

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

RUAN MARCOS XAVIER

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS
DO TIPO GRAVE-BITUME

Joinville

2022

RUAN MARCOS XAVIER

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS
DO TIPO GRAVE-BITUME

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

Orientador: Dr. Breno Salgado Barra.

Joinville

2022

RUAN MARCOS XAVIER

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS
DO TIPO GRAVE-BITUME

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

Joinville (SC), 23 de fevereiro de 2022.

Banca Examinadora:

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

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

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

Dedico este trabalho a todos que me apoiaram e acreditaram no meu potencial, em especial ao meu avô materno, “In memoriam”, minha mãe, meu pai e meu irmão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente Deus por ter me dado forças para enfrentar todos os desafios, agradeço também por ter colocado pessoas incríveis em minha vida e uma família que sempre me motivou na realização desse sonho.

Ao meu avô Durval Zeferino Ramos, “In Memoriam”, e minha mãe Zulma Zeferino Ramos, por me proporcionar educação, saúde, de ensinar valores que moldaram meu caráter e pelos bons exemplos, minha eterna gratidão.

Ao meu pai Arno Xavier, por todo o apoio prestado, pelas conversas, conselhos e momentos de alegria, meu muito obrigado.

Ao meu irmão Gean Paulo Xavier, que me serviu como inspiração durante toda a vida acadêmica, pelos conselhos prestados, além de todo apoio e parceria que grandes irmãos proporcionam.

A minha namorada Beatriz Bernardes por todo apoio durante esse período, paciência, compreensão e motivação nos momentos difíceis, pela amizade, companheirismo e pelo amor recíproco.

Ao meu orientador Dr. Breno Salgado Barra por acreditar no meu potencial e proporcionar oportunidades durante a graduação, pelos ensinamentos prestados em aula e principalmente pelos aprendizados durante meu período no Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav), muito obrigado.

Aos amigos Edson Alvim Krüger Junior, Karoline Domingos, Gustavo Serafim, José Victor Tessele Vargas, Lucas Mensor, Thaís Corrêa Lima e Edilson Vidal que estiveram ao meu lado desde o início e persistiram até esse momento da graduação.

Aos amigos que fiz ao longo da graduação Anete Rodrigues Ferreira, Guilherme Gustavo Dias, Rafael Cristyan Fronza, Vinicius Hunzicker Ferreira, Túlio Henrique Costa Souza Pimenta, pelas conversas, por todos os trabalhos em equipe e pela amizade.

Agradeço aos amigos e colegas da equipe de competição INFRATEC, grupo que tive orgulho de fazer parte, sendo fundamental tanto para crescimento pessoal, quanto profissional.

Ao inesquecível grupo de amigos Capim Canela F.R., que tornaram a minha chegada na cidade mais alegre, sendo sempre um fator motivador para persistir na caminhada. Em especial aos amigos Renan Dalló Stano, João Pedro Buzzi, Ricardo Scheffer Teixeira e John Henschel Jr.

Aos meus primos Daniel Cristian Ramos e Julio Cezar da Cunha, que estiveram presente durante essa etapa, vocês são meus irmãos de consideração.

A todos os meus familiares, pelo carinho e incentivo. Em especial aos meus tios Odair Zeferino Ramos e Franciele Ramos, por me proporcionar moradia durante este período.

A minha colega de laboratório e mestranda Lilian Kethelyn Brum Maciel Rodrigues pela ajuda e dedicação durante a realização dos ensaios realizados para esta pesquisa. E ao Glauciano Neckel por todas as sugestões e dicas para escrita deste trabalho.

Agradeço a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) por proporcionar bolsas de auxílio, que foram de fundamental importância para a permanência na universidade.

Por fim, agradeço às empresas Rudnick Minérios, CBB Asfaltos e ao Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav), por disponibilizarem os insumos e equipamentos necessários à pesquisa, bem como ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq), pelo apoio financeiro através da bolsa de pesquisa.

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

Provérbio japonês, autor desconhecido.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é definir os parâmetros de dosagem de misturas asfálticas do tipo Grave-Bitume (GB) para utilização como camada de ligação em estruturas de pavimento, com base na metodologia de dosagem Marshall, adotada oficialmente no Brasil pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), bem como a definição da resistência das formulações à ação deletéria da água no ensaio de Duriez. A motivação do estudo é proveniente da adaptação de um projeto executado em obra pública na cidade de Dakar, Senegal, utilizando uma curva granulométrica concebida pelo método racional, calculada a partir das equações de Fuller-Talbot, que proporcionam maior controle das frações granulares para a composição das formulações, considerando o peneiramento individual das partículas, com o intuito de se obter uma curva proporcionalmente contínua. A graduação granulométrica é de 0/20 mm e a rocha matriz é procedente de maciço gnáissico pertencente à jazida situada na região metropolitana de Joinville/SC. O ligante betuminoso de base utilizado foi o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70, modificado com o polímero elastomérico Estireno-Butadieno-Estireno (SBS), constituindo a matriz denominada Poliflex 60/85-E, disponibilizada por distribuidor oriundo de Curitiba/PR. Os parâmetros físicos e mecânicos das misturas asfálticas foram estudados a partir de seis dosagens distintas do teor de ligante, a saber: 3,90%, 4,22%, 4,54%, 4,86%, 5,18% e 5,50%, compreendendo uma amostragem total de 30 corpos de prova. De forma complementar, 72 corpos de prova foram confeccionados para analisar a resistência à ação da deletéria da água no ensaio de Duriez. Os resultados obtidos indicam que as dosagens de 4,22% e 4,54% são as que melhor se enquadram nos parâmetros normativos da metodologia Marshall. Entretanto, entre as duas dosagens mencionadas, tem-se que o teor de 4,54% apresentou maior resistência à ruptura por tração indireta e estabilidade mecânica, além dos demais parâmetros de dosagem estarem aceitáveis para aplicação como camada de ligação em estruturas de pavimento, em que pese as limitações técnicas da metodologia adotada no país. Ainda, as formulações testadas apresentaram, em geral, forte resistência mecânica à ação deletéria da água, com percentuais máximos referentes à perda da resistência mecânica de 5,0%.

Palavras-chave: Camada de ligação. Grave-Bitume. Ligante betuminoso. Misturas asfálticas.

ABSTRACT

The main aim of this research is to define the dosage parameters for asphalt mixes so-called Grave-Bitume (GB), intending to be applied as binder layers in pavement structures, based on Marshall methodology, which is officially homologated in Brazil by Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), as well as to define the resistance to action of water after carrying out Duriez tests. The motivation to proceed with this research comes from a proposal to adapt a real formulation project designed for public paving works carried out at Dakar, Senegal, using a gradation curve calculated by a rational method, taking into account Füller-Talbot equations, which provide precise control of the granular fractions by individual sieving, aiming to obtain a curve proportionally continuous. The aggregate gradation is 0/20 mm formed by gneissic massive rock samples from a quarry located in the metropolitan region of Joinville/SC. The base asphalt binder was that classified as 50/70, but modified with elastomeric polymer so-called Styrene-Butadiene-Styrene (SBS), constituting the bituminous matrix named Poliflex 60/85-E, supplied by a distributor from Curitiba/PR. The physical and mechanical parameters were determined from six distinct asphalt binder dosages, such as: 3,90%, 4,22%, 4,54%, 4,86%, 5,18% e 5,50%, comprising a total sampling of 30 specimens. In addition, 72 specimens were produced to evaluate the resistance to action of water after carrying out Duriez tests. The results obtained indicate dosages of 4,22% and 4,54% as those with better suitability to the standardized parameters established by the Marshall method. However, among them, that of 4,54% presented greater tensile strength resistance and mechanical stability, besides the other parameters being acceptable for application as binder layer in pavement structures, even taking into account the technical limitations of the methodology adopted in Brazil. Furthermore, the formulations tested presented, in general, strong mechanical resistance with regards to action of water, with maximum percent losses of 5,0%.

Keywords: Binder layer. Grave-Bitume. Asphalt binder. Asphalt mixes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Atividades realizadas para alcançar o objetivo	19
Figura 2	- Seção da estrutura de um pavimento flexível	22
Figura 3	- Classificação das misturas asfálticas	29
Figura 4	- Padrões granulométricos de misturas asfálticas	30
Figura 5	- Adesividade ligante-agregado	31
Figura 6	- Polaridade da carga elétrica da matriz rochosa	31
Figura 7	- Exemplo de aplicação de Grave-Bitume em camada de base	34
Figura 8	- Comparativo entre as curvas granulométricas de estudo e de Dakar	36
Figura 9	- Localização da jazida	37
Figura 10	- Britador Rudnick Minérios LTDA.	38
Figura 11	- Curva de viscosidade <i>versus</i> temperatura	40
Figura 12	- Curva granulométrica formulada para a mistura GB 0/20 mm	43
Figura 13	- Separação das amostras	44
Figura 14	- Mistura asfáltica em processamento	45
Figura 15	- Processo de aferição da massa específica real	45
Figura 16	- Sistema de vácuo com o conjunto da amostra e picnômetro	46
Figura 17	- Procedimento de mistura dos materiais no processo de usinagem	48
Figura 18	- Visão geral do processo de inserção da mistura asfáltica no molde	48
Figura 19	- Mistura asfáltica com papel-filtro e pronta para o processo de compactação	49
Figura 20	- Extração do corpo de prova com auxílio de macaco hidráulico	49
Figura 21	- Corpos de prova Marshall	50
Figura 22	- Medição das amostras	50
Figura 23	- Corpos de prova em banho-maria	52
Figura 24	- Prensa Marshall	53
Figura 25	- Procedimento de ruptura do corpo de prova	54
Figura 26	- Esquema do ensaio de resistência à tração indireta por compressão diametral	55
Figura 27	- Ensaio de resistência à tração indireta	55
Figura 28	- Ruptura no plano diametral vertical	56
Figura 29	- Mistura asfáltica em produção	57
Figura 30	- Molde e êmbolos utilizados na confecção do corpo de prova	57
Figura 31	- Sequência de compactação por duplo pistão	58

Figura 32	-	Corpos de prova realizados no ensaio de Duriez	58
Figura 33	-	Saturação dos corpos de prova condicionados por imersão	59
Figura 34	-	Ruptura do corpo de prova no ensaio de Duriez	60
Figura 35	-	Resultados do Ensaio Marshall	62
Figura 36	-	Resultado resistência à tração indireta	67
Figura 37	-	Relação da resistência condicionada (r) e não condicionada (R)	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Características específicas de misturas asfálticas	24
Tabela 2	- Classificação dos ligantes betuminoso	26
Tabela 3	- Normas DNIT de asfaltos modificados por polímeros	27
Tabela 4	- Especificações técnicas para ligantes modificados por polímeros	28
Tabela 5	- Classificação de misturas asfálticas Grave-Bitume	35
Tabela 6	- Teor de ligante mínimo	35
Tabela 7	- Recomendação de máximos e mínimos da curva granulométrica	36
Tabela 8	- Resultados de caracterização dos agregados	38
Tabela 9	- Propriedades do ligante betuminoso POLIFLEX 60/85-E	39
Tabela 10	- Propriedades ligante POLIFLEX 60/85-E após o envelhecimento	40
Tabela 11	- Composição granulométrica Grave-Bitume	42
Tabela 12	- Resultados da MVR	61
Tabela 13	- Parâmetros de dosagem para camadas de ligação	62
Tabela 14	- Resultados dos prováveis teores de trabalho	65
Tabela 15	- Resultados amostrais resistência à tração indireta	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

%V	- Teor de vazios
%VCB	- Vazios Cheios de Betume
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFNOR	- Association Française de Normalisation
ANP	- Agência Nacional de Petróleo
AASHTO	- <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ASTM	- <i>American Society for Testing and Materials</i>
CA	- Concreto Asfáltico
CAP	- Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	- Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CTJ	- Centro Tecnológico de Joinville
DER/PR	- Departamento de Estradas de Rodagem do estado do Paraná
DNIT	- Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
ES	- Especificação de Serviço
EVA	- Etileno Acetato de Vinila
GB	- Grave-Bitume
IFSTTAR	- <i>Institut Français des Sciences et Technologies des Transports l'Aménagement et des Réseaux</i>
LPC	- <i>Laboratoire Ponts et Chaussées</i>
LDTPav	- Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação
LTDA	- Limitada
ME	- Método de Ensaio
MEA	- Massa Específica Aparente
MVR	- Massa Volumétrica Real
NBR	- Norma Brasileira
NF	- Norma Française
PCG	- Prensa de Compactação Giratória
RBV	- Relação Betume/Vazios
RTI	- Resistência a Tração Indireta
RTFOT	- <i>Rolling Thin Film Oven Test</i>
SBS	- Estireno-Butadieno-Estireno

- UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina
- USACE - United States Army Corps of Engineers
- VAM - Vazios do Agregado Mineral

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO	16
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo Geral	17
1.2.2 Objetivos Específicos	17
1.3 PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO	18
1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	20
1.5 RELEVÂNCIA DO TEMA	20
1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	21

CAPÍTULO 2

PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	22
2.1 COMPOSIÇÃO DAS ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS	22
2.2 CONCEITO DE MISTURAS ASFÁLTICAS	25
2.2.1 Misturas asfálticas densas	32
2.3 MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO GRAVE-BITUME	33

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS GRANULARES	37
3.2 CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE BETUMINOSO	39
3.3 CURVA GRANULOMÉTRICA	41
3.4 ENSAIOS LABORATORIAIS	43
3.4.1 Massa volumétrica real	43
3.4.2 Ensaio Marshall	46
3.4.3 Ensaio de resistência a tração indireta por compressão diametral	54
3.4.4 Sensibilidade a água no ensaio de Duriez	56

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1 MASSA VOLUMÉTRICA REAL	61
4.2 ENSAIO MARSHALL	61
4.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA	66
4.4 SENSIBILIDADE A ÁGUA NO ENSAIO DE DURIEZ	67

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	69
REFERÊNCIAS	71

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Morilha Junior (2004) afirma que o modal rodoviário é o meio de transporte mais difundido no Brasil, tanto para movimentação de cargas como de circulação de passageiros. O autor ainda descreve que uma quantidade significativa da malha rodoviária existente no país está comprometida em função de cargas excessivas aplicadas por eixo, formulações de misturas asfálticas inadequadas, falta de manutenção e falhas de projeto.

A flexibilidade do modal rodoviário em conjunto com o incentivo dos órgãos públicos por este segmento de transporte explica a dependência do país por esta alternativa de transporte (BALLOU, 2008). A utilização de materiais e equipamentos eficientes propiciam na melhor qualidade da estrutura de pavimentos aplicados nas rodovias brasileiras, pois quando se apresentam em más condições, aumentam o custo de operação do transporte, ocasionam prejuízos ambientais e econômicos.

Logo, tem-se que o país precisa de investimentos contínuos e de qualidade em obras de infraestrutura rodoviária, baseados em projetos formulados com critérios técnicos e científicos capazes de assegurar, aos usuários dessas rodovias, conforto, segurança e economia em manutenção dos veículos, e ainda, com interferência mínima do poder público referente à manutenção durante o período de vida útil de projeto.

Ao se considerar que pavimentos de qualidade apresentam dimensionamento e misturas asfálticas adequadas aos parâmetros descritos pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT, 2006), é importante que a qualidade dos componentes dessas misturas seja confeccionada basicamente por granulares e ligantes betuminosos, e que a composição desses materiais reflita no comportamento mecânico gerado por essa combinação.

Sendo assim, misturas realizadas com curvas granulométricas mal projetadas e/ou aglutinadas com ligantes que apresentam resistência inadequada, se mostram com elevado potencial para desenvolver problemas estruturais de maneira precoce, com deformações excessivas e fadiga, diminuindo consideravelmente a vida útil do pavimento (De La ROCHE, 1996).

A recomendação proposta pelo DNIT/ES (2006), Norma 031, é baseada na elaboração de um modelo, que tenha um arranjo estrutural dos granulares realizado por um método de

tentativa e erro, para que a determinação da composição se encaixe dentro dos limites estabelecidos como aceitáveis pelo órgão, chamadas de faixas.

O conceito desse método determina o enquadramento da faixa granulométrica, permitindo curvas diversificadas dentro dos limites estabelecidos, como consequência, as misturas asfálticas apresentam comportamentos distintos e, muitas vezes, gerando resultados insatisfatórios (MOMM, 1998).

A fim de se obter composições granulométricas controladas e com características conhecidas, existe a possibilidade da utilização do método teórico de Füller-Talbot. Nesse método é possível calcular, de maneira precisa, a quantidade de materiais empregada em cada fração baseado no diâmetro máximo do grão e da porcentagem passante na peneira de menor abertura da série escolhida (BARRA et al., 2016).

No contexto de construir pavimentos com desempenhos satisfatórios, sob a avaliação das dosagens de misturas asfálticas do tipo Grave-Bitume em camadas de ligação, também chamadas de binder, a presente pesquisa explora o desenvolvimento de corpos de prova, provenientes da metodologia oficialmente adotada no Brasil, o método Marshall. Além da produção de corpos de prova pelo ensaio de Duriez, para avaliar a ação deletéria da água, considerando uma curva granulométrica determinada a partir do método de Füller-Talbot.

1.2 OBJETIVOS

Para atingir os resultados de interesse, foram propostos neste trabalho os seguintes objetivos para a pesquisa executada:

1.2.1 Objetivo Geral

Propor a formulação de misturas asfálticas do tipo Grave-Bitume (GB), a partir de análise dos parâmetros de dosagem e respectiva verificação da viabilidade técnica para utilização como camada estrutural de ligação.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Definir as aberturas das malhas que compõem a série da curva granulométrica para as formulações, a partir das especificações preconizadas no método racional teórico, empregando as equações de Füller-Talbot;

- Proceder com os ensaios laboratoriais de caracterização das propriedades físicas e mecânicas dos materiais que constituem as misturas asfálticas, como os agregados minerais e o ligante betuminoso;
- Executar os procedimentos laboratoriais para a fabricação dos corpos de prova, medição e determinação de propriedades físicas, e testes de resistência mecânica, baseados na metodologia Marshall;
- Realizar ensaios laboratoriais complementares às análises dos parâmetros da metodologia Marshall, considerando a resistência ao esforço de tração indireta e à ação da água no ensaio de Duriez a 18 °C;
- Definir, com base na análise global dos resultados da campanha experimental, qual a dosagem de trabalho de ligante betuminoso a ser utilizada.

1.3 PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO

Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizados materiais granulares obtidos na jazida da empresa Rudnick Minérios Ltda., localizada em Joinville/SC, empresa parceira do Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) situado no Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Para a definição das propriedades desses granulares, foram considerados estudos de caracterização já realizados por Siroma (2018) e Clara (2020).

O ligante betuminoso utilizado é denominado de POLIFLEX 60/85E, fornecido pela empresa CBB Asfaltos, também parceira do LDTPav, com sede na cidade de Curitiba/PR. Essa matriz é constituída de 4% de polímero elastomérico Estireno-Butadieno-Estireno (SBS), que possibilita o melhoramento das propriedades elásticas, elevando a capacidade da mistura asfáltica resistir aos esforços mecânicos solicitantes.

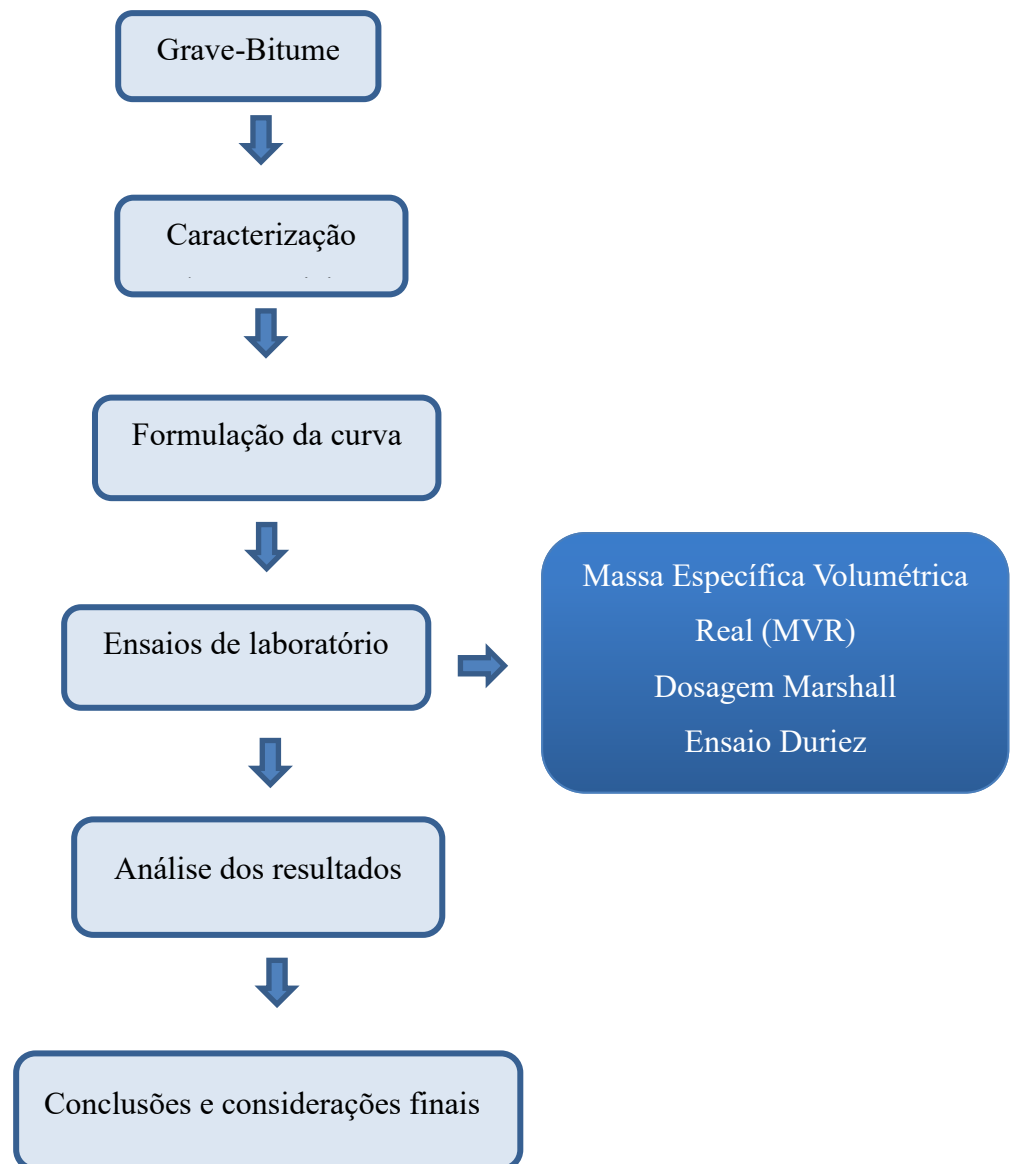
Para determinação da curva granulométrica da mistura GB, utilizou-se o método teórico, que é calculado através da equação de Fuller-Talbot. Esse método fixa parâmetros característicos que são inseridos na equação supracitada, com o objetivo de controlar com maior precisão a distribuição das frações granulares.

A dosagem das misturas asfálticas foi realizada a partir do método Marshall, com o objetivo de determinar o teor de ligante de trabalho. Para tanto, foram estudados seis teores (3,90%, 4,22%, 4,54%, 4,86%, 5,18% e 5,50%), sendo que para cada um, moldou-se cinco corpos de prova, totalizando 30 unidades. De maneira complementar, a fim de definir a melhor

dosagem, dentre as indicações apontadas pela metodologia Marshall, 10 corpos de prova foram moldados e submetidos ao ensaio de Resistência a Tração Indireta (RTI).

Em paralelo, foram confeccionados 72 corpos de prova pelo ensaio de Duriez a 18°C, com a finalidade de analisar comparativamente o desempenho de cada teor, considerando a resistência à ação deletéria da água das formulações produzidas.

Figura 1 - Atividades realizadas para alcançar o objetivo.



Fonte: Autor.

1.4 DELIMITAÇÃO DO ESPAÇO DA PESQUISA

A pesquisa foi executada em sua totalidade no âmbito laboratorial, ou seja, em caráter experimental e quantitativo, e com cunho tecnológico, sem a pretensão de realizar estudos e análises de campo ou computacional. Os ensaios foram realizados integralmente no Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), que dispõe de todos os equipamentos e recursos necessários para realização dos objetivos da pesquisa.

1.5 RELEVÂNCIA DO TEMA

O deslocamento de cargas, bens, serviços e pessoas no país se dá principalmente a partir do modal rodoviário, pelo qual trafegam grandes volumes de veículos, e que muitas vezes possuem cargas de alta intensidade, sujeitos a ambientes com elevados gradientes de temperatura, que causam a deterioração precoce dos pavimentos (ALMEIDA, 2013).

Tendo em conta a necessidade das estruturas de pavimento resistirem ao tráfego elevado, o presente trabalho estuda a formulação de misturas asfálticas do tipo Grave Bitume (GB), para fins de aplicação como camada de ligação, assumindo função estrutural em suas composições. Ainda, apresentam arranjo granulométrico com presença importante de frações graúdas e espessuras que no campo variam de 8,0 cm a 16,0 cm, conferindo boa rigidez e resistência à fadiga às camadas sob solitação dinâmica pelo tráfego, com menor consumo de ligante betuminoso quando comparadas às dosagens de misturas densas convencionais (MANUEL LPC, 2007).

A camada de ligação nas estruturas de pavimento tem a finalidade de assegurar maior aporte estrutural entre a camada superficial de rolamento e as demais camadas subjacentes no do pavimento. No Brasil, é muito utilizada com o objetivo de diminuir custos com a construção de camadas superficiais de rolamento muito espessas, e também, auxiliar na distribuição das tensões propagadas às camadas inferiores, a fim de garantir que as deformações aconteçam em níveis admissíveis e se tenha assegurado o comportamento mecânico das estruturas conforme projetado no decorrer da vida útil de serviço (DNIT, 2006).

1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está apresentado em capítulos, organizados da seguinte forma:

Capítulo 1: Introdução do tema abordado na pesquisa, os objetivos propostos e os procedimentos adotados na execução da pesquisa.

Capítulo 2: Revisão literária sobre misturas asfálticas, com destaque para as formulações do tipo Grave Bitume (GB).

Capítulo 3: Trata dos materiais e métodos utilizados para a execução da pesquisa.

Capítulo 4: Apresenta e discute tecnicamente os resultados obtidos.

Capítulo 5: Discorre sobre as conclusões oriundas do estudo realizado, bem como propõe recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

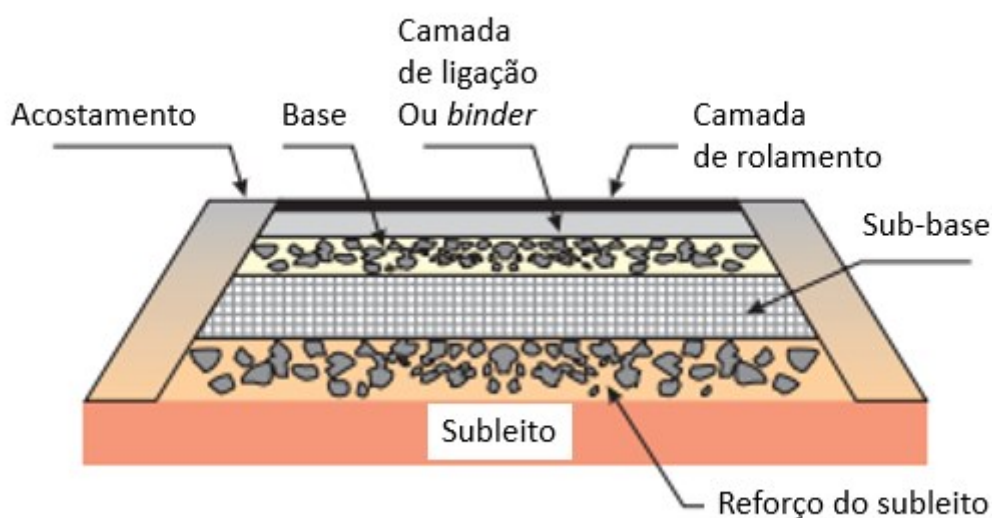
2.1 COMPOSIÇÃO DAS ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS

As obras de pavimentações asfálticas foram empregadas inicialmente em 1802 na França, em 1838 nos Estados Unidos e em 1869 na Inglaterra (IBP, 1994). Desde então, a pavimentação asfáltica está se desenvolvendo através de estudos de materiais e métodos para execução das estruturas do pavimento.

Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (BERNUCCI et al., 2010, p. 9).

Para Andrade (2017) essas múltiplas camadas possuem o papel de resistir e distribuir os esforços transmitidos pelos veículos que trafegam sobre a estrutura, com o menor custo de construção possível, dimensionando-as conforme volume e intensidade do tráfego submetido. Deste modo, a estrutura de pavimento flexível pode ser dividida da seguinte forma: camada de rolamento, camada de ligação (binder), base, sub-base, eventualmente reforço de subleito e subleito, como mostrado na figura a seguir.

Figura 2 - Seção da estrutura de um pavimento flexível.



As camadas superficiais, formadas por camada de ligação, eventualmente existente, e a camada de revestimento, possuem funções de resistir as intempéries e aos esforços de tensão e deformação impostos pelo tráfego, e também, garantir conforto e segurança aos usuários, através da aderência pneu-pavimento (MOMM, 1998).

Segundo Clara (2020), algumas estruturas de pavimento, deterioram-se devido ao fenômeno de degradação. Este acontecimento ocorre geralmente, em seções de pavimentos que sofrem com elevadas tensões de cisalhamento, impostas por zonas de frenagem e aceleração, como curvas, rampas, etc.

O método brasileiro de dimensionamento de pavimentos considera que todas as camadas dos pavimentos possuem função estrutural, contudo, apenas as camadas de rolamento e de ligação possuem misturas asfálticas. Como o GB é uma mistura asfáltica contendo agregado com diâmetro máximo de 20,0 mm, sua aplicação adequada no país seria em camadas de ligação.

Neste contexto, a camada de ligação não é utilizada apenas por condições técnicas, mas com a visão de reduzir custos de execução da obra de pavimentação. Essa camada, também conhecida como binder, é uma camada intermediária, situada entre a camada de rolamento e a camada de base do pavimento (BALBO, 2007).

O Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná (DER/PR), normativa ES-P 21/17 (2017) descreve camada de ligação como a camada imediatamente abaixo da capa asfáltica. Apresenta diferença de comportamento em relação as camadas de rolamento, decorrente da inserção de agregados de maior diâmetro máximo, existência de maior percentual de vazios, menor consumo de finos (fíleres) e de ligante.

De maneira geral, pode-se descrever a camada de ligação como uma camada de Concreto Asfáltico de Petróleo, também chamada de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ). Essa camada é constituída por agregado pétreo, material de enchimento (fíleres) e ligante betuminoso, que são misturados, transportados, espalhados, e por fim, compactados antes da execução do revestimento asfáltico (camada de rolamento).

Os parâmetros de dosagens para misturas asfálticas empregadas em camadas de ligação ou binder, são propostos pelo DNIT ES (2006), normativa 031 que estabelece características relativas à porcentagem de vazios, estabilidade e resistência à tração por compressão diametral estática mínima, de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 - Características específicas de misturas asfálticas.

CARACTERÍSTICAS	MÉTODO DE ENSAIO	CAMADA DE ROLAMENTO	CAMADA DE LIGAÇÃO (BINDER)
Porcentagem de vazios (%)	DNER-ME 043	3 a 5	4 a 6
Relação betume/vazios	DNER-ME 043	75 - 82	65 - 72
Estabilidade, mínima, (kgf) (75 golpes)	DNER-ME 043	500	500
Resistência à Tração por Compressão Diametral Estática a 25°C, mínima, MPa	DNER-ME 138	0,65	0,65

Fonte: DNIT ES 031 (2006).

Nota-se que as características das camadas de rolamento e de ligação são similares, tendo algumas diferenciações na curva granulométrica, devido o diâmetro máximo do agregado da camada de ligação ser superior à de rolamento, além de que são aceitas maiores porcentagens de vazios nesta camada, pois a função de impermeabilizar a estrutura, é dada para a camada de revestimento.

Na metodologia francesa, a estrutura de pavimento é dependente do volume de tráfego, sendo que existem dois conjuntos, em que o primeiro conjunto consiste em estruturas espessas (*chaussée bitumineuse épaisse*) e o segundo conjunto, é chamada de estrutura de pavimento flexível (*chaussée souple*).

As estruturas espessas (*chaussée bitumineuse épaisse*) são aplicadas em tráfegos pesados e de grande volume. As camadas de revestimento e de ligação podem apresentar misturas asfálticas densas, de módulo elevado, de misturas drenantes, etc. Nas camadas de base ou sub-base, são permitidas apenas misturas asfálticas do tipo Grave-Bitume, material granular tratado com betume e misturas de módulo elevado (DE ALMEIDA, 2017).

Já a estrutura flexível (*chaussée bitumineuse épaisse*) segundo o autor supracitado, é destinada a vias de baixo a médio volume e que não possuam grande intensidade. Nas misturas de revestimento e de ligação, deve-se empregar os mesmos tipos de misturas mencionados na estrutura espessa. Para as camadas de base e sub-base recomenda-se a utilização de materiais granulares não tratados, porém, ainda é possível aplicar base tratada com betume, tipo GB-3 definido pela norma francesa NF EN 13285 (2018).

2.2 CONCEITO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Segundo Pouteau (2004), a mistura asfáltica betuminosa é uma mistura de frações selecionadas de agregados e ligante de hidrocarboneto. Nessa mistura, o ligante de hidrocarboneto, também chamado de ligante betuminoso, é o principal responsável pela coesão enquanto o esqueleto mineral garante a rigidez do conjunto.

O comportamento mecânico herda as características viscoelásticas do ligante empregado na mistura asfáltica. Dessa forma, quando as cargas são impostas no pavimento com alta velocidade, a mistura exibe um comportamento elástico. Já em condições de aplicação de cargas lentas, exibe um comportamento predominantemente viscoso. Logo, seu comportamento é apresentado de maneira viscoelástica, cuja linearidade depende do nível de demanda do pavimento (MOMM, 1998).

É importante que na mistura asfáltica ocorra adesão suficiente entre o agregado e o ligante, para que não aconteça a desagregação da mistura, quando estiver suscetível as cargas impostas pelo tráfego do campo. A aplicação inadequada da taxa de ligante possibilita que a mistura asfáltica rompa precocemente, dessa maneira, é fundamental que se atinja o teor ótimo de ligante para prolongar a vida útil do pavimento.

O desempenho de uma mistura asfáltica a uma tensão não depende simplesmente do momento presente de sua aplicação, mas também todo o histórico de solicitações. Enquanto que no nível termodinâmico, os fenômenos de conservação de energia da elasticidade são acompanhados pelo fenômeno dissipativo de viscosidade.

A temperatura é um parâmetro determinante do comportamento dos materiais betuminosos. Pois o ligante que entra na composição varia seu comportamento conforme a temperatura. Em baixa temperatura a mistura asfáltica sob tensões normais de tráfego apresenta elevado módulo de rigidez. No entanto, em alta temperatura possui baixo módulo e alta deformabilidade. Esta propriedade gera fenômenos de degradação contrastantes dependendo das condições climáticas. É notável a existência de rachaduras por frágeis rupturas no inverno e sulcos de deformação permanente no verão.

Esse ligante asfáltico é proveniente do processo de destilação do petróleo, correspondendo entre 25 a 40% do volume total do petróleo extraído e 1,5% do volume total de petróleo processado. Dessa produção, estima-se que 96% da CAP produzido é destinado a aplicação na pavimentação, o restante é utilizado em indústrias de impermeabilização e de isolantes. As características do ligante podem variar conforme origem do petróleo e do processo de refinamento empregado (LEITE, 2007)

Dessa forma, os ligantes betuminosos são submetidos a ensaios laboratoriais recomendados por normas brasileiras que atestam certificação conforme a qualidade do ligante estudado, os limites para classificação são estipulados pela Agência Nacional do Petróleo (ANP), apresentados na Tabela 2 e as normas de caracterização utilizadas são:

- **Penetração – NBR 6576 (ABNT, 2007);**
- **Ponto de fulgor e de combustão – NBR 11341 (ABNT, 2014);**
- **Ponto de amolecimento – NBR 6560 (ABNT, 2016);**
- **Viscosidade Saybolt-Furol – NBR 14950 (ABNT, 2003b);**
- **Ductibilidade – NBR 6293 (ABNT, 2015) e**
- **Efeito de calor e do ar – ASTM D2872 (ASTM, 2004).**

Tabela 2 - Classificação dos ligantes betuminosos.

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	CAP 30/45	CAP 50/70	CAP 85/100	CAP 150/200
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1 mm	30 - 45	50 - 70	85 - 100	150 - 200
Ponto de amolecimento mínimo	°C	52	46	43	37
Viscosidade Saybolt-Furol					
- a 135°C, mín.		192	141	110	80
- a 150°C, mín.	s	90	50	43	36
- a 177°C, mín.		40 - 150	30 - 150	15 - 60	15 - 60
Viscosidade Brookfield					
- a 135°C, sp 21, 20 rpm, mín.		374	274	214	155
- a 150°C, sp 21, mín.	cP	203	112	97	81
- a 177°C, sp 21		76 - 285	57 - 285	28 - 114	28 - 114
Índice de suscetibilidade térmica	-	-1,5 a + 0,7	-1,5 a + 0,7	-1,5 a + 0,7	-1,5 a + 0,7
Ponto de fulgor, mín.	°C	235	235	235	235
Solubilidade tricloroetileno, mín.	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5
Ductibilidade a 25°C, mín.	cm	60	60	100	100
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C, 85 min.					
- Variação em massa, máx.	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5
- Ductibilidade a 25°C, mín.	cm	10	20	50	50
-Aumento do ponto de amolecimento, máx.	°C	8	8	8	8
-Penetração retida, mín.	%	60	55	55	50

Fonte: ANP (2005).

A fim de melhorar o comportamento reológico dos ligantes betuminosos, são inseridos agentes modificadores, sendo produzidos com o objetivo de transformar a mistura asfáltica menos suscetível as condições climáticas, mais flexíveis e resistentes aos esforços desencadeados pelo tráfego no pavimento. Esses agentes modificadores tendem a melhorar as

propriedades relativas à resistência à temperatura de trabalho, facilidade de espalhamento, custo competitivo de mercado (ROHDE, 2007).

Rohde (2007) define ligante modificado como o resultado do contato físico e/ou químico entre um agente modificador e um ligante betuminoso. O processamento é realizado de maneira convencional, com a finalidade de manter propriedades e estabilidades durante as etapas de produção, armazenamento, aplicação e ao longo da vida útil, através do incremento de adições como gilsonita, asfaltina, fileres, fibras ou ainda de polímeros.

A utilização de ligantes betuminosos modificados por polímero visa melhorar a performance em relação a problemas conhecidos em asfaltos convencionais, sendo o afundamento do trilho de roda e o trincamento por fadiga, que desencadeiam a deterioração da estrutura, necessitando de forma prematura a restauração do pavimento (SHINOHARA, 2017).

Esses problemas foram suprimidos pela menor suscetibilidade térmica, gerada pelo aumento do ponto de amolecimento, tornando-o mais resistente ao envelhecimento. Além de melhorar adesividade, coesão, elasticidade e a resistência a deformações permanentes. Todavia, acrescentar polímeros excessivamente pode elevar a viscosidade do ligante, alterando condições de processo e estocagem.

No Brasil, existe uma série de normativas que tratam de asfaltos modificados por polímeros, que são disponibilizados pelo DNIT e mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 - Normas DNIT de asfalto modificados por polímeros.

Normativa	Descrição
DNER-ES 385/99	Pavimentação - concreto asfáltico com asfalto polímero
DNER-ES 386/99	Pavimentação - pré- misturado a quente com asfalto polímero - camada porosa de atrito
DNER-ES 387/99	Pavimentação - areia asfalto a quente com asfalto polímero
DNER-ES 388/99	Pavimentação - micro pré-misturado a quente com asfalto polímero
DNER-ES 390/99	Pavimentação - pré-misturado a frio com emulsão modificada por polímero
DNER-ES 391/99	Pavimentação - tratamento superficial simples com asfalto polímero
DNER-ES 392/99	Pavimentação - tratamento superficial duplo com asfalto polímero
DNER-ES 393/99	Pavimentação - tratamento superficial triplo com asfalto polímero
DNER-ES 394/99	Pavimentação - macadame por penetração com asfalto polímero
DNER-ES 395/99	Pavimentação - Pavimentação - pintura de ligação com asfalto polímero
DNIT-ME 128/2010	Emulsões asfálticas catiônicas modificadas por polímeros elastoméricos
DNIT-ME 129/2011	Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico
DNER-ME 383/99	Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero ensaio Cântabro
DNER-ME 384/99	Estabilidade ao armazenamento de asfalto polímero

Fonte: Adaptado, Shinohara (2017).

Existem outras normas brasileiras específicas para ligantes modificados por polímeros, sendo elas as NBR 14896 (2019) e NBR 14948 (2003), aprovadas pela Agência Nacional do Petróleo (ANP). As especificações estão disponíveis na Tabela a seguir.

Tabela 4 - Especificações técnicas para ligantes modificados por polímeros.

GRAU (Ponto de amolecimento mín./ Recuperação elástica mín.)	MÉTODO ABNT	FLEXPAVE		
		55/75	60/85	65/90
AMOSTRAGEM VIRGEM				
Penetração 25°C, 5s, 100g, dmm	NBR-6576	45 a 70	40 a 70	40 a 70
Ponto de amolecimento mínimo °C	NBR-6560	55	60	65
Ponto de fulgor, mín. °C	NBR-11341	235	235	235
ENSALTO NO RESÍDUO DO RTFOT				
Viscosidade Brookfield - a 135°C, sp 21, 20 rpm, mín. cP		3000	3000	3000
- a 150°C, sp 21, 50 rpm, mín. cP	NBR-15184	2000	2000	2000
- a 177°C, sp 21, 100 rpm, mín. cP		1000	1000	1000
Ensaio de separação de fase, máx. °C	NBR-15166	5	5	5
Recuperação elástica a 25°C, 20cm, mín. %	NBR-15086	75	85	90
Varição em massa, máx., %	NBR-15235	1	1	1
Varição do PA, °C máx.	NBR-6560	-5 a +7	-5 a +7	-5 a +7
Porcentagem de penetração original mín.	NBR-6576	60	60	60
Porcentagem de recuperação elástica original a 25°C, mín.	NBR-15086	80	80	80

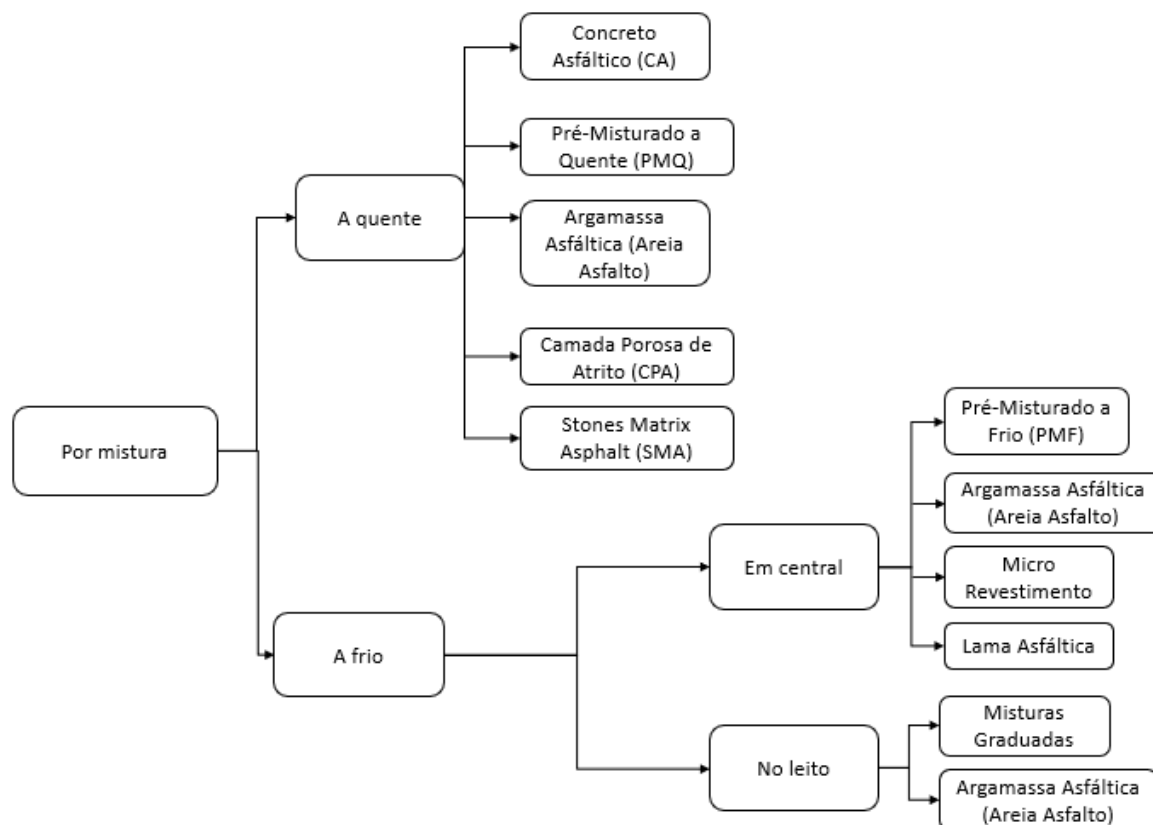
Fonte: ANP (2010).

Os agentes modificadores mais utilizados no país são polímeros como SBS (copolímero de estireno butadieno), SBR (borracha de butadieno estireno) e o EVA (copolímero de etileno acetato de vinila) (IGP, 1999 apud SHINOHARA, 2017).

Conhecido os tipos de ligantes utilizados no país, pode-se definir as misturas asfálticas brasileiras, sendo compostas pela junção de agregados minerais, constituídos por diversos tamanhos, variando a natureza mineral, com ligantes betuminosos, que de forma adequada, possibilitam uma pavimentação com requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, boa aderência pneu-pavimento, resistência a fadiga e ao trincamento térmico (BERNUCCI et al., 2010).

Existem diferentes classificações de misturas asfálticas, que são divididas a partir de três critérios, são eles: processo, estrutura interna e teor de vazios. Dependendo do processo, a mistura pode ser realizada a quente, como também a frio. Referente a estrutura interna, pode conter arranjo granulométrico ou não. E por fim, a mistura pode ser classificada pelo teor de vazios, como: aberta, semidensa ou densa (SATANA, 1992). Na sequência é ilustrado pela Figura 3 a tipificação das misturas asfálticas, e suas subdivisões.

Figura 3 - Classificação das misturas asfálticas.



Fonte: Oliveira et al. (2014).

Segundo Oliveira et al. (2014) as misturas asfálticas são realizadas com a união de agregados pétreos e o ligante betuminoso, que são inseridos e misturados em usina estacionária. Com a mistura pronta, é transportada até o local da obra, espalhada e compactada ainda aquecida, no caso de misturas a quente.

A mistura asfáltica mais utilizada no país é o Concreto Asfáltico (CA), também chamado de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) (BERNUCCI et al., 2010). Esse tipo de mistura define a temperatura do ligante conforme a característica viscoelástica, e pode ser dividido conforme função e aplicação, por meio da mudança da curva granulométrica. A mudança granulométrica é concebida conforme padrões existentes, sendo elas:

- Graduação densa: construído por curva granulométrica contínua e bem-graduada, proporcionando um esqueleto mineral com poucos vazios;
- Graduação aberta: a curva granulométrica é uniforme, ou seja, o diâmetro dos grãos possui pouca variação, promovendo à mistura grande porcentagem de vazios, tornando a mistura drenante, pois permitirá a percolação de água no interior da estrutura;

- Graduação descontínua: a curva granulométrica possui maior porcentagem de agregados graúdos comparado com as frações intermediárias, proporcionando um esqueleto mineral com maior contato entre agregados de grandes dimensões.

A figura a seguir exemplifica a diferenciação entre a composição granulométrica densa, aberta e descontínua.

Figura 4 - Padrões granulométricos de misturas asfálticas.



Fonte: Bernucci et al. (2010).

Essas graduações granulométricas definem o desenvolvimento da formulação da mistura asfáltica, que podem ser ajustadas pelo projetista, porém mantendo a coerência das características da curva. Dessa forma, as porcentagens de material passante nas malhas devem estar de acordo com os limites máximos impostos pela classificação adotada (BARRA, 2009; MOMM, 1998).

Os granulares constituem o maior volume da mistura asfáltica, representando por volta de 80 a 85% da estrutura, podem ser artificiais ou naturais. Esse percentual expressivo resulta diretamente nas características da mistura asfáltica, variando conforme granulometria, propriedades físicas e químicas do agregado (ANDRADE, 2018).

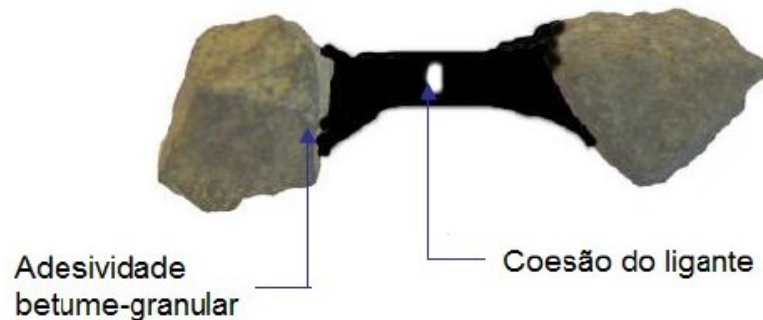
De acordo com Siroma (2018) os parâmetros dos agregados para aplicação na pavimentação dependem da distribuição granulométrica, forma e tamanho, rugosidade superficial, que tenha afinidade com o ligante betuminoso, além de dureza e resistência a ataques químicos causados pelas intempéries do local de execução da obra.

A utilização de granulares britados permitem maior intertravamento entre os grãos, provenientes das arestas vivas causadas pelo processo de britagem. Sendo assim, o atrito entre os grãos acarreta na melhoria da estabilidade do material, conseqüentemente, na resistência a deformação permanente (MOUTIER, 1992).

É importante conhecer a natureza do grão mineral, pois define a compatibilidade do agregado com o ligante betuminoso, delimitando a qualidade da adesividade entre granular e CAP. Essa qualidade é regida pela polaridade superficial natural, da rugosidade e da contaminação dos grãos minerais (NGUYEN, 2006).

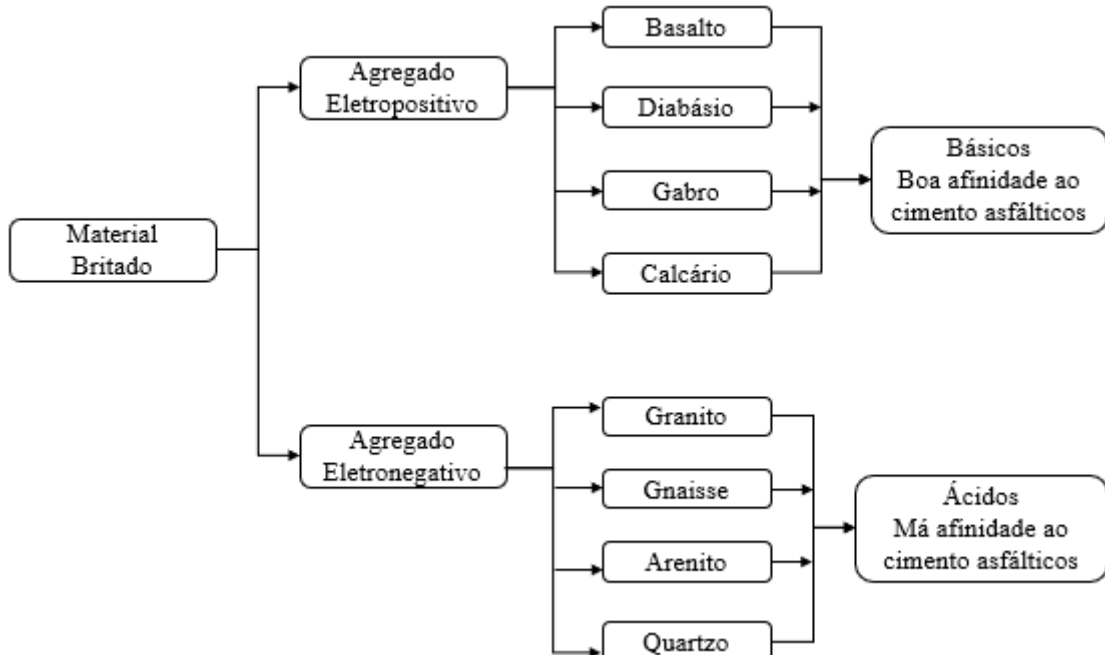
A compatibilidade entre o ligante betuminoso e agregado pétreo é determinada pela norma DNER-ME 78 (1994) que verifica a película de CAP sobre o granular, e também pelo ensaio de Lottman Modificado (AASHTO T-283,1989), esse segundo, analisa a ação deletéria da água. O fator responsável por essa adesividade é a polarização da carga elétrica da rocha que origina o granular.

Figura 5 - Adesividade ligante-agregado.



Fonte: Hamlat (2007, p. 44).

Figura 6 - Polaridade da carga elétrica da matriz rochosa.



Fonte: Santana (1992).

Os agregados empregados na pesquisa são extraídos da região norte de Joinville/SC, oriundos da empresa Rudnick Minérios LTDA. Esse granular possui natureza gnáissica, conforme caracterização realizada por Siroma (2016) e por Clara (2020). O material de gnáisse possui carga eletronegativa, sendo mais suscetível a desagregação.

Com a finalidade de promover melhora na atração elétrica entre ligante e agregado, a cal hidratada proporciona melhora da adesividade dos granulares, derivado do maior poder cimentante desse material e de sua natureza química positiva. A formação de mástique utilizando cal hidratada torna a mistura asfáltica menos vulnerável a desagregação na presença de água (MINIKOWSKI, 2018).

Em relação a trabalhabilidade das misturas asfálticas, o mástique betuminoso possui papel fundamental. É composto pela união do CAP com a fração fina da curva granulométrica (fileres), formando uma espécie de argamassa na superfície dos grãos de maior diâmetro, melhorando o desempenho de aglutinação do ligante betuminoso.

Segundo Barra (2009), os fileres melhoram a resistência a ação deletéria da água na interface ligante-agregado ou mástique agregado, quando existe atração elétrica entre ligante e agregado. E conforme poder de rigidificação do ligante elevam a performance do material a fadiga.

2.2.1 Misturas asfálticas densas

Misturas asfálticas que apresentam graduação densa são caracterizadas pela graduação bem definida e curva granulométrica contínua, proporcionando um esqueleto mineral com poucos vazios, devido aos espaços gerados pelos agregados de maiores dimensões serem preenchidos pelos agregados finos (BERNUCCI et al, 2010).

O comportamento mecânico dessas misturas é influenciado pela curva granulométrica dos agregados, pois cerca de 95% do peso é composto pelos agregados. Como misturas asfálticas densas possuem arranjo granulométrico contínuo e bem-definido, apresentando menores teores de vazios e tornando a mistura mais estável e eficiente na dissipação das cargas do tráfego, devido ao maior atrito entre os granulares (DNIT, 2006).

De acordo com Siroma (2016), formular a curva granulométrica pelo método racional imposto pela equação de Fuller-Talbot possibilita na geração de um esqueleto mineral com base nos diâmetros máximos e mínimos dos grãos que irão compô-la. O melhor preenchimento dos vazios das misturas asfálticas é reflexo dos diferentes diâmetros de granulares empregados.

Segundo Vasconcelos (2004), as misturas asfálticas densas empregadas no Brasil geralmente apresentam em torno de 4% do volume. Já as misturas mais densificadas da França contém um percentual de vazios no intervalo de 4% a 9% do volume total das misturas, pois dependem das razões de utilização de mistura e da curva granulométrica (Manuel LPC, 2007).

2.3 MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO GRAVE-BITUME

Com objetivo de melhorar o desempenho estrutural de bases granulares através da substituição deste material por misturas asfálticas a quente com baixos teores de ligante betuminoso foi criado as misturas asfálticas do tipo Grave-Bitume (GB). Este conceito foi desenvolvido em 1972, a fim de formar uma base asfáltica caracterizada inicialmente pela utilização de ligantes de baixa penetração, graduação descontínua e elevada proporção de agregado britado (MAGALHÃES, 2004).

Magalhães (2004) ainda descreve que durante os anos 80, foram realizadas a reestruturação de vias lentas das autoestradas de cidades e vilas, empregando na construção das camadas de ligação dos pavimentos asfálticos espessos, as misturas asfálticas do tipo GB, sendo pela inserção parcial ou como reforço estrutural. Esse tipo de mistura é usado há mais de 40 anos com granulometria 0/14mm e eventualmente 0/20mm, tratados com baixos teores de betume.

As misturas GB foram consideradas como a evolução dos macadames, otimizando o contato entre granulares graúdos, possibilitando melhor distribuição e dissipação dos esforços (DI BENEDETTO E CORTÉ, 2005). Inicialmente essa mistura era composta apenas por agregados triturados e baixo teor de ligante, contudo, necessitou-se a melhora do desempenho em relação a fadiga, acarretando no aumento dos teores de betume e formulação de curvas granulométricas densas.

Com a expansão da indústria cimentícia, foi desenvolvido o método das frações granulares, sendo transposto e adaptado na elaboração de concretos betuminosos usinados a quente (CBUQ). O método das frações permitiu a evolução das misturas betuminosas de alto desempenho para camadas de base ou ligação (OLARD et al., 2010; OLARD, 2012).

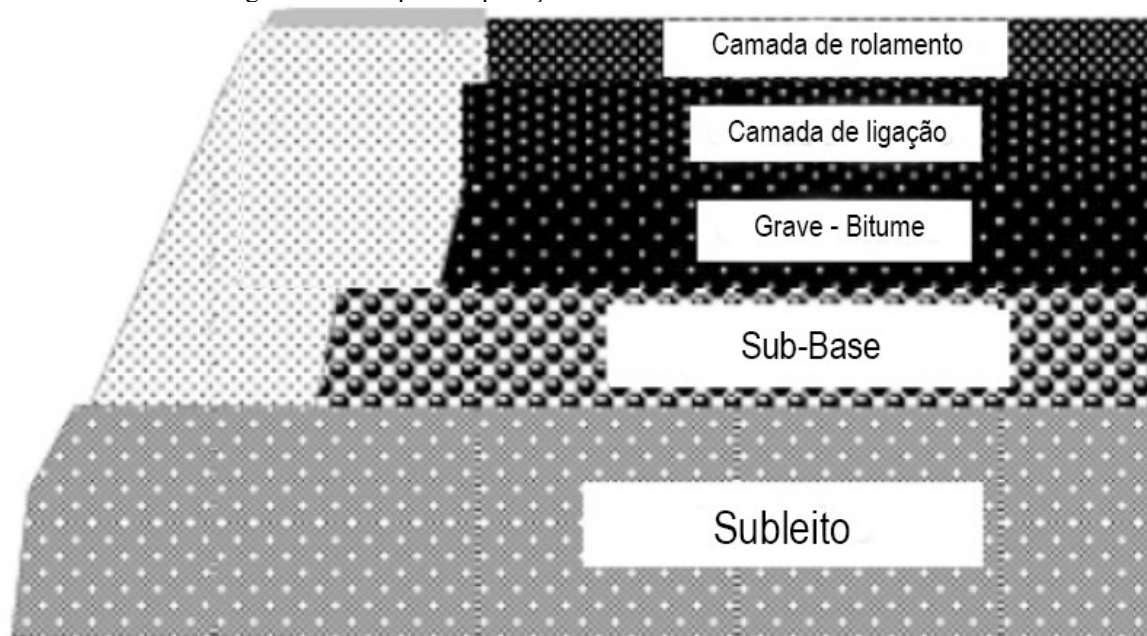
Esse tipo de misturas é destinado para camadas estruturais de base e sub-base na França, com a finalidade de garantir a dissipação dos esforços causados pelo volume e intensidade de tráfego elevado para as camadas de suporte do pavimento, normalmente nessas misturas, são utilizados ligantes de elevada consistência (MANUEL LPC, 2007).

Nesse contexto, Bachand (2018) descreve que as misturas asfálticas do tipo GB são caracterizadas pelo desempenho em relação as funções estruturais, utilizadas em camadas de ligação ou de base, devido a capacidade de reduzir as tensões nas camadas subsequentes da estrutura do pavimento, além de fornecer maior rigidez. Geralmente, as camadas estruturais são sobrepostas por uma camada de rolamento, com a finalidade de dificultar a entrada de água na estrutura do pavimento, proporcionando maior impermeabilidade.

A fundação do pavimento em mistura asfáltica, limita a propagação das fissuras e cria uma proteção a condução térmica gerada pelas tensões impostas pelo tráfego. Enquanto que as camadas de rolamento (camada superficial), tem como objetivo principal, garantir conforto e segurança aos usuários, além de impermeabilidade a estrutura.

Na Figura 7 é ilustrado um exemplo de aplicação da mistura GB em camada de base na França.

Figura 7 - Exemplo de aplicação de Grave-Bitume em camada de base.



Fonte: Meunier (2012).

Em relação as misturas asfálticas do tipo Grave-Bitume, sua principal característica é o emprego de baixos teores de ligante betuminoso (3% a 5%), comparado a outros tipos de misturas. No entanto, as misturas do tipo GB são mais propícias a rachaduras e rasgos, devido a essa baixa taxa de betume e, por isso, é necessário que exista uma camada superior para cobertura dessa mistura.

Para que o GB seja eficiente, as espessuras recomendadas das camadas devem variar conforme o diâmetro máximo dos granulares, enquanto que o teor de ligante betuminoso é

definido pelo módulo de riqueza. Em graduação 0/14, a espessura recomendada deve situar entre 8,0 cm e 12,0 cm e, na graduação 0/20 as espessuras são compreendidas na faixa de 10,0 cm até 15,0 cm *Laboratoire Ponts et Chaussées* (MANUEL LPC, 2007).

As misturas GB são classificadas conforme desempenho mecânico, contudo, o GB classe um entrou em desuso, devido à baixa performance relativa. Com a finalidade de melhorar esse parâmetro, foram criadas outras classes de misturas asfálticas do tipo Grave-Bitume, que são especificadas conforme critérios mostrados na Tabela a seguir.

Tabela 5 - Classificação de misturas asfálticas Grave-Bitume.

Mistura GB Classe	PCG (% VAZIOS) C60 (D 10 mm) C80 (D 14 mm)	RAZÃO r/R	Trilho de	Módulo de rigidez (MPa)	Deformação Admissível Na fadiga ϵ_6 (μ def)
			roda (%) ciclos * 10.000 ** 30.000		
Classe 2	≤ 11	$\geq 0,65$	≤ 10 *	$\geq 9,00$	≥ 80
Classe 3	≤ 10	$\geq 0,7$	≤ 10 *	$\geq 9,00$	≥ 90
Classe 4	≤ 9	$\geq 0,7$	≤ 10 **	$\geq 11,00$	≥ 100

Fonte: Brosseaud (2002).

A norma francesa AFNOR NF EM 13108-1 (2007) rege a classificação das misturas asfálticas do tipo GB. Normalmente são utilizados ligantes de baixa penetração, como CAP 30/45, sendo também empregado CAP 50/70 e o teor de ligante mínimo para cada classificação é mostrada na tabela a seguir.

Tabela 6 - Teor de ligante mínimo.

Mistura	GB 2	GB 2	GB 3	GB 3	GB 4	GB 4
	0/14	0/20	0/14	0/20	0/14	0/20
Módulo de riqueza	2,5	2,5	2,8	2,8	2,9	2,9
Teor de ligante mínimo para MVR 2,65 g/cm ³	4,0	4,0	4,5	4,4	4,7	4,6
Teor de ligante mínimo para MVR 2,75 g/cm ³	3,9	3,9	4,3	4,2	4,5	4,4

Fonte: Manuel LPC (2007).

Outro parâmetro importante é a formulação da curva granulométrica. A metodologia Francesa recomenda valores máximos e mínimos para a definição do esqueleto mineral da mistura GB, mostrada na Tabela 7.

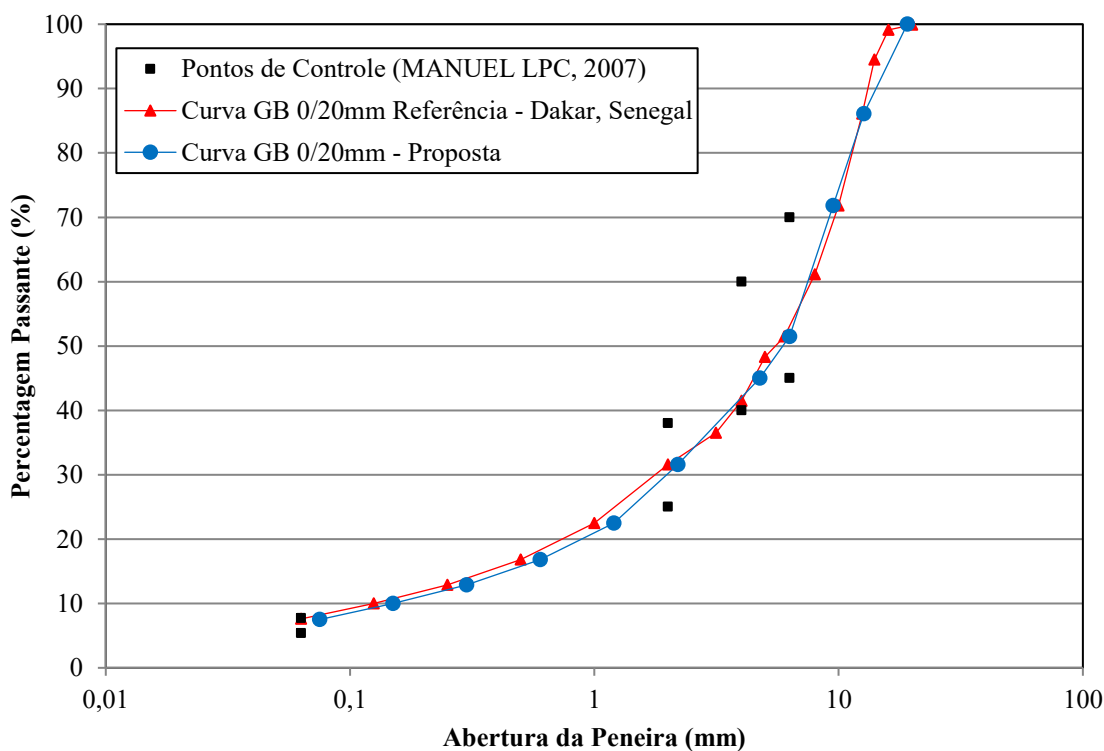
Tabela 7 - Recomendação de máximos e mínimos da curva granulométrica.

Peneira (mm)	Intervalo Mínimo (%)	Intervalo Médio (%)	Intervalo Máximo (%)
6,3	50	53	70
4,0	40	47	60
2,0	25	33	38
0,063	5,4	6,7	7,7

Fonte: Manuel LPC (2007).

Conhecido os parâmetros que regem as misturas asfálticas do tipo GB, foi utilizada como referência de estudo a curva granulométrica do tipo GB 0/20 mm, esta curva granulométrica é ilustrada na Figura 8, sendo aplicada em obra pública de Dakar em 2012, no país de Senegal. O *Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux* (IFSTTAR, 2012) foi responsável pelo desenvolvimento do projeto e também a respectiva execução da obra.

Figura 8 - Comparativo entre as curvas granulométricas de estudo e de Dakar.



Fonte: Adaptado, IFSTTAR (2012).

No sentido de melhorar o desempenho dos pavimentos brasileiros, a pesquisa visa implementar a mistura GB em camadas de ligação, com o objetivo de avaliar os parâmetros conforme critérios do DNIT, que são apresentados nos próximos capítulos.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS GRANULARES

O material pétreo utilizado neste estudo é proveniente do processo de britagem realizado na empresa Rudnick Minérios Ltda., parceira do LDTPav. Esta jazida localiza-se em regiões mineralógicas de transição entre o Complexo Granulítico de Santa Catarina e o Granito Pirai no município de Joinville/SC (Figura 9). Contudo, a matriz rochosa do material é classificada como gnaiss (MEURER, 2015).

Figura 9 - Localização da jazida.



Fonte: Meurer (2015).

A Figura 10 ilustra a central de britagem da empresa supracitada.

Figura 10 - Britador Rudnick Minérios LTDA.



Fonte: Meurer (2015).

Para conhecer as propriedades dos granulares utilizados no estudo foram realizados ensaios normatizados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) na pesquisa de Clara (2020) (Tabela 8), que avaliaram as características do material para aplicação em pavimentação, em que frações do mesmo lote foram utilizadas nesta pesquisa.

Tabela 8 - Resultados de caracterização dos agregados.

Ensaio	Normativa	Resultado		Limite
		Quantitativo	Qualitativo	
Desgaste por Abrasão Los Angeles	DNER – ME 035/98 e DNER – ME 037/97	17,50%	-	Máx. 50%
Índice de forma	ABNT NBR 7809/2006	0,6	Boa cubicidade	Mín. 0,5
Resistência ao ataque químico (Durabilidade)	DNER – ME 089/94 e DNER – ME 037/97	5,3%	-	Máx. 12%
Adesividade ao ligante betuminoso	DNER – ME 078/98	-	Má	
Equivalência de areia	DNER – ME 054/97	78%	-	-
Teor de material pulverizado	DNER – ME 266/97 e DNER – ME 037/97	0,40%	-	Máx. 1,0%
Absorção	DNER – ME 081/98	0,50%	-	-

Fonte: Clara (2020).

Os resultados obtidos demonstram que o material está adequado para aplicação em obras de pavimentação, de acordo com os limites normativos indicados na Tabela 8, exceto pelo fato de apresentar má adesividade. Assim, faz-se necessário corrigir este problema, a partir da adição de melhoradores de adesividade na dosagem da mistura asfáltica ou com a substituição

parcial de granulares com natureza eletropositiva, que permitam a formação de dipolos que possibilitem atração química com o ligante betuminoso de carga elétrica predominantemente negativa.

Como mencionado no capítulo anterior, materiais pétreos com origem gnáissica apresentam carga eletronegativa (Figura 6). Desta forma, foi realizada a substituição parcial de finos passantes na peneira 0,075 mm por cal hidratada CH-I, que melhoram a adesividade das frações granulares gnáissicas ao ligante betuminoso, em razão da carga eletropositiva do material. Como consequência, formam um dipolo elétrico de atração química entre o conjunto granular-ligante, além de auxiliar no aumento de rigidez do mástique formado, devido ao aumento da espessura da película de ligante que envolve os granulares, proporcionando maior resistência à desagregação da mistura (MINIKOWSKI, 2018; SANTANA, 1992).

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE BETUMINOSO

Foi utilizado o ligante betuminoso denominado POLIFLEX 60/85-E, tendo em sua composição 4% de adição de polímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS), fornecido pela empresa CBB asfaltos, também parceira do LDTPav, localizada na cidade de Curitiba/PR. Os resultados da caracterização da amostra utilizada são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Propriedades do ligante betuminoso POLIFLEX 60/85-E.

Característica	Unidade	Método de ensaio	Resultados	Limite				
				Min.	Máx.			
Ponto de amolecimento	°C	NBR 6560	65,4	55	-			
Penetração, 100g, 5s, 25°C	0,1 mm	NBR 6576	40	40	70			
Recuperação elástica, 20 cm, 25°C	%	NBR 15086	90	75	-			
Viscosidade Brookfield	135°C – spindle 21, 20 rpm	NBR 15184	1605	-	3000			
	150°C – spindle 21, 50 rpm					873	-	2000
	177°C – spindle 21, 100 rpm					312	-	1000
Ponto de fulgor	°C	NBR 11341	268	235	-			
Ensaio de separação de fase	Δ P.A. (°C)	NBR 15166	1,2	-	5			
Solubilidade em tricloroetileno	% (m/m)	NBR 14855	99,9	-	-			
Massa específica a 25°C	kg/m ³	NBR 6296	1,014	-	-			

Fonte: Adaptado, CBB Asfaltos (2021).

Foram também realizados ensaios após envelhecimento do ligante com o equipamento Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT), em que os resultados são apresentados na Tabela 10.

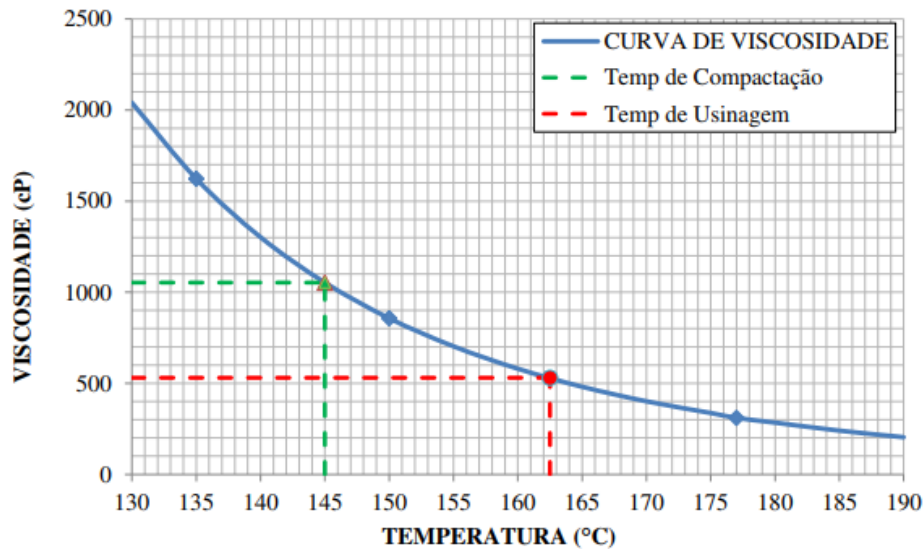
Tabela 10 - Propriedades ligante POLIFLEX 60/85-E após envelhecimento.

Característica	Unidade	Método de ensaio	Resultados	Limite	
				Min.	Máx.
Varição de massa	%	NBR 15235	-0,144	-1,0	1,0
Varição do ponto de amolecimento	°C	NBR 6560	2,3	-5,0	7,0
Porcentagem de recuperação elástica original, 20 cm, 25°C	%	NBR 15086	98,2	80	-
Porcentagem de penetração original, 25°C	%	NBR 6576	79,6	60	-

Fonte: Adaptado, CBB Asfaltos (2021).

A pesquisa realizada por Unisesky (2018) utilizou esse mesmo ligante. Logo, foi utilizado o gráfico de viscosidade *versus* temperatura da referência supracitada, com a finalidade de determinar a temperatura de usinagem e de compactação (Figura 11).

Figura 11 - Curva de viscosidade *versus* temperatura.



Fonte: Unisesky (2018).

Com base nas informações gráficas, foram adotadas as temperaturas de 165°C para usinagem do ligante betuminoso e de 145°C para compactação da mistura asfáltica, e de 178°C para os granulares, ou seja, 13°C acima da temperatura de usinagem do ligante, compreendendo o intervalo de 10°C a 15°C estabelecido pelo DNIT (2006).

3.3 CURVA GRANULOMÉTRICA

A curva granulométrica utilizada neste estudo foi concebida conforme critérios estabelecidos pela normativa francesa (MANUEL LPC, 2007), para misturas asfálticas do tipo Grave-Bitume (GB). Foi tomado como base um projeto executado em obra pública na cidade de Dakar, capital do Senegal. Porém, as aberturas das peneiras foram adaptadas conforme disponibilidade do mercado nacional.

A curva granulométrica foi formulada pelo método racional, também denominado por método teórico. A aplicação deste método consiste na definição das frações que irão compor o traço da mistura asfáltica, de modo que as frações menores preencham gradualmente os vazios formados pelas partículas de maior dimensão (ARALDI, 2017).

Nesse âmbito, os diâmetros máximos e mínimos da composição granulométrica são fixados conforme as características da mistura asfáltica desejada e a necessidade do projetista. Para tanto, utilizam-se as Equações 3.1 e 3.2 de Fuller-Talbot, com a finalidade de definir a composição granulométrica.

$$n = \frac{\log(\%p_i) - \log(100)}{\log\left(\frac{0,075}{D}\right)} \quad (3.1)$$

$$\%p = a \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad (3.2)$$

Onde:

$\%p_i$: Percentagem em peso que passa em uma dada malha de peneira;

a: Constante, tomada igual a 100;

d: Abertura de uma dada peneira (mm);

D: Diâmetro máximo, abertura da peneira que passa 100% (mm);

n: Expoente indicador da graduação da curva.

As Equações 3.1 e 3.2 proporcionam curvas granulométricas contínuas e com proporção adequada entre as frações. Para determinação do tipo de graduação, o DNIT (2006) indica se a graduação é densa, aberta, ou do tipo macadame, conforme limites do expoente da curva descritos a seguir:

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

Por se tratar de uma curva granulométrica GB 0/20 mm, o diâmetro máximo (D) adotado foi de 19,1mm, enquanto o mínimo (d) de 0,075mm. O Manual LPC (2007) estabelece alguns valores limites para curvas de Grave-Bitume, dessa maneira, adotou-se o valor de 7,5% de material passante na peneira de menor diâmetro. Aplicando esses parâmetros na Equação 3.1, tem-se um valor de n igual a 0,47, que caracteriza uma granulometria de graduação densa.

A Tabela 11 apresenta a composição granulométrica adotada no estudo, bem como os parâmetros limites do Manual LPC (2007), denominados pontos de controle.

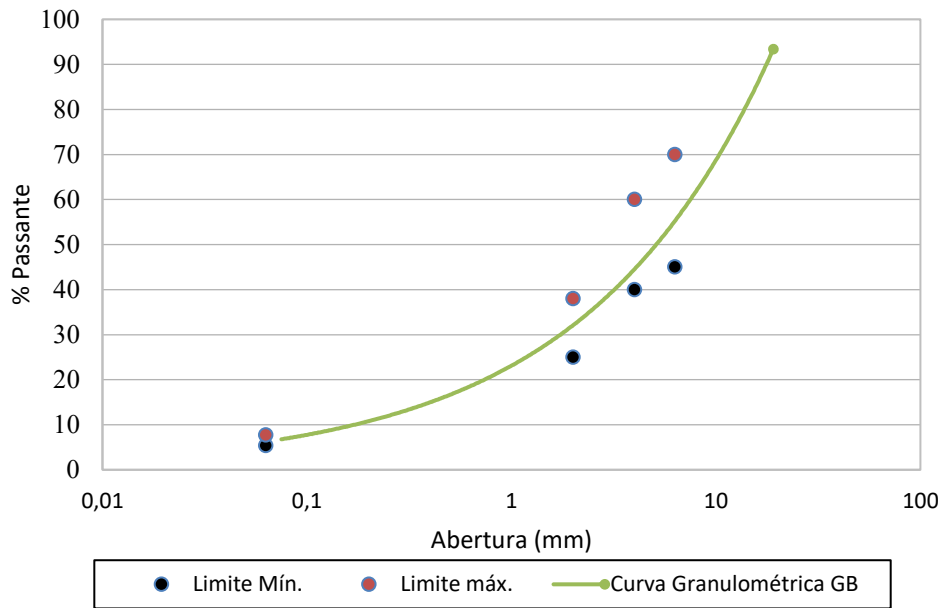
Tabela 11 - Composição granulométrica Grave-Bitume.

Aberturas das Peneiras (mm)	% Passante	% Retida	Pontos de controle	
			Min.	Máx.
19,1	100,0	0,0	-	-
12,7	86,1	13,9	-	-
9,5	71,8	14,3	-	-
6,3	51,5	20,3	45	70
4,8	45,0	6,5	40	60
2,2	31,6	13,4	25	38
1,2	22,5	9,1	-	-
0,6	16,8	5,7	-	-
0,3	12,9	3,9	-	-
0,15	10,0	2,9	-	-
0,075	7,5	2,5	-	-
Fundo	-	7,5	5,4	7,7

Fonte: Autor.

A representação gráfica da curva granulométrica apresentada na Tabela 11 é ilustrada na Figura 12.

Figura 12 - Curva granulométrica formulada para a mistura GB 0/20 mm.



Fonte: Autor.

Foi realizada a substituição parcial de 2,0% da fração passante na peneira de abertura de 0,075mm por cal hidratada CH-I, pelas razões já explanadas no tópico 3.1.

3.4 ENSAIOS LABORATORIAIS

3.4.1 Massa volumétrica real

Para obtenção da massa volumétrica real das misturas formuladas, foi utilizada a norma brasileira NBR 15619 (2016), que trata da determinação da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas. Foram testados seis teores de ligante betuminoso, a saber: 3,90%, 4,22%, 4,54%, 4,86%, 5,18% e 5,50%.

Para a realização do ensaio foram separadas amostras de materiais graúdos e finos, totalizando 635 g (Figura 13).

Figura 13 - Separação das amostras.



Fonte: Autor.

Com as amostras devidamente separadas, o ligante foi aquecido na temperatura de usinagem estabelecido na curva de viscosidade (Figura 11). É importante ressaltar que se deve realizar o aquecimento dos recipientes e utensílios utilizados na execução da mistura, como espátulas e recipiente metálico, a fim de evitar a troca de calor e o resfriamento precoce dos materiais, o que diminuiria a trabalhabilidade do processo.

Aquecidos os materiais, é realizada a mistura das frações graúdas com o ligante betuminoso, a fim de facilitar a molhabilidade sobre a superfície de contato, criando uma película adesiva. Com ao envolvimento completo das partículas graúdas, são adicionadas as frações finas, juntamente com a cal. Dessa forma, os finos ficam em suspensão na película de ligante formada sobre os granulares, formando o mástique betuminoso.

A formação do mástique contribui na formação de misturas asfálticas com maior união entre os granulares, devido à formação de películas mais robustas, garantindo maior resistência aos arrancamentos ocasionados pela passagem do tráfego (BARRA, 2005), além de melhorar o desempenho à desagregação quando submetida à ação deletéria da água. A Figura 14 apresenta a mistura em processo de produção.

Figura 14 - Mistura asfáltica em processamento.

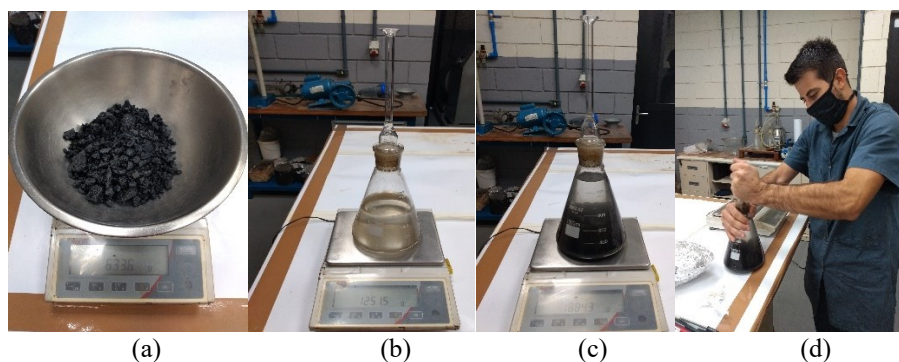


Fonte: Autor.

Ocorrido o processo de mistura, espera-se a amostra resfriar em temperatura ambiente durante 24 horas. Por se tratar de um ensaio realizado com a mistura em estado solto, desgrumam-se as partículas, mas sem gerar a quebra do granular e então, a amostra é pesada em seu estado seco.

Conhecida a massa seca, utiliza-se um picnômetro com rolha calibrado, preenchendo-o com água até aproximadamente 800 ml e afere-se a massa do conjunto. Em seguida, a amostra é adicionada em estado solto dentro do picnômetro com água, então é pesada novamente. Posteriormente, é necessário a remoção do excesso de bolhas de ar, por meio de uma haste metálica que desprende as bolhas em contato com as partículas, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Processo aferição da massa específica real: (a) Mistura solta, (b) Picnômetro com água, (c) Picnômetro com água e mistura asfáltica solta e, (d) Processo de liberação das bolhas.



Fonte: Autor.

Por fim, o picnômetro é inserido no dessecador da bomba de vácuo durante 30 minutos. Passado esse tempo, preenche-se com água até o nível estipulado na rolha e faz-se a última

aferição da massa do conjunto. A bomba de vácuo em funcionamento é mostrada na Figura 16, juntamente com a aferição da massa total do conjunto.

Figura 16 - Sistema de vácuo com o conjunto da amostra e picnômetro: (a) bomba de vácuo, (b) pesagem da amostra.



(a)

(b)

Fonte: Autor.

Com todas as etapas do ensaio desenvolvidas, calcula-se a massa volumétrica real da mistura asfáltica, conforme a Equação 3.3.

$$MVR = \frac{m_2 - m_1}{1000 \cdot V_{pic} - \frac{m_3 - m_2}{\rho_{\text{água}}}} \quad (3.3)$$

Onde:

MVR: Massa volumétrica real da mistura asfáltica (g/cm³);

m_1 : Massa do conjunto picnômetro com água (g);

m_2 : Massa do conjunto picnômetro com água e amostra (g);

m_3 : Massa do conjunto picnômetro com água e amostra após a bomba de vácuo (g);

V_{pic} : Volume do picnômetro calibrado (cm³);

$\rho_{\text{água}}$: Massa específica da água (g/cm³).

3.4.2 Ensaio Marshall

Segundo Senço (2008), a metodologia Marshall foi desenvolvida por Bruce Marshall e foi adotada pelo *United States Army Corps of Engineers* (USACE) para construção de aeroportos militares durante a Segunda Guerra Mundial, com o objetivo de realizar o controle de qualidade a partir do teor ótimo de ligante betuminoso na mistura asfáltica.

Este método é utilizado oficialmente no Brasil pelo DNIT para definição do teor de serviço do ligante betuminoso a ser utilizado na dosagem das misturas asfálticas. O ensaio Marshall é regido pela norma DNER ME 043 (1995), a qual estabelece a produção de corpos de prova cilíndricos, submetidos à compactação por impacto, com o uso do soquete Marshall.

Apesar desta metodologia ser largamente difundida no país, apresenta deficiências, principalmente em relação à forma de compactação das amostras, pois em campo a compactação é realizada por amassamento, enquanto que o soquete Marshall incorre em impacto, induzindo à quebra de frações granulares e ao excesso de densificação do material (BARRA, 2009).

Para a produção dos corpos de prova, foram previamente definidos seis teores de ligante betuminoso, a saber: 3,90%, 4,22%, 4,54%, 4,86%, 5,18% e 5,50%, tomando como base o teor de 4,22% indicado como de partida pelo Manuel LPC (2007) para misturas do tipo Grave-Bitume (GB). O teor de 3,90% foi também testado, pois como foram feitas modificações na curva granulométrica desta pesquisa em relação à originalmente aplicada em Dakar, no Senegal (Figura 8), fez-se necessário observar o comportamento do material em uma dosagem um pouco inferior à 4,22%, a fim de analisar se havia viabilidade técnica no uso deste teor.

Todas as dosagens testadas foram escolhidas em razão do protocolo rotineiro já adotado pelo LDTPav para estudos compreendendo misturas com granulometria densa, sendo estabelecido um intervalo de 0,32% entre os percentuais adotados. Este procedimento permite uma proximidade maior entre os resultados obtidos, pois trata-se de um intervalo inferior a 0,50% sugerido pela norma DNER ME 043 (1995), possibilitando melhor entendimento das curvas dos parâmetros de dosagem.

Os procedimentos de separação das frações granulares em graúdas e finas, além das temperaturas de aquecimento dos materiais, tanto no processo de usinagem quanto de compactação, seguem as mesmas prerrogativas estabelecidas na seção 3.4.1, com a única distinção em relação ao peso total de material utilizado, pois cada corpo de prova Marshall deve ser produzido com 1200 g. A realização da mistura dos materiais se dá conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 - Procedimento de mistura dos materiais no processo de usinagem.



Fonte: Autor.

Após o processo de usinagem finalizado, as misturas asfálticas são reconduzidas à estufa por 2 horas, porém, à temperatura de compactação estabelecida na curva de viscosidade do ligante betuminoso (Figura 11), neste caso de 145°C.

Antes de iniciar a compactação do material, retira-se o molde, colar e base que receberão a amostra, todos devidamente aquecidos na mesma temperatura mencionada, untam-se as paredes internas das referidas peças com uma película de óleo diesel ou vaselina, a fim de facilitar o desmolde após a compactação. Ainda, é inserido papel-filtro na base do molde, para evitar aderência e perda de material em contato com a superfície. Após cumpridas estas etapas, a mistura asfáltica é colocada no interior do molde (Figura 18).

Figura 18 - Visão geral do processo de inserção da mistura asfáltica no molde.



Fonte: Autor.

Uma vez a mistura inserida no interior do molde, devem ser aplicados 25 vigorosos golpes com espátula, com intuito de pré-densificar o material e nivelar a superfície que será

compactada pelo soquete Marshall, sendo 15 golpes circundando as bordas do molde e 10 no centro. Então, novamente é posicionado um papel-filtro, agora sobre a superfície superior, para evitar a perda de material no contato com o soquete Marshall, conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - Mistura asfáltica com papel-filtro e pronta para o processo de compactação.



Fonte: Autor.

Durante o processo de compactação por impacto do soquete Marshall são aplicados 75 golpes em cada face do corpo de prova, totalizando 150 golpes. No caso desta pesquisa, por se tratar de um soquete elétrico, a energia de compactação não depende do operador, proporcionado a mesma energia aplicada em todas as amostras.

Após a compactação, o corpo de prova é extraído do molde com o uso de um macaco hidráulico, evitando avarias na amostra.

Figura 20 - Extração do corpo de prova com auxílio de macaco hidráulico.



Fonte: Autor.

Para cada teor de ligante betuminoso foram produzidos 5 corpos de prova, perfazendo um total de 30 unidades (Figura 21).

Figura 21 - Corpos de prova Marshall.



Fonte: Autor.

Para definição do teor de ligante de trabalho, é necessária a aferição das propriedades físicas das amostras, logo, os corpos de prova devem ser pesados e medidos individualmente. As medições são realizadas com o auxílio de um paquímetro, sendo retiradas três medidas em pontos distintos (Figura 22), adotando a média aritmética como altura do corpo de prova. O diâmetro é fixo em 10,14 cm para todas as unidades.

Figura 22 - Medição das amostras.



Fonte: Autor.

Entre as propriedades físicas a serem determinadas está a massa específica aparente (MEA) e, a massa volumétrica real (MVR) já descrita na seção 3.4.1. Neste contexto, tem-se que a MEA é determinada pela Equação 3.4.

$$MEA = \frac{P_S}{\pi.R^2.h_m} \quad (3.4)$$

Onde:

MEA: massa específica aparente seca;

P_S : peso seco do corpo de prova (g);

R: raio do corpo de prova (cm);

h_m : altura média (cm).

A partir da relação entre a MEA e a MVR são determinados o teor de vazios (%V) (Equação 3.5), vazios do agregado mineral (VAM) (Equação 3.6), vazios cheios com betume (VCB) (Equação 3.7) e, por fim, relação betume/vazios (RBV) (Equação 3.8).

$$\%V = \frac{100.(MVR - MEA)}{MVR} \quad (3.5)$$

Onde:

%V: teor de vazios (%);

MVR: massa volumétrica real do corpo de prova (g/cm^3);

MEA: massa específica aparente do corpo de prova (g/cm^3);

$$VCB (\%) = \frac{MEA.\%L}{D_{\text{ligante}}} \quad (3.6)$$

Onde:

VCB: vazios cheio com betume (%);

MEA: massa volumétrica aparente do corpo de prova (g/cm^3);

%L: teor de ligante (%);

D_{ligante} : massa específica do ligante betuminoso (g/cm^3).

$$VAM (\%) = \%V + VCB \quad (3.7)$$

Onde:

VAM: vazio do agregado mineral (%);

%V: teor de vazios (%);

VCB: vazios cheios com betume (%).

$$RBV (\%) = \frac{100.VCB}{VAM} \quad (3.8)$$

Onde:

RBV: relação betume/vazios (%);

VCB: vazios cheios com betume (%);

VAM: vazios do agregado mineral (%).

Após a determinação das propriedades físicas, é realizado então o processo para avaliar os parâmetros mecânicos das misturas asfálticas. Para tanto, os corpos de prova são imersos em banho-maria a 60°C durante 30 a 40 minutos (Figura 23) e em seguida, conduzidos à prensa Marshall. No caso desta pesquisa, o tempo de imersão foi de 30 minutos.

Figura 23 - Corpos de prova em banho-maria.



Fonte: Autor.

A prensa Marshall (Figura 24) é constituída por um pistão hidráulico na parte inferior, que avança com velocidade constante de forma eletromecânica. Na parte superior, possui um anel dinamométrico para determinação da carga de ruptura dos corpos de prova, também denominada de estabilidade. Um extensômetro analógico é posicionado sobre a superfície do prato de apoio, para aferir deslocamentos durante o processo de ruptura, sendo atribuído o nome fluência.

Figura 24 - Prensa Marshall.



Fonte: Autor.

O processo de ruptura consiste em posicionar o corpo de prova saturado em um molde metálico circular, no qual é aplicado carregamento monotônico por compressão diametral, até o rompimento da amostra (Figura 25).

Figura 25 - Procedimento de ruptura do corpo de prova.



Fonte: Autor.

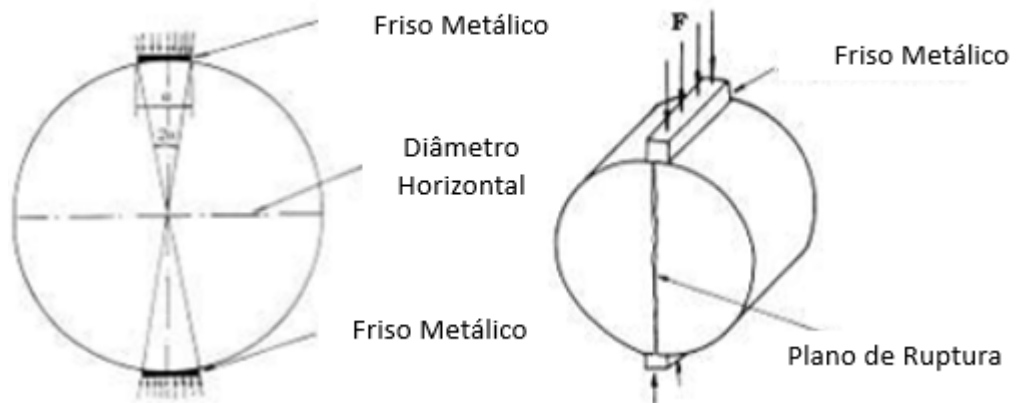
3.4.3 Ensaio de resistência a tração indireta por compressão diametral

De acordo com Medina (1997), o ensaio de resistência à tração indireta foi desenvolvido por Fernando Lobo Carneiro, professor na cidade do Rio de Janeiro. Aplicado inicialmente apenas para corpos de prova produzidos em concreto de cimento Portland, foi incorporado também ao estudo das misturas asfálticas, devido à simplicidade e rapidez de execução. É regido pela norma DNIT-ME 136 (2018), utilizando corpos de prova produzidos pelo método Marshall.

De acordo com Morilha Junior (2004), durante o ensaio ocorre um estado biaxial de tensões, ocorrendo tração no sentido horizontal e compressão no sentido vertical do corpo de prova.

A ruptura dos corpos de prova ocorre também na prensa Marshall. Contudo, as amostras não são submetidas à prévia saturação em banho-maria, e o aparato de encaixe das unidades possui frisos metálicos posicionados nas geratrizes superior e inferior, conforme ilustrado na Figura 26, a fim de gerar o esforço de tração indireta no sentido horizontal durante a aplicação do carregamento à compressão diametral no sentido vertical. O conjunto de execução é mostrado na Figura 27.

Figura 26 - Esquema do ensaio de resistência à tração indireta por compressão diametral.



Fonte: DNIT-ME 136 (2018).

Figura 27 - Ensaio de resistência à tração indireta.



Fonte: Autor.

Devidamente posicionado na prensa, aplica-se a carga vertical de compressão, de maneira contínua até a ruptura completa, separando o corpo de prova em duas partes, de acordo com o plano diametral vertical (Figura 28), anotando-se os resultados da carga suportada pelas amostras.

Figura 28 - Ruptura no plano diametral vertical.



Fonte: Autor.

Para o cálculo da resistência à tração indireta utiliza-se a Equação 3.9.

$$\sigma_R = \frac{2F}{100 \cdot \pi \cdot D \cdot h} \quad (3.9)$$

Onde:

σ_R : resistência à tração indireta (MPa);

F: carga de ruptura (N);

D: diâmetro do corpo de prova (cm);

h: altura média do corpo de prova (cm).

Neste estudo foram produzidos 5 corpos de prova para os dois prováveis teores de trabalho de ligante betuminoso, em função da interpretação dos resultados fornecidos pela metodologia Marshall, totalizando 10 amostras. Os resultados são apresentados em detalhes no próximo capítulo.

3.4.4 Resistência à ação da água no ensaio de Duriez

Para avaliar a ação deletéria da água nas misturas asfálticas testadas, utilizou-se o ensaio de Duriez, considerando a normativa francesa AFNOR NF EN 12697-12 (2018). Esse experimento consiste na comparação entre 6 amostras condicionadas e outras 6 não-condicionadas, com objetivo de avaliar a perda da resistência devido à presença de água. Para tanto, são produzidos doze corpos de prova para cada teor de ligante betuminoso, sendo que cada amostra contém massa total de 1000 g.

Os procedimentos de separação das frações granulares, aquecimento dos materiais, mistura durante o processo de usinagem (Figura 29), e de espera por 2 horas até o momento da compactação, seguem as mesmas prerrogativas já tratadas nas seções 3.4.1 e 3.4.2.

Figura 29 - Mistura asfáltica em produção.



Fonte: Autor.

Após a mistura, a amostra é inserida em um molde cilíndrico acoplado a dois êmbolos metálicos (Figura 30), previamente untados com uma película de óleo diesel ou vaselina, aguardando na estufa a estabilização da temperatura para o processo de compactação.

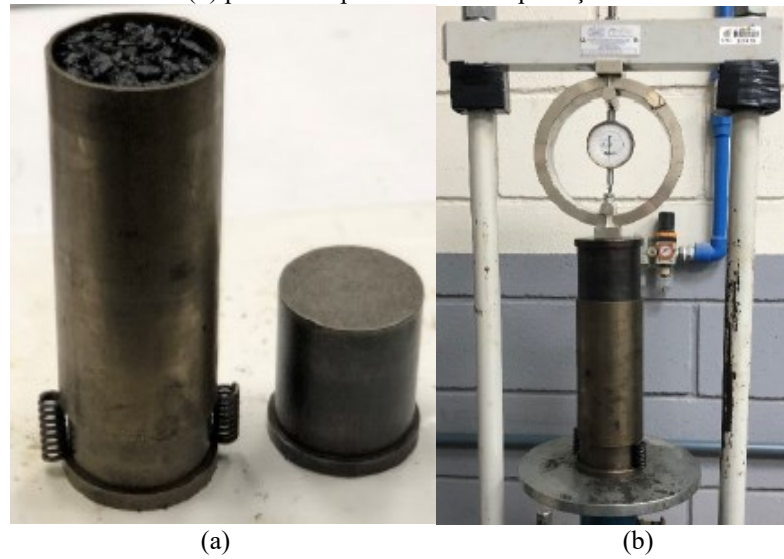
Figura 30 - Molde e êmbolos utilizados na confecção do corpo de prova.



Fonte: Autor.

O procedimento de compactação é executado a duplo pistão (Figura 31), aplicando-se uma carga constante de 60 kN, a ser atingida em menos de um minuto, e deve ser mantida constante durante cinco minutos.

Figura 31 - Sequência de compactação por duplo pistão:(a) molde contendo a mistura asfáltica e (b) prensa em processo de compactação.



Fonte: Autor.

A extração dos corpos de prova é realizada com o auxílio do mesmo macaco hidráulico utilizado na desmoldagem na metodologia Marshall (Figura 20). As amostras devem ficar em período de repouso por mínimo 16 horas de acordo com Manuel LPC (2007), contudo, nesta pesquisa foi respeitado o período de cinco dias, com o intuito de que as reações químicas entre a cal hidratada o conjunto granular-ligante fossem estabelecidas em condição adequada, bem como a ancoragem do ligante betuminoso à superfície dos granulares.

Após o período de repouso mencionado, os 12 corpos de prova de cada teor, totalizando 72 amostras (Figura 32) foram divididos em conjuntos de 6 amostras a serem condicionadas por imersão na água e 6 amostras não condicionadas.

Figura 32 - Corpos de prova produzidos no ensaio Duriez.



Fonte: Autor.

Porém, antes de imergir as amostras em água, os corpos de prova devem ser jateados com ar comprimido para desobstrução dos vazios. Ato contínuo, conduzidos a um dessecador com água, acoplado a uma bomba de vácuo (Figura 33). Neste procedimento, os corpos de prova são mantidos sob uma pressão constante de 350 mmHg por 2 horas, a fim de retirar o ar aprisionado nos vazios existentes, e conseqüente saturação. Posteriormente à saturação prévia a vácuo, as amostras são imersas em um recipiente com água em ambiente climatizado a 18°C por 7 dias consecutivos. No caso das amostras sem condicionado na água, estas devem permanecer em ambiente com temperatura controlada também a 18°C e umidade do ar com $50\% \pm 10\%$.

Figura 33 - Saturação dos corpos de prova condicionados por imersão: (a) sistema de bomba de vácuo; (b) remoção das partículas de ar contidos nos vazios da mistura.



(a)

(b)

Fonte: Autor.

Após a conservação das amostras em ambiente climatizado durante 7 dias, tem-se que são conduzidas ao processo de ruptura por compressão simples na mesma prensa Marshall utilizada nas seções 3.4.2 e 3.4.3 (Figura 34).

Figura 34 - Ruptura do corpo de prova no ensaio Duriez.



Fonte: Autor.

Conhecendo a carga aplicada no corpo de prova que proporcionou a ruptura e as suas respectivas dimensões, calcula-se a resistência de cada amostra a partir da Equação 3.10.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.10)$$

Onde:

σ : tensão de ruptura (kPa);

F: carga de ruptura atingida (kgf);

A: área da seção transversal do corpo de prova, em cm².

De posse dos dados de ruptura dos corpos de prova, faz-se a relação entre a resistência das amostras condicionadas em imersão na água (r) e sem imersão (R).

De acordo com o Manual LPC (2007), as misturas asfálticas do tipo Grave-Bitume (GB) devem apresentar uma perda de resistência máxima de 30% ou 0,3, isto é, conservando no mínimo 70% ou 0,7 de sua resistência original.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 MASSA VOLUMÉTRICA REAL

Os resultados da MVR são de fundamental importância, pois são utilizados juntamente com os resultados da massa específica aparente (MEA) determinados no ensaio Marshall, para o cálculo do teor de vazios que cada corpo de prova apresenta.

Cabe ressaltar que para duas amostras ensaiadas a cada dosagem de ligante betuminoso, a diferença entre os resultados deve ter no máximo 0,002 g. A Tabela 12 apresenta os resultados médios obtidos.

Tabela 12 – Resultados da MVR.

TEOR DE LIGANTE (%)	MÉDIA (g)
3,90	2,592
4,22	2,573
4,54	2,554
4,86	2,543
5,18	2,535
5,50	2,515

Fonte: Autor.

Analisando a Tabela 12, é notório que o acréscimo de teor ligante na curva granulométrica tende a apresentar diminuição linear do valor de MVR, devido à substituição gradual de material granular por ligante betuminoso, que possui baixo valor de massa volumétrica real (1,014 g/cm³; Tabela 9).

4.2 ENSAIO MARSHALL

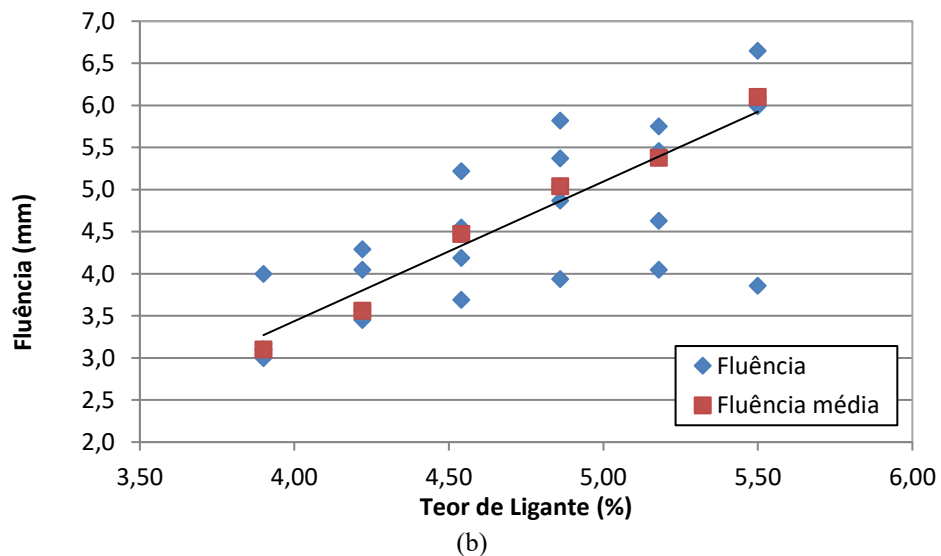
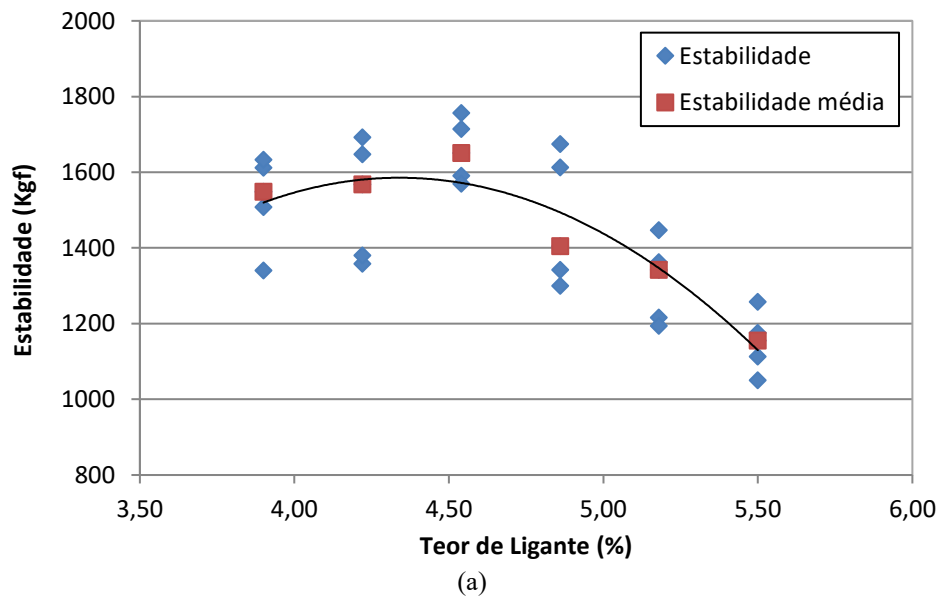
Para balizar a escolha do teor de trabalho das misturas asfálticas GB testadas, foram considerados valores de referência indicados normativamente (DNIT-ES 031, 2006), para aplicação em camadas de ligação nas estruturas de pavimento (Tabela 13).

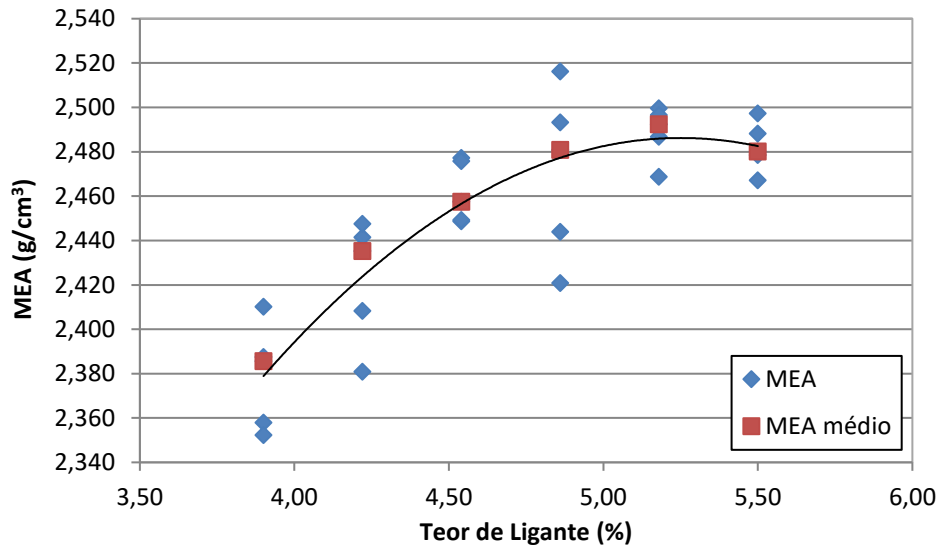
Tabela 13 - Parâmetros de dosagem para camadas de ligação.

CARACTERÍSTICAS	MÉTODO DE ENSAIO	CAMADA DE LIGAÇÃO (BINDER)
Porcentagem de vazios (%)	DNER-ME 043	4 a 6
Relação betume/vazios	DNER-ME 043	65 - 72
Estabilidade, mínima, (kgf) (75 golpes)	DNER-ME 043	500
Resistência à Tração por Compressão Diametral Estática a 25°C, mínima, MPa	DNER-ME 138	0,65

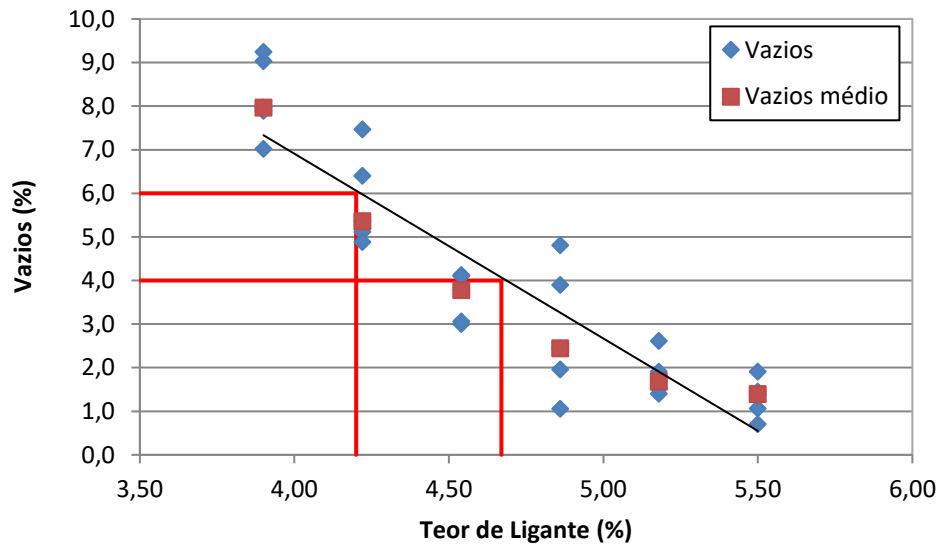
Fonte: Adaptado, DNIT ES 031 (2006).

Figura 35 - Resultados do ensaio Marshall: (a) Estabilidade; (b) Fluência; (c) Massa Específica Volumétrica Aparente; (d) Teor de Vazios; (e) Relação Betume/Vazios; (f) Vazios do Agregado Mineral.

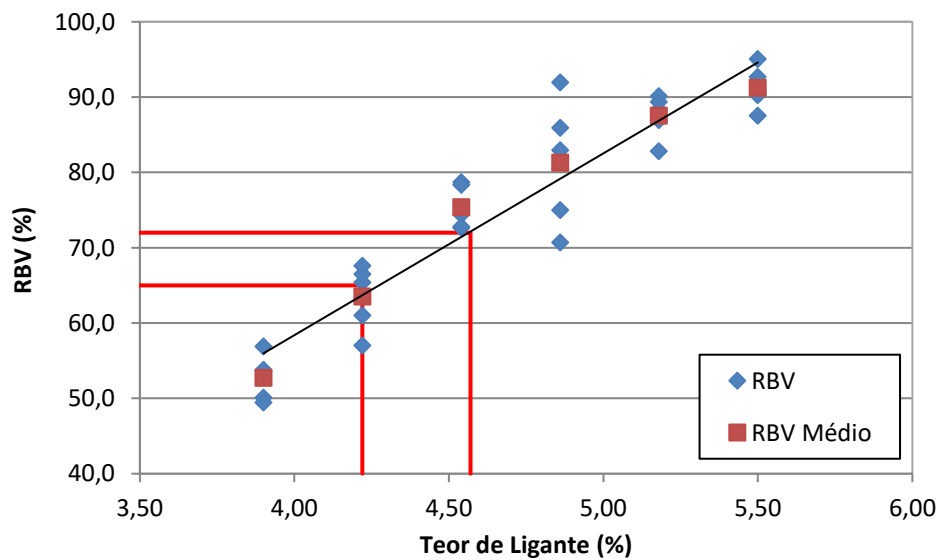




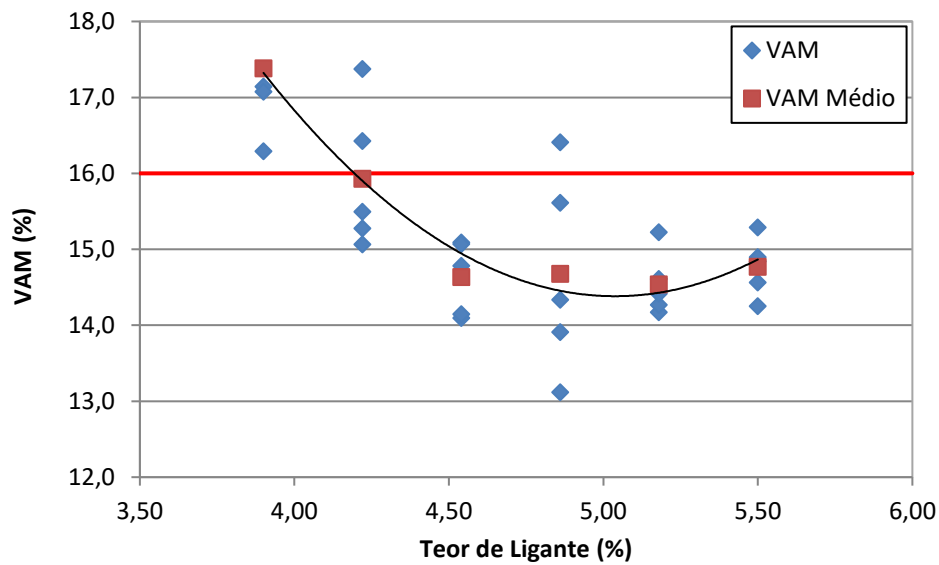
(c)



(d)



(e)



(f)
Fonte: Autor.

Verifica-se que todos os valores de estabilidade superam o limite mínimo exigido pelo DNIT de 500 kgf para camadas de ligação. A fluência ocorre em escala não elevada, apresentando melhores resultados nas menores dosagens de ligante.

Esta combinação pode ser explicada devido à curva granulométrica formulada pelo método teórico ter resultado em uma distribuição de frações finas não predominantes, em relação às de maior dimensão, proporcionando um equilíbrio adequado entre a necessidade de suportar carregamento e o preenchimento gradual dos vazios para a formação do intertravamento granular. Ainda, esta condição permite que a superfície específica gerada pelas frações finas não seja elevada, possibilitando a utilização de menores quantidades de ligante betuminoso.

Referente os parâmetros físicos, verifica-se a diminuição do percentual de vazios ocorre conforme o aumento da dosagem de ligante betuminoso, pois acontece maior preenchimento dos espaços livres, gerados no arranjo granulométrico.

Corroborando também ao já mencionado equilíbrio entre as frações finas e graúdas, ensejando menor consumo de ligante betuminoso, o fato do teor de vazios ter uma faixa de serviço indicada pelo método entre 4,22% e 4,54%, considerado baixo se comparado com arranjos granulométricos relacionados às curvas densas tradicionais formuladas pelo método da tentativa, com o uso de faixas, que chegam a patamares em torno de 5,0% a 5,5% para cima (BARRA, 2005).

Em relação ao VAM apresentar resultados inferiores ao mínimo normativo de 16% para um diâmetro nominal máximo de 12,7 mm, é justificado pelo fato de ser um parâmetro

não adequado para a descrição do comportamento de misturas asfálticas com variação de arranjos granulométricos formulados por métodos teóricos, compostos por frações oriundas de peneiramento individual, que acarretam em uma densificação muito efetiva dos grãos e com pouco espaço para a alocação de ligante betuminoso.

Tanto é fato, que a especificação de serviço DNIT ES 031 (2006) no item 5.2, alínea c, faculta o uso do VAM como variável a ser utilizada na escolha do teor de serviço. Ainda assim, o VAM gera impacto no cálculo do RBV, devido incorporar este parâmetro para a sua determinação (Equação 3.8).

A partir da análise dos resultados apresentados na Figura 35, em conjunto com as observações durante o procedimento de dosagem das misturas, pôde-se constatar dois prováveis teores de trabalho de ligante betuminoso, que se encontram em melhor conformidade com a normativa supracitada, sendo 4,22% e 4,54%. Os valores médios dos parâmetros físicos e mecânicos dos respectivos teores são apresentados de forma resumida na Tabela 14.

Tabela 14 - Resultados dos prováveis teores de trabalho.

Teor de Ligante (%)	4,22	4,54	Parâmetro Normativo
Estabilidade (kgf)	1567,7	1650,0	500,0
MEA (g/cm ³)	2,435	2,457	-
Vazios (%)	5,36	3,80	4,00 a 6,00
RBV (%)	63,52	75,0	65,00 a 72,00
Fluência (mm)	3,56	4,50	-

Fonte: Autor.

Diante da possibilidade de duas dosagens terem potencial para escolha como teor de trabalho, houve a necessidade de se realizar o ensaio de tração indireta, com a finalidade de se confirmar qual a melhor alternativa entre as indicadas para escolha definitiva.

É importante destacar que esta ausência de acurácia proporcionada pelo método Marshall está relacionada diretamente com o empirismo característico de sua execução, pois a compactação por impacto gerada na moldagem dos corpos de prova acarreta na quebra de frações granulares no interior das misturas, alterando o arranjo granulométrico definido originalmente (SIROMA, 2016), o que incide sobre os resultados de massa específica aparente (MEA), e consequentemente no teor de vazios e demais parâmetros correlatos, como o VAM e a RBV.

4.3 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA

Como descrito anteriormente, o ensaio de resistência à tração indireta foi utilizado para complementar os resultados da metodologia Marshall e auxiliar na definição do teor de trabalho das misturas asfálticas GB em estudo. A norma DNIT-ME 136 (2018) rege o método de ensaio bem como, o limite mínimo de resistência para camadas de revestimento e de ligação (0,65 MPa; Tabela 12), sendo que a GB testada é destinada para utilização em camadas de ligação (binder).

Como os resultados da metodologia Marshall apontaram dois prováveis teores ótimos de ligante (4,22% e 4,54%), foram produzidos 5 corpos de prova adicionais pela metodologia supracitada, para cada dosagem, para a realização dos ensaios. Os resultados são apresentados na Tabela 15 e ilustrados na Figura 36.

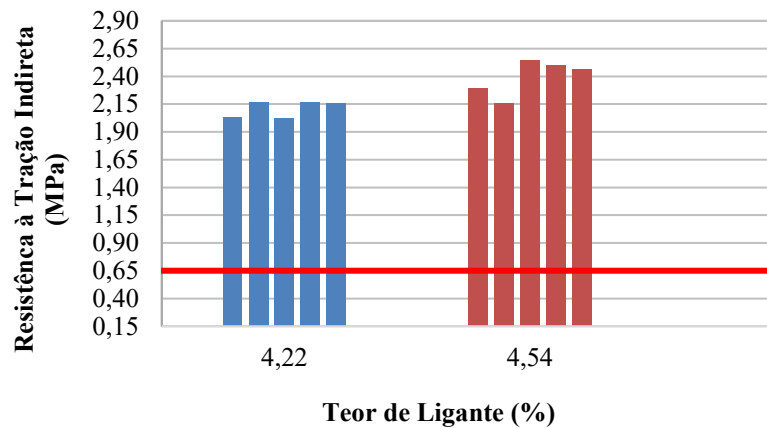
Tabela 15 - Resultados amostrais resistência à tração indireta.

TEOR DE LIGANTE (%)	CORPO DE PROVA	RESULTADOS (MPa)	MÉDIA (MPa)
4,22	A1	2,04	2,11
	A2	2,17	
	A3	2,03	
	A4	2,17	
	A5	2,16	
4,54	B1	2,30	2,40
	B2	2,16	
	B3	2,55	
	B4	2,50	
	B5	2,47	

Fonte: Autor.

Analisando os resultados amostrais dos dois teores de ligante betuminoso, é possível verificar que ocorreram resultados com pequenas variações para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, tendendo a parâmetros com maior confiabilidade para emprego no campo.

Figura 36 - Resultado resistência à tração indireta.



Fonte: Autor.

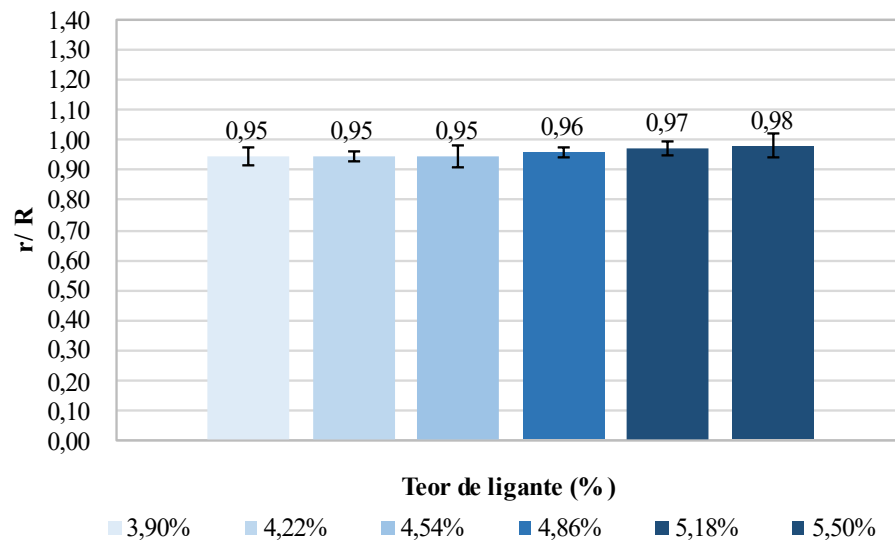
Observando a Figura 36, tem-se que todos os resultados obtidos são superiores ao mínimo exigido de 0,65 MPa pela norma DNIT-ES 031 (2006). Dessa forma, pode-se inferir que os resultados encontrados para o teor de 4,54% são mais significativos quando comparados aos de 4,22%. Portanto, com base nos critérios adotados neste estudo, o teor de ligante betuminoso de 4,54% foi o escolhido como o de trabalho em campo, em razão de ter alcançado melhores resultados.

4.4 RESISTÊNCIA A AÇÃO DA ÁGUA NO ENSAIO DE DURIEZ

O ensaio de Duriez possibilita a verificação sobre como o conjunto granular-betume interage frente à ação deletéria da água, que em razão da elevada tensão superficial do fluido aquoso tende a remover a película de ligante que envolve as frações granulares, acarretando a desagregação das misturas asfálticas e a perda de resistência mecânica.

Conforme a norma francesa AFNOR NF EN 12697-12 (2018), a relação entre corpos de prova condicionados na água a 18°C durante sete dias (r) e não condicionados (R) deve ser superior a 0,70. A média dos resultados obtidos para cada dosagem são ilustradas na Figura 37.

Figura 37 – Relação da resistência condicionada (r) e não condicionada (R).



Fonte: Autor.

Analisando os resultados obtidos, tem-se que todas as formulações obtiveram resultados satisfatórios, apresentando média bem superior ao mínimo aceito pela norma francesa.

Cabe ressaltar que a adição da cal hidratada CH-1 no arranjo granulométrico exerceu função primordial no comportamento das misturas, devido apresentar carga eletropositiva, formando um dipolo quando combinado às cargas eletronegativas do ligante betuminoso e do material pétreo de gnaiss. Essa combinação acarreta no melhoramento da adesividade entre o ligante betuminoso e as frações granulares, dificultando a entrada de água na interface do conjunto granular-ligante.

Além disso, a interação entre as frações naftênicas do ligante betuminoso com o óxido de Cálcio da CH-1 foram um composto químico denominado Naftanato de Cálcio, que forma um tipo de sal insolúvel à presença da água, estabelecendo uma 'blindagem' ao conjunto granular-ligante (SANTANA, 1992).

Ainda, verifica-se que a razão r/R aumenta com o acréscimo do teor de ligante betuminoso. Isso ocorre devido ao aumento da espessura da película envoltora, aumentando a proteção das partículas em relação ao ataque da água, além de preencher mais efetivamente os vazios formados entre os granulares, dificultando a percolação da água no interior da mistura, e assim, dificultando a remoção da película de ligante.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que as características físicas e mecânicas das dosagens de trabalho indicadas pela campanha experimental executada com as formulações propostas de misturas asfálticas do tipo Grave Bitume (GB), apresentaram boa conformação aos parâmetros normativos brasileiros para utilização em camadas de ligação (binder). Logo, dispõem de viabilidade técnica para uso em estruturas de pavimento no Brasil, tendo sido alcançado o objetivo geral proposto para esta pesquisa.

A formulação do arranjo granulométrico elaborada pelo método racional de Füller-Talbot, permitiu controlar com precisão a distribuição dos diâmetros das frações granulares utilizados na mistura, atendendo aos propósitos de resistência ao carregamento e preenchimento gradual dos vazios formados pelos diâmetros maiores, fatores que acarretaram diretamente em elevados valores de estabilidade e de tração indireta para os teores potenciais de trabalho, baixa fluência, teor de vazios enquadrado nos limites normativos e baixo consumo de ligante betuminoso.

Estes fatores são importantes e vão ao encontro dos propósitos desta pesquisa, pois as misturas asfálticas do tipo Grave-Bitume são utilizadas em camadas estruturais nos pavimentos, portanto, sujeitas a fortes intensidades de amplitudes de deformação que induzem à fadiga do material.

Ainda, é importante ressaltar que devido à natureza eletronegativa da rocha matriz gnáissica e do ligante betuminoso utilizados na composição das misturas asfálticas, houve a necessidade de se aplicar a adição de 2,0% de cal hidratada CH-1 no arranjo granulométrico, com a finalidade de melhorar a adesividade do conjunto granular-ligante, devido possuir carga eletropositiva, formando um dipolo que proporciona afinidade elétrica entre os componentes da formulação. Como consequência, foi obtida uma forte resistência à ação deletéria da água no ensaio de Duriez, bem acima do limite mínimo previsto em norma.

A partir dos parâmetros da metodologia Marshall, oficialmente adotada no Brasil para a escolha das dosagens de trabalho das misturas asfálticas, verificou-se que os teores de 4,22% e 4,54% de ligante betuminoso atingiram resultados considerados conformes aos parâmetros estabelecidos pelo DNIT, porém, não de forma definitiva. Portanto, de forma complementar, os ensaios de tração indireta indicaram melhor desempenho para o teor de 4,54%, o qual foi escolhido como o teor de trabalho final entre todas as dosagens testadas.

Todavia, foi perceptível que devido ao caráter empírico dos ensaios Marshall e de tração indireta, tem-se que não representam uma metodologia adequada para a determinação do teor de trabalho de ligante betuminoso das misturas asfálticas, dependendo demasiadamente da habilidade técnica e operacional do condutor da pesquisa, a fim de que se possa estabelecer um bom entendimento dos resultados obtidos.

Isto se dá principalmente pelo fato do procedimento de compactação ser aplicado por impacto, diferentemente da compactação realizada em campo, que ocorre por amassamento e rolagem dos materiais. Além disso, os mecanismos de ruptura por compressão diametral sob carga monotônica não simulam as condições de carregamentos solicitantes observadas em campo, que ocorrem a partir de carregamento dinâmico e transiente, a partir da geração de sinal de flexão alternada. Desta forma, verifica-se que a geração de ruptura dos materiais nestes métodos implica em condições muito severas e incompatíveis com a descrição do fenômeno de fadiga das misturas asfálticas, inexistindo a relação campo/laboratório tão necessária para atestar a confiabilidade de uma dada metodologia.

Ademais, existem poucos estudos sobre misturas do tipo Grave-Bitume fora do escopo da metodologia francesa. Neste contexto, recomenda-se em trabalhos futuros prosseguir com a análise das formulações propostas nesta pesquisa, a partir da execução completa do protocolo previsto pela metodologia citada, compreendendo análises referentes à habilidade de compactação, resistência à deformação permanente, módulo de rigidez complexo e resistência à fadiga, a fim de complementar os resultados já obtidos no ensaio de Duriez, referente à avaliação da resistência à ação da água.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T-283**. Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage. 1989. Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. 13th Edition. Washington, D. C. 1989.

ANDRADE, L. R. **Comparação do comportamento de pavimentos asfálticos com camadas de base granular, tratada com cimento e com estabilizantes asfálticos para tráfego muito pesado**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2017.

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

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução ANP nº 19**. Brasília: ANP, 2005.

ARALDI, G. B. **Impacto da formulação de diferentes matrizes granulométricas na dosagem de misturas asfálticas densas**. 2017. 61 p. Trabalho de conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura) - Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15619/2016** (2016). Misturas asfálticas - Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas. Rio de Janeiro: ABNT, 2016, 13 p.

_____. **NBR 15785/2010** (2010). Misturas asfálticas a quente – Utilização da aparelhagem Marshall para preparação dos corpos-de-prova com diferentes dimensões e aplicações. Rio de Janeiro: ABNT, 2010, 7 p.

_____. **NBR 6576/2007** (2007). Materiais asfálticos - Determinação de penetração – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2007, 11 p.

_____. **NBR 11341/2014** (2014). Derivados de petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland. Rio de Janeiro: ABNT, 2014, 26 p.

_____. **NBR 14950/2003b** (2003). Materiais betuminosos – Determinação de viscosidade Saybolt-Furol. Rio de Janeiro: ABNT, 2003, 10 p.

_____. **NBR 11341/2014** (2014). Derivados de petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland. Rio de Janeiro: ABNT, 2014, 26 p.

_____. **NBR 6293/2015** (2015). Ligantes asfálticos – Determinação de ductilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2015, 11 p.

_____. **NBR 14896/2019** (2019). Ligantes asfálticos – Determinação do teor de resíduo seco de emulsões asfálticas em estudo. Rio de Janeiro: ABNT, 2019, 8 p.

_____. **NBR 14948/2003** (2003). Microrrevestimentos asfálticos a frio modificados por polímero: Materiais, execução e desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2003, 8 p.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **AFNOR NF P 98-251-1**. 2002. Essais relatifs aux chaussées: Préparation des mélanges hydrocarbonés: Essai de Duriez, 2002.

_____. **AFNOR NF P 98-138** (1992). Enrobés hydrocarbonés: Couches de assises, graves-bitume, Paris, França, 1992.

_____. **AFNOR NF EN 13285** (2018). Graves non traitées – Spécifications. Paris, França, 2018.

_____. **AFNOR NF EN 12697-12** (2018), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 12: Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses. Paris, França, 2018.

_____. **AFNOR NF EN 13108-1** (2007), Mélanges bitumineux - Spécifications des matériaux - Partie 1 : Enrobés bitumineux. Paris, França, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2872**. 2004. Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). West Conshohocken, PA, USA. 2004

BACHAND, A. T. **Formulation d'enrobés bitumineux de type ESG10 et GB20 avec incorporation de particules de verre**. 2018. Mémoire de maîtrise en génie de la construction - École de Technologie Supérieure Université du Québec. Montreal, Canadá, 2018.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BALLOU, R. H. **Logística empresarial: transportes de materiais e distribuição física**. Tradução Hugo T.Y.Yoshizaki. 20º reimpr. São Paulo: Atlas, 2008.

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

_____. **Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

BARRA, B. et al. Temperature implications on rheological-mechanical behavior and design of high modulus dense asphalt mix. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 135-144, 2016.

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

BROSSEAUD, Y., 2002, “Método francês para dosagem de misturas asfáltica: abordagem, métodos de ensaio, confiabilidade e validade”. In: **16º Encontro do Asfalto**. IBP, Rio de Janeiro.

BÚRIGO, A. S. **Influência da formulação de esqueletos minerais no comportamento mecânico de misturas de concreto asfáltico**. 2015. 74 p. Trabalho de Conclusão de Curso, (Graduação em Engenharia de Infraestrutura) - Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2015.

CBB Asfaltos. **Especificação de material POLIFLEX 60/85-E**. 2010. Disponível em: https://cbbasfaltos.com.br/pdf/TDS_POLIFLEX_60_85-1.pdf. Acesso em: 05 mar. 2021.

CLARA, E. **Avaliação de misturas asfálticas densas com a incorporação de cinza de carvão mineral**. 2020. 164 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2020.

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, (2003a). Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Recursos-Minerais/Apresentacao/Geologia%2C-Tectonica-e-Recursos-Minerais-do-Brasil-343.html>. Acesso em: 30 abr. 2021.

DE ALMEIDA, A. J. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas com aplicação dos aditivos PR Plast e PR Flex 20 no módulo complexo e na fadiga**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2013.

DE LA ROCHE, C. **Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux: expérimentations et nouvelles perspectives d'analyse**. 1996. Thèses de doctorat - Châtenay-Malabry, École Centrale de Paris. Paris, França, 1996.

DEPARTAMENTO DE ESTRADA DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. **DER/PR ES-P 21/17** (2017). Pavimentação asfáltica usinada à quente. Curitiba, Paraná. 2017, 23 p. Disponível em: http://www.der.pr.gov.br/sites/der/arquivos_restritos/files/documento/2019-10/es-p21-17cauq3.pdf. Acesso em: 20 fev. 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER - ME 043/95** (1995). Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall. Método de Ensaio. Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), Rio de Janeiro, RJ. 1995, 11 p. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner-me043-95.pdf>. Acesso em 15 mar. 2021.

_____. **DNER-ES 385/99** (1999). Pavimentação - concreto asfáltico com asfalto polímero. Especificação de Serviço Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), Rio de Janeiro, RJ. 1999, 15 p. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dner-es385-99.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2021.

_____. **DNER – ME 078/94** (1994). Agregados graúdo – adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994, 3 p. Disponível em: http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/normas/DNER-ME078-94.pdf. Acesso em: 20 mar. 2021.

_____. **DNER - ME 083/98** (1998). Agregados: granulometria por peneiramento. Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), Rio de Janeiro, RJ. 1998, 5 p. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner-me083-98.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT – ES 031/2006** (2006). Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviços. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), Rio de Janeiro, RJ. 2006a, 14 p. Disponível em: http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/normas/DNIT031_2006_ES.pdf. Acesso em: 05 fev. 2021.

_____. **DNIT - ME 136/2018** (2018). Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), Rio de Janeiro, RJ. 2018. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_136_2018_me-1.pdf. Acesso em: 12 abr. 2021.

_____. **Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro. Publicação Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) - 719. 2006b. Disponível em: http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual_de_Pavimentacao_Versao_Final.pdf. Acesso em: 10 nov. 2020.

Di Benedetto, H., Corté, J.-F. (2005). **Matériaux bitumineux routiers 2, Constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges**. Éditions Lavoisier, Hermes Science, Paris. 283 p.

FAGUNDES, P. M. **Avaliação comparativa do comportamento funcional de misturas asfálticas do tipo BBDr e BBTM**. Orientador: Prof. Dr. Breno Salgado Barra. 2020. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2020.

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

HAMLAT, S. **Étude de la résistance des revêtements routiers aux sollicitations tangentielles**. 2007. 178 p. Tese (Doutorado), École Doctorale Mécanique, Thermique et Génie Civil, École Centrale de Nantes et Université de Nantes. Nantes, França, 2007.

Instituto Brasileiro do Petróleo (IBP) – Comissão de Asfalto. **Informações Básicas sobre materiais asfálticos**. Rio de Janeiro: IBP, 1994.

IFSTTAR, **Courbe granulométrique GB 0/14 Sénégal**. Expertise Sénégal Prestation 559. Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. Paris, France, 2012.

KAKPO, C.T. **Caractérisation d'un enrobé bitumineux haute performance incorporant du verre recyclé et son impact sur les performances de cet enrobé**. 2017. Mémoire de maîtrise en Génie de la construction - École de Technologie Supérieure Université du Québec. Montreal, Canadá, 2017.

LEITE, L.F.M. **38ª Reunião Anual de Pavimentação**. 2007. Congresso.

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

MAGALHÃES, S. T. **Misturas asfálticas de módulo elevado para pavimentos de alto desempenho**. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos**. 1ª ed. Rio de Janeiro: UFRJ. 1997. 570 p.

MEUNIER, M. **Prédiction de L'orniérage lie aux déformations permanentes des enrobés bitumineux**. 2012. Thèse de Doctorat em Génie - École de Technologie Supérieure Université du Québec. Montreal, Canadá, 2012.

MEURER, P. **Caracterização de materiais rochosos do norte de Santa Catarina para fins de aplicação em obras de pavimentação**. 2015. 109 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2015.

MINIKOWSKI, B. **Avaliação comparativa de misturas asfálticas densas formuladas com pó calcário, cal hidratada e pó de pedra**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil de Infraestrutura) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2018.

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

MORILHA JUNIOR, A. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

MOUTIER, F. **Utilisation de la Presse à Cisaillement Giratoire et de l'Orniéreur dans la Méthode Française de la Formulation des Enrobés**. Proceedings of the 5th Eurobitume Congress, Vol. IB, pp 546-554. Estocolmo, 1992.

NGUYEN, D. T. **Prédiction des déformations permanentes des couches de surface des chaussées bitumineuses**. 2006. 169 p. Tese (Doutorado), École Nationale des Ponts et Chaussées. Paris, França, 2006.

OLARD, F. **Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures: relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé.** 2003. Thèse (Docteur Ingénieur) - Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Laboratoire GéoMatériaux du Département Génie Civil et Bâtiment de École Nationale des Travaux Publics de l'État. Lyon, França, 2003.

OLARD, F. **GB5 mix design: high-performance and cost-effective asphaltconcretes by use of gap-graded curves and SBS modified bitumens.** Road Materials and Pavement Design, vol. 13, p. 234-259. 2012.

OLIVEIRA, C. de; ARAÚJO, A. P.; MAZUR, N. **Fundamentos da Ciência do Solo - Roteiro de Aulas.** 2002. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – Instituto de Agronomia – Departamento de Solos. Seropédica. Rio de Janeiro, 2002.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação Rodoviária: Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis.** Rio de Janeiro: Editora Copiarte. 2002.

POUTEAU, B. **Durabilite mecanique du collage blanc sur noir dans les chaussées.** 2004. Thèse de Doctorat em Génie Civil - École Centrale de Nantes, Université de Nantes. Nantes, França, 2004.

QUINTERO, C. F. Q. **Estudo de misturas asfálticas com ligantes de consistência elevada: formulação e comportamento mecânico.** 2011. 229p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.

ROHDE, L. **Estudo de misturas asfálticas de módulo elevado para camadas estruturais de pavimentos.** 2007. Tese (Doutorado em engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

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

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

SHINOHARA, K. J. C. **Efeito da modificação do ligante pelo polímero EVA no concreto asfáltico e sua influência no dimensionamento do pavimento.** 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2017.

SIROMA, R. S. **Estudo comparativo e aplicado sobre a influência da utilização da areia descartada de fundição (ADF) na formulação e no desempenho mecânico de misturas de concreto asfáltico.** 2016. 135 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura) - Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville/SC, 2016.

SIROMA, R. S. **Avaliação da deformação permanente em misturas asfálticas densas formuladas com areia descartada de fundição (ADF).** 2018. 196 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2018.

UNISESKY, C. R. **Avaliação comparativa do comportamento funcional e mecânico de misturas asfálticas do tipo BBDr e BBTM.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2018.

VASCONCELOS, K. L. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas a quente dosadas pelas metodologias Marshall e Superpave com diferentes granulometrias.** 2004. 149 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2004.

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