

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

PEDRO AUGUSTO ZAGOLIN

**INFLUÊNCIA DO TIPO DE LIGANTE BETUMINOSO NA DOSAGEM E NO
COMPORTAMENTO DE FLUÊNCIA E ESTABILIDADE DE MISTURAS
ASFÁLTICAS DENSAS**

Joinville

2016

INFLUÊNCIA DO TIPO DE LIGANTE BETUMINOSO NA DOSAGEM E NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

PEDRO AUGUSTO ZAGOLIN

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro de Joinville da
Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito parcial para obtenção do
título de Engenheiro de Infraestrutura.

Orientador: Prof. Dr. Breno Salgado Barra

Joinville

2016

Zagolin, Pedro Augusto

Influência do tipo de ligante betuminoso na dosagem e no comportamento de fluência e estabilidade de misturas asfálticas densas / Pedro Augusto Zagolin ; orientador, Breno Salgado Barra - Joinville, SC, 2016.

54 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville. Graduação em Engenharia de Infraestrutura.

Inclui referências

1. Engenharia de Infraestrutura. 2. Ligantes asfálticos. 3. Metodologia Marshall. 4. Dosagem. 5. Desempenho Mecânico. I. Barra, Breno Salgado. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Infraestrutura. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Carlos e Silene, por terem me concedido todas as oportunidades possíveis para o meu crescimento, pela educação e exemplo de pessoas que são. Faltam-me palavras para expressar a minha gratidão por tudo em minha vida. Muito obrigado.

Aos meus irmãos, Carlos e Luiz, que sempre me apoiaram e encorajaram a seguir a carreira profissional na área de engenharia e pelo intercâmbio de conhecimentos e experiências ao longo da graduação.

À minha namorada, Gabriela Duarte de Souza, por ser fundamental em minha vida, estar sempre ao meu lado dando apoio nos momentos difíceis e incentivando a seguir em busca de sonhos.

Aos amigos e companheiros de laboratório, Marco Aurélio Coppini, Gustavo Araldi e, em especial, Rodrigo Shigueiro Siroma, por não medirem esforços para me auxiliarem e pela contribuição na troca de experiências e discussões na área de pavimentação.

Aos colegas que estiveram junto durante a graduação e puderam colaborar com o meu crescimento pessoal através do compartilhamento de conhecimentos e companheirismo nas atividades.

Ao meu orientador, professor Breno, pela oportunidade e pelos ensinamentos prestados e por me fazer compreender que através da ciência podemos alterar uma realidade completamente desprezada em nosso país.

SUMÁRIO

RESUMO	iii
ABSTRACT.....	iv
LISTA DE ABREVIACOES.....	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS.....	viii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1 Objetivo geral.....	2
1.1.2 Objetivos específicos	2
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	3
2.1 Agregados	3
2.2 Ligantes Asfálticos.....	6
2.3 Misturas Asfálticas.....	11
2.3.1 Tipos de Misturas Asfálticas.....	11
2.3.2 Curva granulométrica e metodologia Marshall	13
3 MATERIAIS E CURVA GRANULOMÉTRICA SELECIONADA.....	15
3.1 Caracterização dos agregados	15
3.2 Caracterização dos ligantes	17
3.2.1 Ponto de amolecimento anel e bola	17
3.2.2 Penetração.....	19
3.2.3 ndice de Pfeiffer e Van Doormaal.....	21
3.2.4 Viscosidade Saybolt-Furol.....	22
3.2.5 Massa específica	26
3.3 Curva granulométrica selecionada	27
4 ENSAIOS LABORATORIAIS	30
4.1 Metodologia Marshall	30
5 RESULTADOS E DISCUSSOES	38
5.1 Considerações gerais.....	38

5.2	Análise dos resultados do ensaio Marshall	40
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	50
	REFERÊNCIAS	52

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho tange à análise do comportamento mecânico de misturas asfálticas densas concebidas com diferentes ligantes asfálticos. Os agregados utilizados são provenientes da jazida Vogelsanger, localizada na região metropolitana de Joinville. Os ligantes empregados são Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) classificados por penetração como: CAP 10/20, CAP 30/45 e CAP 50/70 e foram obtidos junto à empresa Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS). Estudos de caracterização tanto do agregado quanto do ligante betuminoso foram realizados para se adquirir um melhor conhecimento das propriedades desses materiais. A curva granulométrica foi calculada pela equação de Füller-Talbot, e se mostra mais eficiente quanto à distribuição do arranjo das partículas que compõem o esqueleto mineral das misturas asfálticas, em relação aos métodos empíricos por tentativa utilizados no Brasil. Para a dosagem das misturas asfálticas a metodologia Marshall foi empregada, em razão de ser oficialmente homologada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Os resultados obtidos indicam que as características intrínsecas de cada ligante asfáltico são preponderantes quanto à influência na dosagem e no desempenho mecânico das misturas asfálticas e, que o ensaio Marshall mostra-se muito deficiente do ponto de vista técnico como metodologia a ser utilizada na determinação dos teores ótimos de dosagem.

Palavras-chave: ligantes asfálticos, metodologia Marshall, dosagem, desempenho mecânico.

ABSTRACT

The main aim of this research is to analyze the influence of different asphalt binders on the mechanical behavior of dense asphalt mixes. The aggregate source used is provided by Vogelsanger quarry, located in the metropolitan area of Joinville. The binders used are ranked by penetration such as: 10/20, 30/45 and 50/70, which were supplied by PETROBRAS. Characterization tests with the aggregates and bituminous binders were carried out, in order to better understand the properties of these materials. Füller-Talbot equation was used to calculate the aggregate gradation curve, providing more efficient distribution of the particles when compared to the empirical trial method used currently in Brazil. Marshall methodology was used for dosing the asphalt mixes, due to be officially homologated by Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) in Brazil. The results obtained indicate that the intrinsic characteristics of each asphalt binder are decisive on the dosage parameters, as well as on the mechanical performance of asphalt mixes. Furthermore, it can be concluded that Marshall test is technically unsuitable to be used for determining the optimum contents of the mixes.

Key-words: asphalt binders, Marshall methodology, dosage, mechanical performance.

LISTA DE ABREVIações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional do Petróleo
ADP	Asfalto Diluído de Petróleo
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EAP	Emulsão Asfáltica de Petróleo
ES	Especificação de Serviço
IP	Índice de Pfeiffer e Van Doormaal
LDTPav	Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação
LTDA	Limitada
ME	Método de Ensaio
MEA	Massa Específica Aparente
NBR	Norma Brasileira
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro
REPAR	Refinaria Presidente Getúlio Vargas
REPLAN	Refinaria de Paulínia
RBV	Relação Betume/Vazios
S.A.	Sociedade Anônima
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
V	Teor de Vazios
VAM	Vazios do Agregado Mineral
VCB	Vazios Cheios de Betume

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação convencional de curvas granulométricas.	6
Figura 2.2 – Representação da estrutura coloidal de cimento asfáltico.	7
Figura 2.3 – Módulo Complexo no plano Cole-Cole.	8
Figura 2.4 – Produtos obtidos da destilação fracionada do petróleo.	9
Figura 2.5 – Classificação das misturas asfálticas em função de temperaturas típicas de usinagem (números aproximados).	11
Figura 2.6 – Exemplo de comparativo entre curva prática e curva teórica.	14
Figura 3.1 – Ponto de amolecimento anel e bola: amostras (a) indeformadas, (b) iniciando a deformação e (c) ao final do processo.	18
Figura 3.2 – Resultado do ponto de amolecimento dos ligantes.	18
Figura 3.3 – Amostras do ensaio de penetração: (a) secas e (b) submersas em água.	19
Figura 3.4 – (a) Penetrômetro e (b) amostra sendo penetrada.	20
Figura 3.5 – Resultado de penetração dos ligantes.	20
Figura 3.6 – Resultado do índice de Pfeiffer e Van Doormaal dos ligantes.	21
Figura 3.7 – Viscosidade do ligante: (a) Viscosímetro Saybolt-Furol e (b) escoamento no frasco inferior.	23
Figura 3.8 – Curva de viscosidade Saybolt-Furol do CAP 10/20.	24
Figura 3.9 – Curva de viscosidade Saybolt-Furol do CAP 30/45.	24
Figura 3.10 – Curva de viscosidade Saybolt-Furol do CAP 50/70.	25
Figura 3.11 – Comparativo da curva de viscosidade Saybolt-Furol dos ligantes.	25
Figura 3.12 – Massa específica do ligante: (a) picnômetros cheios com água e ligante e (b) tomada das massas.	26
Figura 3.13 – Resultado da massa específica dos ligantes.	27
Figura 3.14 – Curva granulométrica selecionada mediante a faixa C do DNIT.	29
Figura 4.1 – Metodologia Marshall: (a) adição do ligante aos agregados graúdos, (b) colocação dos agregados finos e (c) mistura homogeneizada.	31
Figura 4.2 – Metodologia Marshall: (a) colocação da mistura nos moldes, (b) mistura compactada e (c) compactação no soquete Marshall.	32

Figura 4.3 – Desmolde dos corpos de prova.	33
Figura 4.4 – Disposição final dos 75 corpos de prova.	33
Figura 4.5 – Pesagem hidrostática: (a) corpo de prova já encapado sendo parafinado e (b) pesagem hidrostática.	34
Figura 4.6 – Rompimento dos corpos de prova na prensa Marshall.	37
Figura 5.1 – Estabilidade das misturas asfálticas de (a) CAP 10/20, (b) CAP 30/45 e (c) CAP 50/70.	41
Figura 5.2 – Fluência das misturas asfálticas de (a) CAP 10/20, (b) CAP 30/45 e (c) CAP 50/70.	41
Figura 5.3 – Massa específica aparente das misturas asfálticas de (a) CAP 10/20, (b) CAP 30/45 e (c) CAP 50/70.	42
Figura 5.4 – Teor de vazios das misturas asfálticas de (a) CAP 10/20, (b) CAP 30/45 e (c) CAP 50/70.	42
Figura 5.5 – Vazios cheios com betume das misturas asfálticas de (a) CAP 10/20, CAP 30/45 e (c) CAP 50/70.	43
Figura 5.6 – Vazios do agregado mineral das misturas asfálticas de (a) CAP 10/20, (b) CAP 30/45 e (c) CAP 50/70.	43
Figura 5.7 – Relação betume/vazios das misturas asfálticas de (a) CAP 10/20, (b) CAP 30/45 e (c) CAP 50/70.	44
Figura 5.8 – Comparativo das superfícies de misturas com dois diferentes teores de CAP 10/20: (a) 4,86% e (b) 5,18%.	45
Figura 5.9 – Comparativo dos filtros dos corpos de prova com dois diferentes teores de CAP 10/20: (a) 4,86% e (b) 5,18%.	46
Figura 5.10 – Comparativo das superfícies de misturas com dois diferentes teores de CAP 30/45: (a) 4,54% e (b) 4,86%.	46
Figura 5.11 – Comparativo dos filtros dos corpos de prova com dois diferentes teores de CAP 30/45: (a) 4,54% e (b) 4,86%.	47
Figura 5.12 – Comparativo das superfícies de misturas com dois diferentes teores de CAP 50/70: (a) 4,54% e (b) 4,86%.	47
Figura 5.13 – Comparativo dos filtros dos corpos de prova com dois diferentes teores de CAP 50/70: (a) 4,54% e (b) 4,86%.	48
Figura 5.14 – Corpos de prova após o rompimento na prensa Marshall: (a) CAP 10/20, (b) CAP 30/45 e (c) CAP 50/70.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Exemplo de composições químicas de asfaltos.....	9
Tabela 2.2 – Especificação do Cimento Asfáltico de Petróleo.....	10
Tabela 2.3 – Exemplo de temperaturas de estocagem e usinagem de alguns ligantes asfálticos e do agregado.	12
Tabela 3.1 – Resultado da caracterização dos agregados.....	16
Tabela 3.2 – Intervalos das temperaturas de usinagem e compactação dos ligantes.....	23
Tabela 3.3 – Distribuição granulométrica da curva selecionada.....	28
Tabela 5.1 – Limites normativos de referência para as misturas asfálticas.	38
Tabela 5.2 – Parâmetros de análise do ensaio Marshall.	48

1 INTRODUÇÃO

O sistema rodoviário brasileiro é hoje o principal meio de transporte no país, tanto para pessoas quanto mercadorias (PEREIRA *et al.*, 2013). Sua ampla flexibilidade e acessibilidade traz comodidade aos usuários, garantindo o ir e vir de onde e para onde quiser. Porém, o crescimento acelerado da demanda das rodovias não foi acompanhado pelos investimentos para sua ampliação e manutenção, resultando em uma malha degradada em diversas Regiões do país.

Os pavimentos são muitas vezes a principal problemática percebida. Quando mal dimensionados ou dosados (no caso das misturas asfálticas), podem causar desconforto e insegurança aos usuários, ficando estes mais suscetíveis a acidentes de trânsito. A má execução reflete diretamente nas camadas de revestimento, através de buracos, fissuras, deformações, entre outros. Dessa forma, fazem-se necessários estudos mais aprofundados das propriedades físicas e mecânicas das misturas asfálticas, para que se possa então desenvolver pavimentos de melhor qualidade.

No caso das misturas asfálticas, o conjunto de uma matriz granulométrica bem formulada aliada a um ligante betuminoso dosado na proporção correta e com boas características viscoelásticas constituem os componentes principais capazes de resistir aos esforços mecânicos solicitantes ao longo da vida útil dos pavimentos (BARRA, 2015). Quando se tem qualidade, controle e o correto conhecimento das propriedades dos materiais durante a produção das misturas asfálticas, garante-se o bom comportamento mecânico dos pavimentos.

A metodologia convencionalmente utilizada no Brasil para a dosagem de misturas asfálticas é denominada Marshall. Desenvolvida na década de 40 por Bruce Marshall, a metodologia é regida pela normativa DNER-ME 043/95, a qual determina o teor ótimo de ligante para a mistura.

Nesse contexto, a presente pesquisa consiste na avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas densas formuladas a partir de diferentes ligantes

betuminosos, de acordo com os princípios da metodologia Marshall. Manteve-se em cada um dos traços a mesma curva granulométrica e, assim, a análise teve enfoque unicamente na influência de cada ligante na dosagem e no comportamento mecânico.

Todos os procedimentos, previstos em normas nacionais, aconteceram no Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Centro de Joinville.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a influência do tipo de ligante betuminoso na dosagem e no comportamento da fluência e estabilidade de misturas asfálticas densas.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Caracterizar os ligantes betuminosos e os agregados a serem utilizados a fim de se obter as propriedades e características físicas e mecânicas destes materiais;
- b) Investigar, através de ensaios laboratoriais, o comportamento mecânico de três misturas asfálticas formuladas com a mesma curva granulométrica, a fim de se determinar o teor ótimo de ligante para cada caso, restringindo assim a análise ao impacto gerado pelas matrizes betuminosas distintas;
- c) Analisar qual a influência dos ligantes asfálticos utilizados na estabilidade e fluência das misturas asfálticas, a partir da interpretação dos parâmetros definidos pela metodologia Marshall.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo consiste em uma consolidação da teoria aplicada à problemática do trabalho. Para tal serão discutidos panoramas gerais da pavimentação, definições e classificações. O foco principal serão os ligantes asfálticos.

2.1 Agregados

Uma camada de revestimento asfáltico é construída a partir da associação de dois elementos básicos: agregados e ligantes asfálticos e, eventualmente, adições ou aditivos. Essas associações devem ser realizadas de tal forma que suporte os carregamentos aplicados durante a vida útil de projeto da via.

Os *agregados* são definidos, segundo a NBR 9935/2011 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), como materiais granulares, sem forma ou volume conhecidos, resultantes de processos naturais ou artificiais, cujas características se adequam a preparação de argamassas ou concretos.

São denominados também de *agregados minerais*, por serem resultantes de antigos processos mineralógicos das camadas terrestres. Assim, de acordo com Bernucci *et al.* (2010), fazem-se necessários estudos geológicos mais aprofundados sobre as origens de tais materiais e as transformações ocorridas desde então, a fim de se compreender os potenciais dos mesmos.

São inúmeras as aplicações para os agregados, cada qual com sua peculiaridade. Assim, algumas características são categorizadas, de forma a facilitar a escolha do material. Essas classificações podem ser: a) quanto à natureza, b) quanto ao tamanho e c) quanto à granulometria e serão discutidas adiante.

a) Quanto à natureza

Os *agregados naturais* são resultados de processos espontâneos da natureza, onde as rochas estão submetidas a ações físicas e químicas, as quais irão exercer grande influência em suas propriedades. As intempéries (ações de vento, água e/ou gelo), as alterações de temperatura e pressão e o tipo de transporte do material antes da deposição (aluvionar, coluvionar, dentre outros) são alguns desses fatores. São exemplos o seixo rolado e a areia.

Em alguns casos, porém, há necessidade de algum tipo de intervenção para se alcançar um material com as propriedades desejadas. Alterações estruturais, como no caso de escórias de alto forno e argilas expandidas, definem o material como *agregado artificial*.

À classificação *artificial* pertencem ainda, a bem rigor da definição, os agregados advindos de processos de britagem, os quais influenciam diretamente nas dimensões e forma (SENÇO, 2008). Porém, por se tratar de um material com propriedades muito semelhantes aos da rocha mãe, alguns autores preferem referenciá-lo como *agregado natural*.

b) Quanto ao tamanho

As dimensões das partículas podem ser distintas em três grupos: *agregados graúdos*, *agregados miúdos* e *material de enchimento (filer)*. Senço (2008) destaca ainda as impurezas associadas aos agregados, como argilas, que deverão ser eliminadas para determinadas aplicações.

A classificação quanto ao tamanho acontece através do processo de peneiramento dos grãos. *Materiais graúdos* consistem na fração retida na peneira nº10 (2,0mm); *materiais miúdos* se limitam à fração passante na peneira nº10 e retida na nº200 (0,075mm); e o *material de enchimento* corresponde à fração passante na peneira nº200.

Algumas terminologias são importantes destacar, como observado no DNER-ME 083/98. *Diâmetro máximo* é designado como sendo a abertura máxima da peneira a qual retém 5% ou menos da massa total da amostra. *Módulo de finura* é a soma do percentual retido acumulado nas peneiras dividido por 100. Materiais de enchimento são também chamados de *materiais pulverulentos*.

O tamanho máximo do agregado em misturas asfálticas para revestimentos pode afetar essas misturas de várias formas. Pode tornar instáveis misturas asfálticas com agregados de tamanho máximo excessivamente pequeno e prejudicar a trabalhabilidade e/ou provocar segregação em misturas asfálticas com agregados de tamanho máximo excessivamente grande. (BERNUCCI *et al.*, 2010, p. 120).

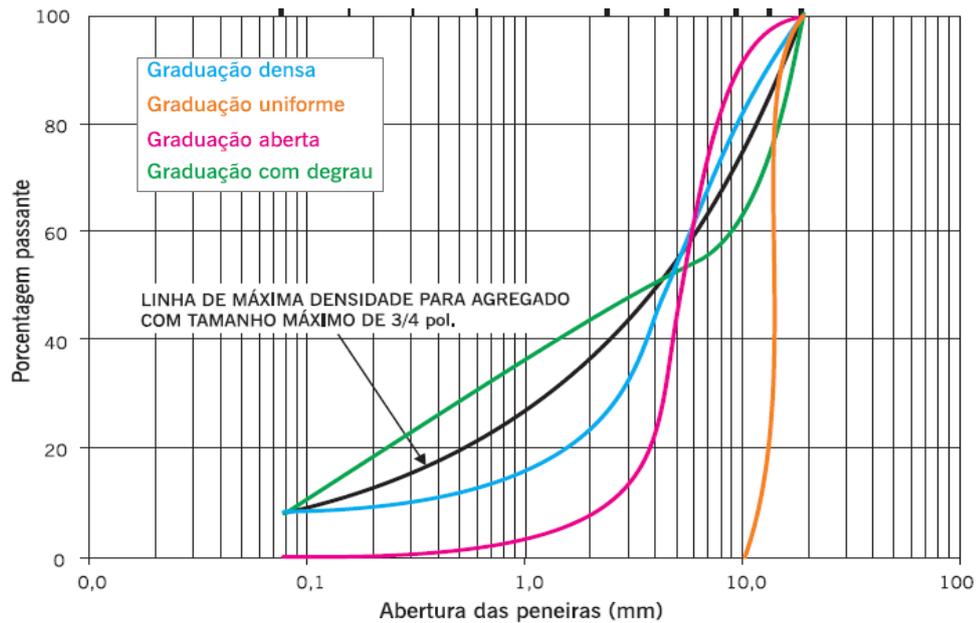
c) Quanto à granulometria

Ao projetar-se uma via com pavimento asfáltico, a granulometria adotada para os agregados influenciará fortemente em diversas propriedades da mistura, como rigidez, estabilidade, durabilidade dentre outros (BERNUCCI *et al.*, 2010). Com isso faz-se necessário a adoção de uma curva granulométrica adequada para que se garanta um melhor empacotamento das partículas.

As mais importantes graduações são descritas abaixo e suas curvas são indicadas na Figura 2.1:

- Graduação densa: distribuição granulométrica contínua, com melhor entrosamento dos grãos e melhor preenchimento de vazios;
- Graduação aberta: distribuição granulométrica contínua, mas com insuficiência de material fino, causando o aumento dos vazios;
- Graduação uniforme: maior parte dos agregados com um tamanho único, em uma faixa estreita;
- Graduação descontínua: poucos agregados de tamanho intermediário, formando um patamar na curva granulométrica.

Figura 2.1 – Representação convencional de curvas granulométricas.



Fonte: Bernucci *et al.*, 2010, p. 123.

2.2 Ligantes Asfálticos

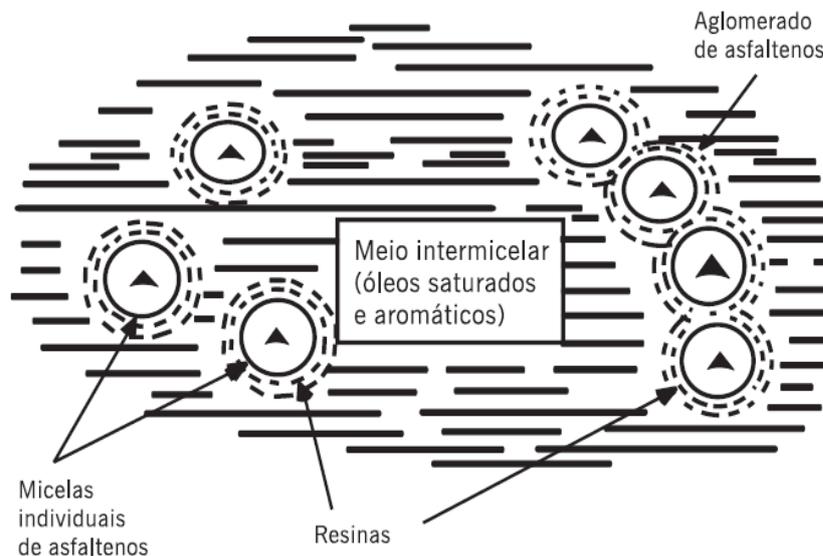
Para que se consiga manter a coesão entre os grãos do esqueleto mineralógico é necessária a aplicação dos ligantes asfálticos. De acordo com Senço (2008) o asfalto é um dos produtos mais antigos utilizados para aglutinação e impermeabilização. Há relatos de sua utilização na antiga Mesopotâmia, como aglutinante de tijolos de muros, pisos e edifícios. Na Grécia, era utilizado na impermeabilização de aquedutos e em catapultas. Aliás, a palavra *asfalto* tem origem grega e quer dizer firme, estável, explicando por si própria o porquê de sua utilização em misturas com agregados.

Também conhecidos como *ligantes betuminosos*, ou *betume*, são materiais aglutinantes de consistência variável, cor pardo-escuro ou negro e caracterizados por possuírem em sua composição química cerca de 90 a 95% de hidrocarbonetos (BARRA, 2015).

Leite (1990) mostra que a estrutura química dos betumes consiste basicamente de duas fases: o meio intermicelar e os asfaltenos, como se pode observar na Figura 2.2. No estado Sol, onde as micelas de asfaltenos encontram-se

dispersas no meio intermicelar, o comportamento é praticamente newtoniano, onde as taxas de deformação são proporcionais às tensões de cisalhamento aplicadas. Já no estado Gel, onde se tem aglomerados de asfaltenos, assegura-se o suporte estrutural, e o comportamento é não newtoniano (BARRA, 2015).

Figura 2.2 – Representação da estrutura coloidal de cimento asfáltico.



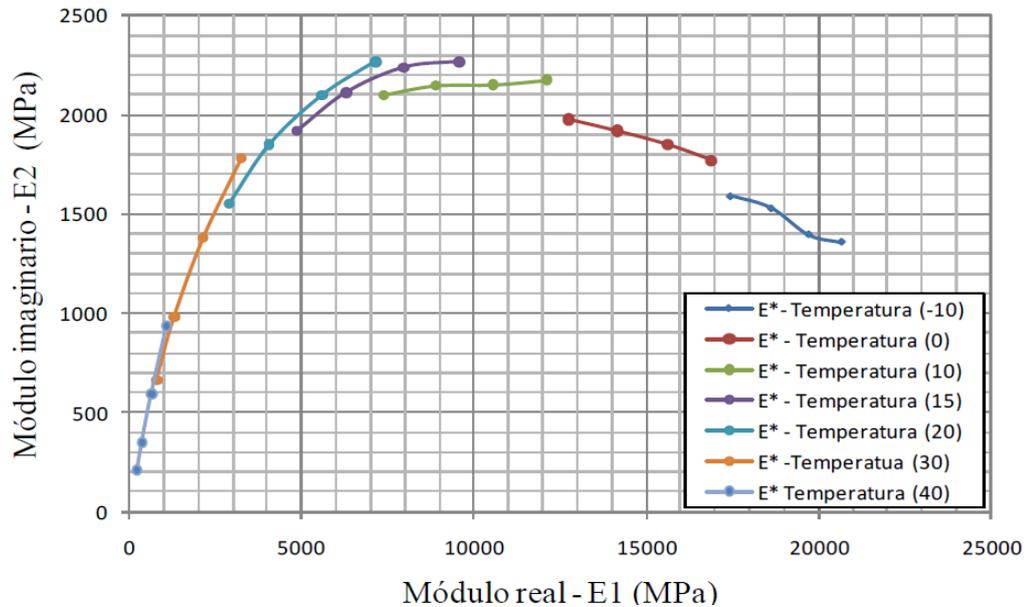
Fonte: Yen¹ (1991) *apud* Bernucci *et al.* (2010, p. 31).

As propriedades químicas garantem ao asfalto uma importante característica: seu comportamento termo-viscoelástico. Ou seja, o material se comportará de maneiras diversas dependendo da frequência e carga do carregamento aplicado, assim como da temperatura.

O gráfico indicado na Figura 2.3, denominado Plano Cole-Cole, mostra essa característica do ligante em misturas asfálticas. Cada segmento da curva, em diferentes cores, representa uma temperatura, onde para cada um desses segmentos tem-se a aplicação de quatro diferentes frequências de carregamento. Com os dados módulo elástico (E1), que representa energia recuperada, e de módulo viscoso (E2), que representa a energia perdida, consegue-se elaborar o gráfico.

¹ Yen T. F. **Asphaltene/resin plus oil interconversion: an investigation into colloidal model of asphaltenes.** 114 p. In: WORKSHOP THE CHEMICAL COMPONENTS AND STRUCTURE OF ASPHAL- TIC MATERIALS, Roma, Itália, 1991.

Figura 2.3 – Módulo Complexo no plano Cole-Cole.



Fonte: Momm² (1998) *apud* Quintero (2011, p. 51).

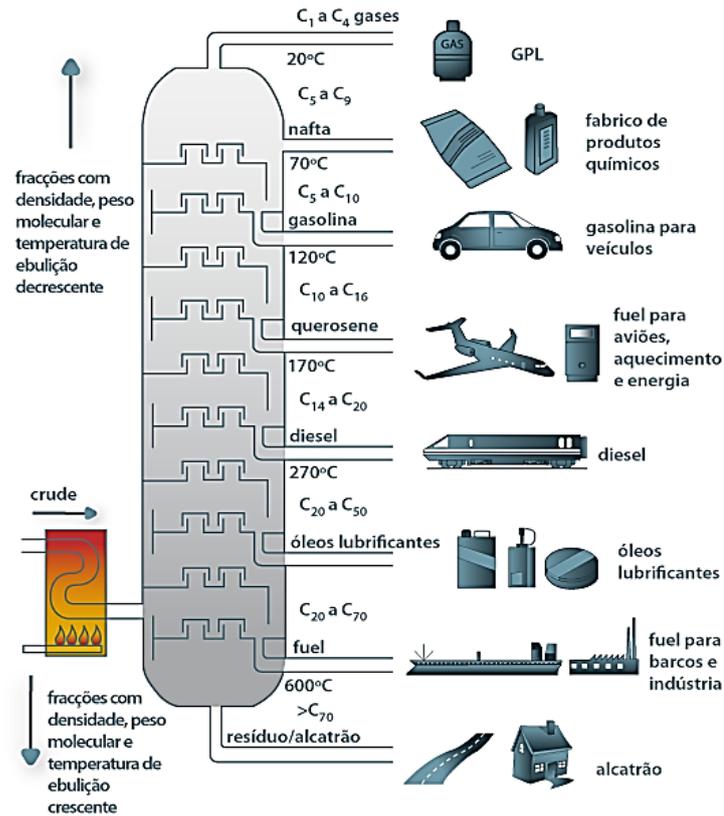
Atualmente, no Brasil, o ligante mais comum é o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), apesar de existirem diversos outros tipos, como o Asfalto Diluído de Petróleo (ADP) e as Emulsões Asfálticas de Petróleo (EAP).

O CAP é obtido através da destilação fracionada do petróleo em refinarias específicas para tal. Como resultado desse processo têm-se diversos produtos com diferentes finalidades, como mostra a Figura 2.4, onde o asfalto está indicado como *alcatrão*, outra possível designação para um material que contém hidrocarbonetos.

O produto resultante irá depender do tipo de destilação e de como ocorreu o processo, além da localização da fonte de petróleo. O exemplo indicado na Tabela 2.1 mostra as composições químicas de ligantes asfálticos de diferentes origens. Percebe-se que leves alterações podem existir, influenciando assim nas características finais do produto.

² MOMM, L. **Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico**. 1998. 259p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

Figura 2.4 – Produtos obtidos da destilação fracionada do petróleo.



Fonte: A Destilação do Petróleo (2015, p. 9).

Tabela 2.1 – Exemplo de composições químicas de asfaltos.

Origem	Mexicano	Boscan Venezuela	Califórnia Estados Unidos	Cabiúnas Brasil	Cabiúnas Brasil	Árabe Leve Oriente Médio
Refinaria	-	RLAM Bahia	-	Regap Minas Gerais	Replan São Paulo	Reduc Rio de Janeiro
Carbono %	83,8	82,9	86,8	86,5	85,4	83,9
Hidrogênio %	9,9	10,4	10,9	11,5	10,9	9,8
Nitrogênio %	0,3	0,8	1,1	0,9	0,9	0,5
Enxofre %	5,2	5,4	1,0	0,9	2,1	4,4
Oxigênio %	0,8	0,3	0,2	0,2	0,7	1,4
Vanádio ppm	180	1.380	4	38	210	78
Níquel ppm	22	109	6	32	66	24

Fonte: Leite³ (2003) *apud* Bernucci *et al.* (2010, p. 28).

³ LEITE, L.F.M. 2003. 113 p.

Os Cimentos Asfálticos de Petróleo, conforme cita Mourão (2003), são classificados de acordo com sua consistência, medida pela viscosidade absoluta, sob condições controladas de vácuo e temperatura, e pela penetração, ou seja, a medida em décimos de milímetro da penetração de uma agulha padronizada em uma amostra nas condições do ensaio. A Tabela 2.2 traz algumas dessas classificações em forma de números, obtidos da Resolução nº19 de 11/07/2005 da Agência Nacional do Petróleo (ANP).

Tabela 2.2 – Especificação do Cimento Asfáltico de Petróleo.

Características	Unidade	Limites				Métodos	
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150-200	ABNT	ASTM
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 a 45	50 a 70	85 a 100	150 a 200	NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín.	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
Viscosidade Saybolt-Furol							
a 135°C, mín.	s	192	141	110	80	NBR 14950	E 102
a 150°C, mín.		90	50	43	36		
a 177°C		40 a 150	30 a 150	15 a 60	15 a 60		
Viscosidade Brookfield							
a 135°C, mín. SP 21, 20rpm, mín.	cP	374	274	214	155	NBR 15184	D 4402
a 150°C, mín.		203	112	97	81		
a 177°C, SP 21		76 a 285	57 a 285	28 a 114	28 a 114		
Índice de Suscetibilidade Térmica		(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	-	-
Ponto de fulgor, mín.	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92
Solubilidade em tricloroetileno, mín.	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
Dutilidade a 25°C, mín.	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113
Efeito do calor e do ar a 163°C por 85 minutos							
Varição em massa, máx.	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5		D 2872
Dutilidade a 25°C, mín.	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento, máx.	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36
Penetração retida, mín. (*)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5

Fonte: ANP⁴ (2005) *apud* Bernucci *et al.* (2010, p. 61).

⁴ AGÊNCIA NACIONAL do PETRÓLEO (ANP). **Resolução Nº 19**, 11 de julho de 2005.

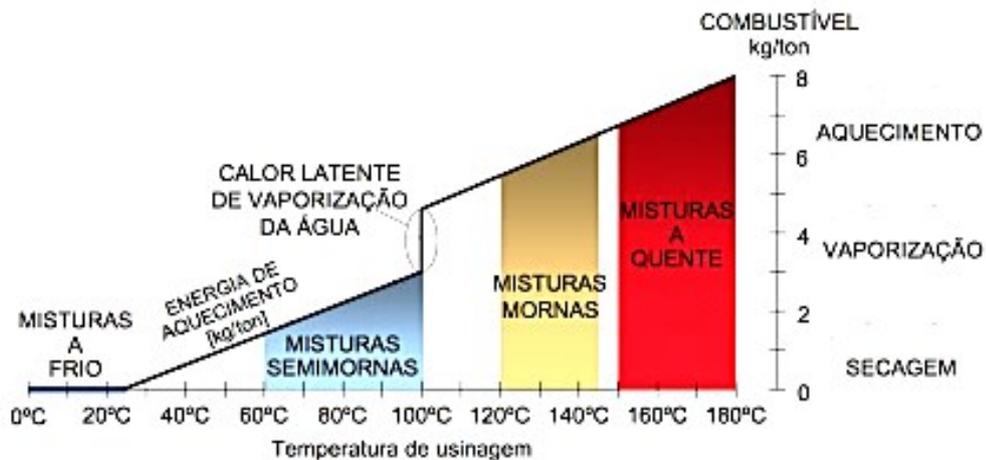
2.3 Misturas Asfálticas

As misturas asfálticas, como mencionadas anteriormente, são produtos de agregados e ligantes e, eventualmente, aditivos ou adições. Portanto, contêm uma matriz mineralógica cuja coesão é garantida pelo betume.

2.3.1 Tipos de Misturas Asfálticas

As misturas betuminosas podem ser classificadas de acordo com a temperatura para a qual serão produzidas/usinadas. De maneira geral, são classificadas em: *misturas a quente* e *misturas a frio*. No entanto, de acordo com Motta (2011), poderão ser incluídas ainda as *misturas mornas* e *semimornas*, em faixas de temperatura intermediárias, e visando a redução da emissão de poluentes e do consumo energético.

Figura 2.5 – Classificação das misturas asfálticas em função de temperaturas típicas de usinagem (números aproximados).



Fonte: Olard⁵ et al. (2008) apud Motta (2011, p. 46).

⁵ OLARD, F. **Low energy asphalts**. Routes Roads, n. 336-337, p. 131-145, 2008. Apresentado a 23 World Road Congress: General Report and Conclusions: PRIARC Prizes, 23., Paris, 2008.

As *misturas quentes* são geralmente adotadas para fins de serviços de pavimentação, sendo denominadas Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ). Sua produção acontece geralmente com o aquecimento dos agregados e ligantes a uma faixa de 150°C a 185°C, dependendo do tipo de ligante, conforme o exemplo da Tabela 2.3. Podem ser aplicadas em diferentes níveis de tráfego, garantindo boa resistência e durabilidade (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Tabela 2.3 – Exemplo de temperaturas de estocagem e usinagem de alguns ligantes asfálticos e do agregado.

Tipo de ligante	Temperatura de estocagem do ligante, máxima, °C	Temperatura de usinagem, °C	
		Ligante	Agregado
CAP – 50/70	160	150 – 155	160 – 165
Asfalto modificado por polímero SBS 45-70/55	170	160 – 165	170 – 175
Asfalto modificado por polímero SBS 45-70/60	175	165 – 170	175 – 180
Asfalto modificado por polímero SBS 45-70/70	180	170 – 175	180 – 185
Asfalto modificado por 15,0% de borracha de pneus	185	170 – 180	180 – 185

Fonte: Bernucci *et al.*(2010, p. 377).

Para os casos em que a produção acontece à temperatura ambiente tem-se as *misturas a frio*. Nesse processo, porém, são necessárias as emulsões asfálticas em vez do CAP. A emulsão funciona através de um solvente que pode ser à base de gasolina ou água e que, em um processo denominado *cura* ou *ruptura*, irá evaporar com o tempo. A principal problemática observada nas misturas a frio é a fragilidade estrutural, não sendo indicadas para casos de volume de tráfego elevado (BARRA, 2015).

As *misturas mornas* e *semimornas* vêm sendo recentemente utilizadas pensando-se em sustentabilidade, onde o consumo de energia para sua produção é mais baixo do que para as misturas quentes. Segundo Motta (2011) para esses casos as temperaturas atingidas são intermediárias em se comparando a misturas quentes e frias, principalmente devido ao aquecimento parcial dos agregados. Poderá ser utilizado asfalto ou emulsão, dependendo do tipo de tecnologia aplicada.

2.3.2 Curva granulométrica e metodologia Marshall

Existem diversas metodologias de formulação para a dosagem das misturas asfálticas no mundo. Atualmente, no Brasil, geralmente utiliza-se a *metodologia Marshall*, de cunho empírico, que verifica principalmente as propriedades e comportamentos dos materiais com base em experiências práticas de campo, sem que tenham sido necessariamente comprovados cientificamente.

O processo de escolha da granulometria dos agregados a serem utilizados em misturas asfálticas é geralmente realizado através do *método por tentativas*. Nesse método a curva granulométrica deve ser manipulada de tal forma que se enquadre dentro de uma faixa de trabalho imposta pela entidade rodoviária responsável pela via.

Segundo Guerrero (2013), estas faixas granulométricas apresentam padrões pouco restritivos que permitem alta variabilidade de curvas dentro dos mesmos limites estabelecidos, acarretando em diferentes comportamentos mecânicos e reológicos das misturas asfálticas. Além disso, podem-se obter curvas mal graduadas que acarretarão em problemas para a estrutura do pavimento (SENÇO, 2008; BÚRIGO, 2015).

Outra maneira para se determinar a curva granulométrica é o *método racional*. O princípio básico dessa metodologia é que, através de equações bem difundidas mundialmente, consiga-se obter uma curva que garantirá um melhor arranjo dos grãos, de modo a produzir um contato direto entre as frações de diâmetros maiores enquanto as de menores tamanhos preenchem os vazios deixados entre os grãos maiores. Conseqüentemente, a estrutura terá mais estabilidade (BARRA, 2005).

A *equação de Fuller-Talbot* é uma das equações que permitem calcular as curvas granulométricas. É definida a partir da escolha do percentual de material passante na peneira de menor diâmetro e do diâmetro máximo do grão que fará parte da série de peneiras selecionada a partir da Equação 2.1.

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

onde:

$\%_p$ = percentagem 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 que depende do tipo de graduação desejada:

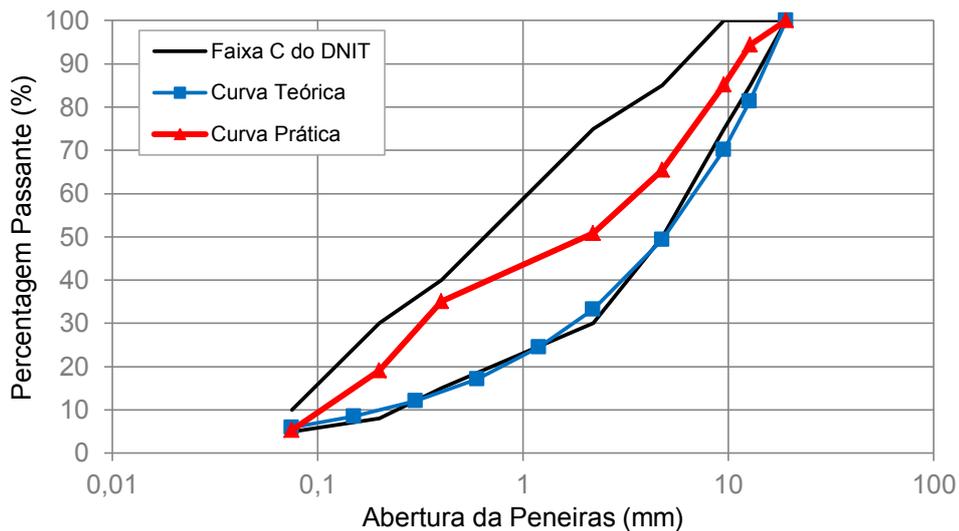
-Agregado de graduação densa: $0,35 < n < 0,55$;

-Agregado de graduação aberta: $0,55 < n < 0,75$;

-Agregado tipo macadame: $D \sim 2d$; $n = 1,0$.

A Figura 2.6 mostra um comparativo de curva prática e teórica. Apesar de apresentar uma melhor organização das partículas, observa-se que as curvas calculadas se encontram fora da faixa C estabelecida pelo DNIT, comumente utilizada para misturas densas.

Figura 2.6 – Exemplo de comparativo entre curva prática e curva teórica.



Fonte: Barra (2005, p. 105).

Para o objetivo principal do método, determinar o *teor ótimo de ligante* a ser utilizado, faz-se necessário a montagem de corpos de prova de misturas asfálticas. Para que se consigam obter propriedades que indicarão o *comportamento mecânico* e, conseqüentemente, o teor ótimo de ligante a ser empregado, os corpos de prova necessitam da realização de ensaios laboratoriais. Todos os processos devem seguir a normativa DNER-ME 043/95.

3 MATERIAIS E CURVA GRANULOMÉTRICA SELECIONADA

O presente capítulo tem como objetivo definir os materiais utilizados e a curva granulométrica selecionada para as formulações das misturas asfálticas da presente pesquisa.

3.1 Caracterização dos agregados

Os agregados minerais podem ter origens distintas e muitas vezes não atendem às exigências para pavimentação especificadas pelo órgão responsável pela via, fazendo-se assim necessário o estudo mais aprofundado de suas propriedades. Desta forma o DNER apresenta uma série de ensaios necessários para a caracterização dos agregados.

Para essa pesquisa, os materiais pétreos selecionados foram obtidos junto à empresa Britagem Vogelsanger LTDA. A jazida conta com uma área de três hectares e está localizada na zona rural do município de Joinville, região norte de Santa Catarina, onde se observa a presença da unidade geológica do Complexo Granulítico Santa Catarina (MEURER, 2015).

Por se tratar de uma das principais empresas de britagem da região, algumas pesquisas já foram realizadas anteriormente, onde os resultados e análises obtidas podem ser aproveitados. Dessa maneira, a presente pesquisa, por não ter como foco principal os agregados minerais utilizados nas misturas asfálticas, utiliza como base ensaios realizados por Meurer (2015), cuja amostra utilizada fora a mesma dessa pesquisa, e expressos na Tabela 3.1.

Os resultados indicam que a amostra coletada está dentro dos limites impostos pelas normativas apresentadas e dessa maneira são passíveis de serem utilizados em mistura asfálticas.

Tabela 3.1 – Resultado da caracterização dos agregados.

Ensaio	Normativa	Resultado		Limite
		Quantitativo	Qualitativo	
Desgaste por abrasão Los Angeles	DNER-ME 035/98	12,54%	-	máx. 50%
Resistência ao ataque químico (Durabilidade)	DNER-ME 089/94	1,95%	Boa qualidade, apesar de quebras em partículas lamelares	máx. 12%
Índice de forma	ABNT NBR 6954/1989	0,68	Boa cubicidade	mín. 0,5
Adesividade ao ligante betuminoso	DNER-ME 078/94	-	Não houve descolamento da película betuminosa quando adicionado 0,5% de Betudope	Sem descolamento da película betuminosa
Massa específica real – agregados graúdos	DNER-ME 081/98	2,844g/cm ³	-	-
Massa específica aparente – agregados graúdos	DNER-ME 081/98	2,808	-	-
Absorção – agregados graúdos	DNER-ME 081/98	0,44%	-	-
Massa específica real – agregados miúdos (Chapman)	DNER-ME 194/98	2,812g/cm ³	-	-
Massa específica real – material finamente pulverizado (Le Chatelier)	DNER-ME 085/94	2,844g/cm ³	-	-

Fonte: Meurer (2015).

3.2 Caracterização dos ligantes

Posteriormente foram estudados os ligantes asfálticos. São os ligantes quem garantem a aglutinação dos granulares a partir da formação de uma película envolvente nos mesmos (GUERRERO, 2013).

Os materiais empregados para as formulações das misturas asfálticas desse estudo são caracterizados em três diferentes classes de Cimento Asfáltico de Petróleo: CAP 10/20, CAP 30/45 e CAP 50/70, e foram obtidos junto a PETROBRAS. Contudo, possuem origens diferentes, a saber: CAP 10/20 da Refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR), e o CAP 30/45 e CAP 50/70 da Refinaria de Paulínia (REPLAN).

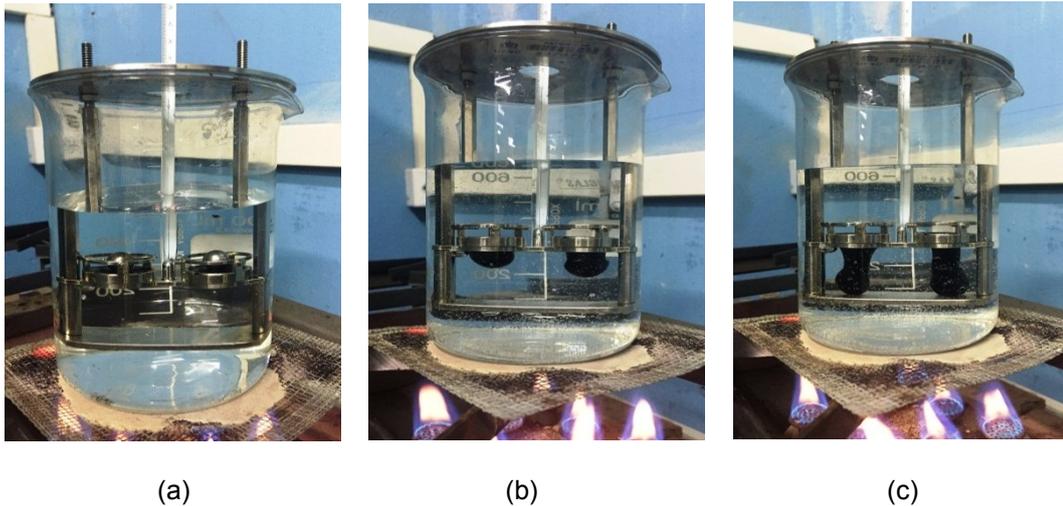
Os ensaios de caracterização, realizados no Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) da UFSC – Centro de Joinville, serão descritos adiante juntamente com as análises dos processos e resultados obtidos.

3.2.1 Ponto de amolecimento anel e bola

Regido pela normativa DNIT-ME 131/2010, este ensaio correlaciona a temperatura a qual o betume amolece e atinge certa condição de escoamento. Duas amostras de asfalto são colocadas dentro de anéis metálicos padronizados e adicionam-se em seus centros duas esferas de aço, com peso e dimensões especificadas. O conjunto é levado a um béquer contendo água e aquecido a uma taxa de $5 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ por minuto.

Após a deformação da amostra (Figura 3.1), consegue-se determinar, com o auxílio de um termômetro, a temperatura exata em que a mesma toca a placa metálica ao fundo do conjunto. O ponto de amolecimento consiste na média das duas temperaturas observadas no ensaio, onde estas não devem ter variação de mais de 2°C entre si.

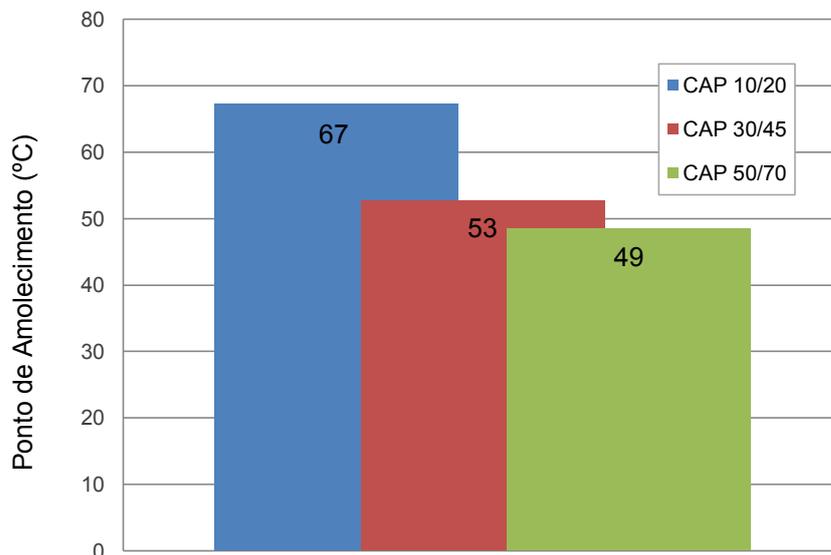
Figura 3.1 – Ponto de amolecimento anel e bola: amostras (a) indeformadas, (b) iniciando a deformação e (c) ao final do processo.



Fonte: Autor.

Os resultados são expressos no gráfico da Figura 3.2. Os pontos de amolecimento dos ligantes CAP 30/45 e CAP 50/70 estão de acordo com as especificações da ANP (Tabela 2.2), onde os valores mínimos especificados são 52°C e 46°C, respectivamente. Não se verifica atualmente a definição de um limite mínimo para o CAP 10/20 neste ensaio, em razão de sua não comercialização, sendo normalmente classificado tão somente pela penetração. Observa-se ainda a tendência de o ponto de amolecimento diminuir concomitantemente com a viscosidade, discutida adiante na seção 3.2.4.

Figura 3.2 – Resultado do ponto de amolecimento dos ligantes.



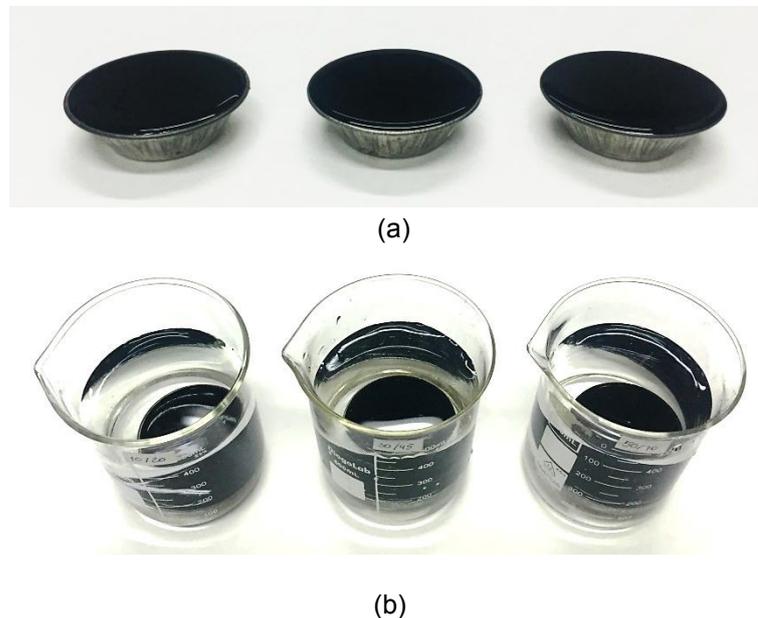
Fonte: Autor.

3.2.2 Penetração

Este ensaio é descrito na normativa DNIT-ME 155/2010, onde se entende *penetração* como sendo a profundidade em que determinada agulha, com dimensões e massa padronizadas, penetra verticalmente uma amostra sob condições de carga, tempo e temperatura prefixadas. A consistência do CAP é tanto maior quanto menor for a penetração da agulha.

Os ligantes devem ser aquecidos até adquirirem consistência suficiente para que sejam colocados em recipientes apropriados. Após o endurecimento das amostras, os conjuntos são posicionados dentro de béqueres contendo água a 25°C, onde permanecem submersos até a estabilização da temperatura (Figura 3.3).

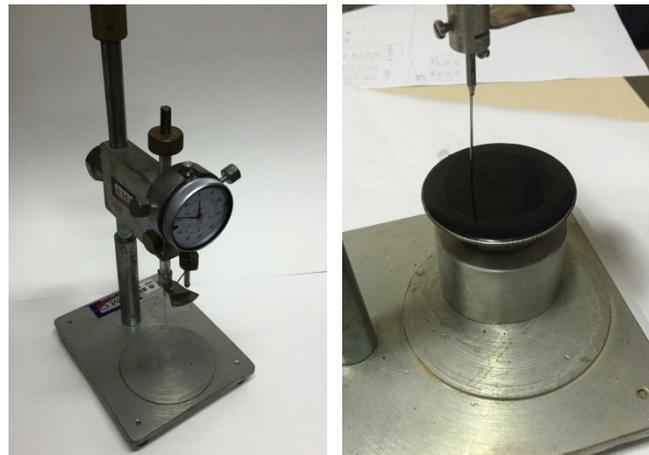
Figura 3.3 – Amostras do ensaio de penetração: (a) secas e (b) submersas em água.



Fonte: Autor.

Os conjuntos estabilizados devem ser levados até o aparelho penetrômetro para a realização do ensaio (Figura 3.4(a)). A penetração é executada através de uma agulha de 100 g durante 5 segundos, anotando-se o deslocamento observado, em décimos de milímetro (0,1 mm). Foram realizadas cinco medidas para cada ligante, sendo o valor final a média aritmética destas.

Figura 3.4 – (a) Penetrômetro e (b) amostra sendo penetrada.



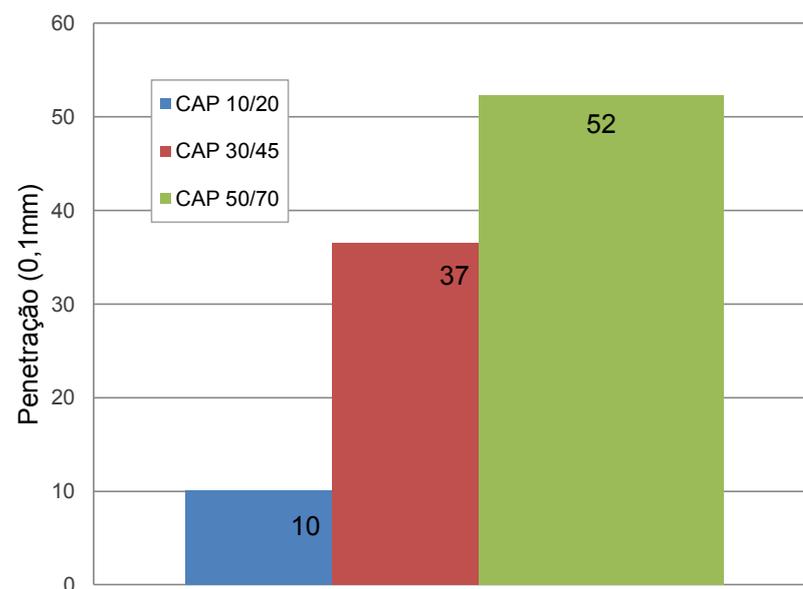
(a)

(b)

Fonte: Autor.

O gráfico da Figura 3.5 incorpora os resultados de penetração, onde cada ligante se apresenta dentro dos limites especificados em suas respectivas classificações.

Figura 3.5 – Resultado de penetração dos ligantes.



Fonte: Autor.

3.2.3 Índice de Pfeiffer e Van Doormaal

Com os valores de penetração e ponto de amolecimento, consegue-se calcular o *Índice de Pfeiffer e Van Doormaal* (IP), também denominado *suscetibilidade térmica*. Este índice indica a sensibilidade do material com a variação da temperatura e se mostra muito importante na pavimentação para evitar a utilização de materiais que alteraram significativamente suas propriedades em função do gradiente térmico do ambiente (BERNUCCI *et al.*, 2010). Abaixo se tem a Equação 3.1 para a *suscetibilidade térmica*:

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

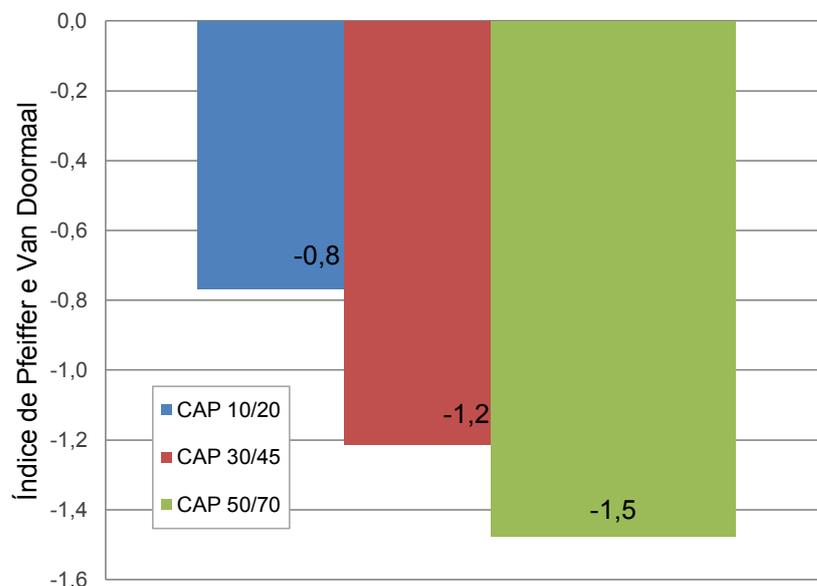
onde:

IP = índice de Pfeiffer e Van Doormaal;

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

P = penetração do CAP à 25°C (0,1 mm).

Figura 3.6 – Resultado do índice de Pfeiffer e Van Doormaal dos ligantes.



Fonte: Autor.

Os resultados apontam para valores inseridos dentro da faixa limite definida pela ANP (Tabela 2.2), variando de -1,5 a +0,7. Pode-se auferir também que o ligante CAP 10/20 obteve um valor intermediário dentro dessa faixa, não sendo muito suscetível à temperatura, tampouco frágil, de acordo com os princípios conceptivos da definição de *IP*. Já o CAP 30/45 e o CAP 50/70 apresentam valores mais próximos do limite negativo, qualificando-os então como bastante suscetíveis à temperatura.

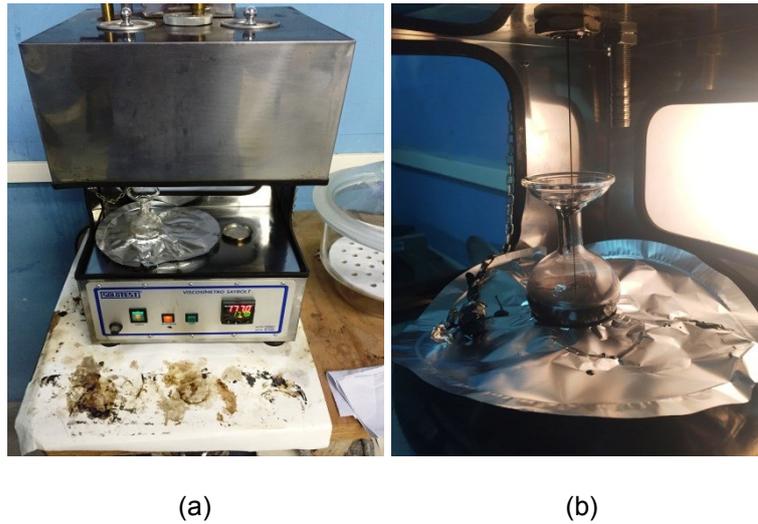
Vale ressaltar que, apesar do *IP* ser um índice normativo utilizado no Brasil para verificação das condições físicas gerais dos ligantes betuminosos, não deve ser tomado como um parâmetro decisivo na determinação do comportamento destes materiais, e sim um mero indicativo de tendências, em razão de ser baseado em ensaios empíricos que pouco têm relação com o comportamento viscoelástico linear sob carga dinâmica, conforme se observa no campo (BARRA, 2015).

3.2.4 Viscosidade Saybolt-Furol

O ensaio de *viscosidade Saybolt-Furol* é especificado na normativa ABNT NBR 14950/2003. Os resultados do ensaio são utilizados para fins de determinação da curva de viscosidade, a qual fornecerá as temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas que garantirão uma boa cobertura dos agregados pelo ligante betuminoso.

O aparelho utilizado é o viscosímetro Saybolt-Furol (Figura 3.7 (a)), o qual consta com um tubo que poderá ficar aberto ou fechado na parte inferior. Os materiais ensaiados são adicionados a esse tubo e aquecidos até a temperatura desejada. Quando essa estabiliza, o orifício é aberto e começa-se a contagem do tempo com o auxílio de um cronômetro (Figura 3.7 (b)). Ao atingir-se a marca de 60 ml no frasco inferior, o cronômetro pode ser pausado e o tempo deve ser anotado.

Figura 3.7 – Viscosidade do ligante: (a) Viscosímetro Saybolt-Furol e (b) escoamento no frasco inferior.



Fonte: Autor.

Os intervalos para as temperaturas de compactação e de usinagem de cada ligante estão representados na Tabela 3.2. Essas faixas são utilizadas, respectivamente, como temperaturas limites para o processo de densificação das misturas asfálticas e homogeneização do ligante betuminoso junto aos agregados minerais.

Tabela 3.2 – Intervalos das temperaturas de compactação e usinagem dos ligantes.

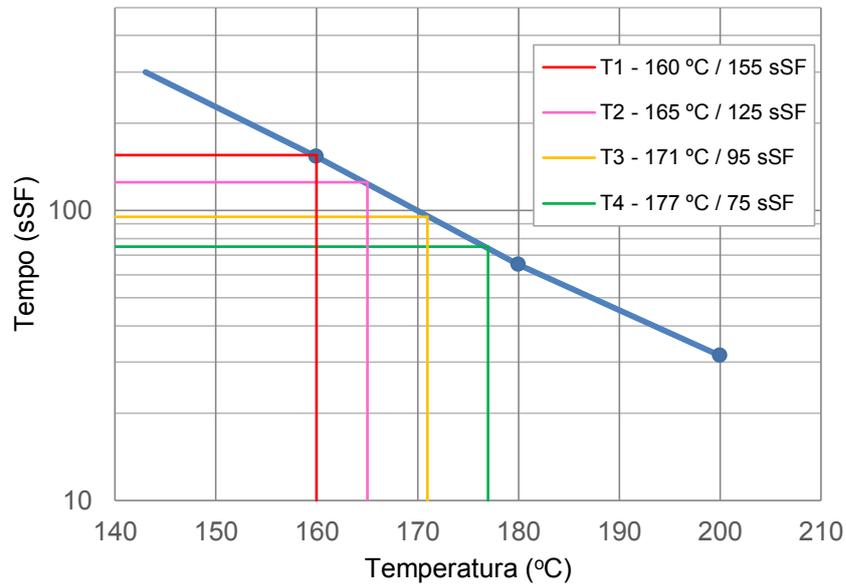
Ligante Betuminoso	Compactação		Usinagem	
	Limite Inferior (°C)	Limite Superior (°C)	Limite Inferior (°C)	Limite Superior (°C)
CAP 10/20	160	165	171	177
CAP 30/45	139	145	152	158
CAP 50/70	137	142	148	153

Fonte: Autor

Vale ressaltar que os agregados, durante a mistura, deverão apresentar uma temperatura variando de 10°C a 15°C acima daquela estabelecida para o ligante (BERNUCCI *et al.*, 2010), sendo adotado geralmente o valor correspondente a 13°C no momento da usinagem.

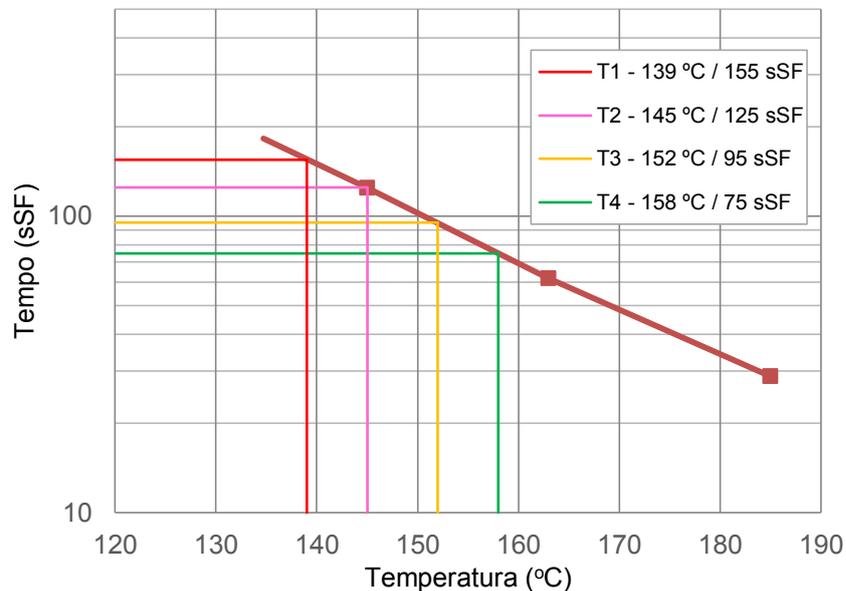
Os gráficos das curvas de viscosidade para cada ligante são mostrados desde a Figura 3.8 até a Figura 3.10, em função da temperatura, em graus Celsius, e do tempo, em segundos Saybolt-Furol. Dessas curvas são extraídas as temperaturas correspondentes ao intervalo de 75 a 95 sSF, para usinagem, e de 125 a 155 sSF, para compactação.

Figura 3.8 – Curva de viscosidade Saybolt-Furol do CAP 10/20.



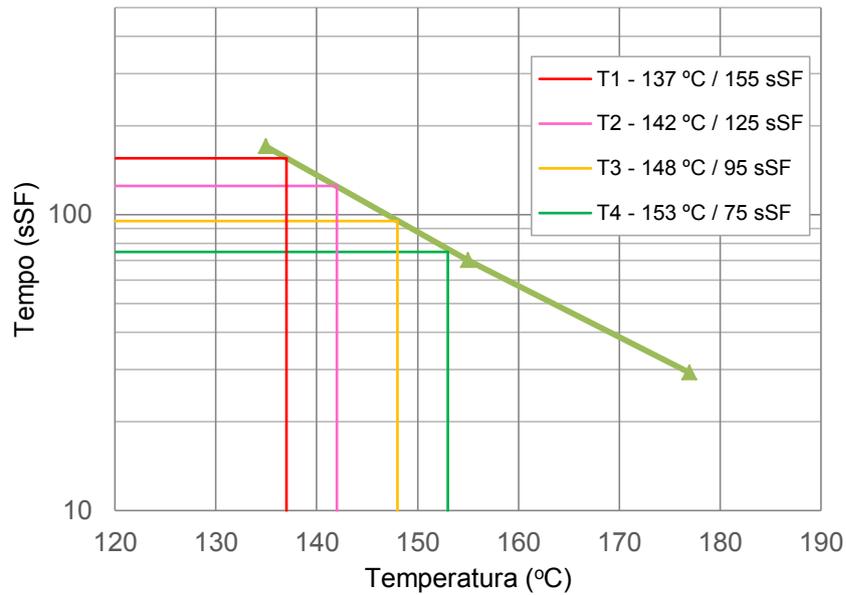
Fonte: Autor.

Figura 3.9 – Curva de viscosidade Saybolt-Furol do CAP 30/45.



Fonte: Autor.

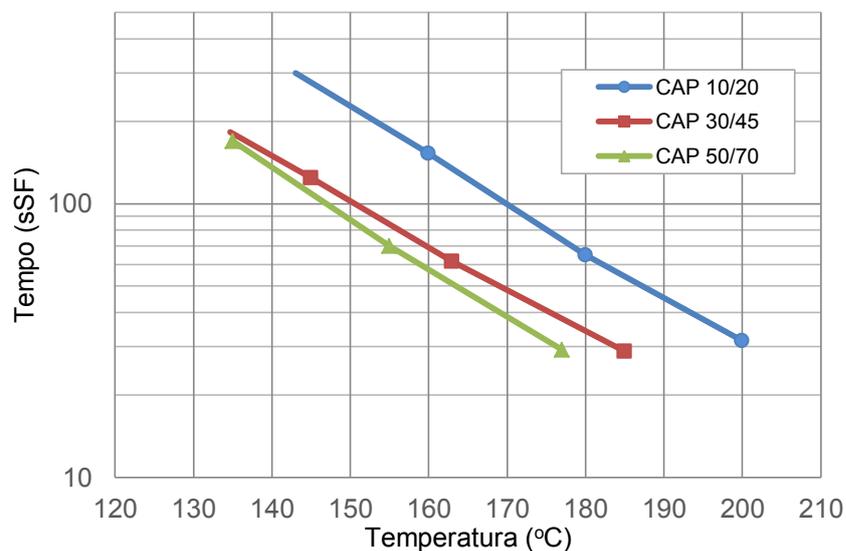
Figura 3.10 – Curva de viscosidade Saybolt-Furol do CAP 50/70.



Fonte: Autor.

Do comparativo ilustrado na Figura 3.11 entende-se que o CAP 10/20 é um material com viscosidade muito superior, dada uma mesma temperatura, em comparação aos demais, que apresentam comportamentos próximos, apesar do CAP 30/45 apresentar viscosidade ligeiramente superior ao CAP 50/70, o que corrobora as tendências obtidas nos ensaios de penetração e ponto de amolecimento anel e bola.

Figura 3.11 – Comparativo da curva de viscosidade Saybolt-Furol dos ligantes.



Fonte: Autor.

3.2.5 Massa específica

O ensaio para a determinação da *massa específica* do ligante é descrito na normativa ABNT NBR 6296/2012. Os ligantes têm em geral massa específica entre 1,00 e 1,02 g/cm³ (BERNUCCI *et al.*, 2010), podendo atingir valores de até 1,3 g/cm³ (BARRA, 2015). Os valores serão usados posteriormente para a dosagem das misturas asfálticas.

Para o método foram empregados três picnômetros para cada ligante onde, com auxílio de uma balança de precisão, foram tomados e anotados quatro massas, a saber: picnômetro vazio, cheio com água, com ligante até a metade e cheio com água e ligante.

Figura 3.12 – Massa específica do ligante: (a) picnômetros cheios com água e ligante e (b) tomada das massas.



(a)

(b)

Fonte: Autor.

A Equação 3.2 fora utilizada para se determinar o valor da *massa específica* dos ligantes, onde o resultado final para cada é a média aritmética das três amostras.

$$\text{Massa Específica} = \frac{(C - A)}{[(B - A) - (D - C)]}$$

(3.2)

onde:

A = peso do picnômetro vazio;

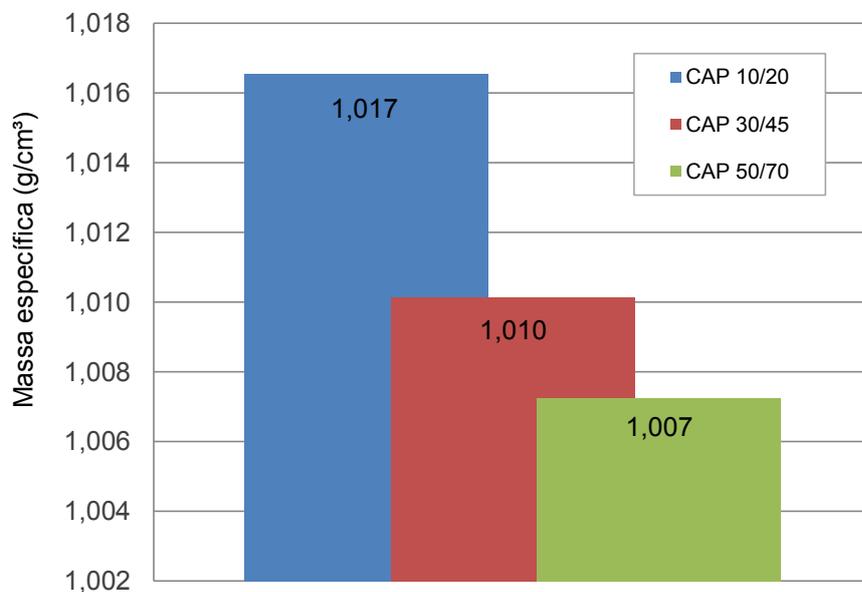
B = peso do picnômetro cheio com água a 25°C;

C = peso do picnômetro com CAP na metade;

D = peso do picnômetro com CAP + água.

Os resultados, ilustrados na Figura 3.13, mostram que os valores encontram-se bem próximos entre si, com desvios na terceira casa decimal e dentro dos intervalos normalmente encontrados. Observa-se ainda a tendência de a densidade do ligante diminuir juntamente com sua viscosidade.

Figura 3.13 – Resultado da massa específica dos ligantes.



Fonte: Autor.

3.3 Curva granulométrica selecionada

A *curva granulométrica* utilizada para as misturas asfálticas foi obtida por Barra (2005) através da equação de Fuller-Talbot, previamente explicada na seção 2.3.2. A abertura máxima da série de peneiras é de 19,1 mm ao passo que o percentual passante na peneira 0,075 mm é de 6,0%. Dessa maneira o expoente n da equação teve como valor 0,51, o que confere a mistura asfáltica como sendo densa.

A série de peneiras adotada tem como prioridade o melhor preenchimento dos vazios formados pelos agregados de maior diâmetro. A partir da peneira de 4,76 mm utilizam-se reduções de diâmetros à metade da abertura de malha imediatamente maior, o que gera maior entrosamento entre os grãos e, logo, maior estabilidade às misturas (BARRA, 2005).

De posse de todos os elementos necessários para o cálculo da curva teórica, utiliza-se a Equação 2.1 para a montagem da distribuição granulométrica (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Distribuição granulométrica da curva selecionada.

Peneira	Abertura (mm)	Distribuição granulométrica da curva teórica selecionada (% passante)
3/4"	19,1	100,0
1/2"	12,7	81,3
3/8"	9,5	70,1
nº04	4,76	49,4
nº10	2,2	33,4
nº16	1,2	24,5
nº30	0,6	17,2
nº50	0,3	12,1
nº100	0,15	8,5
nº200	0,075	6,0

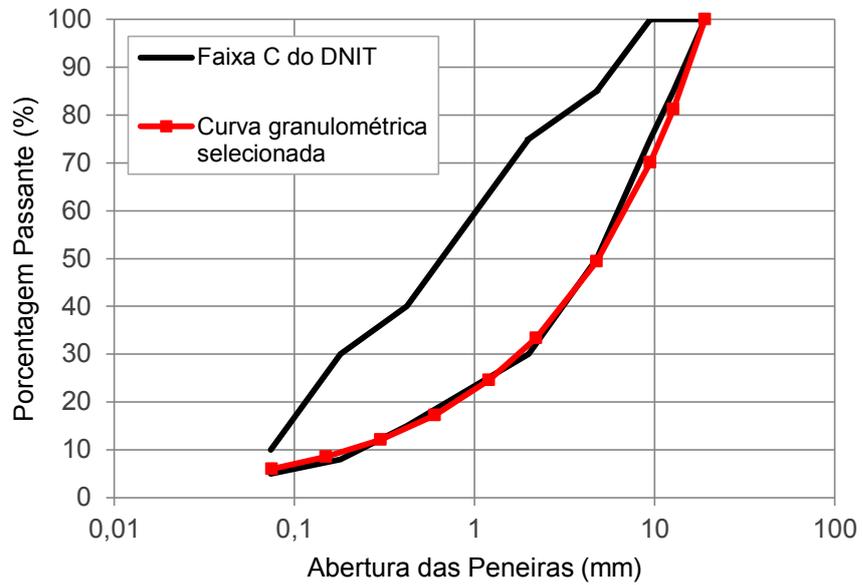
Fonte: Barra (2005).

É possível observar na Figura 3.14 que a curva selecionada tangencia quase que completamente o intervalo inferior da faixa C imposta pelo DNIT, utilizada correntemente na área de abrangência da pesquisa, situando-se até mesmo fora desse intervalo em determinados pontos.

De acordo com as normativas que devem ser seguidas no uso da metodologia empírica por tentativa, não é desejável que a curva teórica tenha sua trajetória situada fora ou muito próxima aos limites inferiores e superiores da amplitude da faixa granulométrica imposta pelo órgão responsável pela via, devendo essa então estar posicionada preferencialmente na região mediana da faixa de referência.

No entanto, como a distribuição da curva acontece de forma racional e não pelo método das tentativas, não é necessário que a mesma se concentre dentro dos limites especificados, e a comparação exposta possui caráter apenas ilustrativo.

Figura 3.14 – Curva granulométrica selecionada mediante a faixa C do DNIT.



Fonte: Autor.

4 ENSAIOS LABORATORIAIS

Este capítulo aborda os ensaios laboratoriais realizados a fim de se avaliar a estabilidade, fluência e dosagem das misturas asfálticas estudadas. Todos os procedimentos ocorreram no Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) da UFSC – Centro de Joinville.

O teor ótimo de ligante das misturas foi obtido através da metodologia Marshall, já abordada no capítulo 2, e regida pelo DNER-ME 043/95. Para Barra (2005), apesar de essa metodologia ser largamente difundida e a mais utilizada no país, existem alguns pontos, principalmente no processo de densificação das misturas, que merecem destaque por não representarem as condições de solicitação em campo.

4.1 Metodologia Marshall

Para que se torne viável a parametrização das características das misturas asfálticas faz-se necessário a montagem de corpos de prova cilíndricos padronizados. Esses são previstos na norma e tem dimensões e pesos pré-definidos.

A determinação do teor de trabalho de ligante é obtida através da compactação desses corpos de prova, em que são realizadas análises de parâmetros físicos e mecânicos referentes ao comportamento das misturas asfálticas, a saber: massa específica aparente (MEA), teor de vazios (V), vazios cheios com betume (VCB), vazios do agregado mineral (VAM), relação betume/vazios (RBV), estabilidade e fluência.

Em cada uma das misturas manteve-se a matriz granulométrica e variou-se proporcionalmente o teor de ligante em 4,22%, 4,54%, 4,86%, 5,18 % e 5,50%. Esses teores foram adquiridos com base na pesquisa de Barra (2005). Para que os resultados fossem mais significativos, preferiu-se trabalhar com um total de cinco

corpos de prova por teor por mistura asfáltica, perfazendo assim um total de 75 corpos de prova.

Para a montagem desses corpos de prova os materiais foram levados à estufa a suas respectivas temperaturas de usinagem (ressaltando que os agregados têm um acréscimo de 13°C em relação ao ligante). Depois de atingida a temperatura, realizou-se a mistura dos granulares com a correta quantidade em peso dos ligantes, de forma manual.

Recomenda-se que as misturas aconteçam, em um primeiro momento, somente com os agregados graúdos (Figura 4.1 (a)), de forma a garantir que o ligante os envolva completamente. Posteriormente é adicionada a fração fina (Figura 4.1 (b)), formando o mástique betuminoso (BARRA, 2015).

Figura 4.1 – Metodologia Marshall: (a) adição do ligante aos agregados graúdos, (b) colocação dos agregados finos e (c) mistura homogeneizada.



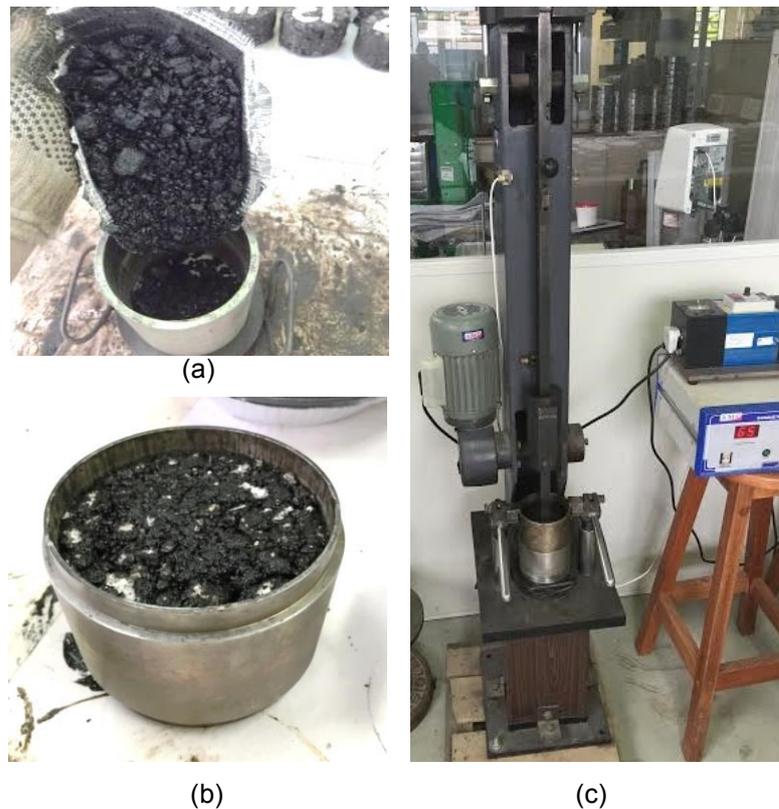
Fonte: Autor.

Cada traço retorna à estufa a sua respectiva temperatura de compactação, onde permanece por duas horas, permitindo assim uma aderência satisfatória do ligante betuminoso às partículas dos agregados. Os moldes de aço cilíndricos também devem ser aquecidos para que não haja perda de temperatura durante o processo de densificação.

As misturas foram então adicionadas aos moldes e levadas ao soquete Marshall para a compactação (Figura 4.2). Esse equipamento opera eletromecanicamente, impedindo a variação da energia de compactação e

contribuindo para diminuição do gradiente de densidade, que seria potencialmente mais variável se realizado manualmente (BÚRIGO, 2015). O peso do soquete e altura de queda são padronizados e, como a finalidade das misturas analisadas nessa pesquisa é para aplicação em camadas de rolamento, foram realizados 75 golpes em cada face dos corpos de prova.

Figura 4.2 – Metodologia Marshall: (a) colocação da mistura nos moldes, (b) mistura compactada e (c) compactação no soquete Marshall.



Fonte: Autor.

O desmolde deve ser feito após o resfriamento natural dos corpos de prova, até que seja possível o toque nos moldes com as mãos, sem o auxílio de proteção de luvas. A extração foi realizada de forma manual, com o auxílio do soquete Marshall (Figura 4.3).

Figura 4.3 – Desmolde dos corpos de prova.



Fonte: Autor

Os corpos de prova finalizados estão representados na Figura 4.4. Para que se obtenham os parâmetros necessários para a determinação do teor ótimo de ligante são necessários dois dados de cada amostra, a saber: altura média, aferida em três diferentes pontos com auxílio de um paquímetro, e peso seco, obtido através de uma balança de precisão.

Figura 4.4 – Disposição final dos 75 corpos de prova.



Fonte: Autor.

A obtenção da *massa específica real* dos corpos de prova se dá através da Equação 4.1, que correlaciona a densidade dos materiais empregados e suas proporções dentro das misturas.

$$d_{real} = \frac{100}{\frac{\%P_1}{d_{gráudo}} + \frac{\%P_2}{d_{miúdo}} + \frac{\%l}{d_{ligante}}}$$

(4.1)

onde:

d_{real} = massa específica real da mistura;

$\%_{P1}$ = percentagem retida da peneira de abertura 12,7mm até 4,8mm;

$\%_{P2}$ = percentagem retida da peneira de abertura 2,2mm até o fundo;

$\%_l$ = percentagem de ligante betuminoso na mistura;

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

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

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

A fim de se estabelecer a *massa específica aparente* dos corpos de prova são necessários os seus respectivos pesos hidrostáticos. Para a realização das pesagens cada amostra deve ser impermeabilizada através do envolvimento com fita crepe e parafina. Posteriormente são submersas em água e registrados os valores dos pesos hidrostáticos. A Figura 4.5 mostra o procedimento.

Figura 4.5 – Pesagem hidrostática: (a) corpo de prova já encapado sendo parafinado e (b) pesagem hidrostática.



(a)

(b)

Fonte: Autor

Os valores apontados foram então substituídos na Equação 4.2 para a obtenção da *massa específica aparente*:

$$d_{ap} = \frac{P1}{(P3 - P2) - \left(\frac{P3 - P1}{d_{paraf.}}\right)}$$

(4.2)

onde:

- d_{ap} = massa específica aparente (g/cm^3);
P1 = peso do CP ao ar (g);
P2 = peso do CP parafinado imerso em água (g);
P3 = peso do CP parafinado ao ar (g);
 $d_{paraf.}$ = massa específica da parafina utilizada (g/cm^3).

Os dados finais foram compilados em uma planilha de onde se conseguiu realizar os cálculos de outras propriedades dos corpos de prova necessários na metodologia Marshall, descritos adiante.

O *teor de vazios* é a relação entre o volume de vazios e o volume real dos corpos de prova e é obtido através da Equação 4.3.

$$V = \left(\frac{d_{real} - d_{ap}}{d_{real}} \right) \cdot 100 \quad (4.3)$$

onde:

- V** = teor de vazios (%);
 d_{real} = massa específica real (g/cm^3);
 d_{ap} = massa específica aparente (g/cm^3).

Os *vazios cheios com betume*, propriamente dito, trazem a percentagem de vazios dos agregados preenchida pelo ligante, e são obtidos pela Equação 4.4.

$$VCB = \frac{d_{ap} \cdot \%l}{d_{ligante}} \quad (4.4)$$

onde:

- VCB** = vazios cheios com betume (%);
 d_{ap} = massa específica aparente (g/cm^3);
%l = teor de ligante (%);
 $d_{ligante}$ = massa específica do ligante (g/cm^3).

Os vazios do agregado mineral são obtidos da soma dos vazios da mistura com os vazios preenchidos com betume, indicados na Equação 4.5.

$$VAM = V + VCB \quad (4.5)$$

onde:

VAM = vazios do agregado mineral (%);

V = teor de vazios (%);

VCB = vazios cheios com betume (%).

A relação betume/vazio, relação entre os vazios cheios com betume sobre os vazios do agregado mineral, está representada na Equação 4.6:

$$RBV = \frac{VCB}{VAM} \cdot 100 \quad (4.6)$$

onde:

RBV = relação betume/vazios (%);

VCB = vazios cheios com betume (%);

VAM = vazios do agregado mineral (%).

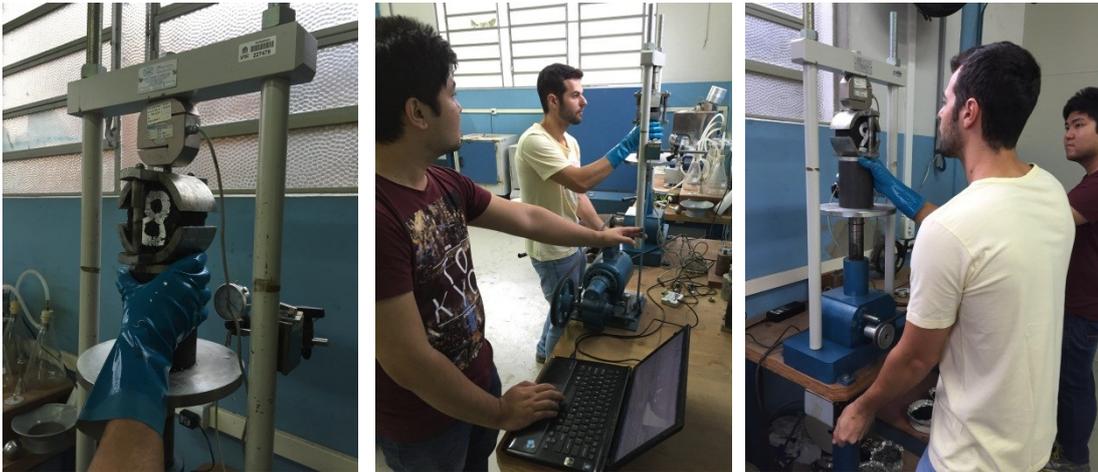
Após a aquisição de todos esses dados por meio das equações, os corpos de prova são submetidos à compressão diametral na prensa Marshall para que se consigam os dois parâmetros restantes: *estabilidade* e *fluência*.

Segundo a normativa DNER 043/95, *estabilidade* é a carga máxima a qual o corpo de prova resiste antes de sua ruptura e *fluência* indica o deslocamento vertical anotado no instante em que acontece a aplicação dessa carga máxima.

Antes do rompimento as amostras devem ser preparadas e submersas em banho-maria à 60°C por 30 minutos para que a análise aconteça em uma situação desfavorável.

Cada corpo de prova foi retirado da água e levado imediatamente à prensa Marshall, onde foi posicionado no centro do molde e submetido à compressão diametral até a ruptura (Figura 4.6). A aparelhagem conta com uma célula de carga e um extensômetro para realizar a medição da carga e do deslocamento, respectivamente, conectados a um computador.

Figura 4.6 – Rompimento dos corpos de prova na prensa Marshall.



Fonte: Autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão expressas algumas considerações gerais bem como a análise dos resultados alcançados pela metodologia Marshall realizada e que determinaram a escolha dos teores ótimos de CAP para a dosagem das misturas asfálticas.

5.1 Considerações gerais

Ao interpretarem-se os gráficos para a determinação do teor ótimo de ligante, alguns requisitos são exigidos para serviços de concreto asfáltico usado em revestimentos de pavimentos e que compõem os parâmetros a serem atendidos na dosagem de laboratório e no campo. Esses limites, especificados na normativa DNIT-ES 031/2006, estão indicados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Limites normativos de referência para as misturas asfálticas.

Parâmetros	Estabilidade (kgf)	V (%)	VAM (%)	RBV (%)
Limites	mín. 500	3,0 a 5,0	mín. 16,0*	75,0 a 82,0

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

Fonte: DNIT-ES 031/2006.

Entretanto, estes valores deveriam ser tomados apenas como diretrizes devido à falta de sensibilidade acurada, bem como a ausência de relação campo/laboratório dos procedimentos de compactação e de ruptura da metodologia Marshall quando comparados aos processos decorrentes em campo.

Neste contexto, tem-se que nem todas as misturas asfálticas formuladas, mesmo tendo bom desempenho mecânico quando testadas no âmbito de outras metodologias mais avançadas, como a francesa, por exemplo, são passíveis de enquadramento nos limites normativos indicados na Tabela 5.1 (BARRA, 2009).

Durante a compactação por impacto e a ruptura por compressão diametral (Figura 4.2 e Figura 4.6), por exemplo, os esforços mecânicos aplicados aos corpos de prova diferem das rolagens por amassamento durante a execução das camadas asfálticas no campo, e também dos processos de ruptura por flexão alternada durante a vida de serviço do pavimento.

A severidade do modo de compactação por impacto acarreta na maior parte dos casos em quebras aleatórias de frações granulares, que implicam em alterações das propriedades originalmente formuladas das misturas, sobretudo a densidade dos granulares. A granulometria dos esqueletos minerais, na maior parte dos casos, torna-se mais fina, logo, com maior superfície específica, implicando no aumento do teor de ligante considerado ótimo.

Ainda, a ruptura por compressão diametral é realizada a uma taxa de carregamento muito rápida e completamente distante das condições reais de campo, não tendo qualquer relação com o fenômeno de fadiga das misturas asfálticas, que é o principal dano que as conduz ao colapso evidenciado em campo (DOMEC⁶, 2005; RUDENSKY⁷, 1997 *apud* BARRA, 2009).

Dessa maneira, em razão do distanciamento que a metodologia Marshall possui em relação às condições reais de campo, o que a confere forte deficiência técnica, faz-se muito necessária a percepção atenta do operador durante o procedimento de mistura em laboratório, notadamente no que se refere ao envolvimento das partículas.

Misturas que apresentam dificuldade para garantir o completo envolvimento dos agregados traduzem falta de ligante, ao passo que superfícies muito brilhosas podem ser um indício de excesso de ligante. Dessa maneira o material, quando misturado, deve apresentar características gerais de opacidade moderada e trabalhabilidade não muito dificultosa para que se possa considerar uma dosagem apta às condições ótimas de aplicação.

⁶ DOMEC, V. **Endommagement par fatigue des enrobés bitumineux em condition de trafic simulé et de température**. Thèse de Docteur. Université de Bordeaux I. 2005.

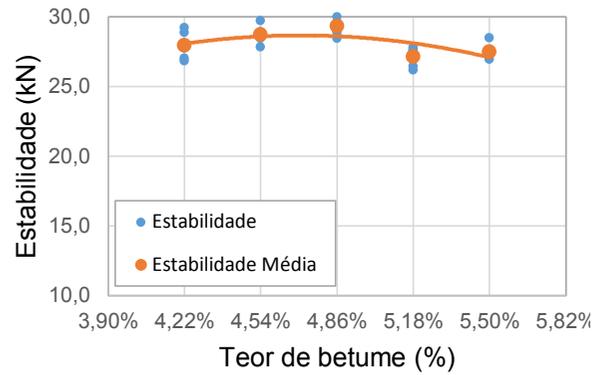
⁷ RUDENSKY, A. V. **Asphalt concrete fatigue properties, in Proceedings of the 5th International RILEM Symposium**. Mechanical Tests for Bituminous Materials (MBTM): Recent Improvements and Future Prospects. Lyon, France. 1997.

Como indicativo também, tem-se que deve ser dada atenção aos filtros de papel posicionados acima e abaixo dos corpos de prova durante o processo de compactação. Em algumas amostras pode ser percebido nos mesmos o aparecimento de acúmulos de ligante após a mistura ter sido compactada, podendo evidenciar o excesso.

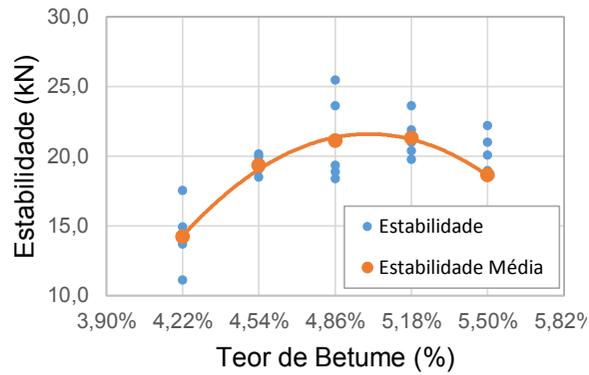
5.2 Análise dos resultados do ensaio Marshall

Os resultados obtidos do ensaio Marshall estão compilados nos gráficos apresentados desde a Figura 5.1 até a Figura 5.7. A partir da análise gráfica bem como das percepções obtidas das formulações quando misturadas, descritos adiante, consegue-se indicar o teor de ligante considerado ótimo.

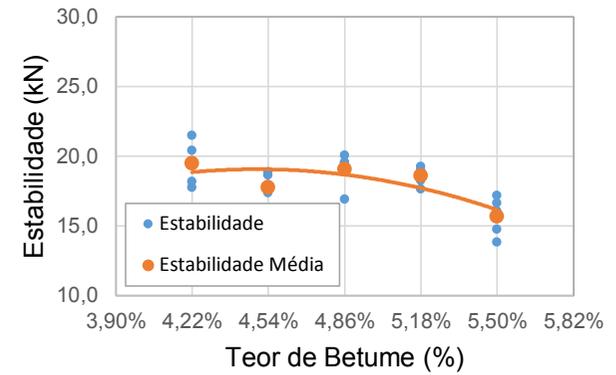
Figura 5.1 – Estabilidade das misturas asfálticas de (a) CAP 10/20, (b) CAP 30/45 e (c) CAP 50/70.



(a)



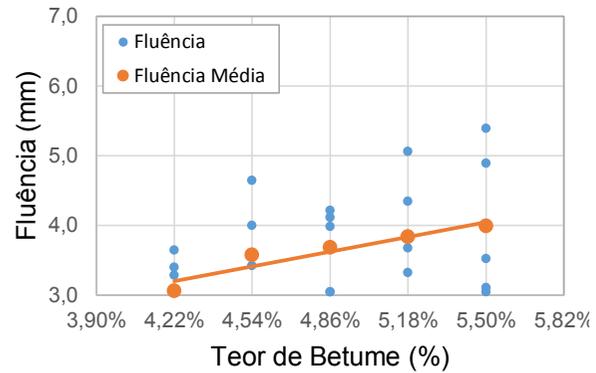
(b)



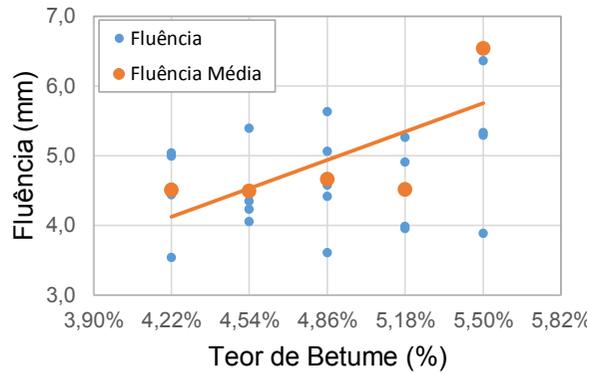
(c)

Fonte: Autor.

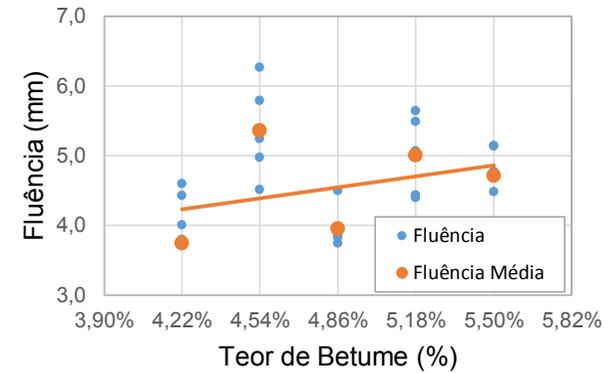
Figura 5.2 – Fluência das misturas asfálticas de (a) CAP 10/20, (b) CAP 30/45 e (c) CAP 50/70.



(a)



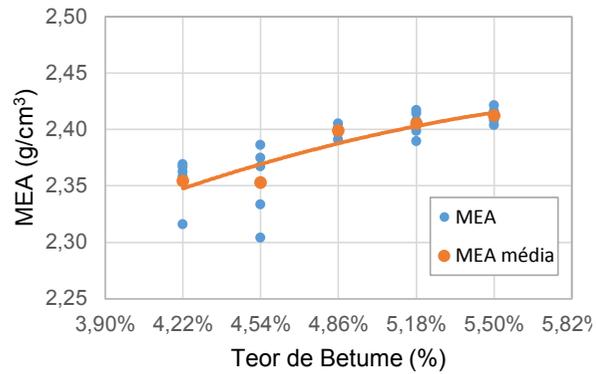
(b)



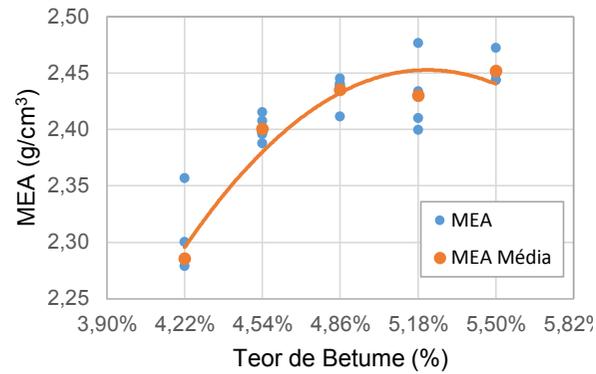
(c)

Fonte: Autor.

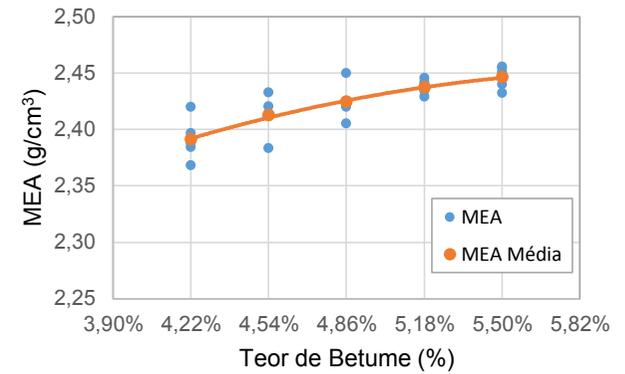
Figura 5.3 – Massa específica aparente das misturas asfálticas de (a) CAP 10/20, (b) CAP 30/45 e (c) CAP 50/70.



(a)



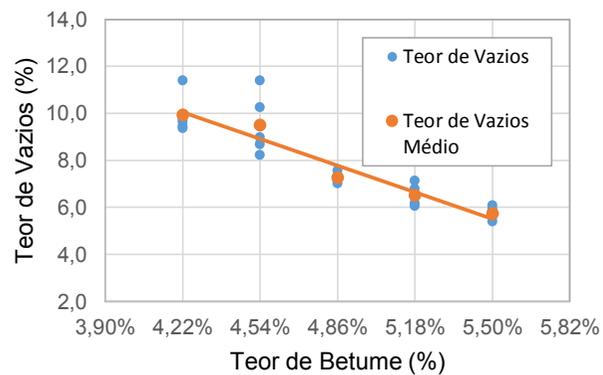
(b)



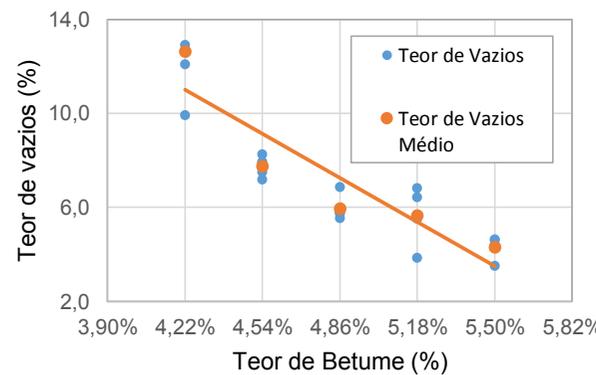
(c)

Fonte: Autor.

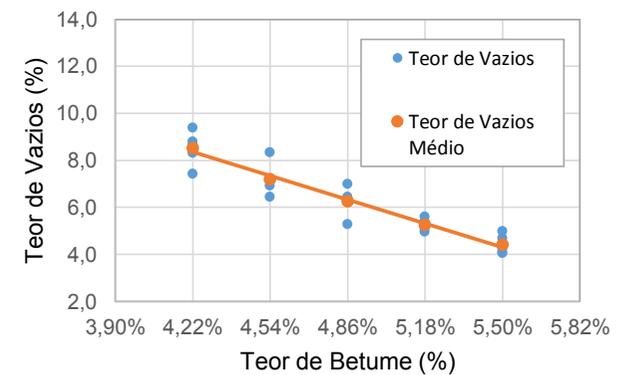
Figura 5.4 – Teor de vazios das misturas asfálticas de (a) CAP 10/20, (b) CAP 30/45 e (c) CAP 50/70.



(a)



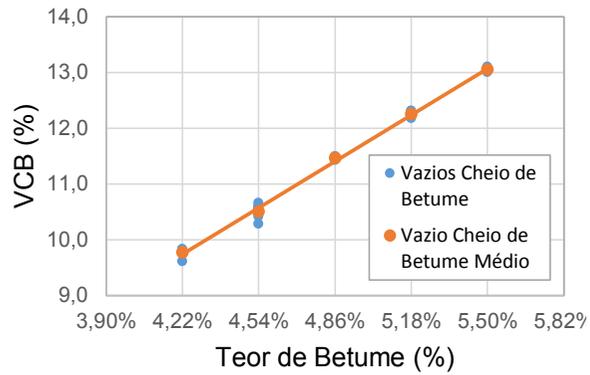
(b)



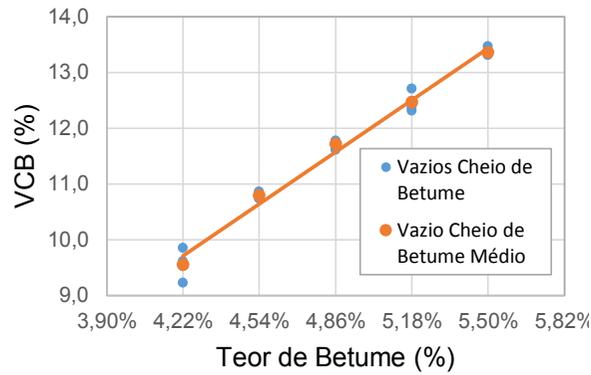
(c)

Fonte: Autor.

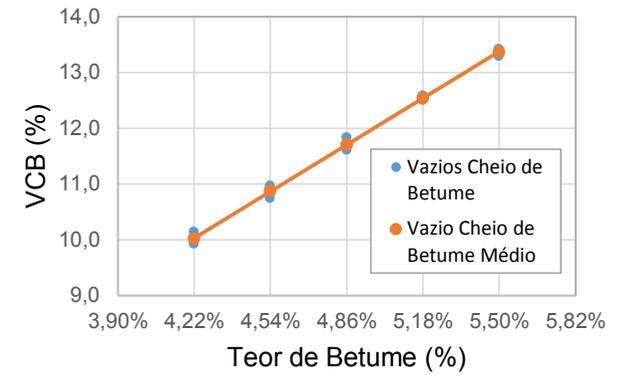
Figura 5.5 – Vazios cheios com betume das misturas asfálticas de (a) CAP 10/20, CAP 30/45 e (c) CAP 50/70.



(a)



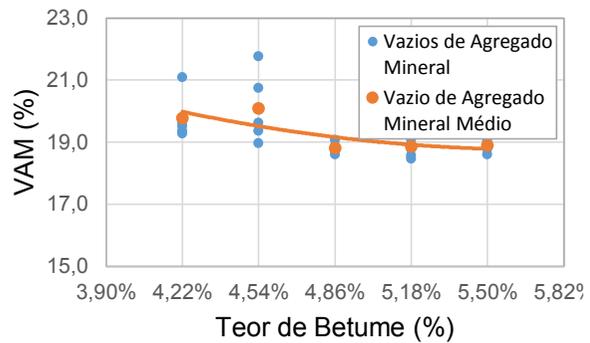
(b)



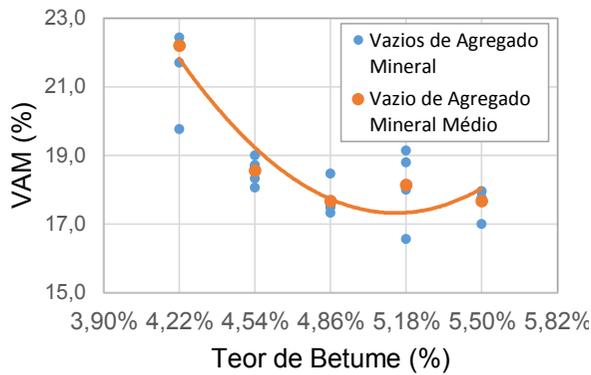
(c)

Fonte: Autor.

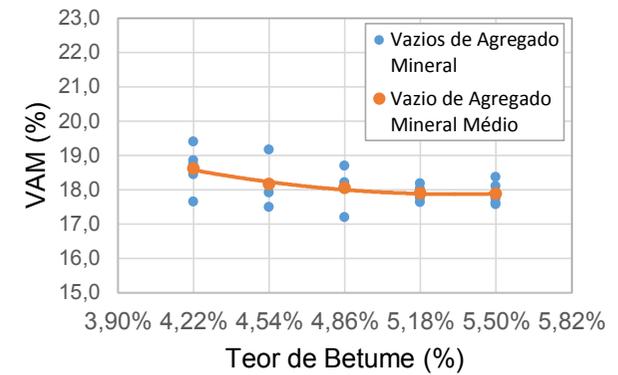
Figura 5.6 – Vazios do agregado mineral das misturas asfálticas de (a) CAP 10/20, (b) CAP 30/45 e (c) CAP 50/70.



(a)



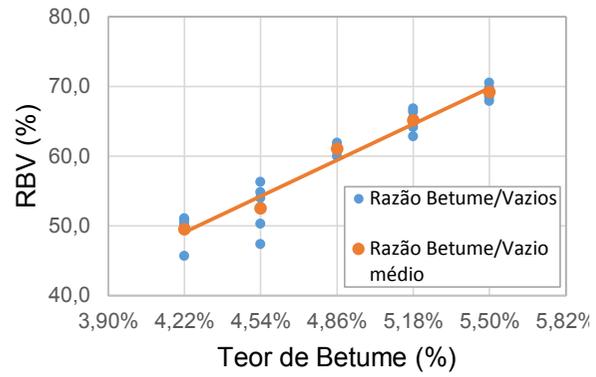
(b)



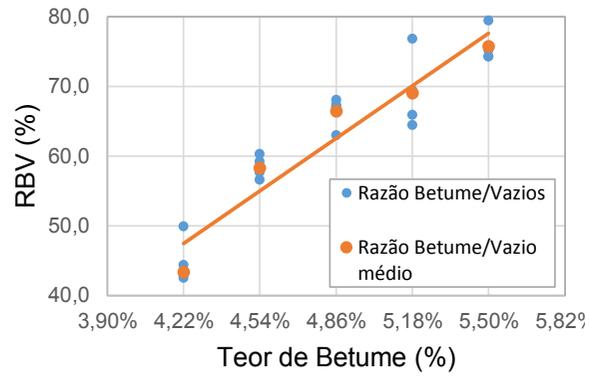
(c)

Fonte: Autor.

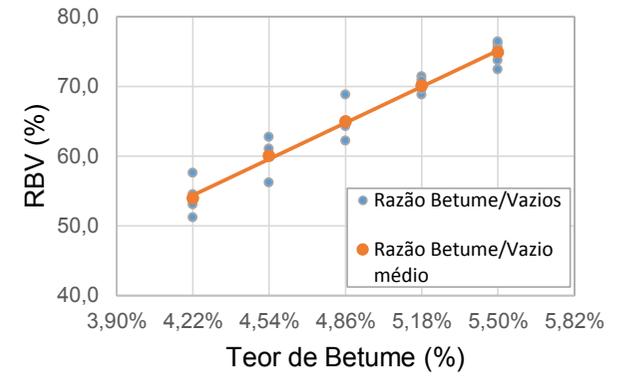
Figura 5.7 – Relação betume/vazios das misturas asfálticas de (a) CAP 10/20, (b) CAP 30/45 e (c) CAP 50/70.



(a)



(b)



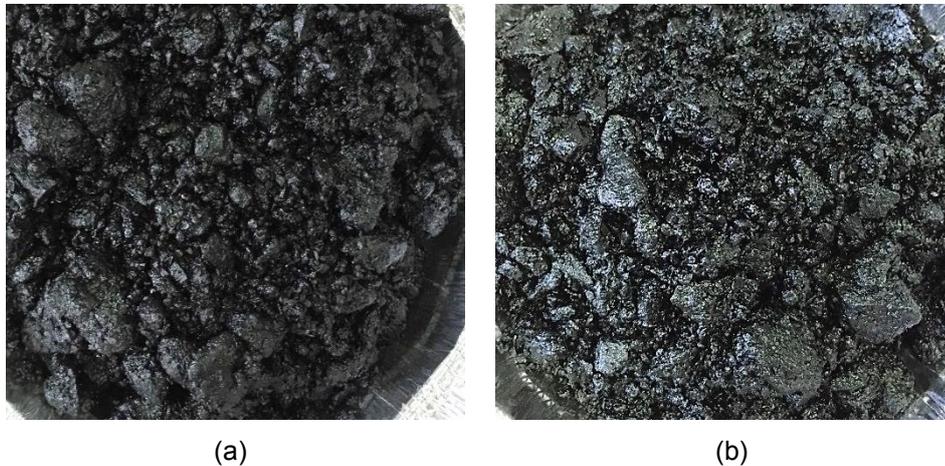
(c)

Fonte: Autor.

A definição do teor de ligante a ser tomado como ótimo através da análise desses gráficos pode ocorrer de diversas maneiras. Para a presente pesquisa optou-se pela observação de três parâmetros principais, pois é mais visível a influência desses no comportamento mecânico em relação aos demais. São eles: fluência, estabilidade e teor de vazios, descritos adiante para cada uma das misturas.

A curva de estabilidade do CAP 10/20 mostra valores máximos que tendem à faixa de teores de 4,54% a 5,18%. No entanto, durante a realização das misturas, pôde-se perceber que aquela com 5,18% de ligante mostrou-se demasiadamente brilhosa, dando um indicativo de excesso de ligante (Figura 5.8). Além disso, para 5,18% de ligante, puderam-se observar o aparecimento de grandes manchas de aglutinação nos filtros dos corpos de prova (Figura 5.9).

Figura 5.8 – Comparativo das superfícies de misturas com dois diferentes teores de CAP 10/20: (a) 4,86% e (b) 5,18%.

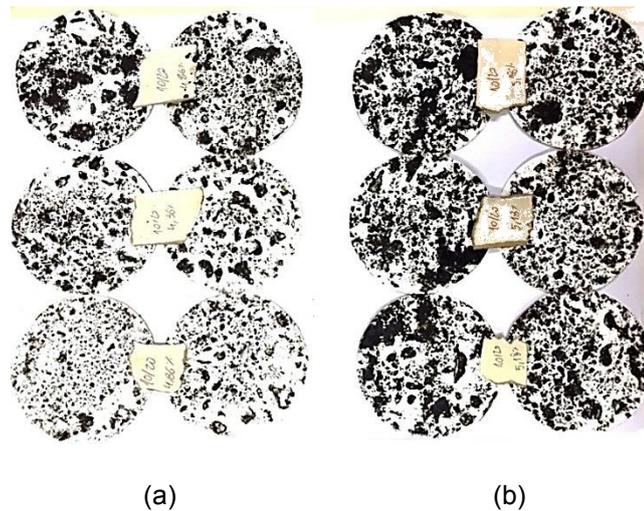


Fonte: Autor.

Analisando-se a reta de fluência observa-se que, pelo fato de ser uma reta de caráter crescente, quanto menos ligante presente na mistura menor será este valor, o que é desejável para pavimentos asfálticos.

Todavia, o teor de vazios encontrado para 4,54% de CAP 10/20 mostra-se muito próximo de 9%. Dessa forma, optou-se pela adoção do teor ótimo de ligante como sendo 4,86%, onde a fluência observada é pouco superior àquela encontrada para 4,54%, ao passo que o teor de vazios encontra-se próximo a 7%.

Figura 5.9 – Comparativo dos filtros dos corpos de prova com dois diferentes teores de CAP 10/20: (a) 4,86% e (b) 5,18%.

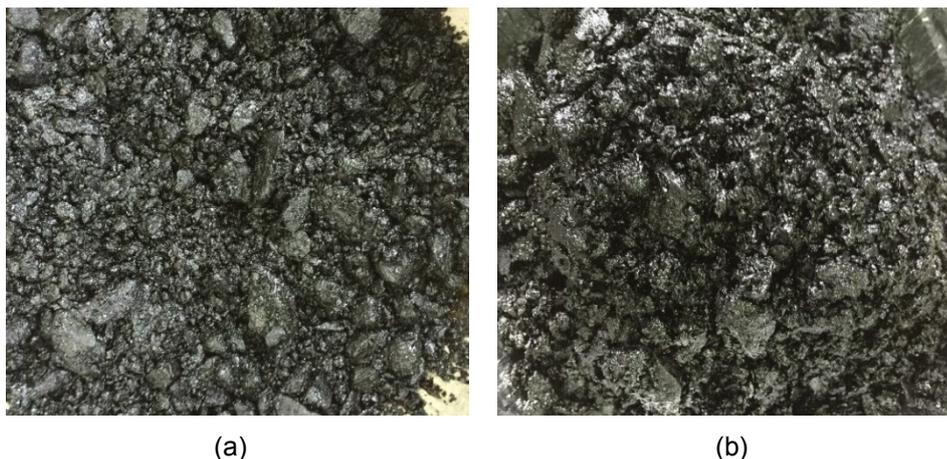


Fonte: Autor.

Já para as misturas formuladas a partir do CAP 30/45 tem-se, em um primeiro momento, durante a análise dos gráficos, comportamentos que induzem ao teor ótimo de ligante de 4,86%, onde a estabilidade se aproxima do valor máximo, a fluência está próxima de 4,5 mm e o teor de vazios situado em torno de 6%.

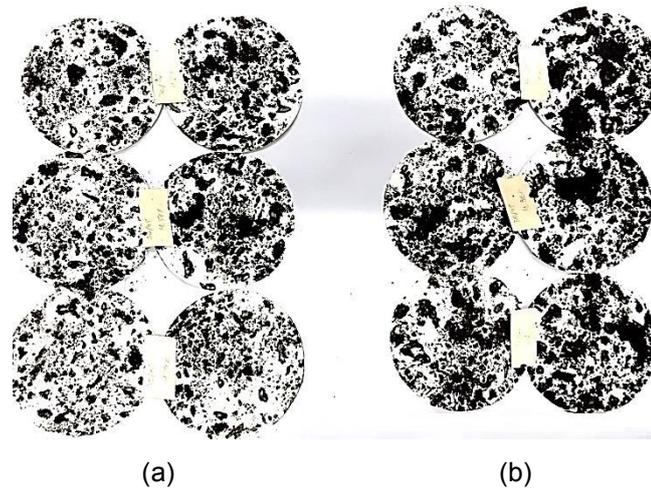
Entretanto, durante a usinagem das misturas asfálticas, pôde-se observar um bom envolvimento dos grãos, com boa trabalhabilidade, já com 4,54% de ligante, ao passo que teores superiores apresentavam superfícies demasiadamente brilhosas (Figura 5.10) e os filtros com relevantes manchas de ligante (Figura 5.11). Dessa forma, o teor ótimo de ligante adotado para o CAP 30/45 foi de 4,54%.

Figura 5.10 – Comparativo das superfícies de misturas com dois diferentes teores de CAP 30/45: (a) 4,54% e (b) 4,86%.



Fonte: Autor.

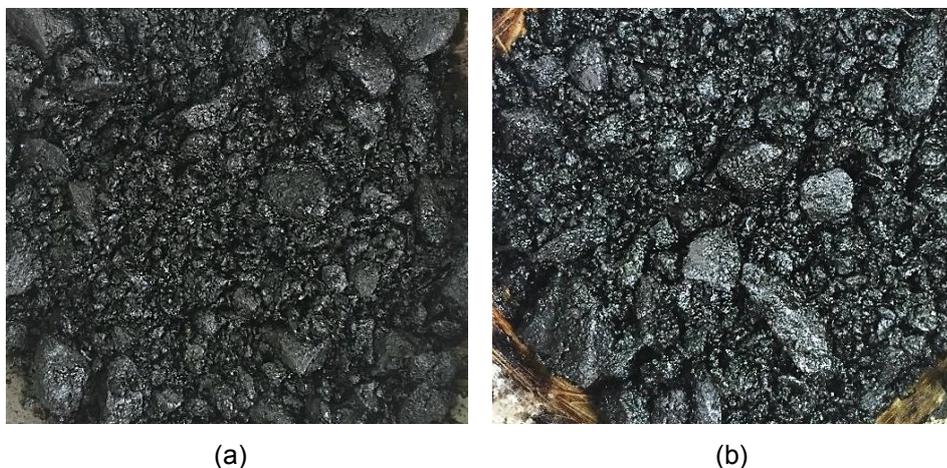
Figura 5.11 – Comparativo dos filtros dos corpos de prova com dois diferentes teores de CAP 30/45: (a) 4,54% e (b) 4,86%.



Fonte: Autor.

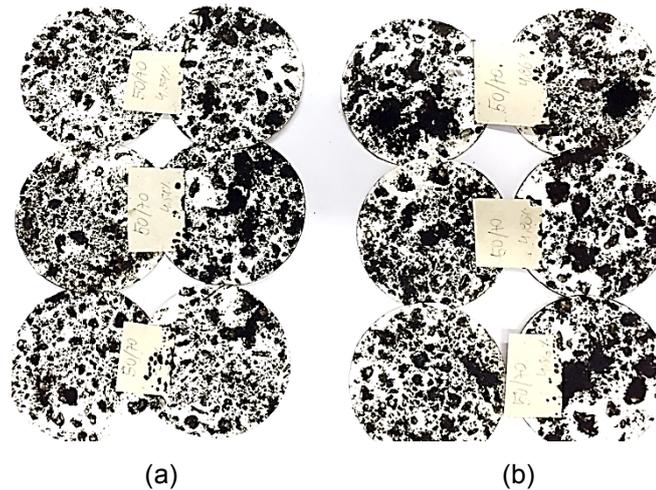
No caso do CAP 50/70, os comportamentos das curvas observadas nos gráficos apontam para um teor ótimo de 4,54%, onde se tem o valor máximo na curva de estabilidade, fluência com tendência ao valor de 4,4 mm e teor de vazios próximo a 7%. A Figura 5.12 e a Figura 5.13 servem como indicativos de que esse teor já era suficiente para garantir a completa envoltura dos grãos pelo ligante durante a mistura.

Figura 5.12 – Comparativo das superfícies de misturas com dois diferentes teores de CAP 50/70: (a) 4,54% e (b) 4,86%.



Fonte: Autor.

Figura 5.13 – Comparativo dos filtros dos corpos de prova com dois diferentes teores de CAP 50/70: (a) 4,54% e (b) 4,86%.



Fonte: Autor.

Além disso, pelo fato do CAP 50/70 ser bastante empregado na área de pavimentação no Brasil, já foram realizados muitos estudos com o intuito de se determinar o teor ótimo desse ligante em misturas asfálticas. Búrigo (2015) realizou em sua pesquisa misturas formuladas a partir de amostras de CAP 50/70, com igual curva granulométrica à deste trabalho, porém, variando a natureza dos agregados (rocha diabásica), obtendo resultados finais que apontaram também para teor ótimo de ligante de 4,54%.

A seguir é apresentada a Tabela 5.2, a qual resume as propriedades resultantes para o teor ótimo de cada ligante.

Tabela 5.2 – Parâmetros de análise do ensaio Marshall.

Ligante Betuminoso	Parâmetros Marshall							
	Estabilidade (kN)	Fluência (mm)	MEA (g/cm ³)	Teor de Vazios (%)	VCB (%)	VAM (%)	RBV (%)	Teor Ótimo de Betume (%)
CAP 10/20	29,29	3,68	2,398	7,333	11,461	18,794	60,989	4,86
CAP 30/45	19,31	4,49	2,400	7,745	10,789	18,535	58,234	4,54
CAP 50/70	17,72	5,35	2,412	7,274	10,876	18,151	59,988	4,54

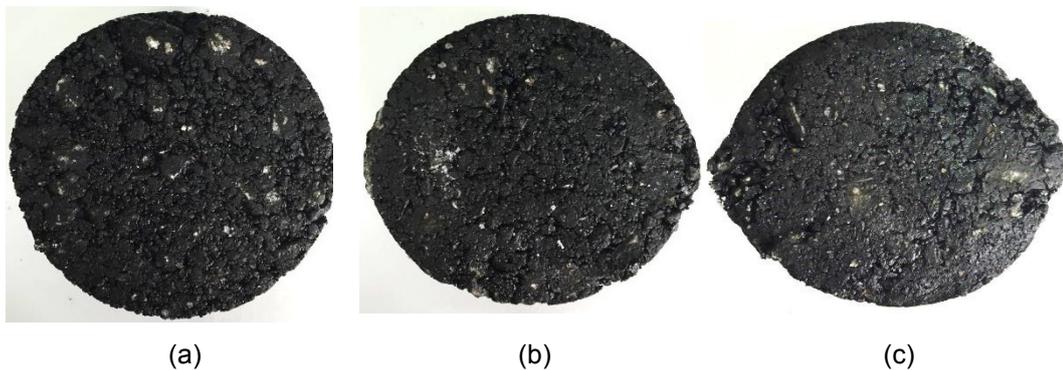
Fonte: Autor.

Ao realizar-se a comparação dos comportamentos mecânicos das misturas, dados os referidos teores ótimos de ligante, pode-se perceber a influência exercida pelos ligantes. A estabilidade tem valores muito superiores nas amostras formuladas

a partir do CAP 10/20. Esse fato pode ser explicado devido à elevada rigidez desse ligante, que contribui para uma maior resistência aos esforços solicitantes.

Em relação à característica de deformabilidade dos materiais, observa-se que as formulações com o CAP 10/20 tendem a se deformar menos que aquelas com o CAP 30/45, que por sua vez deformam menos que as concebidas a partir do CAP 50/70. Esta tendência pode ser comprovada pela Figura 5.14, que apresenta corpos de prova com o mesmo teor de ligante logo após o rompimento, onde aquele preparado com CAP 10/20 mostra-se com formato mais circular que os demais.

Figura 5.14 – Corpos de prova após o rompimento na prensa Marshall: (a) CAP 10/20, (b) CAP 30/45 e (c) CAP 50/70.



Fonte: Autor.

Os gráficos evidenciam ainda que a viscosidade tem forte influência sobre os vazios presentes nas misturas. Ligantes mais viscosos tendem a ter maior dificuldade no envolvimento das partículas granulares, dado um mesmo teor, influenciando assim diretamente as propriedades de teor de vazios e massa específica aparente. Esse fato corrobora com a escolha dos teores ótimos de ligante, onde o valor para as misturas com CAP 10/20 (4,86%) é superior aos demais (CAP 30/45 e CAP 50/70, ambos 4,54%) para que possa garantir o completo envolvimento dos agregados.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos nessa pesquisa comprovam que o ligante betuminoso a ser utilizado na formulação de misturas asfálticas tem grande influência nas propriedades finais encontradas, e conseqüentemente na determinação dos teores ótimos em cada caso, demonstrando que o trabalho atingiu o seu objetivo principal.

Desta forma, verifica-se que as misturas asfálticas herdaram, de fato, o comportamento viscoelástico do ligante betuminoso que contêm, e de forma particular a cada matriz utilizada em sua formulação.

É importante ressaltar também que os resultados da metodologia Marshall aplicada não traduzem fielmente as condições de trabalho observadas em campo. Os valores paramétricos mostram-se inadequados em diversas situações, sendo conseqüência da ausência de sensibilidade e empirismo do método quanto à análise acurada do comportamento viscoelástico das misturas asfálticas, onde o modo de compactação dos corpos de prova, as características dos equipamentos e as condições operacionais do processo podem exercer grande influência.

Portanto, ressalta-se que a determinação do teor ótimo de ligante deve acontecer não somente pela interpretação dos gráficos e dos limites normativos indicados pela metodologia, mas também pela experiência do operador durante a usinagem, de onde se poderá ter um indício da quantidade de ligante que satisfaça a condição ótima da formulação.

Rodovias com elevado tráfego, como rotas entre portos, por exemplo, estão geralmente associadas a movimentações de caminhões e veículos de grande porte, devendo então a camada de rolamento suportar a forte intensidade dos esforços atuantes. Para esses casos indica-se, dentro das delimitações dessa pesquisa, por exemplo, a utilização de misturas concebidas a partir do CAP 10/20 que, apesar de ainda não comercializado, parece garantir um melhor comportamento mecânico do pavimento.

Além disso, indica-se também a aplicação do CAP 10/20 em regiões que apresentam temperaturas mais elevadas devido ao fato de ser menos suscetível à

temperatura, contribuindo para a diminuição dos casos de deformação permanente nas vias.

Em estradas de médio e baixo tráfego, como vias coletoras e arteriais, desde que o trânsito de veículos pesados seja limitado, parecem ser mais indicadas camadas de rolamento formuladas a partir do CAP 30/45 e até mesmo CAP 50/70, onde se observaram nessa pesquisa comportamentos mecânicos próximos e satisfatórios para fins de pavimentação.

Recomendam-se estudos físico-químicos mais aprofundados dos ligantes betuminosos, de caráter microscópico, para que assim se possam entender melhor as características as quais exercem influência, de maneira distinta, sobre as misturas asfálticas.

Sugere-se ainda a execução de ensaios laboratoriais fundamentais para as misturas asfálticas, como: deformação permanente, módulo complexo e resistência à fadiga, encontrados na metodologia francesa de formulação, reconhecida por apresentar estreita relação campo/laboratório. Essa relação se evidencia com a possibilidade de se fazer a análise de módulo complexo e resistência à fadiga no domínio frequencial e à flexão alternada, que é o verdadeiro escopo de solicitação das misturas asfálticas em campo.

REFERÊNCIAS

A DESTILAÇÃO DO PETRÓLEO (CRUDE). **Portal laboratórios virtuais de processos químicos**. Disponível em:

<http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com_content&task=view&id=224&Itemid=415>. Acesso em: 30.maio.2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Agregados** – terminologia. Norma Brasileira nº 9935/2011. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Lastro padrão** – determinação da forma do material. Norma Brasileira nº 6954/1989. Rio de Janeiro: ABNT, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Materiais betuminosos** – Determinação da viscosidade Saybolt Furol. Norma brasileira nº 14950/2003. p. 01-10. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Produtos betuminosos semissólidos** – determinação da massa específica e densidade relativa. Norma Brasileira nº 6296/2012. p. 01-06. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

BARRA, B. S. **Agregados para Pavimentação**. 13-21.abr.2015. Notas de Aula.

BARRA, B.S. **Avaliação da Ação da Água no Módulo Complexo e na Fadiga de Misturas Asfálticas Densas**. 2009. 327p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

BARRA, B. S. **Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas densas utilizando materiais do estado do Pará com o emprego de pó calcário**. 2005. 177 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 3. ed. Rio de Janeiro: PETROBRÁS: ABEDA, 2010.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS (DNER). **Agregado graúdo** – adesividade a ligante betuminoso. Método de Ensaio nº 078/94. p. 01-03. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS (DNER). **Agregados** – análise granulométrica. Método de Ensaio nº 083/98. p. 01-05. Rio de Janeiro: DNER, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS (DNER). **Agregados** – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou magnésio. Método de Ensaio nº 089/94. p. 01-06. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS (DNER). **Agregados** – determinação da abrasão “Los Angeles”. Método de Ensaio nº 035/98. p. 01-06. Rio de Janeiro: DNER, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS (DNER). **Agregados** – determinação da absorção e da densidade do agregado graúdo. Método de Ensaio nº 081/98. p. 01-06. Rio de Janeiro: DNER, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS (DNER). **Agregados** – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Método de Ensaio nº 194/98. p. 01-04. Rio de Janeiro: DNER, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS (DNER). **Material finamente pulverizado** – determinação da massa específica real. Método de Ensaio nº 085/94. p. 01-04. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS (DNER). **Misturas betuminosas a quente** – ensaio Marshall. Método de Ensaio nº 043/95. p. 01-11. Rio de Janeiro: DNER, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Materiais asfálticos** – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola. Método de Ensaio nº 131/2010. p. 01-06. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Material asfáltico** – Determinação da penetração. Método de Ensaio nº 155/2010. p. 01-07. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Pavimentação asfáltica** – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Método de Ensaio nº 136/2010. p. 01-06. Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Pavimentos flexíveis** – Concreto asfáltico. Especificação de Serviço nº 031/2006. p. 01-14. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

GUERRERO, Y. A. P. **Avaliação do desempenho mecânico e reológico de misturas asfálticas mornas**. 2013. 326 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

LEITE, L. F. M. **Estudos reológicos em cimentos asfálticos**. 1990. 122 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990.

MEURER, P. **Caracterização de materiais rochosos do norte de Santa Catarina para fins de aplicação em obras de pavimentação**. 2015. 92 p. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia de Infraestrutura, Centro de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

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

MOURÃO, A. L. M. **Misturas asfálticas de alto desempenho tipo SMA**. 2003. 131 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

PEREIRA, M. A. *et al.* (Org.). **Sistemas de Transportes**. 195 p. Apostila de Curso. Departamento de Transportes, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

SENÇO, W. de. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2008, Vol. 1.

QUINTERO, B. S. **Estudo de misturas asfálticas com ligantes de consistência elevada – formulação e comportamento mecânico**. 2011. 203 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.