UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Felipe Amador Tamanini

REVESTIMENTO ASFÁLTICO: CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E VOLUMÉTRICA DE CONCRETO ASFÁLTICO ENQUADRADO NA FAIXA I DA PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE

Porto Alegre
dezembro 2012

FELIPE AMADOR TAMANINI

REVESTIMENTO ASFÁLTICO: CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E VOLUMÉTRICA DE CONCRETO ASFÁLTICO ENQUADRADO NA FAIXA I DA PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Jorge Augusto Pereira Ceratti

Porto Alegre

dezembro 2012

FELIPE AMADOR TAMANINI

REVESTIMENTO ASFÁLTICO: CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E VOLUMÉTRICA DE CONCRETO ASFÁLTICO ENQUADRADO NA FAIXA I DA PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 13 de dezembro de 2012

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti
DSc. pela UFRJ
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti
DSc. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Washington Peres Núñez
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Lélio Antônio Teixeira Brito
PhD. pela University of Nottingham

Dedico este trabalho à minha família e à Yane, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Jorge Augusto Pereira Ceratti e à Profa. Luciana Rohde, que foram fundamentais no desenvolvimento deste trabalho, principalmente pelos ensinamentos transmitidos e apoio.

Agradeço a Profa. Carin Maria Schmitt pelo grande auxílio e paciência nas correções, sempre indicando os melhores caminhos para o aperfeiçoamento do trabalho.

Agradeço à Titton Brugger, em especial ao engenheiro civil e urbanista João Oly Titton pelo apoio, incentivo, credibilidade concedida e principalmente pela oportunidade de crescimento técnico e profissional.

Agradeço ao grupo Zandoná, primeiramente pelo espaço e materiais cedidos para realização deste trabalho, e fundamentalmente pelo incentivo, apoio e compreensão pelas horas dedicadas ao estudo.

Agradeço ao sr. Pedro Roberto Ribeiro de Quadros, pelo espaço e equipamentos cedidos no laboratório da SOLOTEC Sondagens e Ensaios Geotécnicos, e pela grande experiência transmitida.

Agradeço aos colaboradores do Lapav Rebeca, Lysiane, Vinicius, Daniel e Alex, por todo o apoio e auxílio.

Agradeço ao Douglas Mocelin pela parceria na realização dos ensaios, inclusive sábados e feriados, dedicando-lhe os créditos pelo desenvolvimento do estudo de danos por umidade induzida, apresentado na Semana de Iniciação Científica 2012/2.

Agradeço ao meu amor Yane, pela imensa compreensão em todas as horas, não foi fácil.

Agradeço ao meu irmão Tiago pelo apoio incondicional desde a decisão pela engenharia até o final do curso, em que os esclarecimentos entre as reações químicas de aminas polares e óxidos silicosos foram fundamentais, assim como o ponto de fulgor, inclusive de detergentes.

Agradeço aos meus pais por tudo.

Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades,
lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram
conquistadas do que parecia impossível.

Charles Chaplin

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados obtidos em uma pesquisa experimental, que visa avaliar as propriedades mecânicas e volumétricas de um concreto asfáltico (CA), cuja distribuição granulométrica está compreendida nos limites da Faixa I do Caderno de Encargos da Prefeitura Municipal de Porto Alegre (PMPA). Para o estudo foram utilizados agregados provenientes da britagem do granito, extraídos em uma pedreira localizada no bairro Lomba do Pinheiro em Porto Alegre, e ligante asfáltico CAP50/70. Tanto os agregados quanto o ligante asfáltico, foram cedidos por uma empresa de pavimentação desta capital, e coletados diretamente das correias dosadoras e tanques de armazenamento da usina de asfalto. Para os estudos, foi realizada a caracterização dos agregados e do ligante, segundo parâmetros indicados pela Secretaria Municipal de Obras e Viação (SMOV) e normas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Para análise do CA, os ensaios foram realizados no Laboratório de Pavimentação (Lapav) do Departamento de Engenharia Civil da URFGS, seguindo metodologia Marshall, e complementados pelo ensaio de resistência à tração (RT) e módulo de resiliência (MR). Foram determinadas também, as características volumétricas, estabilidade e fluência de uma mistura composta pela granulometria do projeto e teor de ligante de 4,5%, e, efetuada a comparação dos resultados de dano por umidade induzida do concreto asfáltico com CAP convencional, dopado e dopado envelhecido. A partir dos dados obtidos foi possível definir o projeto, atendendo os requisitos exigidos pela Secretaria Municipal de Obras e Viação de Porto Alegre. Ao final da pesquisa, observou-se que o mistura com 4,3% de ligante, 28,7% de brita 1”, 19,1% de brita 3/4" e 47,9% de pó de pedra, apresentou resultados satisfatórios para enquadramento na Faixa I da SMOV, e, em complemento, também à Faixa B do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). O CA é aplicável somente às camadas de ligação do pavimento segundo SMOV e DNIT.

Palavras-chave: Revestimento Asfáltico de Porto Alegre. Método Marshall. Análise Volumétrica. Camada de Ligação. Binder.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas do projeto 17
Figura 2 – Estrutura tipo de pavimentos asfálticos 19
Figura 3 – Corpo de prova extraído de uma pista, mostrando a camada de ligação 20
Figura 4 – Comparação entre composição granulométrica de um SMA e um CA 22
Figura 5 – Envelhecimento do ligante asfáltico em função do tempo 24
Figura 6 – Deslocamento da película de ligante em função da umidade 29
Figura 7 – Interação entre agregado e ligante com melhorador de adesividade 29
Figura 8 – Ilustração da análise por peneiramento 31
Figura 9 – Representação gráfica convencional de curvas granulométricas 31
Figura 10 – Gráfico de valores limites para VAM 37
Figura 11 – Molde de compressão – ensaio Marshall 40
Figura 12 – Prensa Marshall 40
Figura 13 – Esquema do ensaio de compressão diametral (RT) 43
Figura 14 – Faixa I de distribuição granulométrica de Porto Alegre 47
Figura 15 – Silos de agregados da usina de asfalto 48
Figura 16 – Distribuição granulométrica dos agregados de estudo 50
Figura 17 – Amostra sem adição de dope 50
Figura 18 – Amostra com adição de 0,3% de dope 50
Figura 19 – Curva Temperatura x Viscosidade 52
Figura 20 – Distribuição granulométrica de projeto 54
Figura 21 – Distribuição granulométrica de projeto x Superpave 55
Figura 22 – Separação e dosagem da mistura asfáltica 56
Figura 23 – CP imersos à 60ºC 57
Figura 24 – Ensaio de Estabilidade e Fluência 57
Figura 25 – Gráficos dos parâmetros determinados nos ensaios 59
Figura 26 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral 60
Figura 27 – Método de envelhecimento de ligante RTFOT 62
Figura 28 – Gráfico comparativo de RT e RT’ 63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais características dos agregados utilizados em pavimentação 27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Extensão da malha rodoviária brasileira 13
Tabela 2 – Dimensões nominais das peneiras segundo DNER-ME 035 32
Tabela 3 – Critérios limites para volume de vazios (Vv) e relação betume vazios (RBV) segundo DNIT 37
Tabela 4 – Limites da faixa de trabalho da Faixa I de Porto Alegre 47
Tabela 5 – Distribuição granulométrica dos agregados de estudo 49
Tabela 6 – Caracterização dos agregados de estudo 51
Tabela 7 – Ensaio de viscosidade Brookfield 52
Tabela 8 – Caracterização do ligante asfáltico 53
Tabela 9 – Distribuição granulométrica de projeto 54
Tabela 10 – Ajuste do percentual da mistura 56
Tabela 11 – Resultados de ensaio 57
Tabela 12 – Planilha de cálculo 58
Tabela 13 – Comparação entre resultados do projeto e especificações limites (SMOV e DNIT)..... 61
Tabela 14 – Resultados do ensaio de dano por umidade induzida – Lottman 63
Tabela 15 – Comparativo de projetos Faixa B do DNIT 65
Tabela 16 – Projeto 67

LISTA DE SIGLAS

AAUQ – areia asfalto usinada a quente

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CA – concreto asfáltico

CAP – cimento asfáltico de petróleo

CBUQ – concreto betuminoso usinado a quente

CPA – camada porosa de atrito

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

Lapav – Laboratório de Pavimentação

MR – módulo de resiliência

PMPA – Prefeitura Municipal de Porto Alegre

RBV – relação betume vazios

RT – resistência à tração

SHRP – *Strategic Highway Research Program Superpave*

SMA – *stone matrix asphalt*

SMOV – Secretaria Municipal de Obras e Viação

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

VAM – vazios do agregado mineral

Vv – volume de vazios

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
2 DIRETRIZES DA PESQUISA 15
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA 15
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA 15
2.2.1 Objetivo Principal 15
2.2.2 Objetivo Secundário 15
2.3 PRESSUPOSTO 16
2.4 DELIMITAÇÕES 16
2.5 LIMITAÇÕES 16
2.6 DELINEAMENTO 16
3 REVESTIMENTO ASFÁLTICO 19
3.1 CONCRETO ASFÁLTICO 21
3.1.1 Ligante asfáltico 23
3.1.1.1 Ensaio de penetração 24
3.1.1.2 Viscosidade 25
3.1.1.3 Ponto de amolecimento 26
3.1.1.4 Massa específica 26
3.1.2 Agregado 26
3.1.2.1 Natureza 27
3.1.2.2 Tamanho 30
3.1.2.3 Distribuição granulométrica 30
3.1.2.4 Forma 33
3.1.2.5 Resistência à abrasão 33
3.2 DOSAGEM DE MISTURAS 34
3.3 PARÂMETROS DE ENSAIO 35
3.3.1 Propriedades volumétricas 36
3.3.2 Propriedades mecânicas 40
3.3.2.1 Estabilidade e fluência Marshall 41
3.3.2.2 Módulo de resiliência 41
3.3.2.3 Resistência à tração 43
3.3.3 Dano por umidade induzida 44
4 MATERIAIS, MÉTODOS E RESULTADOS 46
4.1 PROJETO EXPERIMENTAL 46

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS 48
4.2.1 Agregados 48
4.2.2 Ligante asfáltico 51
4.3 DOSAGEM DO CONCRETO ASFÁLTICO E DEFINIÇÃO DO TEOR DE PROJETO 53
4.3.1 Dosagem Marshall 53
4.3.2 Definição e caracterização do teor de projeto 60
4.3.3 Ensaio de dano por umidade induzida 61
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS 64
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 67
REFERÊNCIAS 69

1 INTRODUÇÃO

O sistema rodoviário é o principal modal de transporte no Brasil, pelo qual são transportadas em torno de 61% das cargas do País e circulam aproximadamente 96% dos passageiros. Segundo levantamento realizado pela Confederação Nacional do Transporte, pouco mais de 13% da malha rodoviária brasileira é pavimentada, conforme tabela 1, sendo que cerca de 95% destas rodovias pavimentadas são executadas com revestimento asfáltico (BRASIL, 2011a).

Tabela 1 – Extensão da malha rodoviária brasileira

Concessão	Pavimentada	Não Pavimentada	Total
Federal (km)	62.351	13.844	76.195
Estadual Coincidente (km)	17.012	6.013	23.025
Estadual (km)	106.548	113.451	219.999
Municipal (km)	28.827	1.234.918	1.261.745
Total (km)	212.738	1.368.226	1.580.964
Total (%)	13,45	86,55	100

(fonte: adaptado de BRASIL, 2011a)

Segundo pesquisa realizada em 2011 pela Confederação Nacional do Transporte, rodovias com pavimentos danificados reduzem a velocidade de tráfego em até 31,7 km/h, e geram um acréscimo no custo operacional de, em média, 24,8 % (BRASIL, 2011b, p. 8). Portanto, aprimorar técnicas que visam otimizar os recursos disponíveis, aliado ao aumento da malha rodoviária, são primordiais para melhorar desempenho, durabilidade, segurança e consequente redução dos custos de bens e serviços.

Porto Alegre conta com uma malha viária de 2.788km, composta por 1.154km de vias pavimentadas com revestimento asfáltico, 957km de vias pavimentadas com pedras, blocos e placas de concreto e 676km de vias não pavimentadas. Neste contexto, o presente estudo tem por objetivo avaliar as propriedades mecânicas e volumétricas de um concreto asfáltico, compreendido na Faixa I do Caderno de Encargos da Prefeitura Municipal de Porto Alegre.

Neste trabalho, as propriedades foram analisadas através de ensaios convencionais como o método Marshall, ensaios de módulo como a determinação do módulo de resiliência (MR) e ensaios de ruptura à tração por compressão diametral (RT), sendo avaliadas propriedades mecânicas e volumétricas do concreto asfáltico. Em complemento, foi avaliado o comportamento de uma mistura com os agregados e ligante ensaiados, em relação ao dano por umidade induzida. As determinações limites adotadas seguiram descrição da Secretaria Municipal de Obras e Viação e utilizou-se o agregado proveniente da britagem do granito, mais precisamente de uma jazida localizada no bairro Lomba do Pinheiro em Porto Alegre, e, como ligante, o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70.

Com os resultados obtidos, por meio de ensaios realizados em laboratório, foram analisadas as propriedades volumétricas para diferentes dosagens de agregado e ligante asfáltico. Visando melhor compreensão dos dados obtidos, tais análises foram demonstradas através de recursos gráficos e de tabelas.

Sendo assim, este trabalho está dividido em seis capítulos, sendo este primeiro destinado à introdução. O segundo capítulo descreve a questão de pesquisa, objetivos e etapas do trabalho. O capítulo três apresenta uma revisão bibliográfica sobre os principais assuntos envolvidos no estudo, com métodos de ensaios e análises de misturas asfálticas. O capítulo quatro descreve os materiais utilizados e as principais propriedades relevantes para o concreto asfáltico do estudo, assim como descreve os métodos utilizados para tais determinações e resultados. O capítulo cinco é destinado à análise dos resultados em comparação aos parâmetros indicados pela Secretaria Municipal de Obras e Viação. O capítulo seis é designado às considerações.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

Este capítulo engloba as diretrizes de pesquisa deste trabalho, como a questão de pesquisa a ser respondida, descrição dos objetivos principal e secundário, pressuposto, delimitações e limitações, bem como o delineamento.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: qual o projeto de um concreto asfáltico, considerando os agregados de estudo, que se enquadra na Faixa I da Prefeitura Municipal de Porto Alegre?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundário e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal do trabalho consiste na elaboração de um projeto de concreto asfáltico, com granulometria compreendida na Faixa I do Caderno de Encargos do Município de Porto Alegre, a partir dos resultados de ensaios realizados em laboratório.

2.2.2 Objetivo Secundário

Os objetivos secundários deste trabalho são as caracterizações das propriedades:

a) do agregado em estudo;
b) do ligante asfáltico em estudo;
c) da concreto asfáltico em estudo.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que os ensaios realizados, com corpos de prova de concreto asfáltico moldados segundo método Marshall, em laboratório, apresentam resultados satisfatórios para as análises propostas neste trabalho.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo de concretos asfálticos, seguindo granulometria descrita na Faixa I do Caderno de Encargos da Prefeitura Municipal de Porto Alegre.

2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

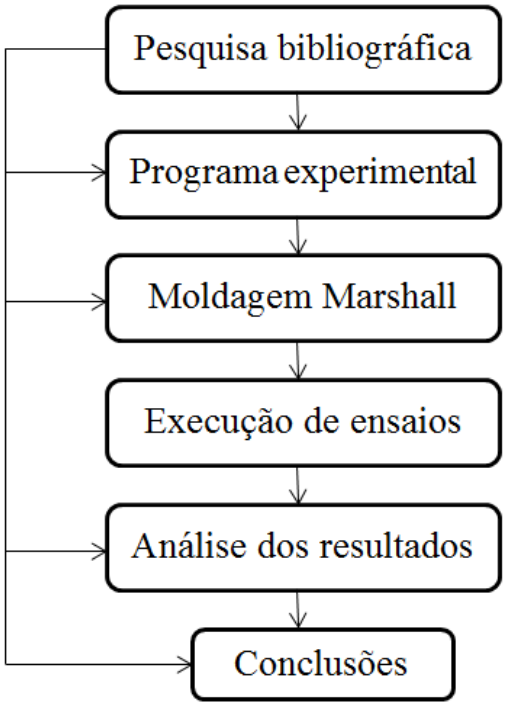
a) a utilização de agregado proveniente da britagem do granito do bairro Lomba do Pinheiro em Porto Alegre;
b) o emprego do ligante asfáltico utilizado na usina de asfalto de uma empresa de pavimentação da Lomba do Pinheiro;

2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir que estão representadas na figura 1:

a) pesquisa bibliográfica;
b) definição do programa experimental;
c) moldagem dos corpos de prova segundo a dosagem Marshall;
d) execução dos ensaios;
e) análise dos resultados;
f) conclusões.

Figura 1 – Diagrama das etapas do projeto



(fonte: elaborado pelo autor)

Na pesquisa bibliográfica buscou-se aprofundar os conhecimentos sobre revestimentos asfálticos e suas composições, e a relevância dos agregados na otimização dos resultados operacionais dos pavimentos, através de livros sobre pavimentação asfáltica, manuais, normas e especificações técnicas. Esta etapa inicial manteve-se até a conclusão do trabalho, e foram fundamentais as informações dadas e auxílio de professores, profissionais atuantes na execução de pavimentação e técnicos de usinagem e laboratório.

Posteriormente, foram definidos os materiais utilizados no preparo das misturas, como agregados e o ligante. Da mesma maneira, foi definida a faixa granulométrica de estudo e métodos de ensaio realizados. Nesta etapa deu-se o início dos trabalhos de laboratório, para caracterização dos materiais empregados e definição do projeto do CA.

A moldagem dos corpos de prova do CA foi realizada segundo Norma DNER-ME 43/95, que trata do método de dosagem Marshall. Foram também determinados os valores de densidade aparente, relação de betume vazios (RBV), vazios do agregado mineral (VAM), estabilidade e fluência em função do teor de ligante.

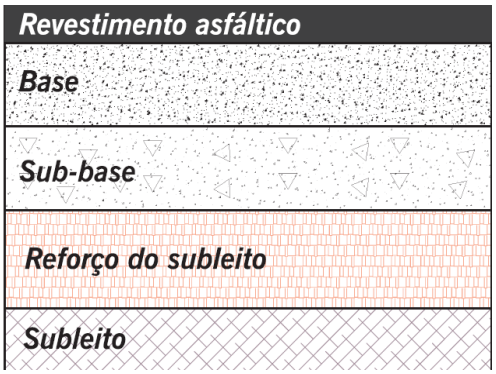
Assim como a modelagem dos corpos de prova, a execução dos ensaios foi realizada no Lapav/UFRGS, segundo determinações normatizadas correspondentes a cada ensaio. Além dos ensaios convencionais de estabilidade e fluência pelo método Marshall, a mistura com teor de projeto foi ensaiada quanto ao módulo de resiliência (MR) segundo a DNER-ME 133/94 e resistência à tração (RT) segundo a DNER-ME 138/94.

Com os resultados obtidos nos ensaios e na moldagem dos corpos de prova, foi efetuada a análise em comparação às especificações exigidas pelos órgãos de controle. Nesta última etapa foram obtidas as conclusões dos resultados obtidos e as considerações finais a respeito do assunto.

3 REVESTIMENTO ASFÁLTICO

Pavimentos asfálticos são constituídos de uma camada superficial de agregado mineral revestido e cimentado por ligante asfáltico, sobre estrutura de apoio (INSTITUTO DE ASFALTO, 1989, p. 16). Esta estrutura de apoio é formada basicamente por materiais granulares ou solos, e, composta por três seções principais: reforço de subleito, sub-base e base. As características das camadas que compõem esta estrutura dependem principalmente do volume de tráfego estimado, espessura de camadas, capacidade de suporte do subleito, condições ambientais, custos e recursos disponíveis. A figura 2 ilustra a estrutura tipo de um pavimento asfáltico, em que se observam as principais camadas de apoio.

Figura 2 – Estrutura tipo de pavimentos asfálticos



(fonte: BERNUCCI et al., 2008, p. 338)

A camada superficial denominada revestimento asfáltico, tem a finalidade de resistir diretamente às ações do clima e do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às seções inferiores, impermeabilizar o pavimento, melhorando as condições de rolamento. Designando às camadas subjacentes, essencialmente a função estrutural, através da combinação de espessuras e índices de suporte (BERNUCCI et al., 2008, p. 9).

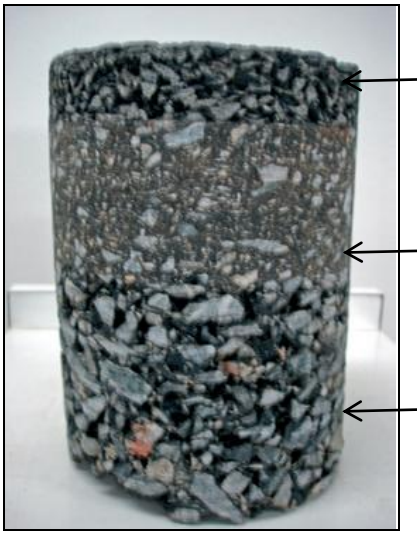
O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2006a, p. 98) classifica os revestimentos asfálticos quanto à sua execução, em revestimentos por mistura ou por penetração. Nas misturas asfálticas, o agregado é pré-envolvido com o material betuminoso antes da compressão, sendo realizadas a quente ou a frio. Em revestimentos por penetração, a

relação de aplicação entre o agregado e o ligante é independente, podendo o material betuminoso ser aplicado sobre camadas de agregado previamente espalhados, tais como os tratamentos superficiais, que são amplamente utilizados em vias de tráfego leve, em função do baixo custo, pois possuem espessura delgada, e não constituem estrutura de pavimento.

O revestimento asfáltico pode ser composto ainda por camada de rolamento e por camada de ligação, usualmente denominada de *binder*. As camadas destinadas ao rolamento tem a função de receber diretamente o contato do tráfego, entretanto quando o revestimento requer espessuras mais elevadas, torna-se viável a execução destas camadas intermediárias ou de ligação. A denominação *binder*, utilizada pelo DNIT 031/2006 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006b, p. 5), diferencia-se das demais camadas, pelas características de distribuição granulométrica mais grossa.

De acordo com Senço (2001, p. 312), a utilização do *binder* em autoestradas, deve ser considerada, antes de tudo, uma medida de caráter econômico, garantindo as qualidades técnicas do pavimento, e, em particular, do revestimento. O autor ainda ressalta que isso ocorre, principalmente quando o projeto de estrutura do pavimento requer espessuras elevadas de revestimento asfáltico, fazendo-se necessária a execução por camadas, entretanto, mesmo sendo usualmente utilizada como camada de ligação, pode ser substituída por outras especificações de revestimento. A figura 3 apresenta uma amostra de revestimento por camadas, retirada de uma pista.

Figura 3 – Corpo de prova extraído de uma pista, mostrando a camada de ligação



Mistura asfáltica usinada a quente, que serve como revestimento drenante

Concreto asfáltico

Binder ou camada de ligação

(fonte: BERNUCCI et al., 2008, p. 161)

Os próximos itens deste capítulo referem-se à caracterização das misturas asfálticas a quente e dos materiais utilizados, assim como a relação de dosagem de agregados e principais métodos de ensaios praticados.

3.1 CONCRETO ASFÁLTICO

As misturas asfálticas a quente são preparadas em usinas fixas ou móveis, através da união de agregados de diversos tamanhos e cimento asfáltico. O asfalto e os agregados são previamente aquecidos separadamente, a temperaturas determinadas, em função das características termoplásticas do ligante, e, em seguida misturados de forma que as partículas de agregado sejam totalmente envolvidas pelo ligante (INSTITUTO DE ASFALTO, 1989, p. 23).

As misturas asfálticas a quente distinguem-se ainda em alguns grupos específicos, em função da granulometria dos agregados, exigências de características mecânicas e em função da aplicação à que se destina. Em relação à composição granulométrica, pode-se classifica-las com graduação densa, aberta ou descontínua (BERNUCCI et al., 2008, p. 158-159).

As misturas densas de concreto asfáltico (CA) compõem-se de uma curva granulométrica contínua e bem graduada, com volume de vazios (Vv) entre 3 e 5%. Neste arranjo, os agregados de dimensões menores preenchem os vazios dos maiores, essa relação de vazios garante à mistura estabilidade ao tráfego, impedindo deformações permanentes significativas por fluência, por exemplo. Em relação ao teor de asfalto, seu percentual varia em massa de 4 a 6%, conforme especificações de projeto (BERNUCCI et al., 2008, p. 162).

Na graduação aberta ou uniforme, observa-se, em sua maioria, a presença de agregados de mesmo tamanho, e pouca presença de finos, o que aumenta o volume de vazios, incorrendo em uma faixa de 18 a 25% de vazios. No revestimento aplicado com esta graduação tende a ocorrer a percolação da água, tornando o asfalto drenante, como por exemplo a camada porosa de atrito (CPA) (BALBO, 2007, p. 179).

Bernucci et al. (2008, p. 165) destacam a função desta propriedade drenante do revestimento com mistura aberta da seguinte forma: “[...] redução da espessura da lâmina d’água na superfície de rolamento e consequentemente das distâncias de frenagem; redução do spray proveniente do borrifo de água pelos pneus dos veículos, aumentando assim a distância de

visibilidade [...]". A camada inferior ao CPA deve ser necessariamente impermeável para evitar a entrada de água na estrutura do pavimento.

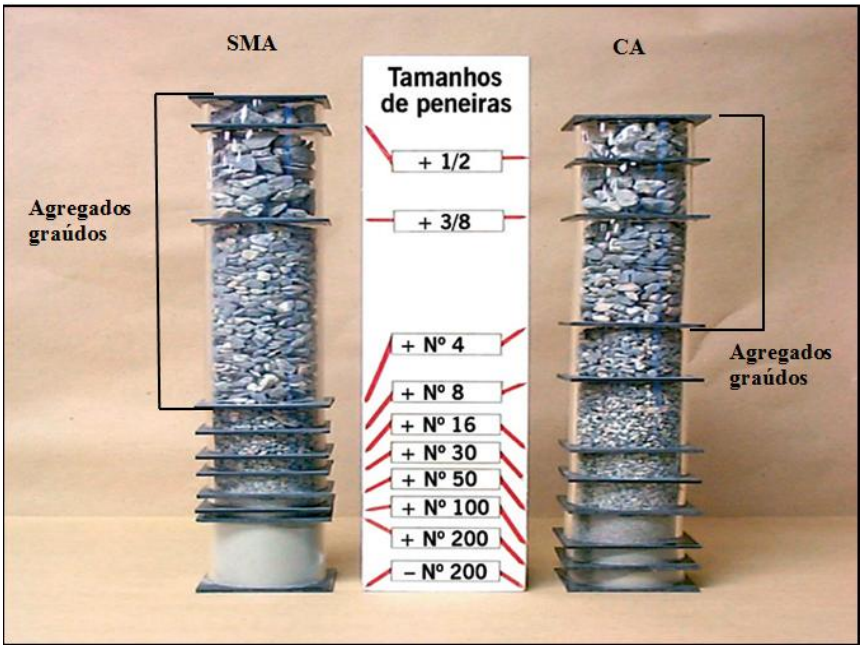
A distribuição granulométrica caracterizada descontínua é determinada pela presença de grandes quantidades de grãos maiores, e, completada apenas por certa quantidade de finos, tornando praticamente insignificante a presença de grãos intermediários. Concebendo-se assim, uma composição em que o contato entre agregados graúdos é maximizado, tornado a mistura mais resistente às deformações, tendo como exemplo a *stone matrix* asphalt (SMA) (BERNUCCI et al. 2008, p. 168).

Balbo (2007, p. 181) ressalta algumas características do SMA:

> A textura superficial resultante, devido à ausência de finos em quantidade no SMA, é mais rugosa e estabelece uma espécie de rede de micro drenagem superficial, que evita a formação de lâminas d'água durante períodos chuvosos, favorecendo a aderência e o contato dos pneus com os agregados superficiais.

A figura 4 ilustra a composição granulométrica do SMA em comparação com um CA de graduação densa. Pode-se observar a disparidade entre o consumo de agregados graúdos e o material mais fino do SMA em relação ao CA (BERNUCCI et al., 2008, p. 169).

Figura 4 – Comparação entre composição granulométrica de um SMA e um CA



(fonte: BERNUCCI et al., 2008, p. 169)

Outro tipo de mistura que se torna solução, principalmente pela indisponibilidade viável de recursos pétreos em determinados locais, seja pela escassez destes recursos naturais ou fatores econômicos, é a areia asfalto usinada a quente (AAUQ). Essa mistura é constituída basicamente de areia e ligante asfáltico, e eventualmente material de enchimento. Além disso, é aplicada geralmente em rodovias de tráfego não elevado, pois em função da presença de apenas agregados miúdos e material de enchimento, apresenta menor resistência às deformações permanentes quando comparadas às demais misturas usinadas a quente (BERNUCCI et al., 2008, p. 174-175).

Nos próximos itens são caracterizadas as principais propriedades do ligante e dos agregados, componentes das misturas asfálticas a quente.

3.1.1 Ligante asfáltico

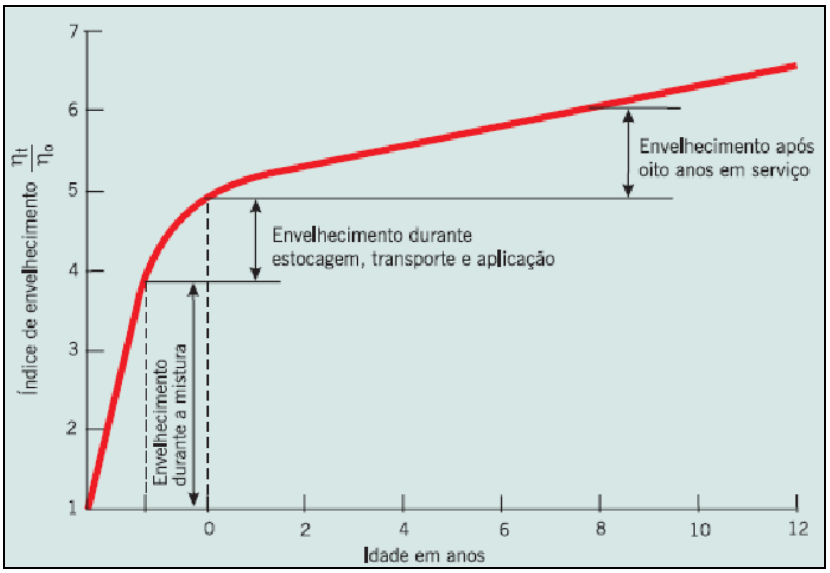
O ligante utilizado em pavimentação é obtido através do refino do petróleo, que passa por diversos processos de destilação e tem como resíduo a fração mais pesada, que após processos adicionais obtém-se o asfalto. O ligante asfáltico, ou, cimento asfáltico de petróleo (CAP) é composto quase que inteiramente de betume e possui características termoplásticas, pois se liquefazem quando aquecidos (INSTITUTO DE ASFALTO, 1989, p. 33).

O ligante asfáltico tem a finalidade de proporcionar uma forte união entre os agregados, possui flexibilidade controlável, é impermeabilizante, durável e resistente à ação da maioria dos ácidos, álcalis e sais, pode ser utilizado aquecido ou emulsionado. Possui característica termoviscoelástica, ou seja, seu comporto mecânico é suscetível à velocidade, ao tempo e à intensidade de carregamento, e à temperatura de serviço (BERNUCCI et al., 2008, p. 25-26).

Porém, mesmo com a elevada resistência de suas propriedades químicas a muitas agentes, ainda assim ocorrem reações que causam o fenômeno do envelhecimento do CAP. Formado principalmente por hidrocarbonetos, o CAP oxida lentamente quando em contato com o ar e água, formando micelas de alto peso molecular, aumentando a viscosidade do ligante e endurecendo-o. As altas temperaturas, área de contato e tempo de exposição aceleram os processos de oxidação, situações verificadas intensamente durante todo o processo de usinagem e operação do pavimento. O processo de envelhecimento do ligante pode ser divido

em três etapas: usinagem, aplicação e vida útil, cabendo às duas primeiras a responsabilidade de aproximadamente 80% do envelhecimento do CAP. A etapa de operação do pavimento, quando o mesmo fica suscetível às intempéries e exposto durante toda sua vida útil, é responsável por apenas cerca de 20% do envelhecimento. A figura 5 representa o índice de envelhecimento, pela relação de viscosidade do ligante recém produzido, em função do tempo (BELTRAME; GUIMARÃES, 2010).

Figura 5 – Envelhecimento do ligante asfáltico em função do tempo



(fonte: BELTRAME; GUIMARÃES, 2010)

Devido a estas características, todos os ensaios direcionados às propriedades físicas do asfalto têm temperatura especificada, e, para determinadas características, controla-se também a velocidade e o tempo de carregamento. Entre as principais propriedades, duas destacam-se quando utilizado para pavimentação, dureza e resistência ao fluxo, medidas respectivamente pelo ensaio de penetração e viscosidade (BERNUCCI et al., 2008, p. 42). Entretanto, propriedades que definem a temperatura de amolecimento e massa específica são essenciais para caracterização deste material, conforme descrito nos próximos itens.

3.1.1.1 Ensaio de penetração

O ensaio de penetração é definido como uma medição empírica da consistência do asfalto. É determinado a partir da profundidade, em milímetros, que penetra uma agulha com massa de 100 gramas, em um volume padronizado de CAP, por um período de 5 segundos à

temperatura de 25ºC, segundo NBR 6576 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1998). Portanto a consistência é tanto maior quanto menor a penetração da agulha.

No Brasil, desde 2005, a especificação de comercialização do CAP é definida a partir da faixa de penetração obtida neste ensaio, sendo produzidos CAP 30-45, 50-70, 85-100 e 150-200. Entretanto, o DNIT-ES 031 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006b, p. 4) limita à utilização em rodovias, apenas do CAP 30-45, 50-70 e 85-100.

3.1.1.2 Viscosidade rotacional

O ensaio de viscosidade tem por finalidade prescrever valores limites de consistência do CAP em determinadas temperaturas, através da resistência ao escoamento (INSTITUTO DE ASFALTO, 1989, p. 35), sendo o *Saibolt-Furol* o aparelho mais utilizado para realização deste ensaio no Brasil. O ensaio é definido a partir do tempo em segundos, que uma amostra de 60 ml de CAP flui totalmente através de um orifício padronizado, a uma dada temperatura. O tempo registrado é expresso em *Segundos Saybolt-Furol* (SSF).

Outro método de caracterização da viscosidade do ligante é através do viscosímetro rotacional, ou viscosímetro *Brookfield*, atualmente o mais empregado nos Estados Unidos e Europa. Trata-se de uma medida de viscosidade dinâmica expressa em centipoise (cP), o ensaio permite a obtenção da curva viscosidade-temperatura em ampla faixa de determinação com a mesma amostra, através da medida do comportamento do fluído a diferentes taxas de cisalhamento, obtidas por rotação de cilindros coaxiais mergulhados na amostra (BERNUCCI et al., 2008, p. 47)

Conforme DNIT-ES 031/2006 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006b, p. 7), a temperatura para misturas asfálticas, deverá ser determinada para cada tipo de ligante, em função da relação temperatura-viscosidade. Considera-se a temperatura adequada no momento da mistura, aquela em que o cimento asfáltico apresenta uma viscosidade dentro da faixa de 150 a 190 cP, ou, 75 a 150 SSF. A temperatura adequada para compactação possui viscosidade entre 250 e 310 cP, ou, 125 e 155 SSF. O DNIT salienta ainda que a temperatura esteja compreendida entre 107 e 177 ºC.

3.1.1.3 Ponto de amolecimento

O ponto de amolecimento é uma medida da temperatura na qual o ligante asfáltico amolece, quando aquecido a determinadas condições, servindo para caracterizar a propriedade de suscetibilidade térmica. Este ensaio é realizado pelo método do anel e bola, com procedimentos descritos na norma DNIT 131/10 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2010).

3.1.1.4 Massa específica

A determinação da massa específica do ligante está relacionada diretamente às demais propriedades volumétricas da mistura asfáltica, sendo utilizada na dosagem das misturas, em geral massa específica do ligante está compreendida entre 1 e 1,02g/cm³. A densidade relativa é a razão entre a massa específica de ligante asfáltico à 20ºC e a massa específica da água a 4ºC, que é de aproximadamente 1 g/cm³. A finalidade deste ensaio é a conversão de massas em volumes durante os cálculos de determinação do teor de projeto (BERNUCCI et al., 2008, p. 53)

3.1.2 Agregado

Define-se agregado como um termo genérico para areias, pedregulhos e rochas em seu estado natural ou processada, recentemente incorporou-se a tal definição, os agregados artificiais. Para o uso em pavimentação, o agregado deve apresentar propriedades de modo a suportar tensões na superfície do pavimento e também em seu interior. Os ensaios de laboratório têm por objetivo determinar como o desempenho de uma rocha que existem há milhões de anos, se dará sendo parte estrutural de um pavimento, durante sua vida útil de projeto (CERATTI; REIS, 2011, p. 23-24).

A utilização de determinados agregados em misturas asfálticas, depende principalmente de sua disponibilidade e custos de aplicação. Entretanto, o Instituto de Asfalto (1989, p. 85) salienta que tal adequação a revestimentos, requer uma avaliação mais criteriosa dos materiais quanto ao tamanho e graduação, limpeza, rigidez, textura superficial, forma das partículas, absorção e afinidade pelo asfalto, de modo que garantam as necessidades requeridas.

O DNIT especifica que a análise dos agregados seja efetuada quanto a três principais características: natureza, tamanho e distribuição granulométrica (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006a, p. 78), conforme quadro 1. Nos próximos itens são descritos os critérios de avaliação destas propriedades, além da forma das partículas e resistência à abrasão.

Quadro 1 – Principais características dos agregados utilizados em pavimentação

Agregados	Quanto à natureza	agregado natural
		agregado artificial
	Quanto ao tamanho	agregado graúdo
		agregado miúdo
		agregado de enchimento
	Quanto à graduação	Denso
		Aberto
		tipo macadame

(fonte: adaptado de DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006a, p. 78)

3.1.2.1 Natureza

Agregado natural inclui todas as fontes de ocorrência natural, obtidos por desmonte, escavação e dragagem, sendo utilizado em seu estado inalterado ou britado. Agregados artificiais são basicamente resíduos industriais, como escoria de alto forno, argila calcinada e argila expandida. Em amplo crescimento de aplicação dentre os artificiais, os agregados formados a partir da reciclagem já se tornaram importante fonte de recursos, principalmente em locais com ausência de agregado pétreo (CERATTI; REIS, 2011, p. 25).

Os agregados provenientes de rochas naturais são analisados quanto a sua origem e composição mineralógica, pois quando associados a ligantes utilizados na construção, podem

ter seu comportamento alterado. Nogami[1] (1977 apud BALBO, 2007, p. 99) descreve algumas observações importantes quanto à utilização do granito em misturas asfálticas:

> Podem apresentar elevada acidez, prejudicial à adesividade com o asfalto; seus fragmentos são pouco lamelares, apresentando boa quantidade de finos após britagem. A eventual presença de pirita nos agregados é um fator limitante para seu emprego na fabricação de concretos.
>
> Solo de alteração granular, comumente designado como "saibro" (solo saprolítico).

Agregados ácidos silicosos como o granito, que apresentam elevados teores de sílica, variando de 50 a 75%, possuem má adesividade ou interação química fraca com a maioria dos asfaltos, justamente pela característica também ácida do ligante. Os agregados de natureza ácida necessitam de compostos com características básicas para ocorrer a interação (LIBERATORI; CONSTANTINO, 2006, p. 2).

Além da incompatibilidade entre a constituição mineralógica do agregado e a constituição físico-química do material betuminoso, a ocorrência de umidade e a presença de finos na superfície do agregado, característica da natureza, também são fatores responsáveis pela perda de adesão. Essa perda de adesão entre agregado e o ligante é o principal responsável por defeitos no pavimento como trincamento por fadiga e deformação permanente (OLIVEIRA FILHO; SOARES, 2006, p. 2).

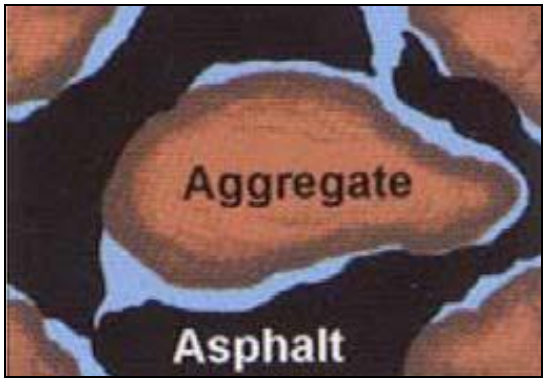
Em relação à afinidade do agregado ao ligante asfáltico, Balbo (2007, p. 118) ressalta que para correção da característica ácida do agregado e melhoria da adesividade do ligante ao agregado, é adicionado à mistura o *dope***.** Definido como aditivo melhorador de adesividade, age compensando a carga eletrostática presente na superfície dos agregados, permitindo a adesão do ligante asfáltico a diversos tipos de agregado.

Como exemplo de melhorador de adesividade, a utilização de cal na mistura favorece a interação do agregado ao ligante, em função da reação química com os ácidos presentes no asfalto, e dão origem a ésteres de cálcio que promovem a adesão do filme asfáltico ao agregado. Quando não há ligação química efetiva entre o ligante e o agregado, e houver água

[1] NOGAMI, J. S. **Principais rochas de interesse às obras civis.** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1977. Apostila da disciplina PMI-811.

livre na mistura, poderá ocorrer o descolamento da película de ligante, expondo a superfície do agregado, conforme figura 6 (LIBERATORI; CONSTANTINO, 2006, p. 3).

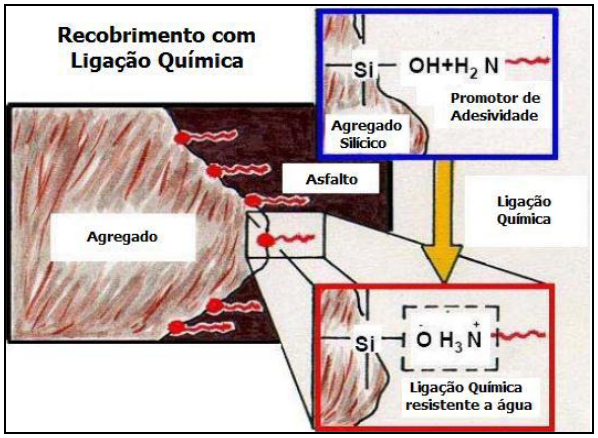
Figura 6 – Descolamento da película de ligante em função da umidade



(fonte: LIBERATORI; CONSTANTINO, 2006, p. 3)

Os compostos melhoradores de adesividade comercializados, são basicamente formados por aminas tenso-ativas alcalinas de terminal polar, solubilizados em óleo mineral, são bons promotores de adesão do ligante ao agregado, figura 7. Possuem elevada resistência de suas propriedades químicas quando submetidos às altas temperaturas, com ponto de fulgor a partir de 150ºC, conforme especificações de distribuidor. Entretanto as diaminas de ácidos graxos, também utilizadas como melhoradores de adesividade, possuem sensibilidade em suas propriedades quando submetidos às elevadas temperaturas, maiores que 140ºC, por longos períodos de tempo (LIBERATORI; CONSTANTINO, 2006, p. 7).

Figura 7 – Interação entre agregado e ligante com melhorador de adesividade



(fonte: LIBERATORI; CONSTANTINO, 2006, p. 3)

3.1.2.2 Tamanho

Em relação ao tamanho, os agregados são classificados em: graúdos, miúdos e material de enchimento ou fíler (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006a, p. 79):

a) agregado graúdo é o material retido na peneira n. 10 (2,0 mm), sendo britas, cascalhos e seixo;
b) agregado miúdo é o material que passa na peneira n. 10 (2,0 mm) e fica retido na peneira n. 200 (0,075 mm), sendo pó de pedra e areia;
c) material de enchimento ou fíler é o material no qual pelo menos 65% passa na peneira n. 200 (0,075 mm), exemplo de cal hidratada, cimento Portland, etc.

Conforme o Instituto de Asfalto (1989, p. 92-93), as especificações de tamanho máximo e tamanho máximo nominal do agregado são importantes para determinação do revestimento. Tamanho máximo é definido como a menor peneira na qual passa 100% de material. Tamanho máximo nominal é especificado como tamanho de peneira maior do que a primeira peneira que retém mais de 10% do material.

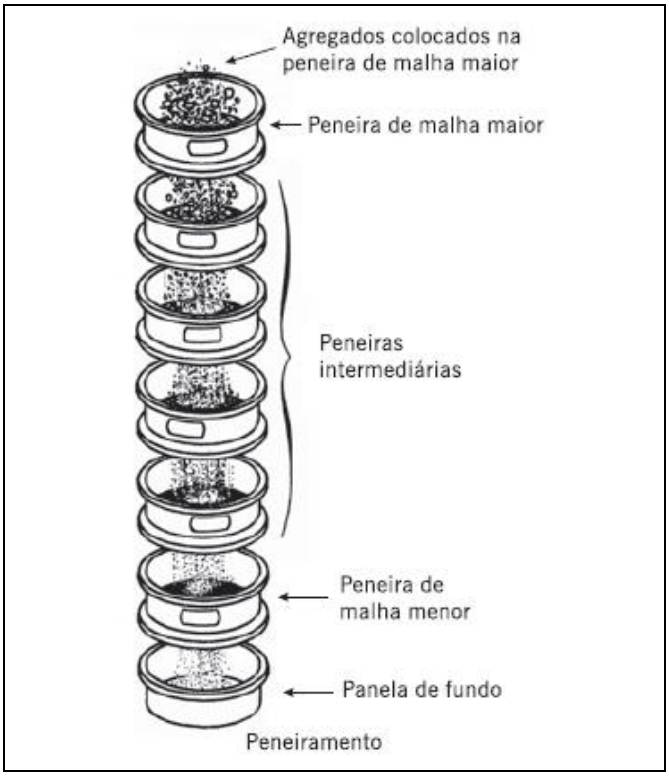
3.1.2.3 Distribuição granulométrica

Em relação à distribuição granulométrica, Bernucci et al. (2008, p. 121) destacam sua relevância nos revestimentos asfálticos da seguinte forma:

> A distribuição granulométrica dos agregados é uma de suas principais características e efetivamente influi no comportamento dos revestimentos asfálticos. Em misturas asfálticas a distribuição granulométrica do agregado influencia quase todas as propriedades importantes incluindo rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente, resistência ao dano por umidade induzida, etc.

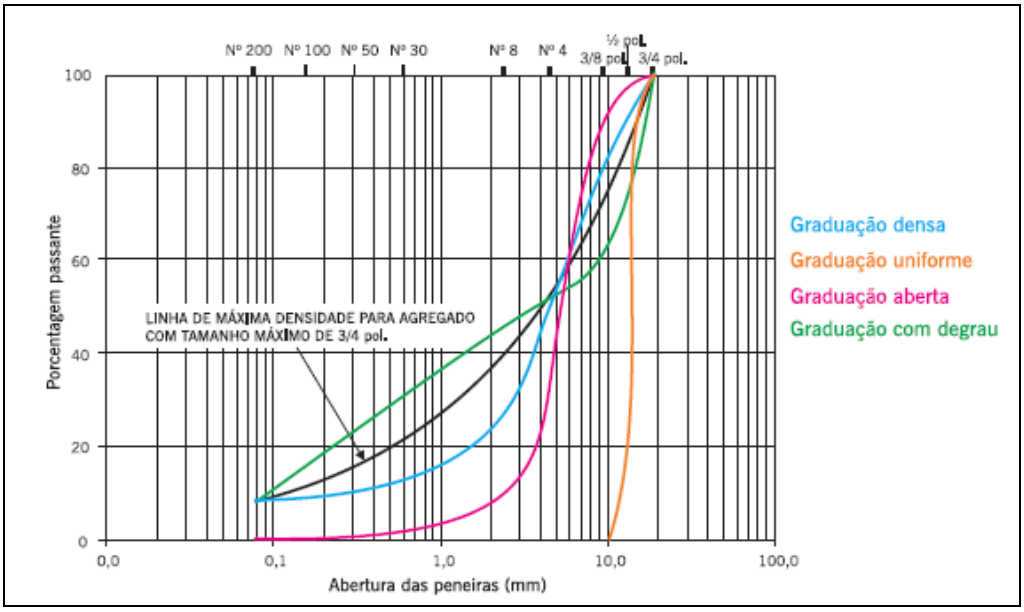
A distribuição granulométrica dos agregados é determinada através de análise por peneiramento, com procedimentos descritos na norma DNER-ME 083/98 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1998b). Uma amostra do material é peneirada por uma série de peneiras com redução progressiva do tamanho da abertura, conforme ilustrado na figura 8. Após a separação, determina-se através da comparação das massas, a distribuição percentual do material passante em cada peneira. Os resultados são expressos na forma de tabelas ou gráficos como na figura 9, determinando composição para misturas asfálticas convencionais.

Figura 8 – Ilustração da análise por peneiramento



(fonte: INSTITUTO DE ASFALTO, 1989, p. 91)

Figura 9 – Representação gráfica convencional de curvas granulométricas



(fonte: BERNUCCI et al., 2008, p. 123)

Segundo DNER-ME 083/98 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1998b, p. 3), quando da ocorrência de material pulverulento, com quantidades significativas de pó, o ensaio granulométrico é precedido pela determinação do teor de pó do agregado. A norma DNER-ME 266/97 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1997) que descreve este processo, orienta a análise granulométrica por lavagem, em que se considera o percentual de material passante na peneira n. 200 (0,075mm).

De acordo com DNER-ME 035/95 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1995a, p. 6), os tamanhos das peneiras a serem usados na análise granulométrica são mostrados na tabela 2. As peneiras tem designação em polegadas, significando a abertura das malhas, quando a denominação é dada por número, significa que existe aquele número de aberturas por polegada quadrada.

Tabela 2 – Dimensões nominais das peneiras segundo DNER-ME 035

Abertura nominal das malhas		
Principal (mm)	Peneira Nº	Peneira pol.
37,5		1 ½"
25		1"
19		3/4"
9,5		3/8"
4,75	4	
2,36	8	
2	10	
1,18	16	
0,6	30	
0,425	40	
0,3	50	
0,15	100	
0,075	200	

(fonte: adaptado de DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 1995a, p. 6)

3.1.2.4 Forma

A forma das partículas possui grande influência na trabalhabilidade das misturas asfálticas a quente e compactação necessária para obtenção da densidade especificada, assim como na resistência à compressão do revestimento, partículas lamelares tendem a formar planos de ruptura devido à sua acomodação natural no espalhamento e compactação (INSTITUTO DE ASFALTO, 1989, p. 88). A forma das partículas é caracterizada pelo índice de forma, através de equipamento com peneiras específicas para tal definição, sendo classificadas em cúbica, alongada, lamelar e alongada-lamelar.

De acordo com Orchard[2] (1976 apud BALBO, 2007, p. 101):

> [...] a **forma** dos grãos pode ser definida em termos de sua esfericidade e de sua angularidade. Normalmente, é tido como regra que agregados de forma cúbica ou esférica fornecem melhores propriedades aos concretos e misturas asfálticas. O que é certo é que agregados de boa forma melhoram a trabalhabilidade do concreto, principalmente porque sua superfície específica é menor que aquela de um agregado de forma irregular. A esfericidade por ser definida, dentre várias maneiras, como a relação entre o volume de uma esfera que circunscreve o grão e o volume do grão propriamente dito. O extinto DNER[3] ([DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM], 1994) adotava o ensaio designado 'índice de forma' para verificação da esfericidade apresentada pelos agregados. A angulosidade, uma propriedade de difícil mensuração, está associada à presença de cantos vivos nos grãos, geralmente descrita por termos que variam de angulosos a arredondados.

3.1.2.5 Resistência à abrasão

A resistência ao à abrasão ou desgaste é comumente analisada, em função dos diversos esforços de esmagamento e abrasão sofridos pelo agregado, durante a mistura, espalhamento, compactação e operação. Esta propriedade é verificada através do ensaio de abrasão Los Angeles, com procedimento descritos na norma DNER-ME 035-98 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1998a), em que uma amostra de agregado é submetida a diversas revoluções no interior de um cilindro com esferas de aço. O resultado é avaliado pela redução de massa dos agregados retidos na peneira 1,7 mm, em relação à massa inicial da amostra.

---

[2] ORCHARD, D. F. **Concrete technology.** 3rd ed. London: Applied Science Publishers, 1976.

[3] DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 086/94**: agregado: determinação do índice de forma. Rio de Janeiro, 1994.

3.2 DOSAGEM DE MISTURAS

A relação de agregados é um dos parâmetros de maior importância em misturas asfálticas, correspondendo a cerca de 90 a 96% em massa e 75 a 85% em volume. A dosagem de uma mistura asfáltica deve garantir estabilidade, durabilidade, flexibilidade, resistência à fadiga, resistência à derrapagem, impermeabilidade e trabalhabilidade. O Instituto de Asfalto (1989, p. 111) faz as seguintes considerações sobre dosagem de agregados:

> Os procedimentos correntes de dosagem de misturas são considerados empíricos, isto é, baseiam-se em valores de ensaio que se estabelecem com base em observações do desempenho no campo. Visto não existir relação quantitativa entre os valores de ensaios e um determinado nível de desempenho do pavimento, pode-se argumentar que a dosagem de mistura corrente é uma combinação de arte e ciência.

Para determinação dos teores de projeto em misturas betuminosas a quente, o método de procedimentos mais utilizado no Brasil é o Marshall. Posterior à criação desta metodologia, em estudos iniciados nos Estados Unidos, com finalidade de aprimorar e criar um método mais condizente com a realidade do pavimento em operação, segue em desenvolvimento o procedimento de dosagem por amassamento denominado *Strategic Highway Research Program Superpave* (SHRP-*Superpave*) (BERNUCCI et al., 2008, p. 205).

O ensaio do método Marshall para misturas betuminosas a quente tem por objetivo a caracterização de parâmetros volumétricos e propriedades mecânicas das misturas, como densidade, índices de vazios, estabilidade e fluência, a partir de procedimentos padronizados, tratados na Norma DNER-ME 043/95 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1995b). O ensaio consiste na aplicação de uma carga de compressão sobre um corpo de prova (CP) cilíndrico, denominado corpo de prova Marshall, com dimensões aproximadas de 100 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura, à temperatura e taxa de carregamento padrão. Esta força de compressão é crescente até o momento em que ocorre a perda de estabilidade, seja pelo deslocamento ou quebra do agregado. A carga máxima é denominada estabilidade Marshall, expressa em N ou kgf. O deslocamento vertical total do prato é denominado fluência, expressa em milímetros.

Para cada dosagem experimental, o DNER-ME 043/95 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1995b, p. 2) recomenda que sejam moldados três CP por teor de ligante estipulado. A Norma descreve ainda as etapas de moldagem dos CP:

a) secagem dos agregados em estufa (105 a 110ºC), até massa constante, e separação conforme porções determinadas em projeto;

b) efetuar a pesagem dos agregados separadamente conforme frações. A composição de agregados e ligante de cada CP deve ter aproximadamente 1200 gramas, a fim de produzir um CP de 100,0 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura;

c) os agregados devem ser aquecidos à temperatura de 10 a 15ºC acima da temperatura do ligante, não ultrapassando 177ºC;

d) mistura-se os agregados e ligantes rapidamente, de 2 a 3 minutos, homogeneizando-os;

e) coloca-se então a mistura dentro dos moldes, e se procede a compactação;

f) a mistura é acomodada com 15 golpes na periferia e 10 golpes no centro, remove-se o anel superior, efetua-se o alisamento, recoloca-se o anel e aplica-se 50 ou 75 golpes com soquete a uma altura de 43,72 cm;

g) inverte-se o anel e aplica-se novamente os 50 ou 75 golpes, porém no lado inverso do CP;

h) após compactação, o CP deverá ser deixado em superfície lisa, a temperatura ambiente, por aproximadamente 12 horas.

3.3 PARÂMETROS DE ENSAIO

A determinação das propriedades do revestimento asfáltico, em função dos parâmetros volumétricos e mecânicos obtidos em ensaios, é de grande complexidade, conforme elucidam Bernucci et al. (2008, p. 287):

> A caracterização de materiais de pavimentação é uma tarefa complexa em virtude das propriedades desses materiais dependerem de diversos fatores, entre eles: meio ambiente, magnitude, tempo de aplicação e frequência de carga dos veículos, e estado de tensões. No caso das misturas asfálticas, o envelhecimento gradativo devido à oxidação do ligante aumenta a complexidade, já que é difícil a simulação desse fenômeno em laboratório para devida caracterização deste material. Diante disso, a caracterização das misturas requer um balanço apropriado entre rigor e praticidade, uma vez que nem todas as variáveis podem ser consideradas simultaneamente, pelo menos não no estágio atual de conhecimento. Privilegiam-se então os aspectos considerados de maior relevância para previsão do comportamento das misturas asfálticas em campo.

Os teores de projetos de misturas asfálticas são definidos a partir de parâmetros volumétricos, em que são determinados volumes de ligante asfáltico e agregado, a fim de produzir uma mistura com as propriedades projetadas. Entretanto, com intuito de simplificar os procedimentos, são utilizadas massas, sendo convertidas em volumes através das massas especificas (BERNUCCI et al., 2008, p. 216). Os autores ressaltam ainda a importância da

determinação de parâmetros mecanísticos, garantindo determinados níveis de resistência à tração (RT), módulo de resiliência (MR), estabilidade e fluência, de modo que os conjuntos de tensões nas camadas que compõem a estrutura do pavimento não venham a diminuir sua vida útil, conforme são abordados nos próximos itens.

3.3.1 Propriedades volumétricas

Juntamente com os procedimentos padronizados de dosagem de misturas asfálticas, são obtidas alternativas para determinação do teor de projeto do ligante. Entretanto, a definição deste teor de projeto é principalmente realizada pelo valor correspondente ao Vv de 4%. Posterior a isso, as misturas são analisadas, entre outros, quanto à RBV, Estabilidade, Fluência e percentual de Vazios do Agregado Mineral (VAM). De forma que atenda economicamente a todos os critérios, e não sendo otimizada apenas uma propriedade em específico, garantindo boas condições de operação e durabilidade do pavimento (INSTITUTO DE ASFALTO, 1989, p. 143-144).

Tais parâmetros visam limitar um valor mínimo de Vv que permita um pequeno aumento da densificação da camada por ação do tráfego, e corresponda a um volume mínimo de vazios que permita a expansão térmica dos agregados e ligante asfáltico, de modo a evitar a exsudação do ligante para a superfície. O valor máximo de Vv é fixado para garantir uma densidade suficiente, em conjunto com as outras propriedades requeridas tais como: estabilidade e resistência à tração (CERATTI; REIS, 2011, p. 72).

Ceratti e Reis (2011, p. 72) ressaltam ainda que a correlação entre RBV e Vv deve atender a certos limites para não produzir camadas betuminosas instáveis por excesso ou falta de ligante. No Brasil, os valores limites máximos e mínimos para Vv e RBV dependem do tipo de mistura asfáltica que está sendo empregada e da pressão dos pneus dos veículos que solicitarão a camada asfáltica, conforme especificação do órgão atuante. Os limites de Vv e RBV segundo parâmetros do DNIT são descritos na tabela 3.

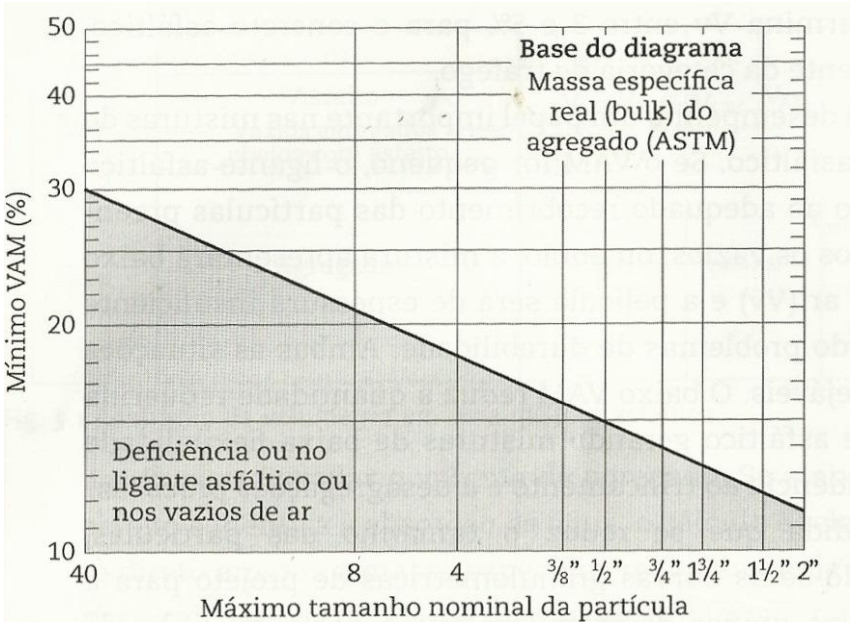
Tabela 3 – Critérios limites para volume de vazios (Vv) e relação betume vazios (RBV)

Tipo de Mistura	Vv (%)	RBV (%)
Camada de Rolamento	3 – 5	75 - 82
Camada de ligação	4 – 6	65 - 72

(fonte: adaptado de DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006a, p. 5)

Em relação ao VAM, se for pequeno, a mistura apresentará baixo Vv e a espessura da película será insuficiente, acarretando problemas de durabilidade. O baixo VAM reduz a quantidade de ligante gerando misturas de baixa flexibilidade com tendências ao trincamento precoce. Curvas granulométricas com agregados menores, mais para a esquerda do gráfico de distribuição, aumentam o valor de VAM, exigindo maior volume de ligante, pois a área superficial dos agregados é maior. Os valores adequados de VAM podem ser estimados a partir do gráfico da figura 10 (CERATTI; REIS, 2011, p. 73).

Figura 10 – Gráfico de valores limites para VAM



(fonte: CERATTI; REIS, 2011, p. 74)

Ceratti e Reis (2011, p. 79-83) descrevem os procedimentos necessários para determinação dos parâmetros gerados em uma dosagem Marshall para concreto asfáltico:

a) determinação das massas específicas de CAP e frações de agregados;

b) determinação da faixa granulométrica adotada;

c) determinação da composição de agregados a fim de atender às especificações da faixa granulométrica. Considerando percentuais em massa preterindo o teor de asfalto;

d) determinação das temperaturas de mistura e compactação, a partir da curva viscosidade-temperatura do CAP;

e) determinação de teores de asfalto para os diferentes grupos de corpos de prova, de modo que os teores variem de ±0,5 a ±1% do teor de asfalto definido;

f) desmoldagem dos CP e determinação da massa seca (MS) e massa submersa (MSsub). Com estes parâmetros determina-se massa específica aparente dos corpos de prova (Gmb), que, quando comparadas com a massa específica máxima teórica (DMT) obtêm-se as relações volumétricas da dosagem;

g) ajuste dos percentuais de agregado com o percentual de asfalto, em que %n = %n* x (100%-%a);

h) com base nos percentuais de agregados e asfalto calcula-se a DMT correspondente ao teor de asfalto considerado;

i) após as medidas volumétricas, os CP são submersos em água a 60ºC por 30 a 40 minutos. São retirados e colocados imediatamente nos moldes e compressão e prensa Marshall conforme ilustrado nas figuras 11 e 12.

Os cálculos para determinação dos parâmetros de dosagem são obtidos através das seguintes fórmulas:

$$V = MS - MSsub \qquad \text{(fórmula 1)}$$

$$Gmb = MS/V \qquad \text{(fórmula 2)}$$

$$Vv = (DMT - Gmb)/DMT$$ (fórmula 3)

$$VCB = (Gmb.\%a)/Ga$$ (fórmula 4)

$$VAM = Vv + VCB$$ (fórmula 5)

$$RBV = VCB/VAM$$ (fórmula 6)

Onde:

V = volume dos corpos de prova (cm^3);

MS = massa seca (g);

MSsub = massa submersa em água (g);

Gmb = massa específica aparente (g/cm^3);

Vv = volume de vazios (%);

DMT = massa específica máxima teórica (g/cm^3);

VCB = vazios com betume (%);

%a = teor de asfalto (%);

Ga = massa específica do ligante (g/cm^3);

VAM: vazios do agregado mineral (%);

RBV: relação betume/vazios (%).

Figura 11 – Molde de compressão – ensaio Marshall

(fonte: BERNUCCI et al., 2008, p. 223)

Figura 12 – Prensa Marshall

(fonte: BERNUCCI et al., 2008, p. 223)

A densidade máxima teórica (DMT) é dada pela ponderação entre as massas dos constituintes da mistura asfáltica, representado pela fórmula 7. A densidade máxima medida (DMM) ou densidade específica Rice, é dada pela razão entre a massa do agregado mais ligante e a soma dos volumes dos agregados, vazios impermeáveis, vazios permeáveis não preenchidos e total de asfalto, com procedimentos descritos na norma NBR 15619 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012). A utilização da DMM assegura uma melhor representatividade da massa específica máxima se comparada com a DMT, pois a absorção do ligante asfáltico nos poros permeáveis do agregado é parcial, não havendo o preenchimento total do volume dos poros permeáveis, parâmetro considerado pela DMT (CERATTI; REIS, 2011, p. 66-69).

$$DMT = \frac{100}{\frac{\%a}{Ga} + \frac{\%Ag}{Gag} + \frac{\%Am}{Gam}} \qquad \text{(fórmula 7)}$$

3.3.2 Propriedades mecânicas

A caracterização mecânica das misturas asfálticas é avaliada, para evitar os principais tipos de defeitos, como trincamento por fadiga, deformação permanente e trincamento térmico. Para

tanto, são estabelecidos limites de resistências dos materiais através de ensaios convencionais como estabilidade e fluência Marshall, ensaio de módulo de resiliência e ensaio de resistência à tração (BERNUCCI et al., 2008, p. 288), conforme abordados nos próximos itens.

3.3.2.1 Estabilidade e fluência Marshall

A baixa estabilidade de misturas asfálticas é um dos fatores relacionados às causas prováveis de defeitos em pavimentos flexíveis. Entre elas, Pinto e Preussler (2002, p. 56-68) relacionam o afundamento na trilha de roda, corrugação e trincamento parabólico.

A norma DNER 043/95 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1995b, p. 5) define a estabilidade Marshall como a resistência máxima à compressão radial apresentada pelo corpo de prova Marshall. Simultaneamente à estabilidade, é determinada a fluência, cujo DNER define como a deformação total apresentada desde a aplicação da carga inicial até a carga máxima.

A carga lida no aparelho deverá ser corrigida por um fator que é função da espessura do CP ensaiado, através da fórmula 8 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1995b, p. 6), obtendo-se a estabilidade Marshall pela multiplicação da carga lida pelo fator de correção:

(fórmula 8)

$$F = 927{,}23.h^{-1{,}64}$$

Onde:
F = fator;
h = espessura do corpo de prova (mm).

3.3.2.2 Módulo de resiliência

Bernucci et al. (2008, p. 291) referenciam Francis Hveem, como o responsável por adotar o termo **resiliência** em 1930, definindo como a “Energia armazenada num corpo deformado

elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações.”. O módulo de resiliência é definido então, como a relação entre a tensão de tração e a deformação específica recuperável, correspondente à tensão aplicada em uma determinada temperatura.

O ensaio do módulo de resiliência (MR) em misturas asfálticas tem procedimentos normatizados pela DNER-ME 133/94 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994b), no qual se aplica uma carga repetidamente no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico, com as dimensões definidas nos corpos de prova moldados pelo método Marshall. O ensaio consiste basicamente nas seguintes etapas:

a) posicionamento do corpo de prova no equipamento, colocando-o na base da estrutura de suporte entre dois cabeçotes curvos;
b) fixar e ajustar os transdutores, que consistem em transformar deformações durante o carregamento em pulsos elétricos;
c) ajustar o oscilógrafo para registro dos deslocamentos;
d) aplicar 50 vezes uma carga (F) a fim de condicionamento do corpo de prova;
e) após o procedimento anterior registra-se no oscilógrafo a deformações resilientes médias para 50-55, 60-65 e 70-75 aplicações de carga (F);
f) com os valores obtidos, calcula-se o módulo de resiliência pela fórmula 9.

Assim, o módulo de resiliência é dado por:

$$MR = \frac{F}{\Delta H}(0{,}9976\mu + 0{,}2692) \qquad \text{(fórmula 9)}$$

Onde:

MR = módulo de resiliência (kgf/cm²);

F = carga vertical repetida (kgf);

Δ = deformação elástica registrada no oscilógrafo (cm);

H = altura do corpo de prova (cm);

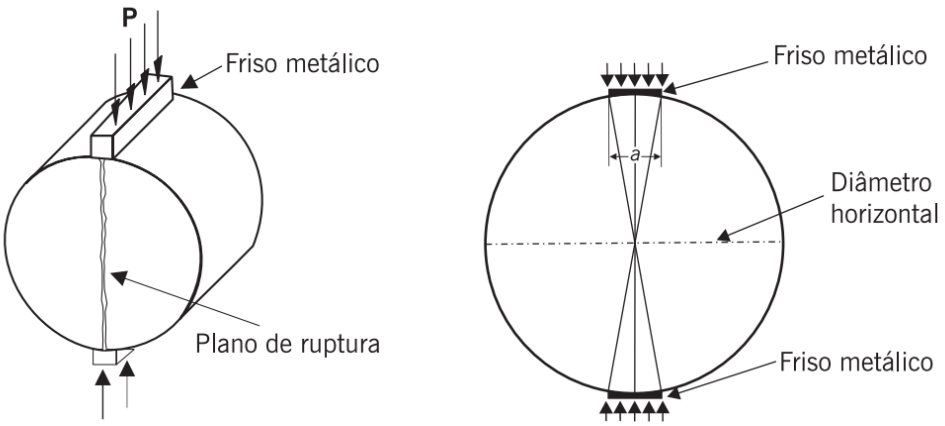
μ = coeficiente de Poisson (valor recomendado de 0,30).

O módulo de resiliência de misturas asfálticas a quente varia com: o tipo de mistura (CA, SMA, CPA, etc.), a faixa granulométrica, o tipo de ligante asfáltico, as propriedades volumétricas de ensaio, entre outras variáveis. Os valores obtidos para módulo de resiliência podem variar de 2.000 a 8.000 MPa para concretos asfálticos a 25ºC. Analisando os dados obtidos, quanto mais próximos forem os módulos de resiliência total e instantâneo, mais rápida é a recuperação elástica do material quando submetido à ação de cargas (BERNUCCI et al., 2008, p. 301).

3.3.2.3 Resistência à tração

A resistência à tração (RT), também denominado ensaio de resistência à compressão diametral, é um importante parâmetro para caracterização de materiais, sendo beneficiado em função da facilidade e rapidez de execução (BERNUCCI et al., 2008, p. 308). No ensaio de resistência à compressão diametral em misturas asfálticas, a aplicação das forças se dá através de frisos metálicos com curvatura adequada ao corpo de prova, conforme ilustra a figura 13.

Figura 13 – Esquema do ensaio de compressão diametral (RT)



(fonte: DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994c, p. 3)

Definido através da DNER-ME 138/94 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994c), pela resistência à tração por compressão diametral, com valor mínimo de 0,65 MPa, este ensaio resume-se basicamente nas seguintes etapas:

a) verificação das dimensões do corpo de prova, podendo ser adotado o mesmo CP do método Marshall;

b) posiciona-se o CP no dispositivo centralizador e coloca-se na prensa;

c) aplica-se a carga progressivamente, com velocidade de deslocamento 0,8 e tolerância de 0,1 mm/s, até que se dê a ruptura por separação das duas metades do CP;

d) com o valor da carga de ruptura (P), a RT é calculada pela fórmula 10.

Desta forma, a resistência à tração é dada por:

(fórmula 10)

$$RT = \frac{P}{\pi R}$$

Onde:

RT = resistência à tração (kgf/cm²);

P = carga de ruptura (kgf);

R = raio do cilindro (cm).

Com a determinação da RT, caracteriza-se um importante parâmetro de análise, a relação MR/RT, ressaltada a sua importância por Balbo (2007, p. 233), que indica que quanto mais rígido se apresenta um material, maior sua resistência à esforços, induzindo maiores tensões de tração no material. Assim, não há ganho proporcional direto em aumentar apenas o módulo de elasticidade sem o incremento de sua resistência, pois seria necessário aumentar a espessura de camada.

3.3.3 Dano por umidade induzida

O dano por umidade induzida é determinado segundo orientações da norma NBR 15617 (ASOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011), tem a finalidade de avaliar o descolamento da película de ligante que envolve o agregado. Para realização deste são moldados seis corpos de prova da mistura a ser avaliada, sendo que três destes corpos de

prova são submetidos à elevada severidade de condicionamento, passando de 8 à 60ºC por períodos determinados na Norma. Após condicionamento, é efetuado ensaio de resistência à tração por compressão diametral com os seis corpos de prova. A relação RRT, entre a resistência à tração dos corpos de prova submetidos à elevada severidade RT', pela resistência à tração RT dos corpos de prova não condicionados deve ser maior que 0,7.

4 MATERIAIS, MÉTODOS E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados o método experimental, materiais utilizados, ensaios de caracterização realizados e resultados obtidos, assim como definido o teor de projeto. Para isso são indicadas as normas correspondentes e procedimentos específicos para determinação das propriedades, demais detalhamentos estão presentes nas referidas normas e capítulo destinado à revisão bibliográfica neste trabalho.

4.1 PROJETO EXPERIMENTAL

O projeto experimental da pesquisa consistiu na avaliação mecânica e volumétrica de um concreto asfáltico, enquadrado na Faixa I do Caderno de Encargos da Secretaria Municipal de Obras e Viação de Porto Alegre, com agregado pétreo de granito e CAP 50-70 fornecidos por uma empresa de pavimentação desta capital. O presente estudo é de âmbito regional, pois o agregado e os demais produtos empregados na mistura são de ampla utilização em Porto Alegre e na região Metropolitana. Com base nisso, foram realizados diversos ensaios e análises para determinação das propriedades dos agregados, do ligante asfáltico e da mistura, de modo que atendessem aos requisitos exigidos pelo município. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Pavimentação (Lapav) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e no laboratório da SOLOTEC Sondagens e Ensaios Geotécnicos, ambos localizados em Porto Alegre.

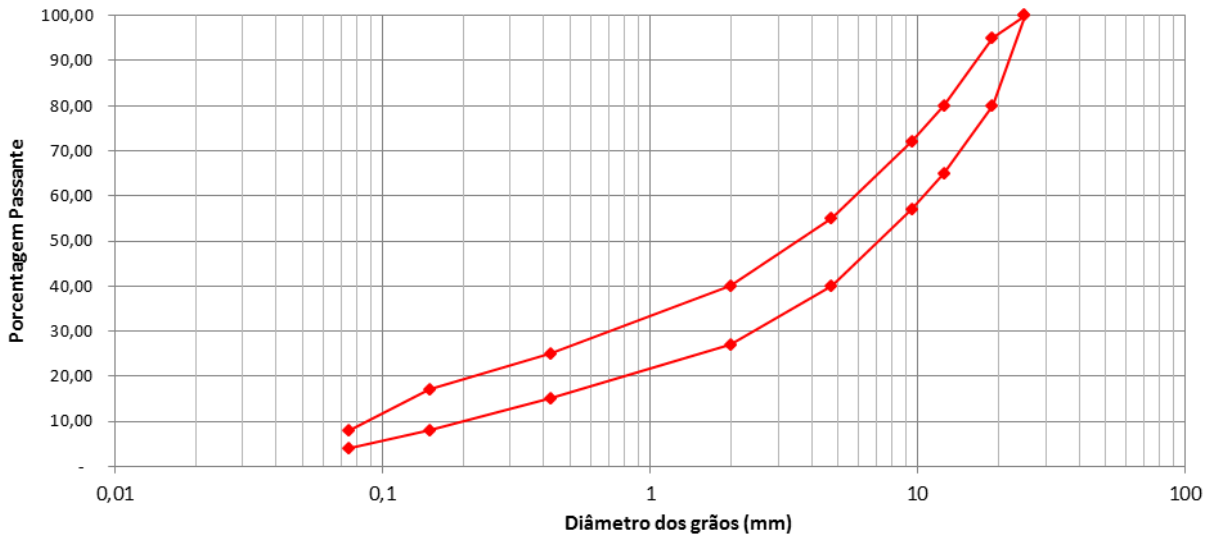
Segundo parâmetros da Secretaria Municipal de Obras e Viação (SMOV) de Porto Alegre, a empregabilidade da granulometria da Faixa I corresponde às camadas de ligação do revestimento, usualmente chamadas de *Binder*, tratando-se de uma distribuição com maior presença de agregado graúdo do que as demais faixas do mesmo órgão (PORTO ALEGRE, 1996, p. 83). Os limites inferior e superior da Faixa I estão discriminados na tabela 4, e, representados graficamente na figura 14.

Tabela 4 – Limites da faixa de trabalho da Faixa I de Porto Alegre

Peneiras		Passante (%)		
nº	mm	Limite Inferior	Limite Superior	Tolerância
1”	25,0	100,0	100,0	± 7
3/4"	19,0	80,0	95,0	± 7
1/2"	12,5	65,0	80,0	± 7
3/8"	9,50	57,0	72,0	± 7
4	4,75	40,0	55,0	± 5
10	2,00	27,0	40,0	± 5
40	0,425	15,0	25,0	± 5
100	0,150	8,0	17,0	± 3
200	0,075	4,0	8,0	± 2

(fonte: adaptado de PORTO ALEGRE, 1996, p. 83)

Figura 14 - Faixa I de distribuição granulométrica de Porto Alegre



(fonte: elaborado pelo autor)

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Nos itens seguintes são apresentados os materiais utilizados para compor a mistura asfáltica de estudo, assim como os métodos de ensaios aplicados para caracterizá-la. Para isso os materiais foram separados em agregados e ligante asfáltico. Com exceção da distribuição granulométrica que foi efetuada no laboratório da SOLOTEC Sondagens e Ensaios Geotécnicos, os demais ensaios foram realizados no Lapav.

4.2.1 Agregados

A obtenção do agregado de estudo se dá através de processo de britagem do granito, em que após o desmonte da rocha, os fragmentos são passados por uma sequência de britadores e peneiras, para redução e separação, e empilhados em montes próximos à mina. Para utilização na usina de asfalto da empresa de pavimentação, os agregados são transportados com pás carregadeiras, separadamente segundo sua fração de peneiramento, e depositados em baias de estocagem próximas à usina de asfalto, ficando expostos às ações do clima. Posteriormente são carregados até os silos da usina, figura 15, estes sim protegidos com lonas.

Figura 15 – Silos de agregados da usina de asfalto

(fonte: foto do autor)

Para o presente estudo, a coleta foi feita diretamente nas correrias dosadoras dos silos da usina de asfalto, em fevereiro de 2012, com exceção da brita de 1”, que, em função da não utilização em dosagens asfálticas no período, foi retirada diretamente dos montes de estocagem próximo à mina. Para os demais agregados, em uma única ocasião foi recolhido o

material equivalente a faixa de 1 metro das correias de frações 3/4", 3/8”, pó de pedra e areia, procedendo-se o total recolhimento e limpeza da esteira, inclusive do material fino depositado no fundo. Após a coleta, as amostras foram reduzidas e fracionadas com separador mecânico, conforme DNER 199/96 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1996), para realização dos ensaios laboratoriais de caracterização do agregado.

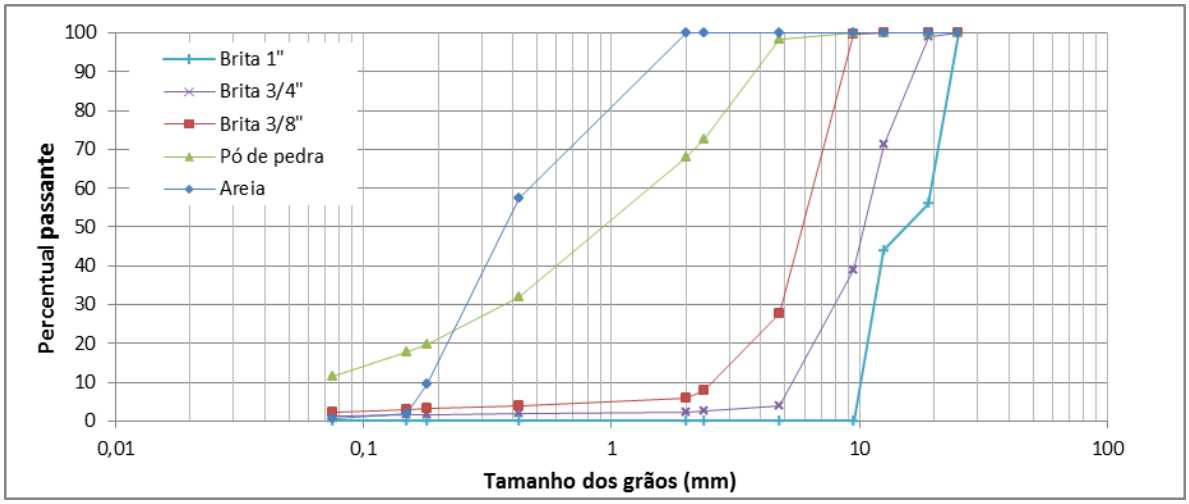
A distribuição granulométrica foi realizada por peneiramento manual, conforme norma DNER 083/98. Devido à presença de material pulverulento, a granulometria iniciou pela lavagem dos agregados na peneira 0,075mm. A distribuição granulométrica dos materiais ensaiados está descrita na tabela 5 e ilustrada graficamente na figura 16.

Tabela 5 – Distribuição granulométrica dos agregados de estudo

Peneiras		Passante (%)				
nº	mm	Brita 1"	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de pedra	Areia
1”	25,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,0	56,0	98,9	100,0	100,0	100,0
1/2"	12,5	44,0	71,2	100,0	100,0	100,0
3/8"	9,50	7,0	38,9	99,6	100,0	100,0
4	4,75	1,9	4,0	27,6	98,4	100,0
10	2,00	1,4	2,4	6,1	67,8	100,0
40	0,425	0,8	1,9	3,9	31,9	57,3
100	0,150	0,0	1,5	3,0	17,8	2,1
200	0,075	0,0	1,1	2,2	11,5	0,5

(fonte: elaborado pelo autor)

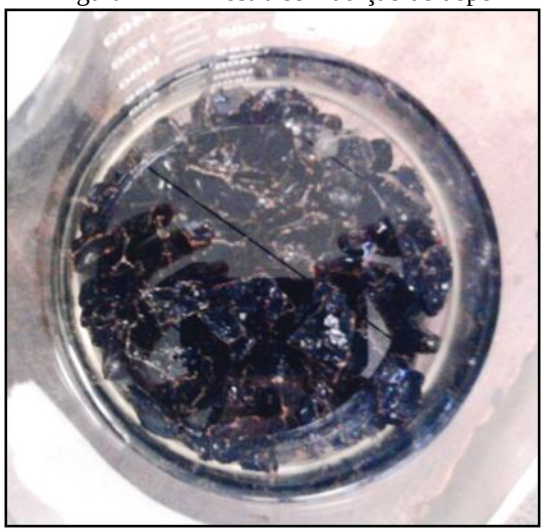
Figura 16 – Distribuição granulométrica dos agregados de estudo



(fonte: elaborado pelo autor)

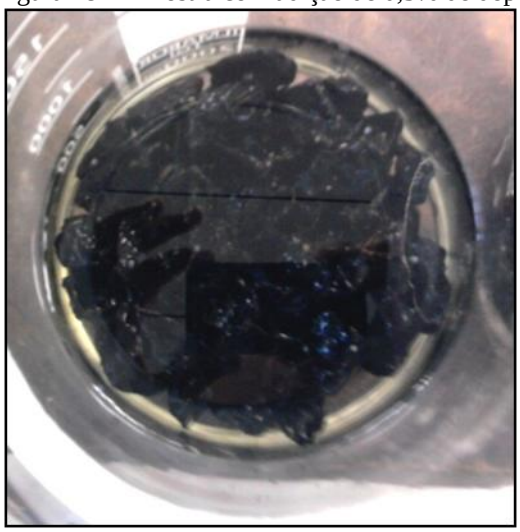
Posterior à separação do material, foi verificada a adesividade do agregado graúdo ao ligante asfáltico, segundo norma DNER 078/94 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM, 1994a). Foram elaboradas quatro amostras, sendo a primeira apenas de agregado e ligante, e as demais de agregado, ligante e **dope**, com percentuais de 0,1%, 0,2% e 0,3% em relação à massa de ligante. O ensaio resultou em adesividade satisfatória apenas com adição de 0,3% de dope, em que não houve descolamento da película de ligante, conforme se observa nas figuras 17 e 18.

Figura 17 – Amostra sem adição de dope



(fonte: foto do autor)

Figura 18 – Amostra com adição de 0,3% de dope



(fonte: foto do autor)

Foram realizados ainda ensaios de abrasão, índice de forma e densidade do agregado graúdo e agregado miúdo. Os resultados obtidos nos ensaios estão discriminados resumidamente na tabela 6, assim como as especificações e indicações de norma.

Tabela 6 – Caracterização dos agregados de estudo

Características	Norma	Especificação	Resultados
Adesividade	DNER 078/1994	Boa	0,3% dope
Perda por abrasão (%)	DNER 035/1998	<50	33,58
Índice de Forma (%)	DNER 086/1994	>50	62,0
Densidade agregado graúdo (g/cm³)	DNER 081/1998	NE	2,57
Absorção (%)	DNER 084/1995	NE	0,961
Densidade agregado miúdo (g/cm³)		NE	2,67

(fonte: elaborado pelo autor)

4.2.2 Ligante asfáltico

O ligante asfáltico utilizado neste estudo foi retirado diretamente do tanque de CAP da usina de asfalto da empresa de pavimentação de Porto Alegre, em uma única ocasião em fevereiro de 2012. A empresa distribuidora do ligante asfáltico comercializa o mesmo como CAP50-70. Para caracterizá-lo em laboratório foram realizados ensaios de penetração, ponto de amolecimento, densidade e viscosidade rotacional.

A viscosidade do ligante foi verificada a partir do viscosímetro rotacional, ou viscosímetro de Brookfield, com procedimentos descritos na norma NBR 15184 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004). Este ensaio é de fundamental importância, pois define temperaturas necessárias para o bombeamento do cimento asfáltico, produção da mistura, aplicação e compactação do CA, conforme ilustra a figura 19, em que se observam as

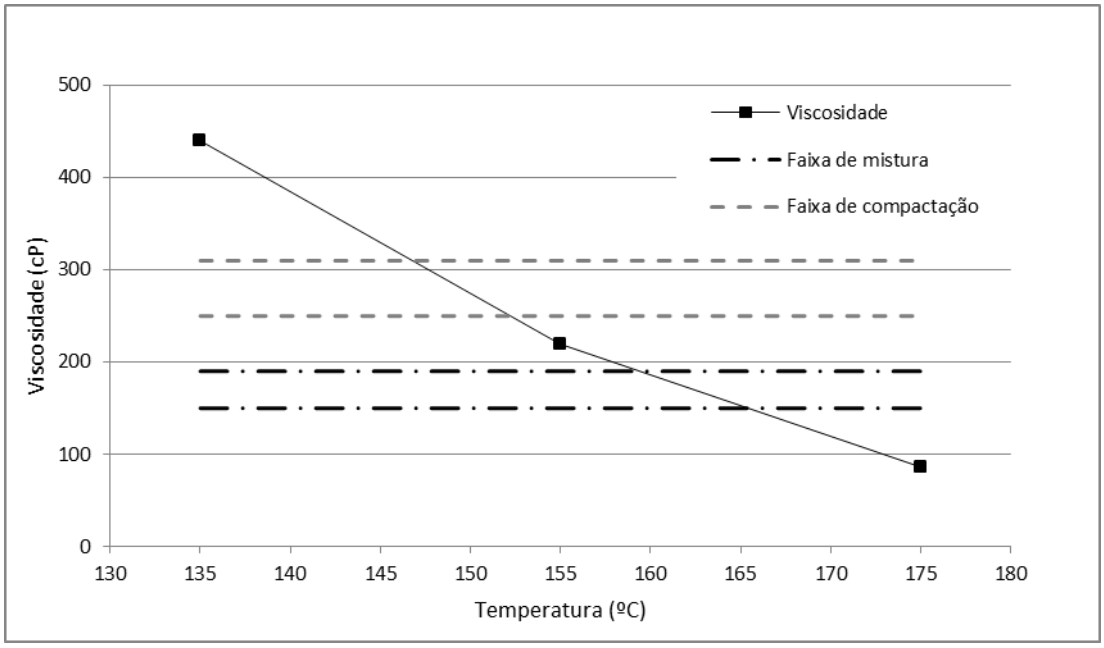
temperaturas correspondentes às faixas de compactação e de mistura. Os dados obtidos com o ensaio estão expressos na tabela 7.

Tabela 7 – Ensaio de viscosidade Brookfield

Unidade	Temperaturas (°C)					
	135ºC	155ºC	175ºC	195ºC	Mistura	Compactação
Viscosidade (cP)	440	220	86	50		
Torque (%)	17.6	22.0	17.2	10.0	159 - 167	146 - 153
Frequência (rpm)	20	50	100	100		

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 19 – Curva Temperatura x Viscosidade



(fonte: elaborado pelo autor)

Em resumo aos ensaios de caracterização do ligante, a tabela 8 descreve os resultados obtidos no laboratório, em comparação às especificações fornecidas pelo distribuidor.

Tabela 8 – Caracterização do ligante asfáltico

Características	Norma	Especificação	Resultados
Penetração (Dmm)	DNIT 155/2012	50 - 70	47
Ponto de Amolecimento, mín. (ºC)	DNIT 131/2010	46	48
Viscosidade Brookfield (cP)	NBR 15184	-	-
135ºC, min. SP 21, 20 rpm, mín.	-	274	440
150ºC, SP 21 mín.	-	112	280
177ºC, SP 21	-	57 – 285	80
Densidade (g/cm³)	NBR 6296/2004	NE	1,01

(fonte: elaborado pelo autor)

4.3 DOSAGEM DO CONCRETO ASFÁLTICO E DEFINIÇÃO DO TEOR DE PROJETO

Nos itens seguintes são descritos os procedimentos realizados para dosagem do CA de estudo e definição do teor de projeto a partir dos resultados obtidos. Para tal análise, foi verificada volumetria e ensaios de estabilidade, fluência, resistência à tração e módulo de resiliência. Em complemento à análise da relação agregado, ligante e melhorador de adesividade, foi verificado o dano por umidade induzida com uma mistura composta pela granulometria de projeto e teor de ligante de 4,5%.

4.3.1 Dosagem Marshall

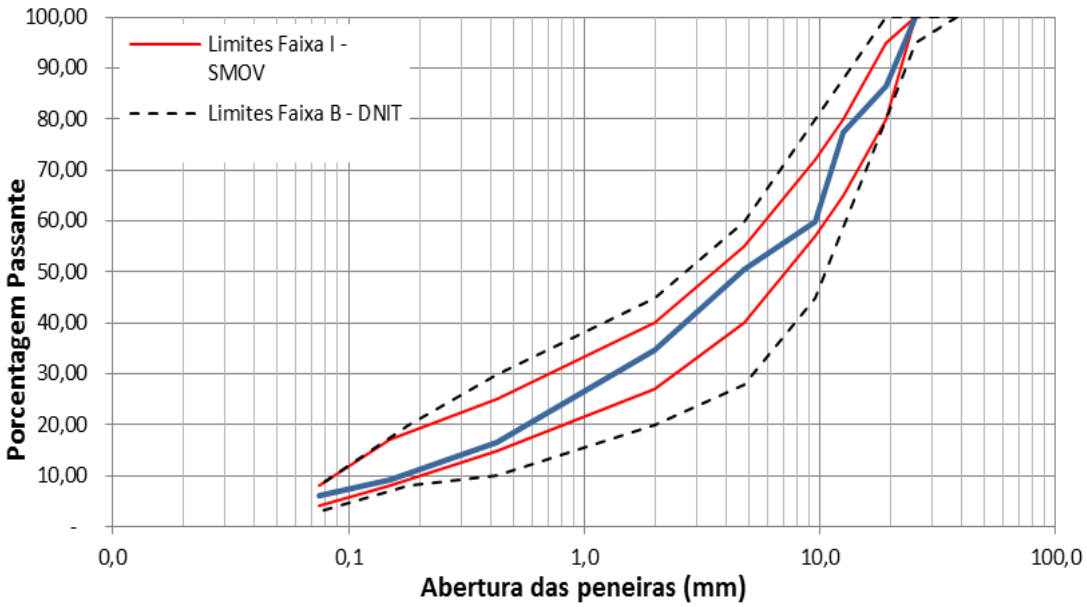
A moldagem dos corpos de prova foi efetuada pelo método Marshall, segundo norma DNER 043/95. Após a caracterização dos agregados e do ligante, a faixa granulométrica de estudo foi definida, conforme percentuais indicados na tabela 9. A figura 20 representa a distribuição granulométrica de estudo inserida na Faixa I da SMOV. A fim de obter maior abrangência de aplicação da mistura estudada, foi enquadrada também na Faixa B do DNIT, que se destina tanto às camadas de ligação como de rolamento do pavimento.

Tabela 9 – Distribuição granulométrica de projeto

Peneiras		Passante (%)			
		30%	20%	50%	100%
nº	Mm	Brita 1"	Brita 3/4"	Pó de pedra	Projeto
1”	25,0	100,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,0	56,0	98,9	100,0	86,58
1/2"	12,5	44,0	71,2	100,0	77,44
3/8"	9,50	7,0	38,9	100,0	59,88
4	4,75	1,9	4,0	98,4	50,57
10	2,00	1,4	2,4	67,8	34,82
40	0,425	0,8	1,9	31,9	16,55
100	0,150	0,0	1,5	17,8	9,23
200	0,075	0,0	1,1	11,5	5,97

(fonte: elaborado pelo autor)

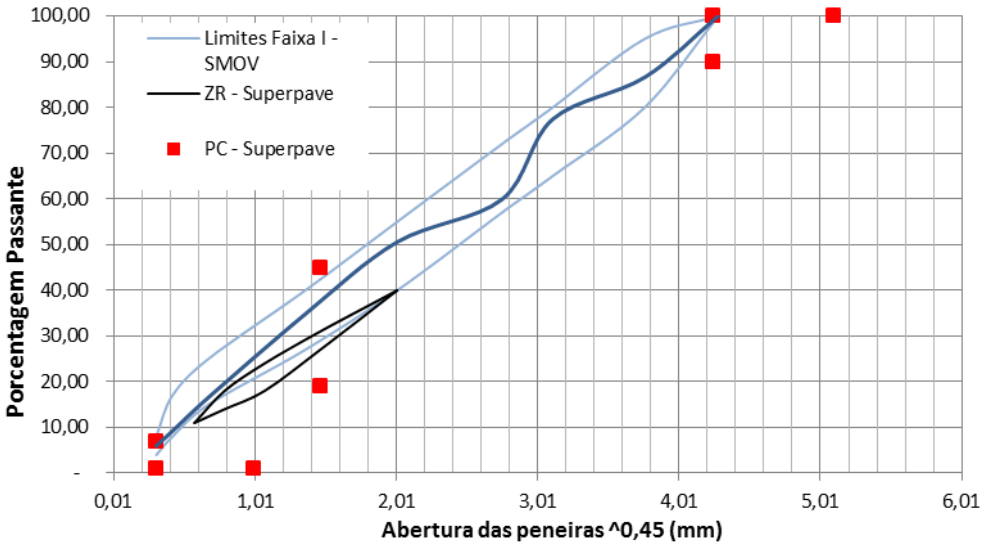
Figura 20 – Distribuição granulométrica de projeto



(fonte: elaborado pelo autor)

Em complemento à análise deste trabalho, a composição foi apenas verificada segundo parâmetro de distribuição do método *Superpave*, para agregado máximo de 25mm, conforme figura 21, demais procedimentos e ensaios específicos do método não foram realizados. Para que a graduação de estudo atendesse ao critério do método, a curva granulométrica passou entre os pontos de controle e fora da zona de restrição.

Figura 21 – Distribuição granulométrica de projeto x Superpave



(fonte: elaborado pelo autor)

Para o projeto, foram utilizados apenas os agregados classificados como brita 1”, brita 3/4” e pó de pedra. A partir da granulometria inicial, os percentuais de agregado foram ajustados em relação ao teor de ligante para moldagem dos CP, variando de 4,0 a 6,0%, conforme tabela 10. Com os percentuais da mistura definidos, e, definidas as temperaturas de mistura e compactação, obtidas no item 4.2.2, procedeu-se a separação e dosagem dos materiais. Para os ensaios de caracterização volumétrica, estabilidade e fluência, foram moldados 3 CP, cada um com massa aproximada de 1200g, para cada teor de ligante asfáltico, figura 22. Depois de efetuada a mistura, iniciou-se a compactação dos CP, considerando especificação de tráfego pesado, ou seja, com 75 golpes na base e no topo de cada CP.

Tabela 10 – Ajuste do percentual da mistura

Teor de ligante (%)	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
3/4"	12,88	12,82	12,75	12,68	12,62
1/2"	8,78	8,73	8,68	8,64	8,59
3/8”	16,86	16,77	16,68	16,59	16,50
n.4	8,94	8,89	8,84	8,79	8,75
n.10	15,12	15,04	14,97	14,89	14,81
n.40	17,54	17,44	17,35	17,26	17,17
n.100	7,03	7,00	6,97	6,93	6,89
n.200	3,12	3,11	3,09	3,08	3,06
Fundo	5,73	5,70	5,6	5,64	5,61
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 22 – Separação e dosagem da mistura asfáltica

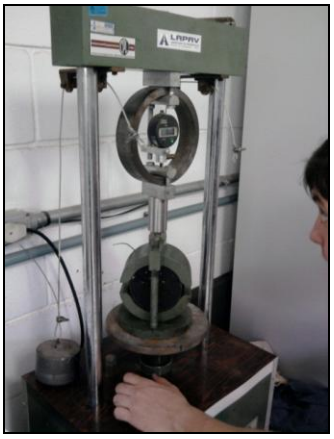
(fonte: foto do autor)

O procedimento de ensaio da estabilidade e fluência seguiu as recomendações do método Marshall, cuja especificação refere-se às misturas com agregado de tamanho máximo de 25,4mm. Após a moldagem, compactação e resfriamento, os CP foram pesados e medidos, e foram imersos em água com temperatura de 60ºC pelo período de 30 minutos, sendo retirados e colocados imediatamente nos moldes de compressão para realização dos ensaios de estabilidade e fluência (figuras 23 e 24).

Figura 23 – CP imersos à 60ºC

(fonte: foto do autor)

Figura 24 – Ensaio de Estabilidade e Fluência



(fonte: foto do autor)

A estabilidade foi obtida para cada CP, e corrigida pelo fator correspondente à altura do mesmo, através da fórmula 8. A fluência foi obtida simultaneamente à estabilidade, com auxilio do defletrômetro. A tabela 11 apresenta os resultados obtidos através dos ensaios realizados com as misturas projetadas, em função do teor de ligante asfáltico. A tabela 12 apresenta a planilha de cálculos de cada CP e os valores médios calculados. A partir dos dados obtidos foram plotados os gráficos da figura 25.

Tabela 11 – Resultados de ensaio

Teor de ligante	Unidade	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
DMM – Rice	g/cm³	2,47	2,44	2,41	2,39	2,39
Densidade Aparente	g/cm³	2,35	2,36	2,38	2,37	2,37
Volume de vazios	%	4,65	3,35	1,4	0,75	0,82
Vazios do agregado mineral	%	13,95	13,84	13,17	13,64	14,86
Relação Betume Vazios	%	66,73	75,83	89,36	94,51	94,54
Estabilidade	kgf	606	746	684	553	540
Fluência (0,01”)	pol	12,56	10,34	13,44	13,56	12,86

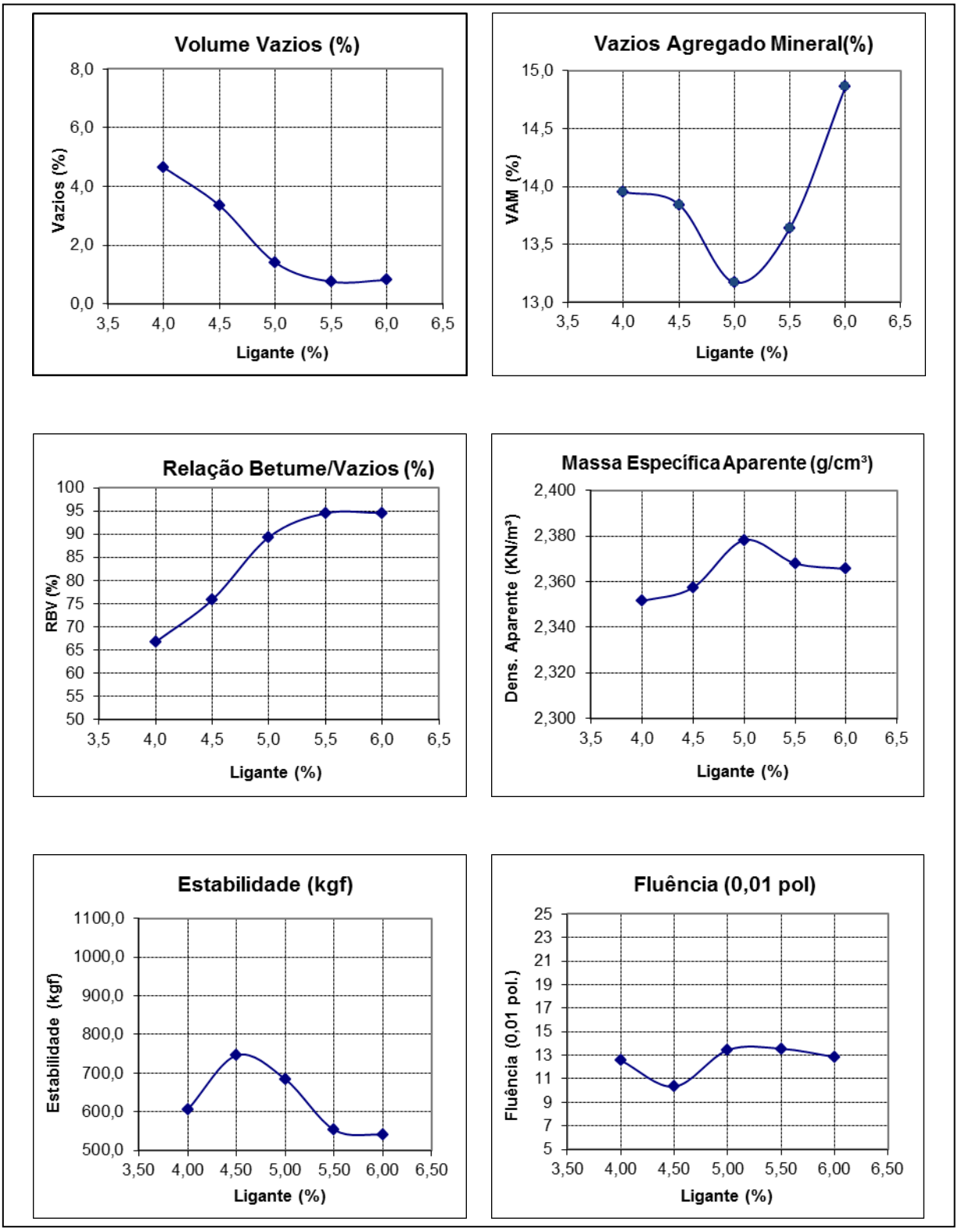
(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 12 – Planilha de cálculo

Geometria				Pesos			Densidades			Vazios				
% CAP	Nº CP	h (cm)	d(cm)	no ar	na água	Sup. Seca	volume	D apar.	DMM	ar	VAM	RBV	Fluência	Est.
4,0	1	6,53	10,20	1224,79	705,72	1226,21	519,1	2,346		4,9	14,1	65,7		
4,0	2	6,62	10,20	1262,64	729,95	1263,13	532,7	2,361		4,3	13,6	68,7	12,56	718
4,0	3	6,34	10,20	1201,58	691,20	1201,69	510,4	2,347		4,8	14,1	65,8		
média		***6,50***	***10,20***	***1229,67***	***708,96***	***1230,34***	***520,71***	***2,35***	***2,47***	***4,65***	***13,95***	***66,73***	***12,56***	***605,52***
4,5	4	6,19	10,20	1182,81	682,60	1183,41	500,2	2,355		3,4	13,9	75,2		
4,5	5	6,57	10,20	1235,74	714,41	1237,31	521,3	2,356		3,4	13,9	75,6	9,40	814
4,5	6	6,40	10,20	1218,16	705,39	1219,84	512,8	2,361		3,2	13,7	76,7	11,28	678
média		***6,39***	***10,20***	***1212,24***	***700,80***	***1213,52***	***511,44***	***2,36***	***2,44***	***3,35***	***13,84***	***75,83***	***10,34***	***745,95***
5,0	7	6,04	10,20	1165,28	676,45	1165,50	488,8	2,376		1,5	13,3	88,7		
5,0	8	6,48	10,20	1263,61	736,04	1264,34	527,6	2,385		1,1	12,9	91,3	13,84	743
5,0	9	6,35	10,20	1220,30	707,97	1220,52	512,3	2,374		1,6	13,3	88,1	13,04	625
média		***6,29***	***10,20***	***1216,40***	***706,82***	***1216,79***	***509,58***	***2,38***	***2,41***	***1,40***	***13,17***	***89,36***	***13,44***	***684,30***
5,5	10	6,36	10,20	1213,60	701,03	1213,85	512,6	2,360		1,1	13,9	92,1		
5,5	11	6,46	10,20	1226,55	710,58	1226,93	516,0	2,368		0,7	13,6	94,6	14,84	468
5,5	12	6,33	10,20	1217,36	706,71	1217,56	510,7	2,376		0,4	13,4	96,9	12,28	639
média		***6,38***	***10,20***	***1219,17***	***706,11***	***1219,45***	***513,06***	***2,37***	***2,39***	***0,75***	***13,64***	***94,51***	***13,56***	***553,47***
6,0	13	6,39	10,20	1213,80	702,19	1213,99	511,6	2,365		0,9	14,9	94,3		
6,0	14	6,37	10,20	1216,54	705,84	1216,73	510,7	2,374		0,5	14,5	96,9	13,96	591
6,0	15	6,53	10,20	1212,35	701,34	1214,05	511,0	2,358		1,1	15,1	92,4	11,76	489
média		***6,43***	***10,20***	***1214,23***	***703,12***	***1214,92***	***511,11***	***2,37***	***2,39***	***0,82***	***14,86***	***94,54***	***12,86***	***540,38***

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 25 – Parâmetros determinados nos ensaios



(fonte: elaborado pelo autor)

4.3.2 Definição e caracterização do teor de projeto

A partir dos resultados obtidos nos ensaios, o teor de projeto foi definido como 4,3% de ligante, sendo o percentual correspondente ao Vv de 4%. Posterior a isso, foram moldados 6 CP com o teor de projeto para verificação das propriedades volumétricas e mecânicas do projeto, sendo 3 CP destinados à estabilidade e fluência e 3 CP aos ensaios de resistência à tração (RT) e módulo de resiliência (MR). O ensaio de resistência à tração por compressão diametral seguiu os procedimentos da norma DNER 138/94. A partir dos valores de leitura, juntamente com as medidas de altura e diâmetro, foi calculada a resistência à tração. A figura 26 mostra um CP durante e após ensaio de RT, respectivamente.

Figura 26– Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

(fonte: foto do autor)

O ensaio de MR seguiu os procedimentos da norma DNER 133/94, em que primeiramente foi efetuado o ensaio de RT de um dos CP como condição de parâmetro ao MR. A tabela 13 apresenta o resumo dos resultados dos ensaios de caracterização do teor de projeto da mistura em comparação com os parâmetros preconizados pela SMOV e DNIT, para as faixas granulométricas de estudo.

Tabela 13 – Comparação entre resultados do projeto e especificações limites (SMOV e DNIT)

Característica	Unidade	Projeto	Especificação de Camada		
			SMOV - Ligação/Rolamento	DNIT - Rolamento	DNIT - Ligação (Binder)
DMM	g/cm³	2,440	NE	NE	NE
Densidade Aparente	g/cm³	2,340	NE	NE	NE
Volume de vazios	%	4,2	3 – 5	3 – 5	4 – 6
VAM	%	14,22	NE	>14	>14
RBV	%	70,11	NE	75 - 82	65 - 72
Estabilidade	kgf	754	700 – 900	>500	>500
Fluência	Pol^{-1}	9,76	5 – 10	8-18	8-18
Relação E/F	kgf/cm	3089	3500 – 2250	NE	NE
RT	MPa	1,39	NE	>0,65	>0,65
MR	MPa	6732	NE	NE	NE
MR/RT	-	4856	NE	NE	NE

(fonte: elaborado pelo autor)

4.3.3 Ensaio de dano por umidade induzida

O ensaio de dano por umidade induzida seguiu os parâmetros da norma NBR15617 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011). Foi realizado com a finalidade de comparar o desempenho da mistura com ligante convencional, ligante com dope e ligante dopado envelhecido. Foram moldados três grupos de 6 CP cada e submetidos ao ensaio Lottman, totalizando 18 CP. O ligante com dope foi envelhecido através dos procedimentos da NBR 15235 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006), ensaio de determinação do efeito do calor e do ar em uma película rotacional através do equipamento RTFOT, figura 27. Conforme verificado no item 4.2.1, para uma adesividade satisfatória do ligante ao agregado, o percentual de dope no ligante foi de 0,3%. Os resultados obtidos neste ensaio foram utilizados para estudo apresentado em um projeto de iniciação científica. Em função da realização do ensaio ter sido efetuada antes da determinação do teor

de projeto do presente estudo, foi adotado como parâmetro o teor de 4,5% de ligante, conforme distribuição já discriminada na tabela 10.

Figura 27 – Método de envelhecimento de ligante RTFOT

(fonte: foto do autor)

Seguindo orientações de Norma, os CP foram moldados com Vv de 7% ± 1%, dos quais, 3 CP de cada grupo foram saturados e levados à um sistema de resfriamento sendo mantidos por 16 horas, após, foram mantidos em imersão à 60ºC por 24 horas. Então, juntamente com os outros CP, que não foram condicionados à elevada severidade, foram submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

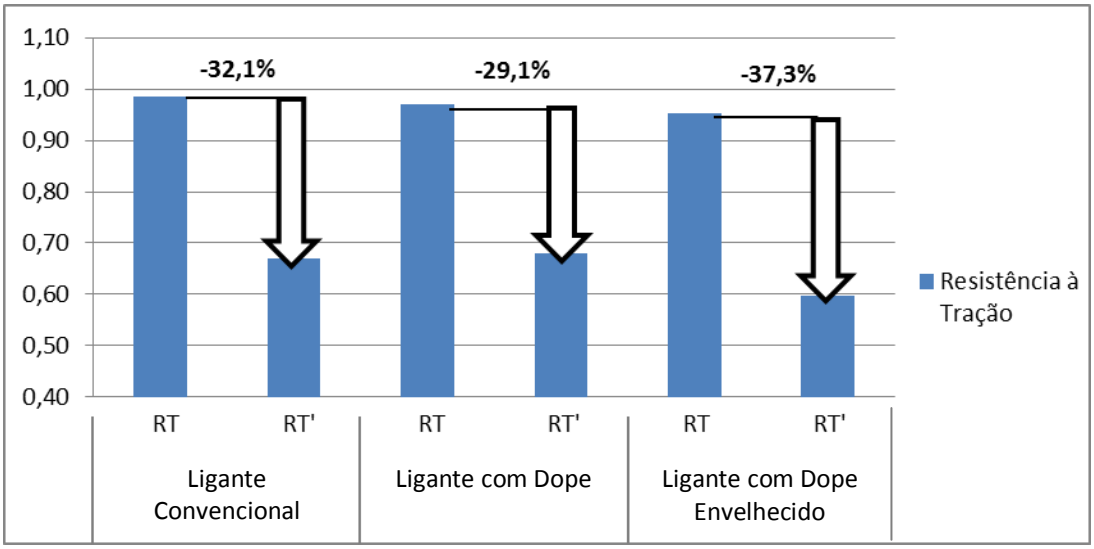
A relação (RRT), entre a resistência à tração por compressão diametral dos CP submetidos à elevada severidade (RT') e da resistência à tração por compressão diametral (RT) dos CP não submetidos à resfriamento e congelamento, deverá ser maior ou igual a 70%, ou seja, a perda de resistência deve ser inferior ou igual a 30%. A tabela 14 demonstra o resumo dos resultados obtidos nos ensaios e a figura 28 representa-os graficamente.

Tabela 14 - Resultados do ensaio de dano por umidade induzida - Lottman

Mistura	Ligante Convencional		Ligante com Dope		Ligante com Dope Envelhecido	
Condicionamento	RT	RT’	RT	RT’	RT	RT’
Resistência à Tração	0,923	0,581	0,961	0,730	0,899	0,584
	0,974	0,637	0,968	0,836	0,861	0,607
	1,062	0,790	0,981	0,474	1,097	0,602
Média	**0,987**	**0,669**	**0,970**	**0,680**	**0,952**	**0,598**
RRT	67,9		70,1		62,7	

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 28 – Gráfico comparativo de RT e RT’



(fonte: elaborado pelo autor)

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Por meio dos resultados obtidos nos ensaios com os agregados, foi possível identificar algumas características significativas, quando esses foram aplicados na mistura asfáltica. Devido às características físico-químicas do granito, principalmente em função de sua composição mineralógica, a interação com o ligante asfáltico convencional CAP50/70 não foi avaliada como favorável. Sendo assim, não há condição de aplicação sem adição de melhorador de adesividade no teor de 0,3%. Foram realizados ensaios em duas ocasiões diferentes, e, em ambas, ocorreu descolamento parcial da película de ligante quando não foi adicionado dope.

Pôde-se constatar, a partir dos dados analisados, outro aspecto relevante a respeito do agregado: a distribuição granulométrica apresentou um elevado percentual de material passante na peneira 0,075mm, principalmente no pó de pedra. Esta característica ponderal do material pulverulento, também é responsável pela má adesividade e pela diminuição da resistência ao dano causado pela água. Demais parâmetros como: índice de forma e resistência à abrasão apresentaram resultados enquadrados nos admissíveis, pelos órgãos e normas verificadas.

O ligante asfáltico apresentou resultados que o caracterizam como CAP50/70, conforme especificação do distribuidor. O ponto de amolecimento foi verificado com 48ºC, e as temperaturas de mistura e compactação ficaram na ordem de 159 à 167ºC e 144 à 155ºC, respectivamente.

No que diz respeito às misturas asfálticas ensaiadas com diferentes teores de ligante, para a determinação do teor de projeto, estas apresentaram o índice de VAM abaixo do recomendado para o máximo tamanho nominal do agregado utilizado. Isso significa que as misturas apresentaram baixo Vv, incorrendo em um preenchimento elevado dos vazios com ligante nos teores estimados. Essa característica da mistura é decorrente da curva granulométrica, que se encontra mais à direita no gráfico de granulometria, ou seja, como há presença de agregados maiores, há também uma redução na área superficial, reduzindo assim o VAM e o volume de ligante necessário. A mistura com teor de projeto apresentou VAM de 14,22, enquadrando-se

desta forma no limite recomendado pelo DNIT. Em contrapartida aos parâmetros do DNIT, a SMOV não apresenta restrição a esta característica.

Ceratti e Reis (2011 p. 73) salientam que misturas com baixo VAM tendem a apresentar baixa flexibilidade e maior tendência ao trincamento e deformações permanentes precoces.

Verificou-se que a mistura com teor de projeto apresentou resultados dentro dos valores especificados pelos parâmetros requeridos na Faixa I da SMOV, e na Faixa B do DNIT para camadas de ligação, não se enquadrando ao exigido para camadas de rolamento do DNIT em função da RBV de 70,22. Os ensaios mecânicos de estabilidade e fluência da mistura de projeto também apresentaram valores dentro do especificado pelos órgãos consultados, bem como a relação estabilidade/fluência. Como os índices de RT e MR não são restrições de análise pelo município de Porto Alegre, os mesmos foram verificados apenas segundo especificação do DNIT, conforme exposto na tabela 13, não havendo assim restrições.

Em função da análise dos resultados de MR e da relação MR/RT, requerer estudos mais específicos e comparativos da mistura, apenas foi considerado o enquadramento do MR na ordem de grandeza de 2000 a 8000 MPa, indicados por Bernucci et al. (2008 p. 301). Em complemento da análise feita a respeito do MR e RT, foi realizada a comparação dos resultados da mistura de estudo com um projeto também enquadrado na Faixa B do DNIT. Projeto este, destinado às camadas de ligação, cujos ensaios de MR e RT para o teor de projeto de 6% foram realizados no Lapav, em julho de 2011. A mistura comparada é composta por agregado de basalto, cal e CAP50/70, e o teor de projeto foi de 6,16%. O ligante asfáltico utilizado foi distribuído pelo mesmo fornecedor do ligante desta pesquisa, conforme resultados da tabela 15.

Tabela 15 – Comparativo de projetos Faixa B DNIT

Projeto	CAP 50/70 (%)	Estabilidade (kgf)	Fluência (pol)	MR (MPa)	RT (MPa)	MR/RT
Estudo	4,3	754	9,76	6732	1,39	4856
Faixa B Basalto	6,0	1258	11,09	4779	1,41	3389

(fonte: elaborado pelo autor)

Em relação ao ensaio de dano por umidade induzida, pôde-se constatar uma particularidade circuntancial nos resultados obtidos pela composição da mistura, conforme observada na tabela 14. Somente a mistura com ligante dopado apresentou resultado satisfatório. A pior situação foi observada no ligante dopado e envelhecido, cujo envelhecimento teve como intuito simular as severas condições da mistura asfáltica, durante a usinagem, espalhamento e compactação.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio dos resultados dos ensaios foi possível evidenciar que os agregados e o ligante asfáltico podem ser utilizados em revestimentos asfálticos para SMOV de Porto Alegre e para o DNIT. É relevante ressaltar a existência de restrições pontuais, como por exemplo, a utilização de dope como melhorador da interação entre o agregado e o ligante asfáltico convencional CAP50/70. Já em relação à composição da mistura asfáltica de projeto, apresentada na tabela 16, esta pode ser utilizada como camada de ligação no município de Porto Alegre, e como camada de ligação pelo DNIT devido à RBV.

Tabela 16 – Projeto

Brita 1”	28,7%
Brita 3/4"	19,1%
Pó de pedra	47,9%
CAP50/70	4,3%
Total	100%

(fonte: elaborado pelo autor)

É possível a partir da análise proposta pelo presente estudo constatar a importância da investigação laboratorial, o estudo dos materiais que compõem o revestimento asfáltico e a realização de simulações das características de usinagem e operação do pavimento. É significativo também ressaltar que as interações entre os materiais devem ser otimizadas, não apenas em um parâmetro, mas em todos os parâmetros que são exigidos na execução da mistura e operação do pavimento.

Portanto, considerando o trabalho em questão, provavelmente se consiga utilizar como alternativa de seguimento das análises de interação entre o agregado e o ligante, um estudo da composição química do dope. Outro aspecto significativo é a sua caracterização em relação ao ponto de fulgor e a curva de viscosidade/temperatura, pois as características necessárias para melhorar a adesividade devem ser mantidas durante as fases de usinagem e operação do

pavimento. Após a caracterização das propriedades das alternativas de dosagem do dope, como, por exemplo, através do experimento Lottman, estas podem ser aprimoradas a fim de que seja parâmetro restritivo de dosagem.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6576**: materiais betuminosos: determinação da penetração. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR 15184**: materiais betuminosos - determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 15235: materiais asfálticos – determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional, 2006.

_____. NBR 15617: misturas asfálticas - determinação do dano por umidade induzida, 2011.

_____. **NBR 15619:** misturas asfálticas - determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas, 2012.

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

BELTRAME, L. F.; GUIMARÃES, A. C. R. Um estudo comparativo sobre envelhecimento de ligantes asfálticos de diversas origens utilizando equipamento RTFOT. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 40., 2010, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 2010. p. 10.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobrás; Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto, 2008.

BRASIL. Confederação Nacional do Transporte. **Boletim Estatístico.** Brasília, 2011a. Dados referentes ao setor de transportes. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/Paginas/Boletins_Detalhes.aspx?b=3>. Acesso em: 15 nov. 2012.

_____. Confederação Nacional do Transporte. **Pesquisa de dados.** Brasília, 2011b. Dados referentes ao setor de transportes. Disponível em: <http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Documents/Arquivos%202011/Principais_dados_PCR2011-1.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2012.

CERATTI, J. A. P.; REIS, R. M. M. **Manual de Dosagem de Concreto Asfáltico**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 078/94**: agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994a.

_____. **ME 133/94:** pavimentos flexíveis – misturas betuminosas a quente – determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, 1994b.

_____. **ME 138/94:** pavimentos flexíveis - misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 1994c.

_____. EM 035/95: peneiras de malhas quadradas para análise granulométrica de solos. Rio de Janeiro, 1995a.

_____. **ME 043/95:** misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995b.

_____. **PRO 199/96:** Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório, 1996.

_____. **ME 266/97:** agregados: determinação do teor de materiais pulverulentos. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **ME 035/98:** agregados – determinação da abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 1998a.

_____. **ME 083/98:** agregados – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação.** Brasília, DF, 2006a.

_____. **031/2006 ES:** pavimentos flexíveis – concreto asfáltico – especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006b.

_____. **131/2010 ME**: materiais asfálticos – determinação do ponto de amolecimento – método do anel e bola método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

INSTITUTO DE ASFALTO. **Manual de Asfalto.** Rio de Janeiro: Petrobrás. 1989.

LIBERATORI, L. A.; CONSTANTINO, R.S. Melhoradores de Adesividade para Misturas Asfálticas: estado da arte. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 18., 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 2006. p. 10.

OLIVEIRA FILHO, C. M. S.; SOARES, J. B. Adesão e coesão em misturas asfálticas: melhoradores de adesividade, ligantes modificados e intertravamento. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 20., 2006, Brasília. **Anais...** Brasília: Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. 2006. Não paginado.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação Rodoviária:** conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis. Rio de Janeiro, 2002.

PORTO ALEGRE. Secretaria Municipal de Obras e Viação. **Caderno de Encargos de Obras Viárias.** Porto Alegre, 1996. v. 2.

SENÇO, W. **Manual de Técnicas de Pavimentação.** São Paulo: Pini, 2001. v. 2.