e na Fadiga de Misturas Asfálticas Densas**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, SC, Brasil, 2009.

BARRA, B. S. **Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas densas utilizando materiais do Estado do Pará com o emprego de pó calcário**. 202 p. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, SC, Brasil, 2005.

BERNUCCI, L. B; MOTTA L. M. G. da; CERATTI J. A. P.; SOARES J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 3ª Reimpressão. Rio de Janeiro, RJ, 2010. Disponível em http://www.proasfalto.com.br/07_download.htm. Última consulta em maio de 2015.

DEINFRA - Departamento Nacional de Infraestrutura do Estado de Santa Catarina. **Faixa granulométrica D para Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ)**. 2015. <http://www.deinfra.sc.gov.br>. Última consulta em abril de 2015.

DEINFRA ES-P 05/92. **Camadas de misturas asfálticas usinadas a quente**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1992 Disponível em: http://www.deinfra.sc.gov.br/jsp/relatorios_documentos/doc_tecnico.jsp. Última consulta em março de 2015.

DNER-ME 04/94. **Material Betuminoso: Determinação da Viscosidade Saybolt-Furol à Alta Temperatura**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro (RJ), 1994.

DNER-ME 043/95. **Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro (RJ), 1995.

DNER-ME 078/94. **Agregado - adesividade a ligante betuminoso**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro (RJ), 1994.

DNER-ME 35/98. **Agregados: Determinação da Abrasão Los Angeles.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro (RJ), 1998.

DNER-ME 81/98. **Agregados: Determinação da Absorção e da Densidade do Agregado Graúdo.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro (RJ), 1998.

DNER-ME 84/95. **Agregado Miúdo: Determinação da Densidade Real.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro (RJ), 1995.

DNER-ME 89/94. **Agregados: Avaliação da Durabilidade pelo Emprego de Soluções de Sulfato de Sódio ou de Magnésio.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro (RJ), 1994.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação.** Rio de Janeiro (RJ), 2006. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf>. Última consulta em maio de 2015.

DNIT-EM 095/2006. **Cimentos asfálticos de petróleo.** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro (RJ), 2006.

DNIT-ES 031/2006. **Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço.** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro (RJ), 2006.

DNIT-ME 117/94. **Mistura betuminosa – determinação da densidade aparente.** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro (RJ), 1994.

DNIT-ME 131/2010. **Materiais asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola.** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro (RJ), 2010.

DNIT-ME 136/2010. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral.** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro (RJ), 2010.

DNIT-ME 155/2010. **Material asfáltico - Determinação da penetração.** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro (RJ), 2010.

LA SERNA, H. A. de; REZENDE, M. M.. **Agregados para a Construção Civil**. In: Departamento Nacional de Produção Mineral. **Economia Mineral do Brasil**. Brasília, DF. p. 602-635. 2009 Disponível em: <<http://anepac.org.br/wp/wp-content/uploads/2011/07/DNPM2009.pdf>>. Última consulta em abril de 2015.

MANUEL LPC. **Manuel LPC d'Aide à la Formulation des Enrobés. Publié par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)**. Groupe de Travail RST "Formulation des Enrobés". 199p. Paris, France, 2007

MEDINA, J.. **Mecânica dos Pavimentos**. Editora UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1997.

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

MORILHA, A. J.. **Estudo sobre a Ação de Modificadores no Envelhecimento dos Ligantes Asfálticos e nas Propriedades Mecânicas e de Fadiga das Misturas Asfálticas**. 185 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, 2004. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/87049/207429.pdf?sequence=1>> Última consulta em abril de 2014.

SENÇO, W. de. **Manual de Técnicas de Pavimentação: Volume 2**. 1. ed. São Paulo, SP, 2001. Pini Ltda. 688 p.

SENÇO, W. de. **Manual de Técnicas de Pavimentação: Volume 1**. 2. ed. São Paulo, SP, 2008. Pini Ltda. 779 p.

SETEP. **Projeto de concreto asfáltico usinado a quente - Faixa D DEINFRA: Rodovia SC-446 Trecho Criciúma- Forquilha, Lote 4**. SETEP – Topografia e Construções Ltda. Programa Rodoviário do Estado de Santa Catarina – Etapa IV, 2013.