

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

RAFAEL CRISTYAN FRONZA

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DOS PARÂMETROS DE DOSAGEM DE MISTURAS
ASFÁLTICAS DENSAS COM A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Joinville

2022

RAFAEL CRISTYAN FRONZA

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DOS PARÂMETROS DE DOSAGEM DE MISTURAS
ASFÁLTICAS DENSAS COM A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

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

Orientador: Prof. Dr. Breno Salgado Barra

Joinville

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Fronza, Rafael Cristyan

Avaliação Comparativa dos Parâmetros de Dosagem de
Misturas Asfálticas Densas com a Incorporação de Resíduo de
Construção e Demolição / Rafael Cristyan Fronza ;
orientador, Breno Salgado Barra, 2022.

82 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville,
Graduação em Engenharia de Infraestrutura, Joinville, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia de Infraestrutura. 2. Misturas
asfálticas. 3. RCD. 4. Caracterização. 5. Parâmetros de
dosagem. I. Salgado Barra, Breno. II. Universidade Federal
de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de
Infraestrutura. III. Título.

RAFAEL CRISTYAN FRONZA

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DOS PARÂMETROS DE DOSAGEM DE MISTURAS
ASFÁLTICAS DENSAS COM A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

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), 14 de julho 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

Dedicado esse trabalho a todos que me ajudaram e apoiaram durante essa jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por estar presente em toda minha jornada sempre me dando força e motivação para enfrentar os desafios ao longo do caminho e também por sempre colocar pessoas especiais que acreditam e confiam nos trabalhos feitos por mim.

Agradeço a minha mãe e ao meu pai, os quais me deram todo suporte desde início da universidade até a sua conclusão, pois sem eles quase nada seria possível.

A minha namorada, Thays Lino, que me deu todo suporte e apoio para chegar até esse momento e permitir a realização desse trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Breno Salgado Barra por acreditar no meu potencial e proporcionar várias 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).

Aos amigos que fiz ao longo da graduação, João Vitor Emmert Maximiliano e Ruan Marcos Xavier, por todos os trabalhos em equipe e pela amizade.

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), por proporcionar bolsas de auxílio estudantil, que foram de fundamental importância para a permanência no curso.

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 realização desta pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro na concessão da bolsa de estudos.

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é realizar a avaliação comparativa dos parâmetros de dosagem de misturas asfálticas densas, com a incorporação de resíduo de construção e demolição (RCD). Para tanto, as curvas granulométricas foram concebidas com base na metodologia teórica, utilizando as equações de Fuller-Talbot. As misturas asfálticas formuladas possuem característica densa, considerando o diâmetro máximo da série de peneiras em 12,7 mm, compreendendo os seguintes teores de ligante betuminoso nas dosagens: 4,86 %, 5,18 %, 5,50 %, 5,82 %, 6,14 %, 6,46 %, 6,78 %, 7,10 % e 7,42 %. O RCD bruto é oriundo de demolição de galpão industrial ocorrida na cidade de Joinville/SC, com beneficiamento realizado em central de britagem localizada em Araquari/SC. A caracterização do resíduo beneficiado foi procedida em análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de Raios-X (DRX), espectrometria por fluorescência de Raios-X (FRX) e textura superficial por adsorção de Nitrogênio (BET). A incorporação do RCD nas misturas asfálticas deu-se entre as frações passantes nas peneiras 2,2 mm e 0,075 mm, relacionadas à curva granulométrica de projeto, tendo sido testadas três variações percentuais (7,0 %, 15,0 % e 30,0 %), as quais foram comparadas às formulações de referência integralmente compostas por granulares britados de maciço rochoso gnáissico, obtidos em jazida situada na região metropolitana de Joinville/SC. O ligante betuminoso é classificado na faixa de penetração 30/45 (0,1 mm), proveniente de refinaria e distribuidor localizados no Estado do Paraná. Os parâmetros de dosagem das misturas asfálticas foram determinados com o uso da metodologia Marshall, oficialmente homologada no Brasil pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Avaliações complementares das dosagens potenciais de trabalho indicadas pelo método Marshall foram efetuadas com a verificação da resistência à ruptura por tração indireta, resistência à ação da água no ensaio de Duriez a 18 °C e mancha de areia, este último abrangendo o aspecto funcional referente à rugosidade superficial das misturas asfálticas. Os resultados obtidos indicam que apesar das partículas do RCD estudado possuírem macrotextura subangular e microtextura rugosa, dispõem de porosidade e superfície específica quase três vezes maiores que as frações de rocha britada e pouca afinidade elétrica com o ligante betuminoso, contribuindo para o aporte de maiores teores de ligante nas dosagens e menor resistência mecânica das formulações, além de gerar superfícies com textura menos rugosa, em comparação às misturas asfálticas de referência.

Palavras-chave: Misturas asfálticas. RCD. Caracterização. Parâmetros de dosagem.

ABSTRACT

The main aim of this research is to comparatively evaluate the dosing parameters of dense asphalt mixes, by adding of civil construction and demolition waste (CDW). Aggregate gradation curves were conceived based on theoretical methodology, with use of Füller-Talbot's equations. Asphalt mixes formulated have dense characteristic, taking 12.7 mm as the maximum diameter of the sieve opening series selected, as well as the following binder contents tested: 4.86%, 5.18%, 5.50%, 5.82%, 6.14%, 6.46%, 6.78%, 7.10% and 7.42%. The raw CDW is provided by an industrial premise demolition service occurred in Joinville/SC, being mechanically processed in a crushing plant located in Araquari/SC. The characterization of the CDW was carried out through analyses such as: scanning electron microscopy (SEM), X-Ray diffraction (XRD), spectrometry by X-Ray Fluorescence (XRF) and surface texture by Hydrogen induction (BET). The incorporation of CDW in the asphalt mixes occurred between the fractions passing through the sieve openings from 2,2 mm to 0,075 mm, being three percent variations tested (7,0 %, 15,0 % and 30,0 %), which were compared to the formulations taken as reference, i.e., totally constituted by crushed gneissic massive rock particles, provided by a quarry located nearby Joinville/SC. The asphalt binder is qualified by penetration as 30/45 (0,1 mm), produced and supplied by refinery and distributor placed in the State of Paraná. The dosing parameters of the asphalt mixes were determined with use of the Marshall methodology, officially homologated in Brazil by the Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Additional evaluations of the potential dosages indicated by the Marshall method were carried out upon resistance to rupture by tensile strength, resistance to action of water in Duriez test at 18°C and sand path height, the latter comprising the functional aspect related to surface roughness of the asphalt mixes. The results indicate that despite CDW particles have presented subangular macrotexture and rough microtexture, they have porosity and specific surface almost three times higher than that of crushed rock particles and little electrical affinity with the asphalt binder, contributing for higher binder contents and lower mechanical resistance of the formulations, besides providing fewer rough surfaces, in comparison to the asphalt mixes taken as reference.

Keywords: Asphalt mixes. CDW. Characterization. Dosing parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	- Fluxograma de execução da pesquisa.	18
Figura 2.1	- Seções de estruturas de pavimento: (esquerda) rígido e (direita) flexível.	22
Figura 2.2	- Corpo de prova extraído de uma estrutura de pavimento ilustrando várias composições.	23
Figura 2.3	- Comparação das misturas asfálticas com função de superfície.	24
Figura 2.4	- Carga elétrica inerente ao tipo de rocha matriz.	25
Figura 2.5	- Ilustração da forma das frações granulares.	26
Figura 2.6	- Curvas granulométricas aplicadas às misturas asfálticas pela metodologia francesa.	18
Figura 2.7	- Representação esquemática dos grupos fracionários presentes no ligante betuminoso.	28
Figura 2.8	- Representação estrutural do ligante betuminoso.	28
Figura 2.9	- Depósito de resíduo de demolição.	30
Figura 2.10	- Processo de britagem do RCD.	31
Figura 2.11	- RCD oriundo de material cimentício.	32
Figura 3.1	- Ensaio de granulometria do RCD utilizado.	35
Figura 3.2	- Leiras do RCD coletado para realização da campanha experimental.	35
Figura 3.3	- Partículas do RCD com macrotextura subangular (ampliação em 100 vezes).	36
Figura 3.4	- Partícula do RCD com microtextura rugosa (ampliação em 500 vezes).	36
Figura 3.5	- Difractogramas do (a) RCD utilizado nesta pesquisa, (b) RCD estudado por Sena (2018) e (c) pó de pedra caracterizado por Clara (2020).	37
Figura 3.6	- Curva de viscosidade Saybolt-Furol do ligante betuminoso 30/45.	41
Figura 3.7	- Representação gráfica da curva granulométrica BBSG 0/14.	44
Figura 3.8	- Amostra preparada para o ensaio de MVR.	45
Figura 3.9	- Amostra do ensaio de MVR com 30,0 % de RCD e teor de ligante em 4,54 %	46

Figura 3.10	- Amostra do ensaio de MVR com 30,0 % de RCD e teor de ligante em 6,14 %	46
Figura 3.11	- Procedimento do ensaio de MVR: (a) peso da amostra seca, (b) amostra com água; (c) retirada de ar dos interstícios com a bomba de vácuo; (d) peso final do conjunto com água até o menisco da rolha.	47
Figura 3.12	- Processo de pré-compactação dos corpos de prova: (a) controle da temperatura após a usinagem, (b) transferência da amostra para o molde e, (c) amostra pronta para ser compactada.	49
Figura 3.13	- Soquete Marshall.	49
Figura 3.14	- Procedimento de ruptura dos corpos de prova.	51
Figura 3.15	- Conjunto para execução do ensaio de mancha de areia.	52
Figura 3.16	- Esquema do ensaio de tração indireta.	53
Figura 3.17	- Ruptura de um corpo de prova à tração indireta.	54
Figura 3.18	- Compactação dos corpos de prova por duplo pistão no ensaio de Duriez.	55
Figura 3.19	- Saturação das amostras no ensaio de Duriez.	56
Figura 4.1	- MVR das formulações testadas.	58
Figura 4.2	- Resultados do ensaio Marshall.	60
Figura 4.3	- Tendências das alturas da mancha de areia das misturas asfálticas formuladas.	66
Figura 4.4	- Gráfico com a plotagem dos resultados médios obtidos para tração indireta.	69
Figura 4.5	- Gráfico da relação r/R para ensaio de Duriez.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	- Especificações dos CAP.	29
Tabela 3.1	- Resultados da caracterização do material rochoso.	33
Tabela 3.2	- Composição química do RCD.	39
Tabela 3.3	- Composição química do pó de pedra.	40
Tabela 3.4	- Resultados das análises textural.	40
Tabela 3.5	- Parâmetros característicos do ligante betuminoso 30/45.	41
Tabela 3.6	- Composição granulométrica em função da curva teórica para misturas BBSG 0/14.	43
Tabela 3.7	- Limites de aplicação do revestimento segundo sua macrotextura.	53
Tabela 4.1	- MVR das formulações testadas.	57
Tabela 4.2	- Parâmetros de dosagens para camada de rolamento.	59
Tabela 4.3	- Faixa de teores de ligante betuminoso indicadas pelo ensaio Marshall.	64
Tabela 4.4	- Altura da mancha de areia das misturas asfálticas formuladas.	65
Tabela 4.5	- Resultados médios da tração indireta.	67
Tabela 4.6	- Teores de ligante de trabalho recomendados após os ensaios de tração indireta.	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	- Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ADP	- Asfalto Diluído
AMB	- Asfalto Modificado por Borracha de Pneu
AMP	- Asfalto Modificado por Polímero
ANP	- Agência Nacional de Petróleo
ARCI	- Agregado reciclado cimentício
ARCO	- Agregado Reciclado de Concreto
ARM	- Agregado reciclado misto
BB	- Concreto betuminoso (béton bitumineux)
BBDr	- Concreto betuminoso drenante (béton bitumineux drainante)
BBM	- Concreto betuminoso delgado (béton bitumineux mince)
BBSG	- <i>Béton Bitumineux Semi-Grenus</i>
BBSG	- Concreto betuminoso semiaberto (béton bitumineux semi-grenus)
BBTM	- Concreto betuminoso muito delgado (béton bitumineux très mince)
CAP	- Cimento Asfáltico de Petróleo
CNT	- Confederação Nacional do Transporte
CONAMA	- Conselho Nacional do Meio Ambiente
DNIT	- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNIT-EM	- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - Especificação de Material
DNIT-ES	- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - Especificação de Serviço
DNIT-ME	- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – Método de Ensaio
DRX	- Difração de Raio-X
EAP	- Emulsões Asfálticas
FRX	- Fluorescência de Raio-X
IPR	- Instituto de Pesquisas Rodoviárias
LDTPav	- Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação

MEA	- Massa Específica Aparente
MEV	- Microscopia Eletrônica de Varredura
MVR	- Massa Volumétrica Real
PF	- Perda ao Fogo
PIB	- Produto Interno Bruto
PR	- Estado do Paraná
PR	- Paraná
RBV	- Relação Betume e Vazios
RCD	- Resíduo de Construção e Demolição
REPLAN	- Refinaria Planalto de Paulina
SATC	- Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
SC	- Estado de Santa Catarina
SP	- São Paulo
UFSC	- Universidade Federal de Santa Catarina
V	- Teor de Vazios
VAM	- Vazios do Agregado Mineral
VCB	- Vazios Cheios com Betume

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO	13
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	13
1.2. OBJETIVOS	14
1.2.1. Objetivo geral	14
1.2.2. Objetivos específicos	15
1.3. PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO	16
1.4. JUSTIFICATIVA: RELEVÂNCIA DO TEMA	18
1.5. DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	19
1.6. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	20

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1. DEFINIÇÕES SOBRE PAVIMENTO	21
2.2. DEFINIÇÕES SOBRE MISTURAS ASFÁLTICAS	22
2.2.1. Misturas asfálticas no conceito do pavimento francês	23
2.3. GRANULARES	24
2.4. LIGANTE BETUMINOSO	27
2.5. RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	30

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1. GRANULARES PÉTREOS	33
3.2. RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	34
3.2.1. Microscopia eletrônica de varredura	35
3.2.2. Difração de Raios-X	37
3.2.3. Espectrometria por fluorescência de Raios-X	39

3.2.4.	Textura superficial	40
3.3.	LIGANTE BETUMINOSO	41
3.4.	CURVA GRANULOMÉTRICA	42
3.5.	ENSAIOS LABORATORIAIS	44
3.5.1.	Massa volumétrica real	44
3.5.2.	Ensaio Marshall	48
3.5.3.	Mancha de areia	52
3.5.4.	Resistência à tração por compressão diametral – Tração Indireta	53
3.5.5.	Duriez a 18 °C	54

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES	57	
4.1.	MASSA VOLUMÉTRICA REAL	57
4.2.	ENSAIO MARSHALL	58
4.3.	MANCHA DE AREIA	65
4.5.	DURIEZ	70

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	72
REFERÊNCIAS	74

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A construção civil brasileira tem alcançado um patamar de notoriedade em várias circunstâncias econômicas e sociais nos últimos anos. Conforme Azevedo et al. (2011), essa atividade tem boa representatividade no produto interno bruto (PIB) do país e efeitos relevantes na empregabilidade. Em 2018, o setor representou 8,8 % do PIB, sendo que a cadeia produtiva da construção empregou mais de 10 milhões de pessoas (CONSTRUBUSINESS, 2019).

Entretanto, engloba uma cadeia de serviços que mais consome recursos naturais, entre 20,0 % e 50,0 % das extrações totais realizadas (BRASILEIRO e MATOS, 2015). Bribián et al. (2011 *apud* QUEIROZ, 2019) indicam que 60,0 % da matéria-prima extraída da natureza é usada nesse ramo. Neste contexto, tem-se que os resíduos de construção e demolição (RCD), compõem entre 41,0 % e 70,0 % dos resíduos sólidos urbanos (PINTO, 1999).

Os RCD são formados durante as construções, reformas e demolições, contendo diversos materiais utilizados em obra, como: argamassa, concreto, tijolo, cerâmica, gesso e outros. No que diz respeito ao quantitativo, de acordo com relatórios da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), apenas em 2018 foram coletadas 122.012 t/dia de RCD (ABRELPE, 2018). O mesmo documento destaca que o montante mencionado não representa a totalidade nacional, a qual é historicamente subnotificada, pois o recolhimento registrado normalmente ocorre na maior parte dos casos em obras que são de responsabilidade municipal ou a partir de lançamentos/descartes realizados em terrenos públicos, como os bota-foras, por exemplo.

Segundo Pinto (1999), a geração de resíduo pode variar entre 230 e 760 kg/habitante/ano, conforme a região e o seu respectivo desenvolvimento econômico.

Diante deste cenário, Brasileiro e Matos (2015) indicam que o RCD gerado pelas construções é passível de ser reaproveitado em vários processos produtivos de insumos e construtivos, como tijolos, blocos de concreto e nas obras de pavimentação. Quiñones (2014) pontua que o RCD pode ser utilizado na composição de camadas de sub-base, base e mesmo nas misturas asfálticas, em que mais de 90,0 % do peso destas últimas é proveniente do arranjo granulométrico (HUANG et al., 2007).

Segundo Melo (2010), outro aspecto favorável à reutilização do RCD para minimizar a extração de matéria-prima, é a distância média de transporte entre as jazidas e a localização das obras em alguns casos. Para tanto, cita os exemplos das cidades de Brasília e Manaus, que não dispõem de jazidas próximas aos centros urbanos, o que aumenta consideravelmente o custo dos serviços executados, podendo até mesmo inviabilizar a realização de algumas obras. De acordo com Barra (2005), Belém também enfrenta esta problemática.

Para a Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2019), a maior parte do PIB brasileiro circula pelas estradas federais e estaduais. Porém, apesar da importância do modal rodoviário para o país, tem-se que do total de 1.720.700 km correspondentes à malha viária nacional, somente 213.453 km são pavimentadas, ou seja, 12,4%. Esta pesquisa avaliou também a qualidade geral de 108.863 km de vias pavimentadas, compreendendo a totalidade da extensão federal e trechos estratégicos de vias estaduais. Foi constatado que apenas 41,0 % dos pavimentos se enquadravam no conceito bom e ótimo quanto ao estado geral.

Portanto, além de se perceber a potencialidade do uso do RCD na área de pavimentação, resultados auspiciosos têm sido descritos por Delongui (2012), Melo (2010), Queiroz (2019), Quiñones (2014) e Silva (2009), assinalando a relevância de avaliar os parâmetros de dosagem de misturas asfálticas que possuem RCD na composição.

Com o intuito de contribuir acerca das discussões sobre soluções sustentáveis para o reaproveitamento de resíduos gerados em obras de construção civil, este trabalho propõe o uso do RCD na formulação de misturas asfálticas densas do tipo *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG), em substituição parcial às frações granulométricas oriundas de rocha sã britada, com foco nos impactos ocasionados aos parâmetros de dosagem, bem como na viabilidade técnica de sua utilização em obras de pavimentação.

1.2. OBJETIVOS

Foram estabelecidos os objetivos gerais e específicos para nortear o desenvolvimento do trabalho.

1.2.1. Objetivo geral

Avaliar comparativamente os parâmetros de dosagem de misturas asfálticas densas do tipo *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG), com a incorporação de resíduo de construção e demolição (RCD) de obra civil.

1.2.2. Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram traçados:

- Definir a curva granulométrica das formulações, a partir de metodologia teórica, com o uso das equações de Füller-Talbot;
- Compor os traços das misturas asfálticas com o uso de RCD, considerando a substituição de frações situadas no intervalo passante nas peneiras com abertura 2,2 mm e 0,075 mm da curva granulométrica concebida, nas seguintes variações proporcionais: 7,0 %, 15,0 % e 30,0 %. Ainda, comparar-se-ão os resultados obtidos com os provenientes de misturas asfálticas de referência, compostas integralmente por frações granulares oriundas de britagem de rocha gnáissica;
- Determinar as propriedades características do RCD, a partir de análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de Raios-X (DRX), espectrometria por fluorescência de Raios-X (FRX) e textura superficial por adsorção de Nitrogênio (BET);
- Produzir os corpos de prova das misturas asfálticas, bem como determinar as suas propriedades físicas e parâmetros de dosagem, de acordo com os requisitos normativos preconizados pela metodologia Marshall, para utilização em camadas superficiais de rolamento nas estruturas de pavimento;
- Realizar análises complementares à metodologia Marshall quanto à resistência à ruptura por tração indireta, resistência à ação da água no ensaio de Duriez a 18 °C e mancha de areia, este último abrangendo o aspecto funcional referente à rugosidade superficial das misturas asfálticas;
- Definir, com base na análise conjunta e comparativa de todos os resultados obtidos, qual a dosagem do teor de ligante betuminoso de trabalho a ser utilizada em cada formulação testada, bem como avaliar a viabilidade técnica do uso de RCD em projetos de misturas asfálticas destinadas às obras rodoviárias de campo.

1.3. PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO

A coleta do RCD utilizado foi realizada em um serviço de demolição de galpão industrial realizado na cidade de Joinville/SC, em que os resíduos foram conduzidos a uma central de britagem em Araquari/SC, a fim de cominuir os blocos brutos gerados durante a demolição. Ato contínuo, os granulares britados de rocha sã gnáissica foram coletados na jazida da empresa Rudnick Minérios Ltda., situada no distrito de Pirabeiraba, região metropolitana de Joinville/SC.

O ligante betuminoso, de classificação por penetração 30/45 (0,1 mm), foi utilizado em sua forma pura nesta pesquisa, tendo sido produzido pela Refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR) da Petrobrás S.A., e fornecido pela empresa CBB Asfaltos Ltda., localizadas em Araucária/PR e Curitiba/PR, respectivamente.

O RCD ao chegar nas instalações do Laboratório da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) foi submetido a um processo de triagem e classificação, com o intuito de separar as frações granulares obtidas no processo de britagem de outros materiais não servíveis às dosagens das misturas asfálticas, como plásticos, fios, raízes vegetais, vidros, entre outros.

Posteriormente, foi realizada a análise granulométrica do RCD para verificação de quais seriam as frações granulares mais representativas percentualmente em sua distribuição, tendo-se observado que se encontravam a partir das frações passantes na peneira de abertura de 2,2 mm.

Amostras do RCD foram encaminhadas ao Laboratório de Caracterização Microestrutural (LACAMI), do Centro Tecnológico SATC, em Criciúma, para análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de Raios-X (DRX), espectrometria por fluorescência de Raios-X (FRX) e textura superficial por adsorção de Nitrogênio (BET).

A curva granulométrica foi formulada a partir do método teórico, com o uso das equações de Fuller-Talbot, permitindo ao projetista possuir o controle absoluto das frações individuais dos materiais, a cada peneira, com definição de uma curva com trajetória contínua normalizada e bem distribuída percentualmente em todas as suas frações, garantindo melhor intertravamento dos materiais e melhor desempenho mecânico (ANDRADE et al., 2020).

Diante desta informação e com base na curva granulométrica concebida, três variações percentuais de substituição do RCD em relação aos granulares britados de rocha sã gnáissica foram definidas: 7,0% (considerando apenas a substituição total das frações passantes na peneira de abertura 0,075 mm), 15,0 % (considerando a substituição total das frações retidas nas peneiras de abertura 0,15 mm e 0,075 mm, além das frações passantes nesta última), e

30,0 % (considerando a substituição total das frações retidas nas peneiras de abertura 1,2 mm, 0,6 mm, 0,15 mm e 0,075 mm, além das frações passantes nesta última).

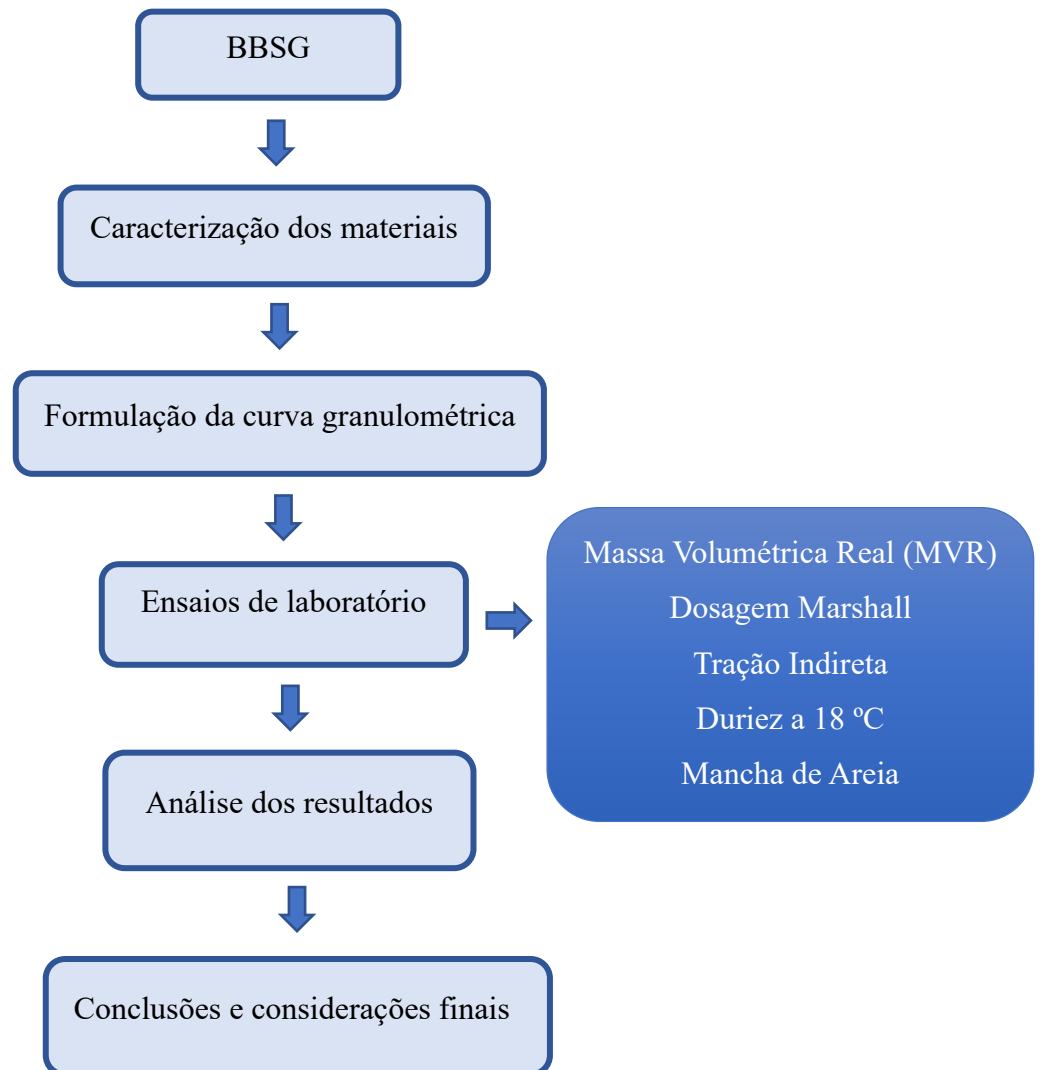
A dosagem das misturas asfálticas foi procedida a partir do método Marshall, com o objetivo de determinar o teor de ligante de trabalho para cada formulação. Para tanto, foi testado um total seis teores, a saber: 4,86 %, 5,18 %, 5,50 %, 5,82 %, 6,14 %, 6,46 %, 6,78 %, 7,10 % and 7,42 %, sendo que para cada um foram moldados cinco corpos de prova, totalizando 100 unidades.

De maneira complementar às indicações apontadas pela metodologia Marshall, foram igualmente testados 100 corpos de prova à ruptura por tração indireta, bem como 60 unidades foram moldadas e submetidas ao ensaio de Duriez a 18 °C, para verificação da resistência à ação da água das misturas asfálticas. Ainda, utilizando os mesmos corpos de prova Marshall, antes do procedimento de ruptura, foram executadas medidas da altura da mancha de areia, para determinação da rugosidade superficial das amostras.

O consumo de ligante betuminoso total foi da ordem de 20 litros, enquanto cerca de 310 kg de material granular foram utilizados, incluindo as frações britadas de rocha e RCD.

A Figura 1.1 ilustra o fluxograma da campanha experimental desenvolvida durante a pesquisa

Figura 1.1 - Fluxograma de execução da pesquisa.



Fonte: Autor.

1.4. JUSTIFICATIVA: RELEVÂNCIA DO TEMA

A relevância desta pesquisa justifica-se pela verificação quanto à influência da incorporação de RCD na formulação de misturas asfálticas densas do tipo *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG), compreendendo substituições percentuais distintas, em comparação com um arranjo granulométrico integralmente oriundo de frações britadas de rocha gnáissica.

Neste contexto, há uma forte potencialidade para utilização de resíduos provenientes da construção civil em diversos ramos da engenharia civil, em que o tipo de material gerado é dependente da atividade ou serviço realizados.

Contudo, apenas os argumentos de sustentabilidade e ecologicamente correto não podem ensejar o uso indiscriminado do RCD, pois em se tratando de um material com

características heterogêneas, necessita ter as suas propriedades estudadas a fundo em cada caso, aliado às necessidades desejadas para aplicação final, a fim de que seja verificada de forma assertiva qual a viabilidade técnica de sua utilização.

O aspecto que deve ser levado muito em conta quando se busca uma alternativa viável para o uso de resíduos sólidos, é a capacidade deste material produzir a maior quantidade de soluções com a menor utilização possível de recursos naturais, ou pelo menos que possa ser utilizado em larga escala. Para se alcançar tal estágio, Morais (2006) estabelece as seguintes necessidades:

- Minimizar o consumo de recursos naturais;
- Maximizar a reutilização de recursos reaproveitados;
- Aperfeiçoamento de projetos;
- Substituição de materiais naturais por outros alternativos.

Logo, o presente trabalho aborda discussões diretas sobre o aproveitamento do RCD em formulações de misturas asfálticas, ou seja, em obras de pavimentação que utilizam insumos em larga escala, fomentando a execução de pesquisas complementares futuras e contribuindo para a propagação do tema no meio técnico-científico.

1.5. DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A campanha experimental foi restrita ao âmbito laboratorial, não tendo sido objeto de estudo qualquer procedimento realizado em campo ou simulação numérica.

As atividades previstas foram integralmente desenvolvidas nas instalações do Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) do Campus da UFSC/Joinville, o qual dispõe de todos os recursos necessários ao cumprimento dos objetivos traçados para a execução deste trabalho, exceto a caracterização do RCD que ocorreu no Laboratório de Caracterização Microestrutural (LACAMI) do Centro Tecnológico SATC, em Criciúma/SC.

Ressalta-se que as análises realizadas são válidas apenas para as condições estabelecidas nesta pesquisa.

1.6. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho foi organizado da seguinte forma:

Capítulo 1: Introduz o tema de estudo, apresentando ao leitor os objetivos e o enfoque da pesquisa.

Capítulo 2: Aborda aspectos gerais sobre estruturas de pavimento, misturas asfálticas e, resíduo de construção e demolição (RCD).

Capítulo 3: Discorre sobre as características dos materiais selecionados, curva granulométrica proposta para a formulação BBSG, bem como os procedimentos metodológicos adotados.

Capítulo 4: Expõe os resultados e as discussões relacionadas à campanha experimental realizada.

Capítulo 5: Trata das conclusões advindas da pesquisa e das recomendações para a execução de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados tópicos que estão relacionados às definições sobre estruturas de pavimento, misturas asfálticas e seus principais constituintes (granulares e ligante betuminoso), além de aspectos gerais sobre o resíduo de construção e demolição (RCD).

2.1. DEFINIÇÕES SOBRE PAVIMENTO

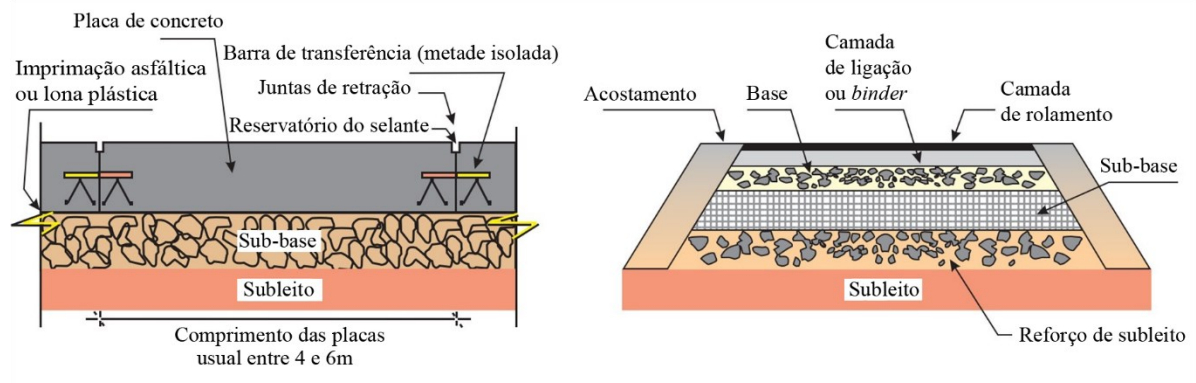
De acordo com o Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006a), pavimento é a superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre um semi-espaço considerado teoricamente como infinito, denominado infraestrutura ou terreno de fundação, também designado de subleito.

Senço (1997) define pavimento como um sistema multicamadas, em que as espessuras são dimensionadas a fim de:

- Resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los às camadas inferiores;
- Propiciar melhores condições de trafegabilidade, no que diz respeito ao conforto e à segurança;
- Resistir aos esforços horizontais, referentes ao desgaste, para que a superfície de rolamento seja mais durável.

Ainda, os pavimentos podem ser classificados como flexíveis, rígidos, semirrígidos, invertidos e compostos, em que o primeiro é o mais utilizado, também conhecido como pavimento de concreto asfáltico e doravante denominado desta forma. Em geral, a estrutura é organizada nas seguintes camadas: revestimento ou rolamento, base, sub-base e subleito. As camadas de ligação e de reforço do subleito são eventuais. No caso dos pavimentos rígidos, a camada de revestimento também atua na função de camada de base (BERNUCCI et al., 2010). A Figura 2.1 ilustra seções típicas de pavimentos rígidos e flexíveis.

Figura 2.1 - Seções de estruturas de pavimento: (esquerda) rígido e (direita) flexível.



Fonte: Bernucci et al. (2010).

2.2. DEFINIÇÕES SOBRE MISTURAS ASFÁLTICAS

A mistura asfáltica é um material proveniente da combinação entre partículas granulares, que correspondem a mais de 90,0 % do seu peso total, formando arranjos granulométricos com frações de tamanhos e formas variadas, e o ligante betuminoso, oriundo do petróleo cru fracionado em torres de destilação, com comportamento viscoelástico e termosuscetível (BARRA, 2009).

No Brasil, as misturas asfálticas normalmente são aplicadas na camada de rolamento das estruturas de pavimento. Contudo, pode ocorrer também a utilização como camada de ligação (Figura 2.1, direita; Figura 2.2). Neste contexto, diversas formulações podem ser utilizadas, variando as composições granulométricas e os ligantes betuminosos em suas concepções, além de eventuais aportes de aditivos e adições, desde que atendam aos requisitos normativos previstos na metodologia considerada em cada caso (VASCONCELOS, 2004).

Figura 2.2 - Corpo de prova extraído de uma estrutura de pavimento ilustrando várias composições.



Fonte: Bernucci et al. (2010).

2.2.1. Misturas asfálticas no conceito do pavimento francês

As misturas asfálticas, no que diz respeito à concepção da estrutura de pavimento francês, podem ser utilizadas tanto em camadas funcionais quanto estruturais. No primeiro caso, constituem as camadas superficiais de rolamento, possuem espessuras esbeltas para os padrões franceses (máximo de 8,0 cm), e destinam-se a prover conforto e segurança a partir de superfícies com boa rugosidade e drenabilidade ou percolação da água precipitada da chuva, além de resistirem aos afundamentos na trilha de roda e protegerem as camadas estruturais do ataque intempérico, principalmente da ação da água e da radiação solar, não fazendo parte das simulações numéricas durante o dimensionamento (MANUEL LPC, 2007).

No segundo caso, destinam-se a suportar os esforços das cargas solicitantes do tráfego, sendo responsáveis por apresentar rigidez e resistência à fadiga compatíveis com as funções que exercem no campo, que podem ser desde a camada de rolamento até a sub-base (GUIDE TECHNIQUE, 1994)

Na metodologia francesa há ainda vários tipos e classes de formulações, que se comportaram de formas diferentes e são avaliadas de maneira distinta. A seguir, são listadas algumas que podem ser previstas em soluções de pavimentação para aplicação como camada de rolamento (MANUEL LPC, 2007):

- BB – Concreto betuminoso (*Béton Bitumineux*);
- BBSG – Concreto betuminoso semidenso (*Béton Bitumineux Semi-Grenus*);
- BBM – Concreto betuminoso delgado (*Béton Bitumineux Mince*);
- BBTM – Concreto betuminoso muito delgado (*Béton Bitumineux Très Mince*);

- BBDr – Concreto betuminoso drenante (*Béton Bitumineux Drainante*).

A Figura 2.3 ilustra a diferença da textura superficial entre uma mistura asfáltica drenante (BBDr) e semidensa (BBSG).

Figura 2.3 - Comparação das misturas asfálticas com função de superfície.



Fonte: Guide Technique (1994).

2.3. GRANULARES

A estrutura das misturas asfálticas é composta principalmente por partículas granulares, que podem ser de origem natural ou artificial. Desse modo, aspectos como graduação, tamanho, dureza, aspereza da superfície, sanidade, afinidade com o ligante e absorção de água são aspectos fundamentais a serem analisados durante o processo de seleção (BARRA, 2005). Além disso, as características físicas e químicas acabam dependendo tanto da natureza da rocha-mãe como do seu processo de beneficiamento (CLARA, 2020).

Conforme Senço (1997), o material natural é aquele que se encontra em depósitos constituídos pelo meio ambiente, como areias, seixo rolado ou pedregulhos, enquanto os artificiais foram submetidos a processos industriais de beneficiamento nas etapas de extração e britagem, gerando os granulares britados e as areias artificiais, por exemplo. Independente de obtenção das partículas, dois fatores são primordiais quanto ao desempenho na composição das misturas asfálticas: composição mineralógica e forma das partículas.

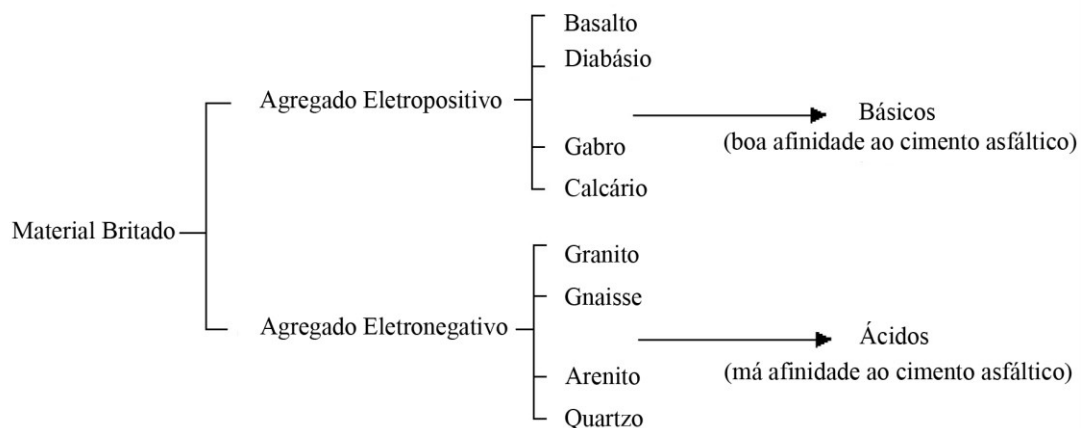
De forma geral, as rochas são formadas por três principais grupos, podendo ser classificados como:

- Ígneas ou Magmáticas: origem do resfriamento rápido ou lento do magma, após as erupções vulcânicas;
- Rochas Sedimentares: sofreram intemperismo e foram transportadas, geralmente pela água;
- Rochas Metamórficas: formadas pela combinação de calor e pressão atmosférica, que implicam em modificações estruturais e minerais.

Ainda, é apresentada outra classificação para as rochas de origem ígnea, que leva em conta a presença de sílica (SiO_2) na ocorrência, podendo ser classificada como ácida ou félsica, quando possui elevado teor de sílica, e básica ou máfica, quando há menor presença de sílica. Contudo, esta classificação está relacionada com a carga elétrica superficial do granular, e os percentuais são variados, a depender do meio em que a rocha foi gerada e aos processos intempéricos que sofreu até o momento (SANTANA, 1992).

Esta condição está diretamente relacionada com a afinidade existente entre as partículas granulares e o ligante betuminoso, que propiciam a adesividade do conjunto. No esquema da Figura 2.4, tem-se que as rochas eletropositivas, com menor presença sílica, possuem melhor condição de afinidade com o ligante betuminoso que as eletronegativas, que dispõem de cenário contrário. Assim, as ocorrências eletropositivas são menos suscetíveis à ação deletéria da água, propiciando menor probabilidade de deslocamento da película de ligante que recobre os granulares, reduzindo a desagregação das misturas asfálticas e aumentando a vida útil do pavimento (BARRA, 2005).

Figura 2.4 - Carga elétrica inerente ao tipo de rocha matriz.



Fonte: Santana (1992).

A carga elétrica dos granulares está diretamente associada à sua composição mineral, em que o elemento químico com maior participação percentual é responsável pelas reações majoritárias do material com outros compostos (XAVIER, 2022). Nesta lógica, por exemplo, espera-se que as rochas basálticas e diabásicas apresentem melhor adesividade que as rochas graníticas e gnáissicas.

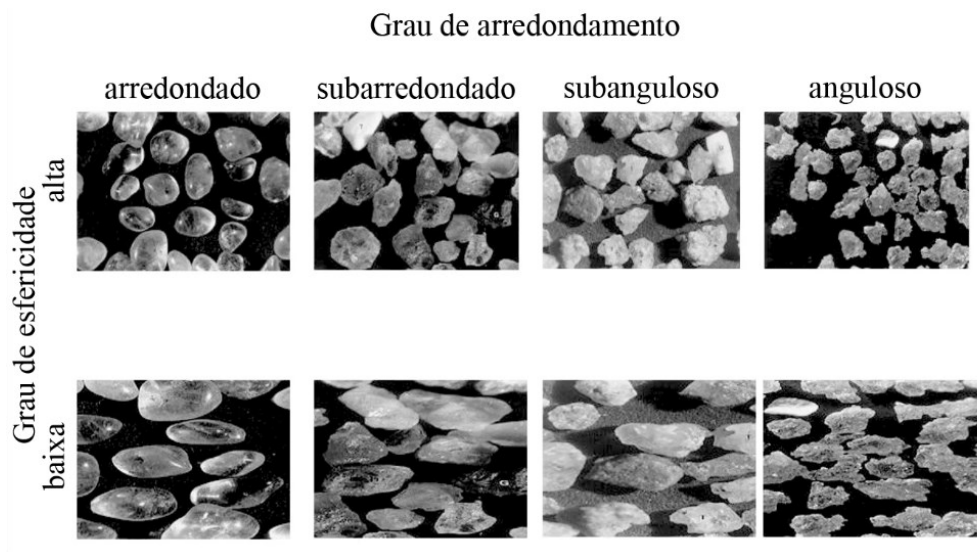
As frações granulares são separadas pelos tamanhos de suas partículas constituintes, a partir de uma série de peneiras com aberturas e tamanhos padronizados (DNER EM-035, 1995). Contudo, as partículas podem apresentar diversas formas. Clara (2020) explica que a morfologia influencia diretamente na resistência de contato entre as posições dos granulares e as rotações relativas dos grãos e, Senço (1997) acrescenta que grãos cúbicos possuem melhor intertravamento que os alongados ou chatos, também conhecidos como lamelares.

Senço (1997) também define as características da forma dos granulares em 2 índices:

- Grau de Esfericidade;
- Grau de Arredondamento.

A esfericidade se relaciona ao quão próximo o grão é de uma esfera, podendo ser classificada em: esferoidais, achatados, prismáticos ou lamelares. O grau de arredondamento está associado à resistência e à abrasão da rocha, onde pode ser classificada em anguloso, com cantos vivos e sem desgaste, e subangulares, cantos mais suaves. A Figura 2.5 ilustra as morfologias mais características dos granulares, em que a norma DNIT-ME 425 (2020) regula os procedimentos para determinar a forma das partículas.

Figura 2.5 - Ilustração da forma das frações granulares.

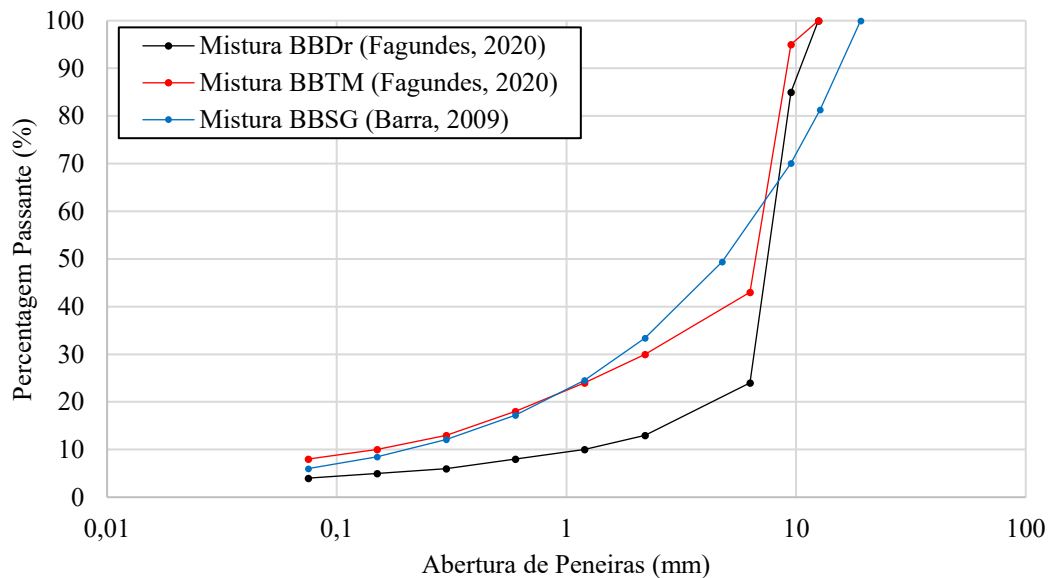


Fonte: ABNT NBR 7389-1 (2009).

Como pode ser visto, os granulares possuem diversas formas que estão relacionadas com características da rocha de origem, em que a partir dos processos de beneficiamento ou intempéricos adquirem formatos singulares. Logo, a seleção das partículas deve priorizar as macrotexturas subangulares e microtexturas rugosas, com boa resistência à abrasão (MOMM, 1998). Ainda, após o processo de britagem, as partículas costumam apresentar diversas arestas, permitindo bom intertravamento, aumentando o ângulo de atrito, estabilidade e resistência ao cisalhamento do material (MOUTIER, 1992).

Quanto à graduação, Bernucci et al. (2010) propõem a seguinte classificação: densa, aberta, uniforme e descontínua. Na Figura 2.6 é possível observar a representação de algumas granulometrias estudadas na metodologia francesa para formulação de misturas asfálticas, em que a BBDr e BBTM apresentam graduação descontínua e a BBSG semidensa.

Figura 2.6 - Curvas granulométricas aplicadas às misturas asfálticas pela metodologia francesa.



Fonte: Buchholz (2020).

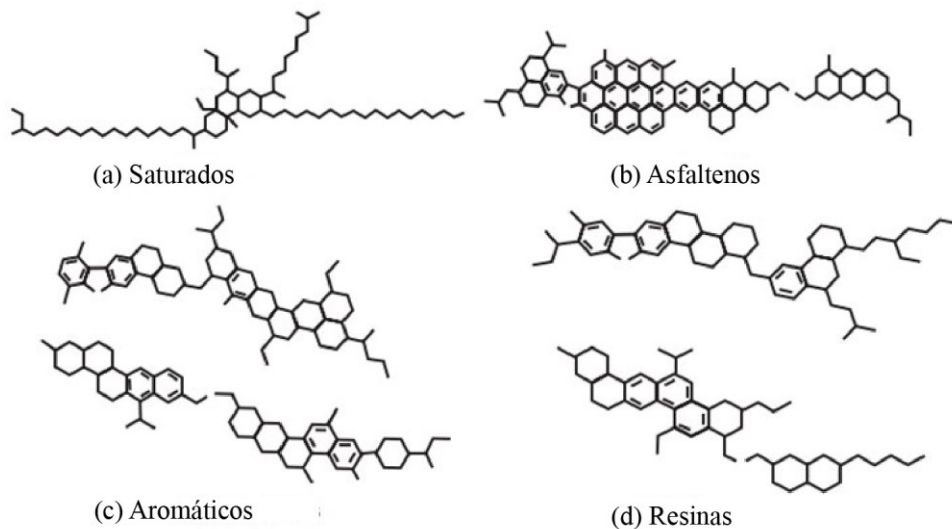
2.4. LIGANTE BETUMINOSO

O ligante asfáltico, ou betuminoso, tem sua origem no processo de destilação fracionária do petróleo, sendo caracterizado como hidrocarboneto. A composição química depende do seu local de origem, possuindo cor, dureza e volatilidade variáveis, em que possui uma cor pardo-escura ou negra, em geral (BAAJ, 2002).

A partir dos ensaios de solubilidade, são verificadas quatro frações típicas: saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos. A matriz de maltenos é constituída pelas frações saturadas,

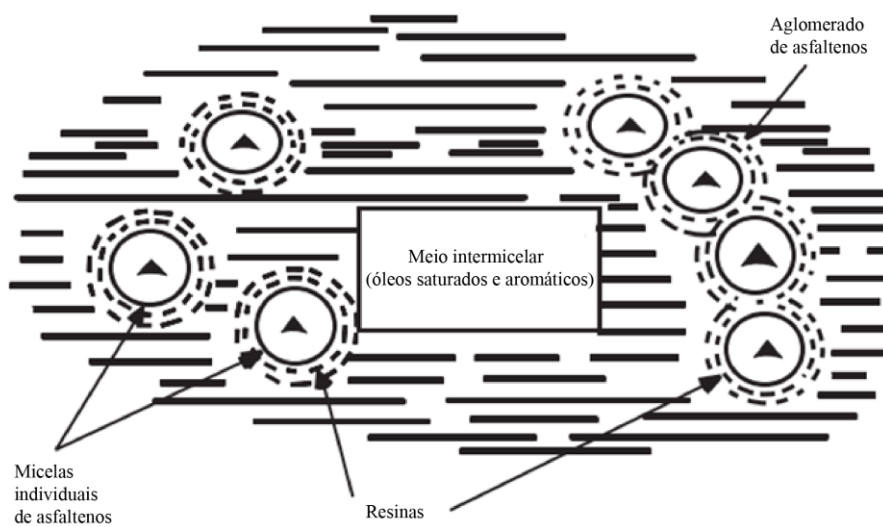
aromáticas e das resinas, correspondente ao meio de suspensão dos asfaltenos, componente formado por glóbulos rígidos e responsável pelo aspecto estrutural do ligante. Assim, tem-se que quanto maior a fração de maltenos, o comportamento do material tenderá a ser sol, da mesma forma que se os asfaltenos se sobressaírem, o comportamento tenderá a ser gel (MAILLARD, 2005). Nas Figuras 2.7 e 2.8 são ilustradas as representações das cadeias de hidrocarbonetos e a estrutura do ligante betuminoso, respectivamente.

Figura 2.7 - Representação esquemática dos grupos fracionários presentes no ligante betuminoso.



Fonte: Shell (2003).

Figura 2.8 - Representação estrutural do ligante betuminoso.



Fonte: Yen (1991).

Do processo de destilação fracionária do ligante betuminoso são extraídos diversos produtos utilizados pelas indústrias e mesmo em nosso cotidiano, como gasolina, querosene, diesel, nafta e o CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo), em que as especificações deste último são regulamentadas pela Agência Nacional de Petróleo (ANP, 2005) (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Especificações dos CAP.

CARACTERÍSTICAS	UN.	LIMITES				MÉTODOS		
		CAP 30/45	CAP 50/70	CAP 85/100	CAP 150/200	ABNT	ASTM	DNER
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	30-45	50-70	85-100	150-200	NBR 6575	D 5	ME 003/99
	°C	52	46	43	37			
Viscosidade Saybolt Furol	s					NBR 14950	E 102	
a 135°C, mín.		192	141	110	80			
a 150°C, mín.		90	50	43	35			
a 177°C.		40-150	30-150	15-60	15-60			
OU								
Viscosidade Brookfield	cP					NBR 1584	D 4402	
a 135°C, SP 21, 20 rpm, mín.		374	274	214	155			
a 150°C, SP 21, mín.		203	112	97	81			
a 177°C, SP 21		76-285	57-285	28-114	28-114			
Índice de susceptibilidade térmica		(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)			
Ponto de fulgor, mín.	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92	ME 149/94
Solubilidade em tricloroetileno, mín.	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042	ME 153/94
Efeito do calor e do ar (RTOF) a 163°C, mín.							D 2872	
Varição em massa, máx.	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5			
Ductibilidade a 25°C, mín.	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Aumento do ponto de amolecimento, máx.	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D36	
Penetração retida, mín.	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5	ME 003/99

Fonte: ANP (2005).

Há vários outros tipos de CAP comercializados, produzidos a partir do uso de agentes modificadores e, mesmo os diluídos (ADP) e emulsionados. Os polímeros e a borracha de pneus são os mais utilizados como agentes modificadores, com a função de melhorar o comportamento reológico das matrizes puras, diminuindo a termosuscetibilidade e aumentando a recuperação elástica, por exemplo (ROHDE, 2007).

A principal característica dos ligantes betuminosos é o seu comportamento viscoelástico e termosuscetível. Logo, com a variação da temperatura e frequência de carregamento ocorrem mudanças em suas propriedades mecânicas, ou seja, são sensíveis ao tempo de aplicação de carga e às variações de temperatura quando são aplicadas as cargas solicitantes (NGUYEN, 2006).

Todavia, o envelhecimento do ligante betuminoso causa um enrijecimento da mistura asfáltica, provocando aumento do módulo de rigidez, mas acarreta um comportamento mecânico frágil, devido à perda das frações maltênicas do material, diminuindo a resistência à fadiga (BARRA, 2009).

2.5 RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

O resíduo de construção e demolição (RCD) é oriundo de materiais descartados nas obras, podendo ter sua origem durante a construção inicial, reforma ou demolição. A Resolução Nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002) aponta que os resíduos de Classe A estão aptos à aplicação em estudos com misturas asfálticas, os quais são compostos por argamassas, concretos ou materiais de origem cerâmica, como tijolos, telhas ou piso, que constituem os principais componentes dos RCD. Ainda, conforme a norma ABNT NBR 15115 (2004), materiais de Classe B, C e D não devem ser utilizadas em obras de pavimentação. A Figura 2.9 ilustra um depósito de RCD.

Figura 2.9 - Depósito de resíduo de demolição.



Fonte: Autor.

Como é possível notar na Figura 2.9, o RCD apresenta muita variabilidade em sua composição, pois as proporções entre material cerâmico, argamassa e cimento variam conforme a natureza da obra (DELONGUI, 2002), o que pode resultar em matrizes distintas em cada caso e até mesmo no mesmo local, quando coletados de áreas distintas (QUEIROZ, 2019).

Contudo, para tornar viável sua aplicação em meio à variabilidade característica, o RCD é submetido a uma triagem classificadora estabelecida pelo CONAMA, em que a Classe A é conduzida a um processo de britagem e as frações resultantes são separadas por peneiramento conforme os diâmetros comerciais dos granulares rochosos fornecidos pelas pedreiras (Brita 1, Brita 0, pedrisco e pó de pedra).

A Figura 2.10 ilustra as pilhas de RCD obtidas após o processo de britagem e peneiramento.

Figura 2.10 - Processo de britagem do RCD.



Fonte: Autor.

A norma ABNT NBR 15116 (2021) define 3 subclasses para os resíduos de construção de demolição:

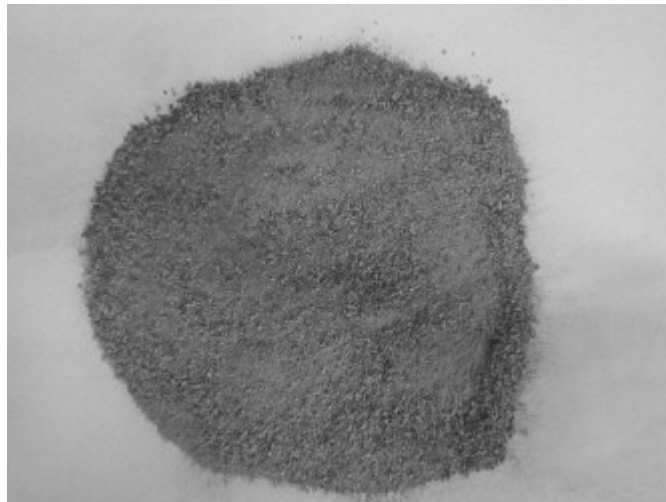
- ARCO: Agregado reciclado de concreto;
- ARCI: Agregado reciclado cimentício;
- ARM: Agregado reciclado misto.

A diferença entre o ARCI e o ARCO se dão principalmente pelo último não possuir praticamente nenhum material cerâmico. O ARCI possui teores bem reduzidos de material cerâmico, enquanto o ARM é uma mistura de material cimentício e cerâmico. De forma prática, a predominância de material cimentício ou cerâmico pode ser indicada facilmente por ser de

aspecto acinzentado ou alaranjado/avermelhado, respectivamente (DELONGUI 2012; SILVA, 2009; QUIÑONES, 2014), mas ensaios laboratoriais são importantes para confirmar as afirmações.

Chen et al. (2011), realizou ensaios de caracterização do pó do RCD para utilização em misturas asfálticas, proveniente de uma construção em Wuhan, na China. Esse resíduo era de origem cimentícia, caracterizado por possuir cor mais acinzentada (Figura 2.11), em que foram realizados ensaios de difração de Raios-X, espectrometria por Fluorescência de Raios-X (FRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), que indicaram forte presença de quartzo e calcita na composição química do material, originários da areia e do cimento hidratado.

Figura 2.11 - RCD oriundo de material cimentício.



Fonte: Chen et al. (2011).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo serão abordados os materiais utilizados na pesquisa, apresentando os parâmetros de caracterização dos granulares pétreos, do ligante betuminoso, bem como do RCD. Ainda, serão descritas as metodologias utilizadas tanto na concepção quanto nos ensaios laboratoriais aplicados às misturas asfálticas formuladas.

3.1. GRANULARES PÉTREOS

Os granulares pétreos utilizados na composição das misturas asfálticas foram obtidos de britagem do maciço rochoso gnáissico pertencente à jazida da empresa Rudnick Minérios Ltda., parceira do LDTPav, localizada no distrito de Pirabeiraba, região metropolitana de Joinville/SC. De acordo com Meurer (2015), o maciço mencionado está inserido em uma zona de transição situada entre o Complexo Granulítico Santa Catarina e o Granito Piraí, tendo sido o primeiro formado entre 2800 a 2500 milhões de anos atrás e, o segundo a 600 milhões de anos atrás.

A Tabela 3.1 apresenta os resultados dos parâmetros de caracterização dos granulares pétreos utilizados.

Tabela 3.1 - Resultados da caracterização do material rochoso.

ENSAIO	RESULTADOS	LIMITES	NORMA
Abrasão Los Angeles	13,4%	$\leq 50\%$	DNER-ME 35/98
Durabilidade	3,1%	$\leq 12\%$	DNER-ME 89/94
Índice de forma	0,65	$\geq 0,5$	NBR 7809/2006
Adesividade	Má	-	DNER-ME 78/94
Equivalente de areia	78%	-	DNER-ME 54/97
Teor de material pulverulento	0,1%	$\leq 1,0\%$	DNER-ME 266/97
Absorção	0,3%	-	-
Massa específica aparente	2,768 g/cm ³	-	DNER-ME 195/97
Massa específica real	2,812 g/cm ³	-	DNER-ME 195/97

Fonte: Autor.

Como é possível observar na Tabela 3.1, tem-se que o material rochoso atende às especificações para aplicação em obras de pavimentação, exceto quanto à adesividade que

resultou má. Esta condição está associada à origem gnáissica da rocha matriz, pois contém um percentual majoritário de sílica (SiO_2) em sua composição, constituindo granulares com carga elétrica predominantemente eletronegativa (CLARA, 2020), os quais prejudicam a afinidade adesiva com o ligante betuminoso, conforme abordado no tópico 2.3.

Cabe destacar, porém, que não foi utilizado nenhum aditivo químico ou adição como melhorador de adesividade às misturas asfáltica, a fim de não interferir no real comportamento do RCD incorporado nas formulações.

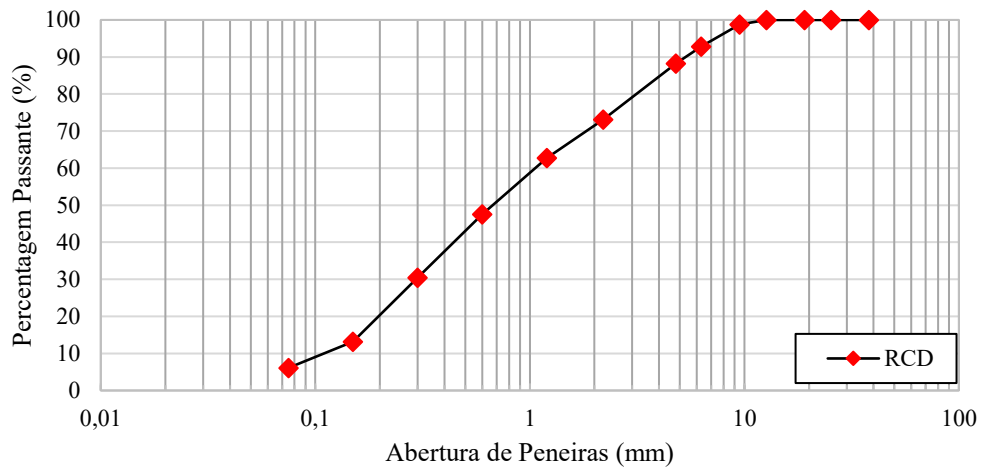
3.2. RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

O resíduo de construção e demolição (RCD) foi beneficiado por britagem e peneiramento nas instalações da empresa Terraplenagem Medeiros, em central localizada no município de Araquari/SC. Ato contínuo, ao serem recebidas as amostras no Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav), foram submetidas a um pré-processo de triagem e classificação, tanto por separação manual como por peneiramento, tendo sido selecionados apenas os materiais aptos para utilização como frações granulares na composição de misturas asfálticas. Neste contexto, foram descartados materiais que se encontram fora da Classe A do CONAMA (2002), como plásticos, fios, raízes vegetais, vidros, entre outros.

É importante ressaltar que nos trabalhos de Delongui (2012), Melo (2012) e Silva (2009), diversas granulometrias de RCD foram utilizadas, compreendendo frações passantes desde a peneira de 50,0 mm até passantes na de 0,075 mm, tendo sido relatadas quebras de partículas entre os maiores diâmetros, devido às fissurações causadas nos resíduos pelos impactos gerados durante os procedimentos de demolição ou descarte.

Além disso, foi realizada a análise granulométrica (Figura 3.1) do RCD no LDTPav após triagem e classificação prévias, para verificação de quais seriam as frações granulares mais representativas percentualmente em sua distribuição, tendo-se observado que se encontravam a partir das frações passantes na peneira de abertura de 2,2 mm.

Figura 3.1 - Granulometria do RCD utilizado.



Fonte: Autor.

Portanto, com base nas experiências mencionadas e por ter sido igualmente verificado durante o processo de triagem e classificação do RCD utilizado nesta pesquisa o mesmo aspecto de fissuração em diversas partículas com diâmetros superiores a 2,2 mm, apenas frações abaixo deste diâmetro foram consideradas para aproveitamento nas formulações das misturas asfálticas.

A Figura 3.2 ilustra as leiras de onde foi coletado o RCD beneficiado para a execução da campanha experimental.

Figura 3.2 - Leiras do RCD coletado para realização da campanha experimental.



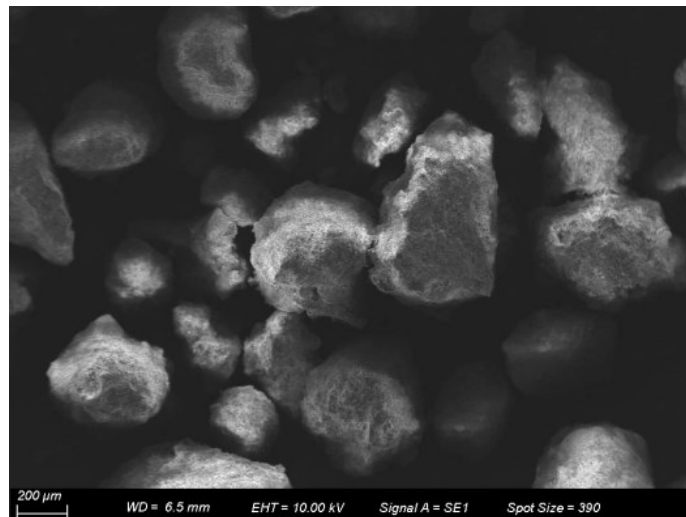
Fonte: Autor.

Finalizado o procedimento de peneiramento do RCD previamente triado e classificado no LDTPav, amostras foram conduzidas ao Laboratório de Caracterização Microestrutural (LACAMI) do Centro Tecnológico SATC, em Criciúma/SC, para a realização de análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV), difração de Raios-X (DRX), espectrometria por fluorescência de Raios-X (FRX) e textura superficial por adsorção de Nitrogênio (BET).

3.2.1. Microscopia eletrônica de varredura

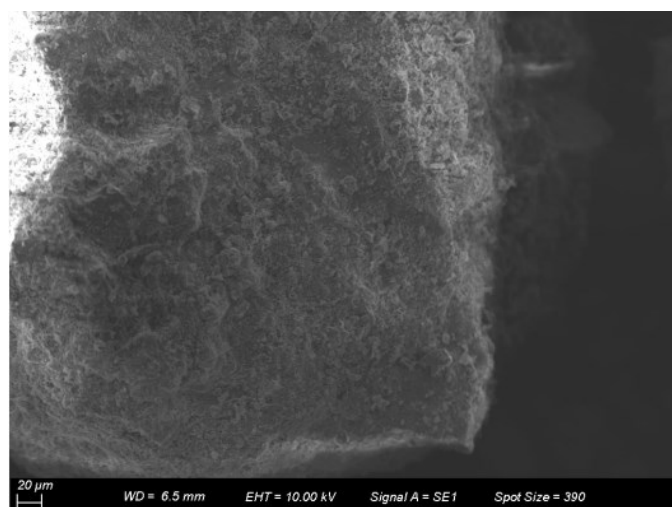
As imagens obtidas no MEV ilustram partículas do RCD com morfologia relacionada à macrotextura subangular (Figura 3.3) e microtextura rugosa (Figuras 3.4).

Figura 3.3 - Partículas do RCD com macrotextura subangular (ampliação em 100 vezes).



Fonte: Autor.

Figura 3.4 - Partícula do RCD com microtextura rugosa (ampliação em 500 vezes).



Fonte: Autor.

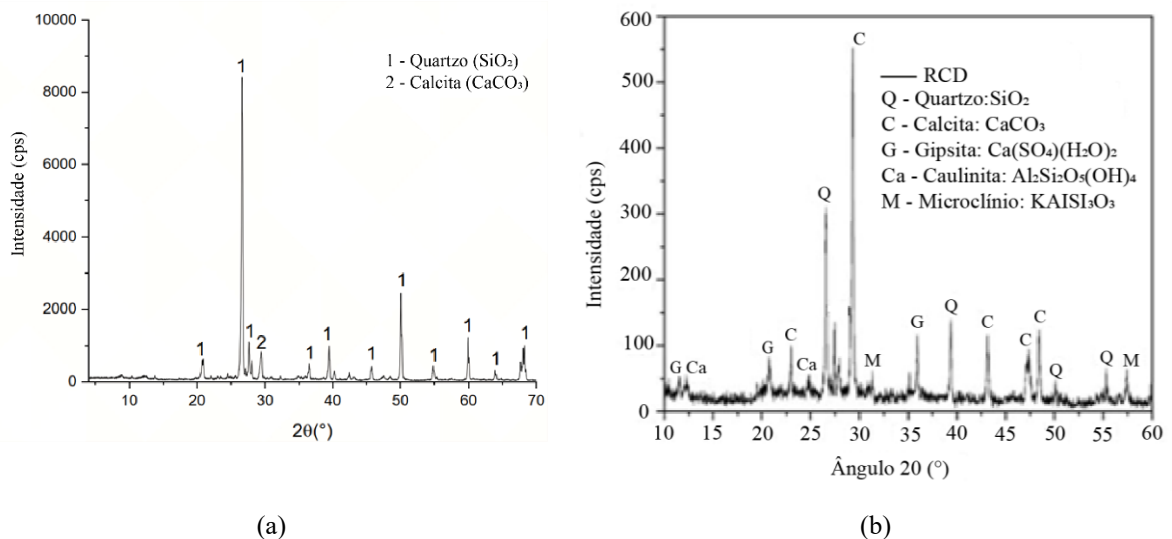
As partículas subangulares e com superfície áspera favorecem o aumento do ângulo do atrito interno no arranjo granulométrico e propiciam boa ancoragem do ligante betuminoso, em comparação com as frações arredondadas e superficialmente lisas, conforme abordado no tópico 2.3. Esta condição morfológica está associada ao processo de britagem a que o material foi submetido, pois proporciona a cominuição dos blocos brutos do RCD em partículas com arestas vivas e irregulares, que favorecem o bom intertravamento do arranjo granulométrico das misturas asfálticas (BARRA, 2005).

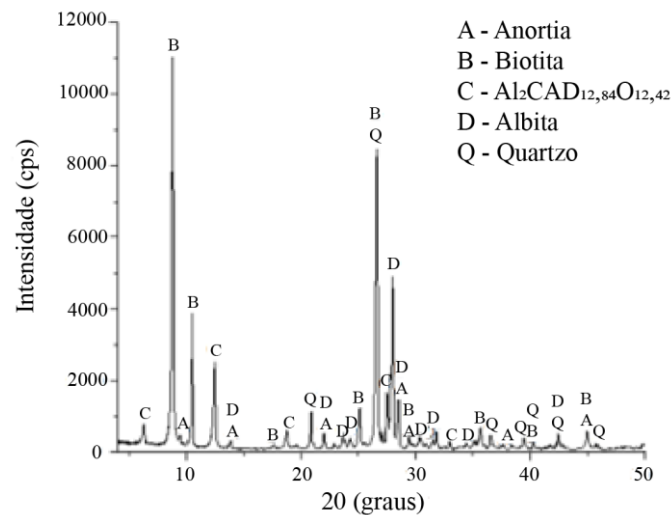
3.2.2. Difração de Raios-X

A análise por difração de Raios-X (DRX) foi realizada com o equipamento de modelo LabX XRD-6100 da marca Shimadzu, em que a identificação das fases ocorreu com auxílio do banco de dados da Crystallography Open Database (COD 2018), com tratamento dos dados no software Origin 2019 Professional.

Na Figura 3.5 são ilustrados os difratogramas obtidos com o RCD utilizado nesta pesquisa (Figura 3.5a), em comparação ao RCD estudado no trabalho de Sena (2018) e ao pó de pedra da rocha gnáissica da empresa Rudnick Minérios Ltda. Caracterizado por Clara (2020).

Figura 3.5 - Difratogramas do (a) RCD utilizado nesta pesquisa, (b) RCD estudado por Sena (2018) e, (c) pó de pedra caracterizado por Clara (2020).





(c)

Fonte: (a) Autor, (b) Sena (2018) e, (c) Clara (2020).

Os difratogramas dos RCD destacam os picos de quartzo e calcita nas Figuras 3.5a, b. Isto ocorre em razão do material ser oriundo de demolição de galpão industrial, em que a presença de cerâmica (tijolos, lajotas e pisos), derivados cimentícios (argamassa, cimento Portland e concreto), cal, areia e granulares britados de rocha (presentes na formulação dos traços de argamassa, contrapiso, reboco e concreto, e mesmo em peças de gesso e placas cimentícias) são predominantes.

Logo, tem-se que todos estes materiais mencionados, com exceção da cal, possuem uma quantidade expressiva de sílica (SiO_2) em suas composições, que é o principal elemento químico formador do quartzo, enquanto a calcita é o mineral base das cales, que também se encontram presentes na composição das argamassas e do cimento Portland.

O trabalho de Macedo et al. (2012) corrobora com as descrições efetuadas, pois ao caracterizar vários resíduos da indústria ceramista, observou a sobressalência da fase correspondente ao mineral quartzo. Ainda, a Figura 3.2 confirma a expressiva presença de cerâmica no RCD utilizado nesta pesquisa, pois apresenta cor alaranjada, indicando a argila constituinte da matéria-prima que dá origem aos tijolos e peças de revestimento cerâmicos (lajotas e pisos) utilizados em obras da construção civil.

Quanto ao pó de pedra (Figura 3.5c), as fases de anortita, biotita e albita, correspondem à clássica formação de materiais rochosos gnáissicos, como ramificação do cálcio, filossilicatos e feldspatos, respectivamente, associados aos picos de quartzo oriundos da presença de sílica (SiO_2), conforme destacado por Clara (2020).

3.2.3. Espectrometria por fluorescência de Raios-X

A composição química do RCD (Tabela 3.2) foi determinada por espectrometria por fluorescência de Raios-X (FRX), de acordo com a norma ASTM D 7348-07, com prévio procedimento de perda ao fogo (PF), a fim de eliminar impurezas contidas nas amostras.

Tabela 3.2 - Composição química do RCD.

ELEMENTOS	TEOR (%)
SiO ₂	62,032
CaO	16,849
Al ₂ O ₃	10,736
Fe ₂ O ₃	4,665
MgO	1,848
K ₂ O	1,611
SO ₃	0,809
TiO ₂	0,754
Outros	0,219
PF	0,480
Total	100,0

Fonte: Autor.

Com base na Tabela 3.2, nota-se que a sílica (SiO₂) se destaca em relação aos outros elementos, conforme verificado nas análises de DRX. Chen et al. (2011) e Sena (2018) também pontuam que a característica silicosa se sobressai na composição química do RCD.

Além disso, a presença de SiO₂, Fe₂O₃ e Al₂O₃ indicam materiais cerâmicos, mas também de granulares naturais oriundos de rocha. No caso do CaO, está relacionada ao gesso descartado em obras e às partículas das pastas de cimento, fato corroborado pelo trabalho de Chen et al. (2011), em que foi usado RCD de origem cimentícia que portava um teor de 35,59 % de SiO₂ e 29,20 % de CaO.

Na Tabela 3.3 é apresentada a composição química do pó de pedra utilizado nesta pesquisa, com dados da pesquisa de Clara (2020), sendo perceptível a predominância de SiO₂, justificando a má adesividade com o ligante betuminoso (Tabela 3.1).

Tabela 3.3 - Composição química do pó de pedra.

ELEMENTOS	TEOR (%)
SiO ₂	53,602
Fe ₂ O ₃	14,505
Al ₂ O ₃	10,928
CaO	8,080
MgO	3,260
K ₂ O	2,576
TiO ₂	1,228
SO ₃	0,435
MnO	0,252
ZrO ₂	0,102
V ₂ O ₅	0,073
SrO	0,055
ZnO	0,042
Cr ₂ O ₃	0,033
Na ₂ O	2,311
PF	2,311
Total	100

Fonte: Clara (2020).

3.2.4. Textura superficial

A análise textural do RCD foi procedida a partir da técnica de adsorção de Nitrogênio em baixas temperaturas, com auxílio do equipamento da marca Quantachorme, modelo Quadrasorb evo, e tratamento dos dados com o uso do software QuadraWin. A Tabela 3.4 apresenta os resultados obtidos para o RCD, em comparação ao pó de pedra.

Tabela 3.4 - Resultados das análises textural

ANÁLISES	RCD	PÓ DE PEDRA (CLARA, 2020)	UNIDADE
Área Superficial	7,990	3,052	m ² /g
Volume de Poros	0,03463	0,01285	cm ³ /g
Raio Médio de Poros	86,69	84,20	Å

Fonte: Autor.

Tem-se que o RCD possui superfície específica e porosidade quase três vezes maiores que a do pó de pedra, ensejando que quando for utilizado nas dosagens das misturas asfálticas, requererão maiores teores de ligante betuminoso para propiciação de bom recobrimento das frações granulares.

3.3. LIGANTE BETUMINOSO

O ligante betuminoso é classificado por penetração como 30/45 (0,1 mm), em sua forma pura, produzido pela refinaria REPLAN da Petrobrás, localizada em Paulínia/SP, e fornecido pela empresa CBB Asfaltos, de Curitiba/PR. A Tabela 3.5 apresenta as propriedades características do material.

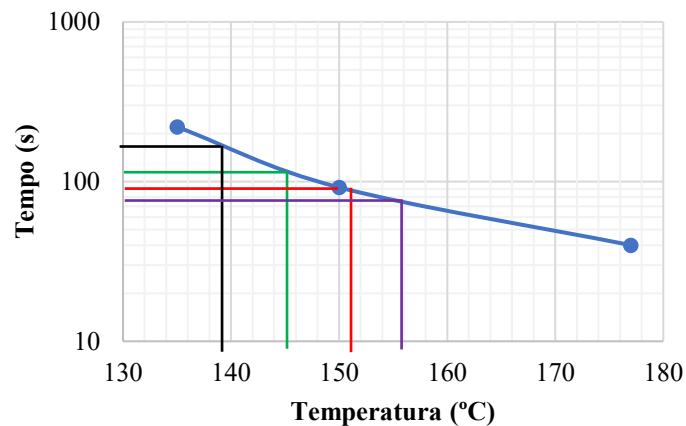
Tabela 3.5 - Parâmetros característicos do ligante betuminoso 30/45.

CARACTERÍSTICAS	MÉTODO	RESULTADO	ESPECIFICAÇÃO	UNIDADE
Penetração	D 5	34	30 a 45	0,1 mm
Ponto de Amolecimento	D 36	53,5	52, mín.	°C
Ductibilidade a 25°C	D 113	> 150	60, mín.	% massa
Solubilidade no tricloroetileno	D 2042	99,9	99,5, mín.	% massa
Ponto de fulgor	D 92	352	235, mín.	°C
Índice de susceptibilidade térmica	X 18	-1,2	1,5 a +0,7	
Densidade relativa a 24°C	D 70	1,01	-	g/cm ³
Aquecimento a 177°C	X 215	Não espuma	Não espuma	

Fonte: REPLAN (2018).

Ainda, com base no ensaio de viscosidade Saybolt-Furol executado por Clara (2020), que utilizou a mesma amostragem de ligante betuminoso desta pesquisa, obteve-se a curva de viscosidade (Figura 3.6) que indicou as temperaturas de usinagem em 155 °C e de compactação em 145 °C. Para aquecimento dos granulares, a temperatura de 168 °C foi utilizada, atendendo ao intervalo de 10 °C a 15 °C acima do valor adotado para usinagem, conforme preconizado pela norma DNIT ES-031 (2006).

Figura 3.6 - Curva de viscosidade Saybolt-Furol do ligante betuminoso 30/45.



Fonte: Siroma (2018).

3.4. CURVA GRANULOMÉTRICA

Para formulação da curva granulométrica das misturas asfálticas, existem diversos métodos que podem ser adotados, podendo ser citados: tentativa, racional, algébrico, gráfico de Rothfuchs e do Instituto do Asfalto (BARRA, 2009; SENÇO, 2008).

O método por tentativa é o mais aplicado no Brasil (ARALDI, 2017), em que constrói-se uma curva granulométrica a partir da combinação de frações heterogêneas comerciais que se encaixe nos limites das faixas granulométricas determinados por DNIT ES-031 (2006).

No caso do método racional ou teórico, tem-se o controle de cada fração que compõe curva, a cada peneira, obtendo-se controle preciso das frações pelo projetista, com o preenchimento gradual dos vazios formados pelos diâmetros de maior dimensão (ANDRADE, 2018).

Nas composições granulométricas, no total de quatro utilizadas nesta pesquisa, o RCD substituiu parcialmente as frações granulares oriundas de rocha gnáissica britada, da seguinte forma:

- Referência: sem substituição por RCD, em que a composição é integralmente constituída por frações de granulares britados de rocha gnáissica;
- 7,0 %: substituição da fração granular rochosa passante na 0,075 mm pela mesma fração correspondente ao RCD;
- 15%: substituição das frações rochosas passantes na peneira 0,30 mm pelas mesmas frações correspondentes ao RCD;
- 30%: substituição das frações rochosas passantes na peneira 2,2 mm pelas mesmas frações correspondentes ao RCD.

Para o cálculo das curvas granulométricas foram utilizadas as Equações 3.1 e 3.2 de Füller-Talbot.

$$\%p = a \left(\frac{d}{D} \right)^n \quad (3.1)$$

Onde:

$\%p$: percentagem em peso que passa em uma dada peneira da série escolhida;

a : constante, tomada igual a 100;

d : abertura de uma dada peneira (mm);

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

n : expoente de graduação.

$$n = \frac{\log(\%p_i) - \log(100)}{\log\left(\frac{0,075}{D}\right)} \quad (3.2)$$

Onde:

n : expoente de graduação;

$\%p_i$: percentagem em peso que passa na peneira de menor diâmetro (0,075 mm);

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

De acordo com DNIT (2006b), o expoente n permite classificar as graduações das curvas granulométricas como:

- Densa: $0,35 < n < 0,55$;
- Aberta: $0,55 < n < 0,75$;
- Macadame: $D \approx 2d$ e $n \approx 1$.

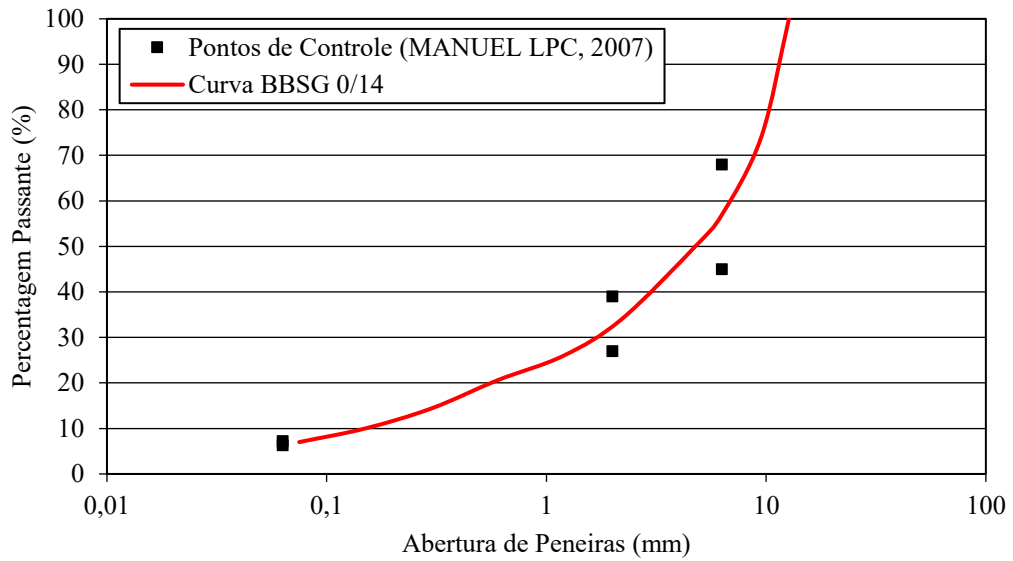
Para esse trabalho, a curva granulométrica proposta é de uma mistura asfáltica do tipo *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG), de graduação 0/14 mm, com diâmetro máximo de 12,7 mm e 7,0 % passante na peneira de abertura 0,075 mm. Logo, o valor de n obtido foi de 0,52, o que corresponde uma curva de graduação densa. A Tabela 3.6 apresenta e a Figura 3.7 ilustra a distribuição granulométrica obtida, com os respectivos pontos de controle indicados pela metodologia francesa (MANUEL LPC, 2007).

Tabela 3.6 - Composição granulométrica em função da curva teórica para misturas BBSG 0/14.

ABERTURA (mm)	% PASSANTE	% RETIDO
12,7	100,0	-
9,5	74,0	26,0
6,3	57,0	17,0
4,76	50,0	7,0
2,2	34,0	16,0
1,2	26,0	8,0
0,6	20,6	5,4
0,3	14,4	6,2
0,15	10,0	4,4
0,075	7,0	3,0
-	-	7,0

Fonte: Autor.

Figura 3.7 - Representação gráfica da curva granulométrica BBSG 0/14.



Fonte: Autor.

3.5. ENSAIOS LABORATORIAIS

Neste tópico serão abordados os procedimentos para execução dos ensaios de: massa volumétrica real (MVR); Marshall; resistência à tração por compressão diametral, também denominado de resistência à tração indireta, e; Duriez a 18° C.

3.5.1. Massa volumétrica real

Este ensaio é realizado com o objetivo de determinar a massa volumétrica real (MVR) das misturas asfálticas, em estado solto (AFNOR NF EN 12697-5, 2019), com o uso da Equação 3.3.

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

Onde:

MVR : massa volumétrica real da mistura asfáltica, em g/cm³;

m_1 : massa do conjunto picnômetro + água, em g;

m_2 : massa do conjunto picnômetro + água + amostra, em g;

m_3 : massa do conjunto picnômetro + água + amostra, após a bomba de vácuo, em g;

V_{pic} : volume do picnômetro calibrado, em cm^3 ;

$\rho_{\text{água}}$: massa específica da água a uma determinada temperatura, em g/cm^3 .

Para cada teor de ligante betuminoso, duas amostras foram ensaiadas com massa total de 635 g, correspondente a 50 vezes o diâmetro máximo da curva granulométrica (12,7 mm; Tabela 3.6). A Figura 3.8 ilustra uma visão geral das amostras preparadas para teste.

Figura 3.8 - Amostra preparada para o ensaio de MVR.



Fonte: Autor.

É importante destacar que, inicialmente, os teores de ligante 4,22 %, 4,54 %, 4,86 %, 5,18 % e 5,50 % foram selecionados para teste, tanto para as misturas de referência quanto para aquelas com adição de 7,0 %, 15,0 % e 30,0 % do RCD. Contudo, como abordado ao longo da seção 3.2, o RCD utilizado é material que possui porosidade e superfície específica elevadas, quase três vezes maior que as amostras de pó de pedra, contribuindo para maior absorção de ligante betuminoso durante os procedimentos de preparação das misturas asfálticas. Desta forma, foi verificado que parte dos teores iniciais selecionados apresentaram recobrimento insuficiente dos granulares, sobretudo quanto maiores foram as dosagens de RCD, conforme pode ser observado na Figura 3.9.

Figura 3.9 - Amostra do ensaio de MVR com 30,0 % de RCD e teor de ligante em 4,54 %.



Fonte: Autor.

Diante das condições observadas, foi necessário executar uma nova batelada de ensaios, a fim de verificar a partir de quais teores as misturas asfálticas compostas com RCD apresentavam bom envolvimento pelo ligante betuminoso (Figura 3.10), tendo sido alcançados os seguintes resultados:

- 7,0 % RCD: 4,86 %, 5,18 %, 5,50 %, 5,82 % e 6,14 %;
- 15,0 % RCD: 5,18 %, 5,50 %, 5,82 %, 6,14 % e 6,46 %;
- 30,0 % RCD: 6,14 %, 6,46 %, 6,78 %, 7,10 % e 7,42 %.

Figura 3.10 - Amostra do ensaio de MVR com 30,0 % de RCD e teor de ligante em 6,14 %.



Fonte: Autor.

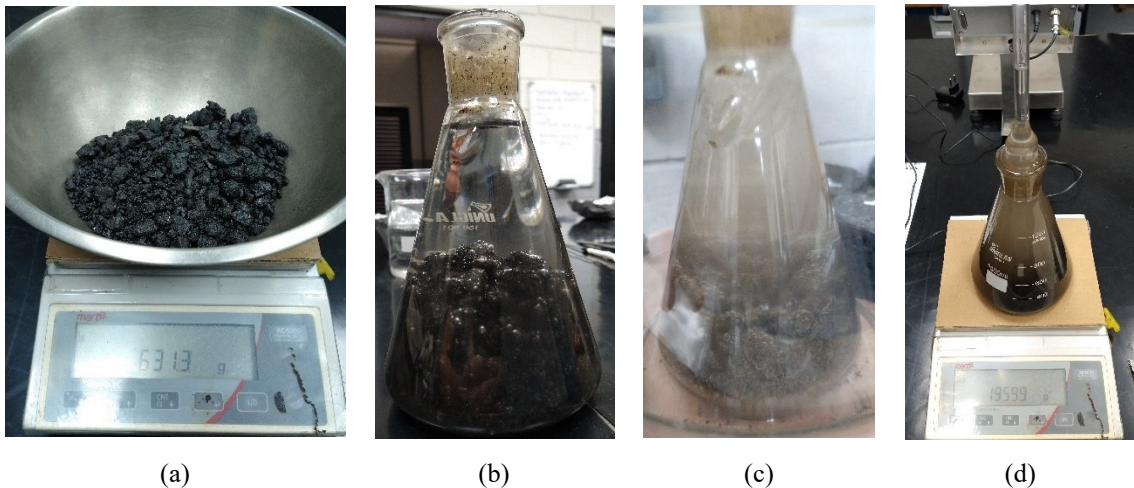
Para a preparação das amostras, o ligante betuminoso foi aquecido a 155 °C, conforme parâmetros indicados pela curva de viscosidade (Figura 3.6), e os granulares a 168 °C, ou seja, 13 °C acima da temperatura de usinagem do ligante.

Após finalizado o procedimento de mistura do ligante betuminoso com as frações granulares, a amostra é espalhada em uma bandeja para repouso e resfriamento até a temperatura ambiente por 24 horas.

Antes da realização do ensaio propriamente dito, é necessário desgrumar manualmente o material solto até que as partículas se encontrem bem individualizadas, porém, sem exercer muita força para que não haja fissuração da película de ligante ou quebra dos granulares.

São tomados os pesos do Erlenmeyer, com volume previamente calibrado, a seco e com água até a marca de aproximadamente 800 ml. Em seguida, insere-se a amostra de mistura asfáltica no interior do Erlenmeyer com água, alocando-o sem a rolha no dessecador da bomba de vácuo por 2 horas a 350 mmHg, com o intuito de retirar o ar presente nos interstícios. Por fim, é tomado o peso do conjunto com água até o menisco da rolha. Tendo sido aferidos os pesos descritos, tem-se que a MVR das misturas asfálticas é determinada conforme a Equação 3.3. A Figura 3.11 ilustra as etapas dos procedimentos realizados.

Figura 3.11 - Procedimento do ensaio de MVR: (a) peso da amostra seca, (b) amostra com água; (c) retirada de ar dos interstícios com a bomba de vácuo; (d) peso final do conjunto com água até o menisco da rolha.



Fonte: Autor.

3.5.2. Ensaio Marshall

O ensaio Marshall é oficialmente homologado pelo DNIT a partir da norma DNER ME-043 (1995). Para a produção dos corpos de prova, os teores de ligante betuminoso utilizados foram os mesmos já estabelecidos no ensaio de MVR.

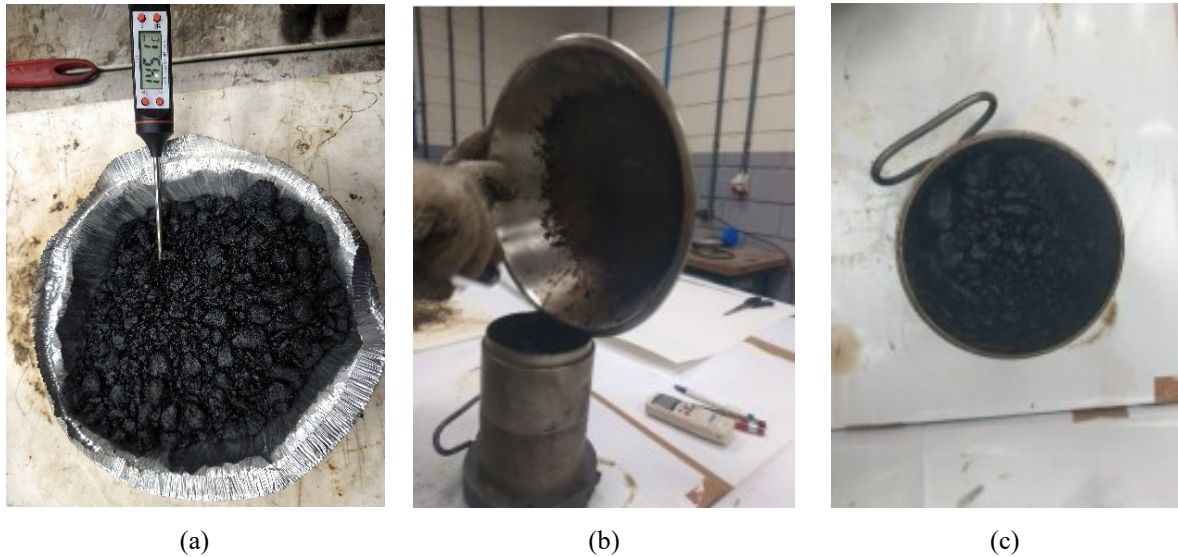
Todavia, foram acrescentados mais dois novos teores de ligante betuminoso nas dosagens das misturas asfálticas formuladas com 15,0 % (4,54 % e 4,86 %) e 30,0 % (5,50 % e 5,82 %) de RCD, pois ao terem sido determinados os teores de vazios das amostras produzidas inicialmente, foi verificado que os percentuais obtidos estavam muito reduzidos, da ordem de 3,50 % e 2,90 % para as dosagens de ligante betuminoso de partida com 5,18 % e 6,14%, respectivamente, conforme poderá ser observado mais detalhadamente nos resultados apresentados no capítulo 4. Um total de 120 corpos de prova foram produzidos.

Assim, foi mantido o intervalo de 0,32 % entre as dosagens percentuais de ligante betuminoso que já vinham sendo aplicadas, ficando distribuídos finalmente da seguinte forma:

- Referência: 4,22 %, 4,54 %, 4,86 %, 5,18 % e 5,50 %;
- 7% RCD: 4,86 %, 5,18 %, 5,50 %, 5,82 % e 6,14 %;
- 15% RCD: 4,54 %, 4,86 %, 5,18 %, 5,50 %, 5,82 %, 6,14 % e 6,46 %;
- 30% RCD: 5,50 %, 5,82 %, 6,14 %, 6,46 %, 6,78 %, 7,10 % e 7,42 %.

Durante a preparação das amostras, foi realizado o controle minucioso das temperaturas de usinagem (155 °C) e de compactação (145 °C) das misturas asfálticas, a fim de que fossem respeitadas as condições adequadas de trabalhabilidade dos materiais, sem gerar prejuízos aos resultados obtidos (Figura 3.12).

Figura 3.12 - Processo de pré-compactação dos corpos de prova: (a) controle da temperatura após a usinagem, (b) transferência da amostra para o molde e, (c) amostra pronta para ser compactada.



Fonte: (a) Autor; (b) e (c) Xavier (2022).

Com a mistura no interior do molde, aplicam-se 25 golpes vigoroso com uma espátula metálica, sendo 15 circundando as bordas internas e no 10 ao centro, proporcionando uma pré-densificação da amostra a fim de evitar vazios mal distribuídos. Ato contínuo, nivela-se a superfície para que não apresente desnível. Coloca-se papel filtro sobre a face superior da amostra, tal como realizado antes de sua colocação no interior do molde, a fim de evitar aderência com os equipamentos durante a compactação, sendo finalmente conduzida ao soquete Marshall (Figura 3.13) para compactação, em que serão contabilizados 75 golpes por face.

Figura 3.13 - Soquete Marshall.



Fonte: Xavier (2022).

Após a compactação, a extração das amostras com uso de extrator hidráulico, evitando avarias e deformações nos corpos de prova. Em seguida, um repouso mínimo de 24 horas é recomendado antes de prosseguir com o ensaio, com o intuito de que o processo de ancoragem do ligante betuminoso com o arranjo granular ocorra de forma adequada.

As propriedades físicas das amostras são determinadas a partir da massa específica aparente (MEA) dos corpos de prova (Equação 3.4):

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

Onde:

MEA: massa específica aparente, em g/cm³;

P_s: peso seco do corpo de prova, em g;

R: raio do corpo de prova, em cm;

h_m: altura média, em cm.

De posse dos resultados correspondentes à MVR (Equação 3.3) e à MEA (Equação 3.4), determinam-se os demais parâmetros físicos, a saber:

- Teor de Vazios (%V) (Equação 3.5);
- Vazios Cheios com Betume (VCB) (Equação 3.6);
- Vazios do Agregado Mineral (VAM) (Equação 3.7);
- Relação Betume/Vazios (RBV) (Equação 3.8).

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

Onde:

%V: percentagem de vazios, em %;

MVR: massa volumétrica real do corpo de prova, em g/cm³;

MEA: massa específica aparente do corpo de prova, em g/cm³.

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

Onde:

%VCB: percentagem de vazios cheios com betume, em %;

%L: teor de ligante, em %;

$D_{ligante}$: massa específica do ligante betuminoso, em g/cm^3 .

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

Onde:

$\%VAM$: percentagem de vazios do agregado mineral, em %.

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

Onde:

$\%RBV$: relação betume/vazios, em %.

Determinadas as propriedades físicas, os corpos de provas são submetidos à imersão em banho-maria a $60\text{ }^\circ\text{C}$ por um período de 30 a 40 minutos. Em seguida, conduzidos à prensa Marshall para verificação da resistência à ruptura por compressão diametral (estabilidade) e respectiva deformação (fluência), conforme ilustrado na Figura 3.14.

Figura 3.14 - Procedimento de ruptura dos corpos de prova.



Fonte: Autor.

3.5.3. Mancha de areia

O ensaio de mancha de areia é um método para avaliação da rugosidade superficial das misturas asfálticas, sendo preconizado pela norma AFNOR NF EN 13036-1 (2010).

Consiste em formar círculos sobre as superfícies das misturas asfálticas, a partir do espalhamento de uma areia com volume ($25,0 \text{ cm}^3$) e granulometria padronizadas, passante na peneira 0,3 mm e retida na 0,15 mm, com o auxílio de um soquete com base emborrachada (Figura 3.15).

Figura 3.15 - Conjunto para execução do ensaio de mancha de areia.



Fonte: O Autor.

Formado o círculo com o espalhamento da areia, é medido o diâmetro em três direções distintas, sendo adotada a média, determinando-se a altura da mancha de areia (Equação 3.9).

$$HS = \frac{4V}{\pi D_m^2} \quad (3.9)$$

Onde:

HS : altura média da mancha de areia, em mm;

V : volume de material a ser espalhado, em cm^3 ;

D_m : diâmetro médio formado pelo espalhamento do material, em cm;

Cabe ressaltar que, para este trabalho, o volume do material foi reduzido de 25,0 cm³ para 1,0 cm³, devido às dimensões reduzidas dos corpos de prova Marshall, utilizados como amostra, em que a areia utilizada e calibrada possuía uma massa específica de 2,60 g/cm³.

A classificação da rugosidade superficial pelo ensaio da altura da mancha de areia pode ser determinada com o uso da classificação de Pasquet (1968) (Tabela 3.7).

Tabela 3.7 - Limites de aplicação do revestimento segundo sua macrot textura.

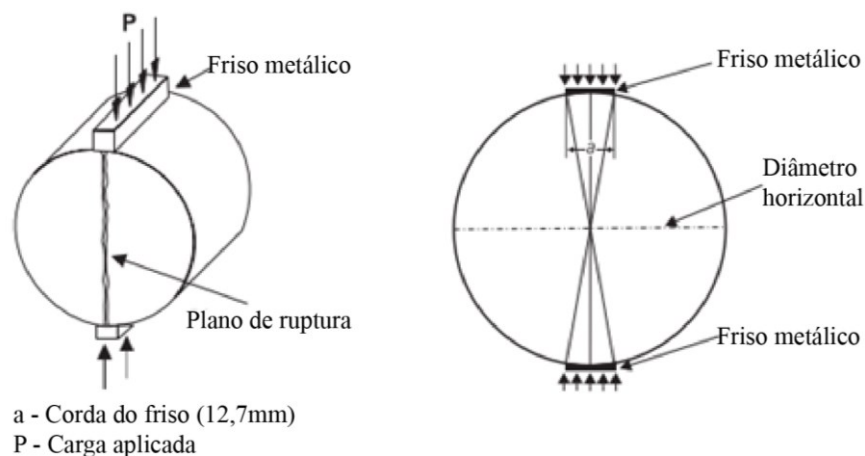
TEXTURA SUPERFICIAL	ALTURA (mm)	APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO
Muito Fina	$H < 0,2$	Não deve ser utilizado
Fina	$0,2 \leq H < 0,4$	Zonas Urbanas, $V < 80$ km/h
Média	$0,4 \leq H < 0,8$	Vias com $80 \text{ km/h} < V < 120 \text{ km/h}$
Grossa	$0,8 \leq H < 1,2$	Vias rápidas com $V > 120 \text{ km/h}$
Muito Grossa	$H > 1,2$	Casos Especiais: Clima muito frio e presença de gelo

Fonte: Pasquet (1968).

3.5.4. Resistência à tração por compressão diametral – Tração Indireta

O ensaio de resistência à tração indireta (DNIT-ME 136, 2018) com corpos de prova moldados pelo soquete Marshall, em que a ruptura é realizada a partir de uma força aplicada diametralmente sobre as amostras, transmitidas a partir de frisos metálicos que geram tensão de tração perpendicular à direção da carga (Figura 3.16), calculada conforme a Equação 3.10.

Figura 3.16 - Esquema do ensaio de tração indireta.



Fonte: DNIT-ME 136 (2018).

$$\sigma_R = RTI = \frac{2F}{\pi DH} \quad (3.10)$$

Onde:

σ_R : resistência à tração indireta, em MPa;

F : carga de ruptura, em kgf;

D : diâmetro do corpo de prova, em cm;

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

Nesta pesquisa foi testada à tração indireta a mesma quantidade amostral produzida para o ensaio Marshall, ou seja, de 120 corpos de prova. A Figura 3.17 ilustra o momento da ruptura de uma unidade.

Figura 3.17 - Ruptura de um corpo de prova à tração indireta.



Fonte: Autor.

3.5.5. Duriez a 18 °C

O ensaio de Duriez (AFNOR NF EN 12697-12, 2018) é realizado com o intuito de avaliar a resistência à ação deletéria da água nas misturas asfálticas.

O procedimento consiste em preparar 12 amostras por teor de ligante betuminoso. Cada unidade contém massa total de 1000 g, em razão do diâmetro máximo da curva granulométrica de 12,7 mm (Tabela 3.6) ser menor que 14,0 mm, conforme prevê a norma

supracitada. A compactação das amostras se dá por duplo pistão, aplicando-se 6,0 t por 5 minutos (Figura 3.18).

Figura 3.18 - Compactação dos corpos de prova por duplo pistão no ensaio de Duriez.



Fonte: Autor.

A desmoldagem dos corpos de prova ocorre também com o uso de extrator hidráulico, assim como nos ensaios Marshall e tração indireta já abordados, sendo posteriormente identificados e deixados em repouso por no mínimo 24 horas, pelas mesmas razões já descritas no tópico 3.5.2.

É importante mencionar que para o ensaio de Duriez não foram moldados corpos de prova para todos os teores de ligante betuminoso testados previamente nos ensaios Marshall e tração indireta, pois o critério utilizado para escolha das dosagens se deu a partir da análise conjunta dos teores potenciais de trabalho indicados pelos procedimentos supracitados, informados a seguir e a serem melhor discutidos na apresentação dos resultados no capítulo 4, totalizando 60 unidades produzidas:

- Referência: 4,86 %;
- 7,0 % RCD: 4,86 %, 5,18 %, 5,50 %;
- 15,0 % RCD: 4,86 %, 5,18 %, 5,50 %;
- 30,0 % RCD: 5,82 %, 6,14 %, 6,46 %.

Os 12 corpos de prova de cada teor são subdivididos em 2 grupos de 6 unidades, em que metade é condicionada por saturação em bomba de vácuo por 2 horas a 350 mmHg (Figura 3.19) e imersas em água a 18°C. A outra metade não condicionadas é mantida em um ambiente seco a 18°C. Ambas permanecem por um período de 7 dias em cada condição descrita.

Figura 3.19- Saturação das amostras no ensaio de Duriez.



Fonte: Autor.

Após os 7 dias de condicionamento, as amostras são conduzidas à prensa para a realização da ruptura por compressão simples, fazendo-se a relação entre a resistência do conjunto condicionado em água (r) e a seco (R). Para misturas asfálticas do tipo BBSG 0/14 mm formuladas para esta pesquisa, a relação r/R não deve ser inferior a 0,70 (MANUEL LPC, 2007).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo serão apresentados os resultados obtidos na campanha experimental realizada, bem como as discussões técnicas correspondentes.

4.1. MASSA VOLUMÉTRICA REAL

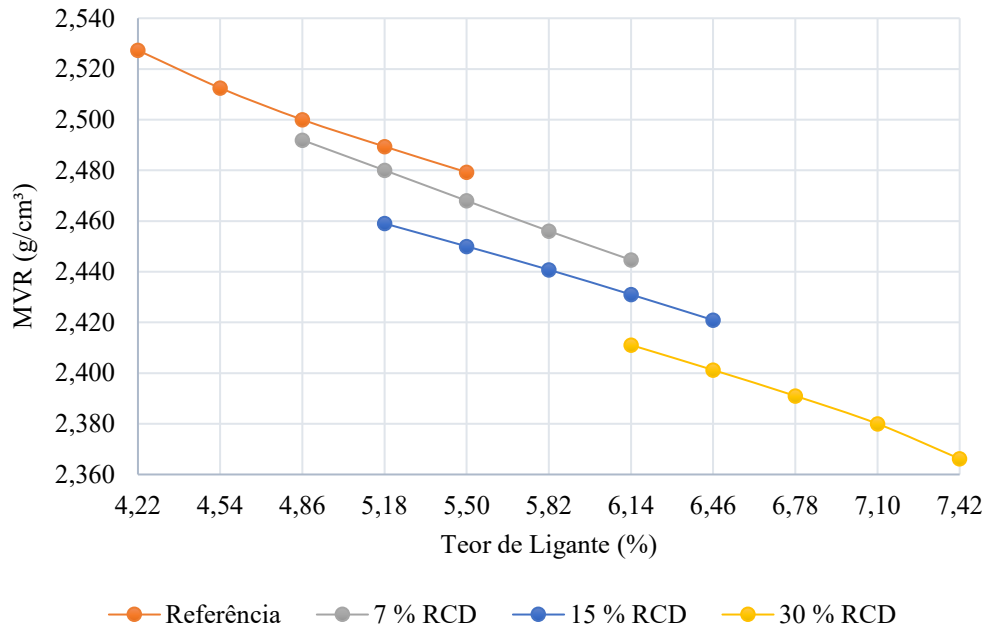
A determinação da MVR é fundamental no proporcionalmente de uma percepção inicial quanto à trabalhabilidade das amostras durante o processo de usinagem (Figuras 3.9 e 3.10), além de ser um parâmetro necessário ao cálculo do teor de vazios das misturas asfálticas (Equação 3.5). A Tabela 4.1 apresenta e a Figura 4.1 ilustra o valor médio de duas determinações tomadas para cada teor de ligante betuminoso selecionado para as formulações testadas.

Tabela 4.1 - MVR das formulações testadas.

REFERÊNCIA		7% RCD	
Teor (%)	MVR (g/cm ³)	Teor (%)	MVR (g/cm ³)
4,22	2,527	4,86	2,492
4,54	2,512	5,18	2,480
4,86	2,500	5,50	2,468
5,18	2,489	5,82	2,456
5,50	2,479	6,14	2,445
15% RCD		7% RCD	
Teor (%)	MVR (g/cm ³)	Teor (%)	MVR (g/cm ³)
4,54	2,479	5,50	2,431
4,86	2,469	5,82	2,421
5,18	2,459	6,14	2,411
5,50	2,450	6,46	2,401
5,82	2,441	6,78	2,391
6,14	2,431	7,10	2,380
6,46	2,421	7,42	2,366

Fonte: Autor.

Figura 4.1 - MVR das formulações testadas.



Fonte: Autor.

Os resultados observados na Figura 4.1 indicam uma tendência linear decrescente para todas as misturas asfálticas formuladas, decorrente da substituição crescente de frações granulares pelo ligante betuminoso, em razão deste último possuir massa específica real menor que a matriz pétreia (Tabelas 3.1 e 3.5).

Ainda, é perceptível que as formulações com incorporação de RCD alcançaram valores progressivamente menores que a mistura de referência, composta apenas por granulares britados de rocha. Isto é explicado pelo fato das partículas do RCD possuírem superfície específica e porosidade quase três vezes maiores que as rochosas, conforme discutido no tópico 3.2.4 e apresentado na Tabela 3.4. Estas características contribuem para que com o aumento da quantidade de RCD incorporado, maiores sejam o volume da amostra e a necessidade de utilização de ligante betuminoso na formulação, respectivamente, reduzindo a MVR das misturas asfálticas.

4.2. ENSAIO MARSHALL

Embora a mistura asfáltica BBSG 0/14 mm seja uma formulação estabelecida pela metodologia francesa para aplicação como camada funcional de rolamento nas estruturas de pavimento, tem-se que nesta pesquisa a metodologia Marshall, abordada no tópico 3.5.2, foi tomada como referência para a determinação dos parâmetros de dosagem. Neste contexto, a

Tabela 4.2 apresenta os parâmetros considerados na especificação de serviço DNER-ME 195 (1997), oficialmente adotada no Brasil para o projeto de misturas asfálticas destinadas à camada de rolamento.

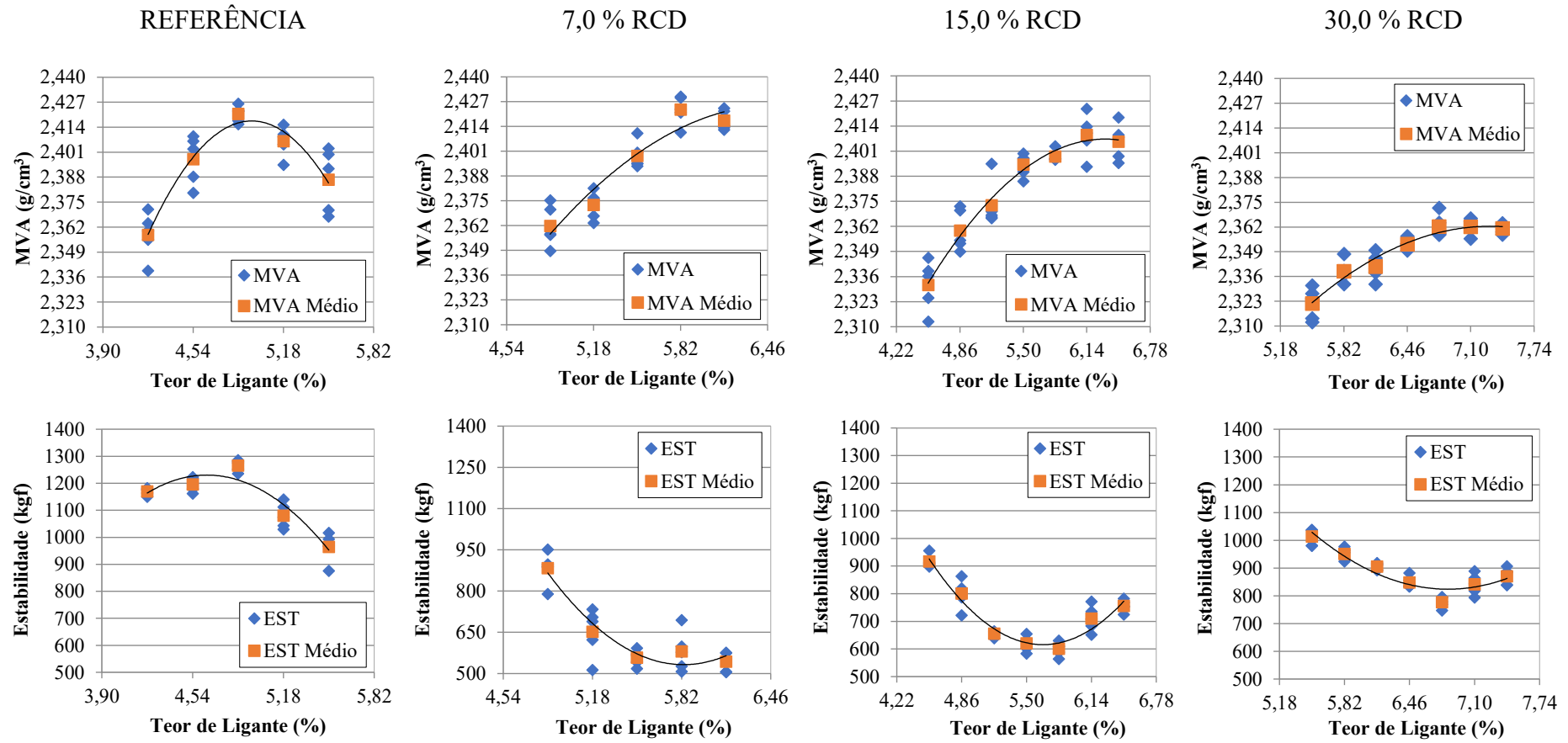
Tabela 4.2 - Parâmetros de dosagens para camada de rolamento.

CARACTERÍSTICAS	ENSAIO	CAMADA DE ROLAMENTO
% Vazios		3,0 a 5,0
Relação Betume/Vazios (%)	DNER-ME 043 (1995)	75 a 82
Estabilidade Mínima (kgf)		500
Resistência a Tração Mínima (MPa)	DNIT-ME 138 (2018)	0,65

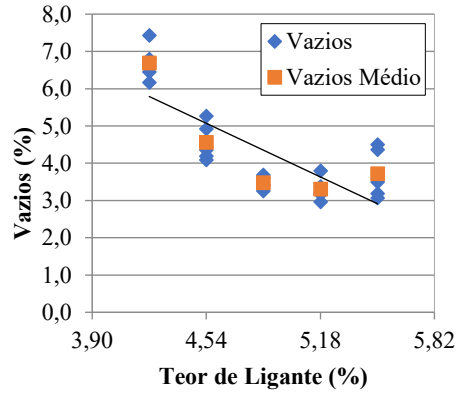
Fonte: DNIT-ES 031 (2006).

A Figura 4.2 ilustra os resultados obtidos no ensaio Marshall, compreendendo todas as formulações testadas e de forma comparativa, a fim de melhor visualizar e interpretar as informações para cada parâmetro analisado.

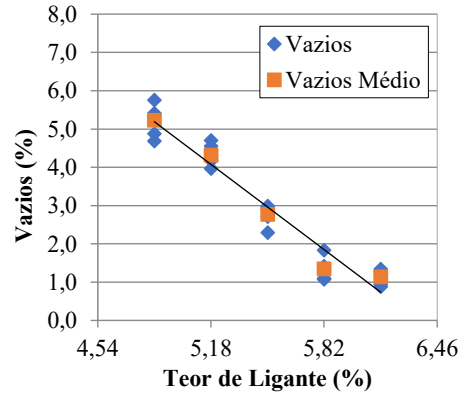
Figura 4.2 - Resultados do ensaio Marshall.



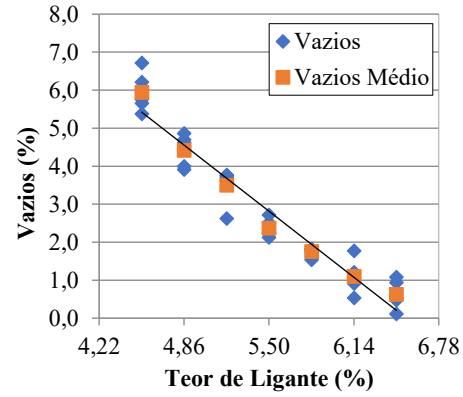
REFERÊNCIA



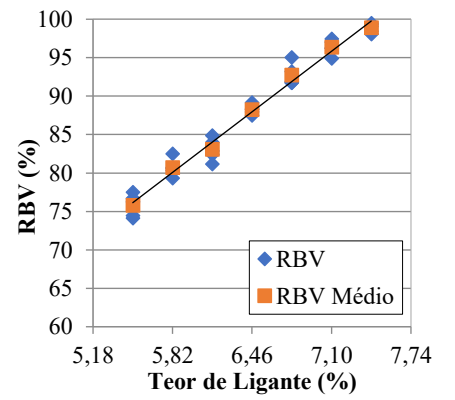
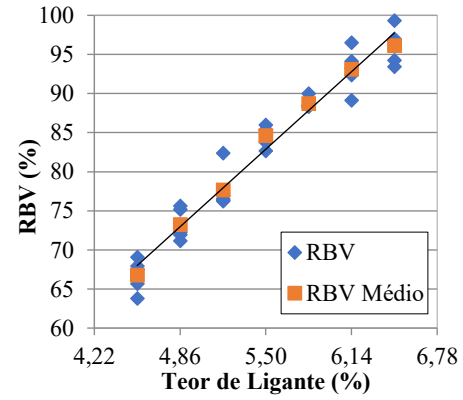
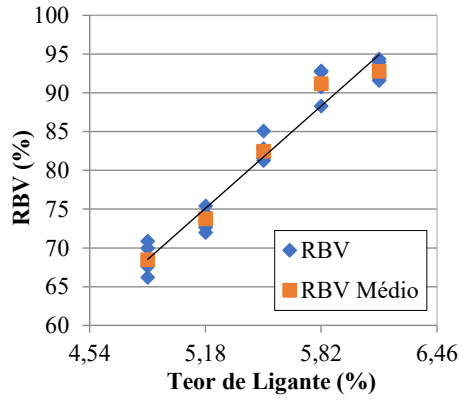
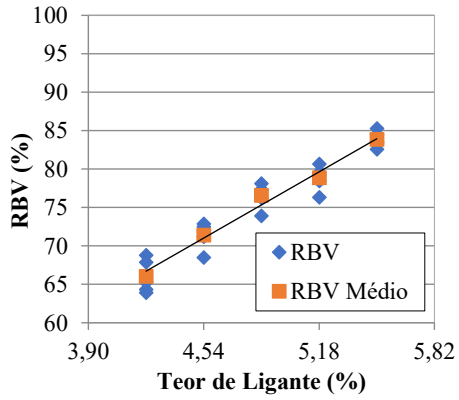
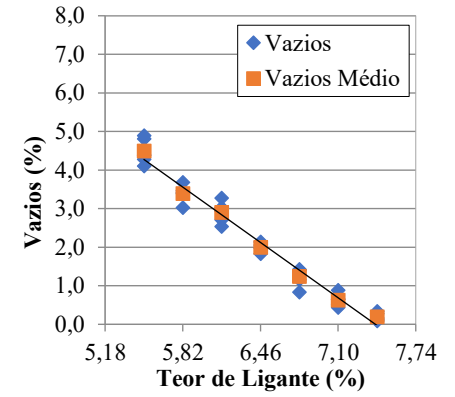
7,0 % RCD

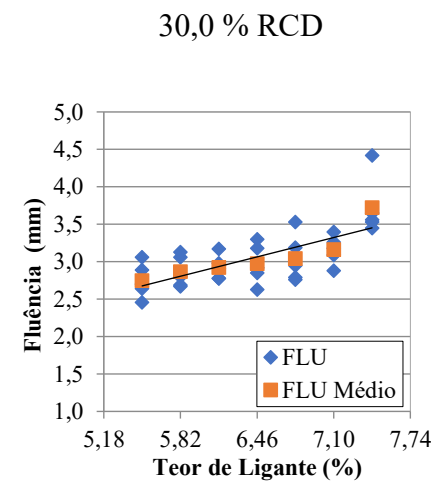
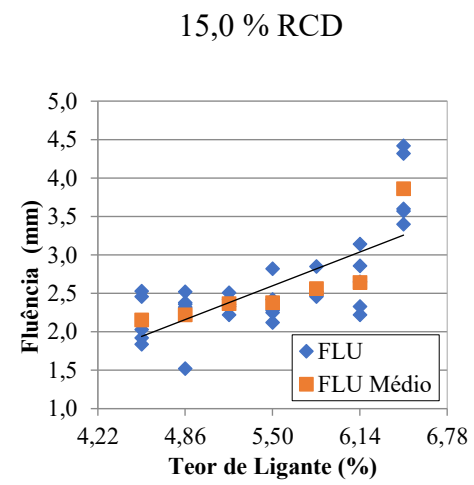
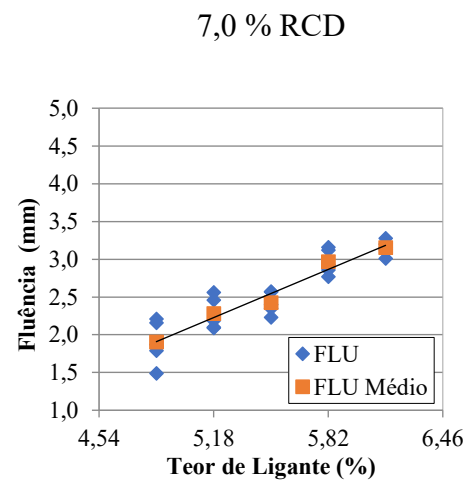
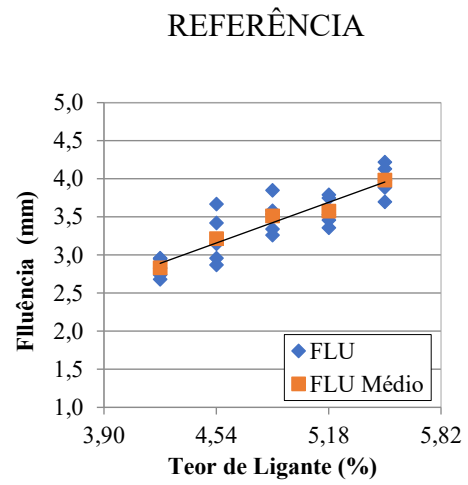


15,0 % RCD



30,0 % RCD





Fonte: Autor.

Observando os resultados apresentados nos gráficos da Figura 4.2, é possível constatar que, assim como explanado para as curvas de tendência da MVR (Figura 4.1), a porosidade e a superfície específica são os parâmetros mais influentes no comportamento de todas as formulações testadas, quando colocadas em condição comparativa.

Isto posto, em que pese as partículas de RCD possuam macrotextura subangular e microtextura rugosa (Figuras 3.2 e 3.3), tem-se que o fato da porosidade e da superfície específica serem quase três vezes maiores que as rochosas, conforme já abordado em algumas oportunidades neste trabalho, o aumento percentual progressivo de sua incorporação implica nos seguintes aspectos:

Maior área abrangida por unidade de peso e absorção de ligante betuminoso, acarretando em maior consumo deste último nas dosagens e respectivo preenchimento dos vazios formados pelos granulares de maiores dimensões. Como resultado, tem-se menor massa específica aparente (MEA), resistência mecânica (estabilidade) e teor de vazios das misturas asfálticas. Em contrapartida, maiores escalas de RBV são verificadas.

Quanto à estabilidade, é possível observar trajetórias parabólicas côncavas para as misturas asfálticas com incorporação de RCD, ao invés de convexas, como normalmente ocorre e é verificada na formulação de referência. Esta condição está associada ao fato de que nas dosagens com menor teor de ligante betuminoso, a resistência mecânica é atribuída principalmente ao arranjo granulométrico, pois as partículas de RCD absorvem boa parte do aglutinante conforme demonstrado no tópico 3.5.1.

À medida que estes teores aumentam, ocorre o decréscimo da resistência mecânica, em razão da forte redução no volume de vazios e maior atuação do ligante betuminoso na superfície de contato intergranular das amostras, elevando de forma gradativa o efeito lubrificante nestas áreas de contato e, ato contínuo, diminuindo a resistência aos esforços aplicados durante o procedimento de ruptura por compressão diametral. O resultado é a obtenção de valores em escalas próximas ao limite mínimo de 500 kgf preconizado pela especificação de serviço DNIT-ES 031 (2006) (Tabela 4.2), sobretudo nas incorporações de 7,0 % e 15,0 % de RCD.

Ainda, retomadas do aumento da estabilidade são observadas nas maiores dosagens de ligante betuminoso, porém, não por conta da melhoria das propriedades mecânicas das misturas asfálticas, mas pelo fato do excesso de ligante em suspensão produzir uma pressão fluídica inicial em resposta à aplicação dos esforços mecânicos solicitantes. Esta constatação tanto é verdade, que os ganhos de estabilidade são levemente crescentes, enquanto as fluências

observadas atingem os maiores valores, corroborando à interpretação dos dados discorrida e às tendências observadas nos trabalhos de Silva (2009) e Sena (2018).

Outro ponto importante a ser discutido diz respeito aos valores de fluência obtidos terem sido, em geral, maiores para a mistura de referência quando comparados às formulações com incorporação do RCD, enquanto se espera normalmente o contrário, principalmente pelos valores de estabilidade serem maiores.

Ocorre que devido à mistura asfáltica de referência ser composta integralmente por granulares britados de rocha, estes possuem maior resistência mecânica que o RCD. Logo, maior o tempo de carga aplicada necessário para que atinjam o colapso estrutural e, conseqüentemente, maior o deslocamento vertical resultante do tempo mais prolongado de aplicação dos esforços solicitantes. Raciocínio análogo, porém, com tendência inversa, é aplicável às formulações com incorporação de RCD.

Todavia, as representações gráficas do ensaio Marshall não permitem definir de forma assertiva qual seriam as dosagens de trabalho para cada formulação testada, pois levando em conta os limites normativos apresentados na Tabela 4.2, verifica-se que uma faixa de valores pode ser considerada como potencialmente utilizável em cada caso, condição que não permite ao projetista ter a possibilidade de uma escolha precisa deste parâmetro, fato que pode ser decisivo na especificação de uma mistura asfáltica com bom ou mau comportamento mecânico na prática.

A Tabela 4.3 apresenta os teores de ligante trabalho indicados pela metodologia Marshall como potencialmente utilizáveis para especificação de serviços de pavimentação.

Tabela 4.3 - Faixa de teores de ligante betuminoso indicadas pelo ensaio Marshall.

MISTURA ASFÁLTICA	TEORES DE LIGANTE
Referência	4,86 % a 5,18 %
7,0 % RCD	5,18 % a 5,50 %
15,0 % RCD	5,18 % a 5,50 %
30,0 % RCD	5,50 % a 6,14 %

Fonte: Autor.

Por esta razão, análises complementares foram realizadas com o intuito de fornecer maiores subsídios técnicos para que as escolhas dos teores de trabalho fossem mais assertivas. Para tanto, ensaios de mancha de areia, resistência à tração indireta e à ação deletéria da água foram procedidas e serão abordadas nos tópicos seguintes.

Contudo, para a mistura asfáltica de referência, o teor de ligante de trabalho selecionado foi de 4,86 %, tomando como base as pesquisas de Clara (2020) e Siroma (2018)

realizadas com a mesma mistura asfáltica BBSG 0/14 mm, incluindo granulares e ligante betuminoso provenientes dos mesmos fornecedores ao deste trabalho.

4.3. MANCHA DE AREIA

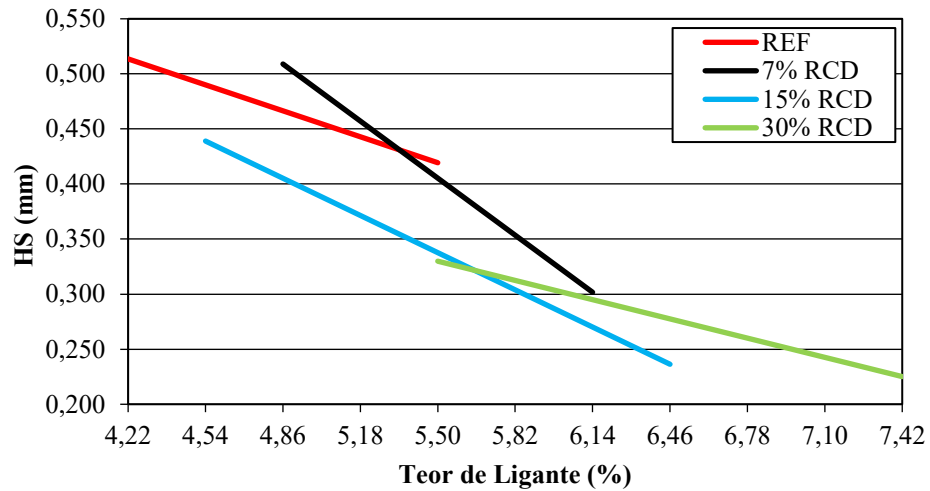
A Tabela 4.4 apresenta e a Figura 4.3 ilustra os resultados obtidos no ensaio de mancha de areia, a partir da média de três determinações obtidas em cada corpo de prova. Cabe lembrar que foram utilizadas as mesmas amostras moldadas para o ensaio Marshall, porém, com as medições tendo sido efetuadas previamente ao processo de ruptura.

Tabela 4.4 - Altura da mancha de areia das misturas asfálticas formuladas.

MISTURA ASFÁLTICA	TEOR DE LIGANTE (%)	MÉDIA (mm)
Referência	4,22	0,51
	4,54	0,49
	4,86	0,47
	5,18	0,44
	5,50	0,42
7,0 % RCD	4,86	0,50
	5,18	0,46
	5,50	0,41
	5,82	0,36
	6,14	0,30
15,0 % RCD	4,54	0,44
	4,86	0,40
	5,18	0,37
	5,50	0,34
	5,82	0,31
	6,14	0,28
30,0 % RCD	6,46	0,18
	5,50	0,33
	5,82	0,31
	6,14	0,29
	6,46	0,27
	6,78	0,26
	7,10	0,24
	7,42	0,20

Fonte: Autor.

Figura 4.3 - Tendências das alturas da mancha de areia das misturas asfálticas formuladas.



Fonte: Autor.

Considerando a classificação proposta por Pasquet (1968) (Tabela 3.7), tem-se que as misturas asfálticas de referência ficaram integralmente classificadas com textura superficial média, podendo ser utilizadas em vias com velocidades aplicadas de 80 km/h a 120 km/h. No caso das formulações com 7,0 % de RCD, as dosagens de 4,86 % a 5,18 % apresentaram textura média, enquanto de 5,82 % a 6,14 % ficaram enquadradas como fina, aplicáveis a vias urbanas com velocidades abaixo de 80 km/h.

Para a incorporação de 15,0 % de RCD, obteve-se a mesma tendência de 7,0 %, porém, as dosagens de 4,54 % a 4,86 % foram classificadas com textura média, e de 5,12 % a 6,46 % como fina. No que diz respeito às dosagens com 30,0 % de RCD, tem-se que todas foram enquadradas na classificação de textura fina.

Verifica-se que as tendências apresentadas estão em consonância com a composição das formulações testadas, pois como as misturas de referência possuem frações granulares rochosas com menor superfície específica, em relação aos mesmos diâmetros substituídos por RCD, apresentam menor área ocupada por unidade de peso, aumentando a rugosidade superficial do material. Esta análise é corroborada com o aumento gradativo do percentual de RCD nas dosagens, em que as texturas superficiais decrescem progressivamente de altura, mesmo quando comparados iguais teores de ligante betuminoso entre as formulações.

Ainda, ao passo em que os teores de ligante aumentam, também é um aspecto que se associa à diminuição da textura, em razão do preenchimento cada vez maior dos canais de curtose formados entre os granulares na superfície das misturas asfálticas (XAVIER, 2022).

Neste contexto, é importante reiterar que a compactação Marshall é muito distinta da compactação em campo, ou seja, mais severa, tendendo a gerar superfícies menos rugosas que

nos processos de rolagem executados na prática, assim como a dimensão dos corpos de prova possuem superfícies muito reduzidas para análise. Cabe neste trabalho, portanto, uma análise de cunho relativo e não absoluto dos valores obtidos quanto a esta propriedade.

4.4. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA

Em razão da dificuldade referente à escolha pelo projetista de forma assertiva do teor de ligante de trabalho nas dosagens a partir dos parâmetros da metodologia Marshall, conforme discorrido ao final do tópico 4.2, tem-se que os ensaios de tração indireta foram utilizados como critério complementar para auxiliar na definição de qual dosagem seria a mais indicada entre todas as testadas, para cada caso.

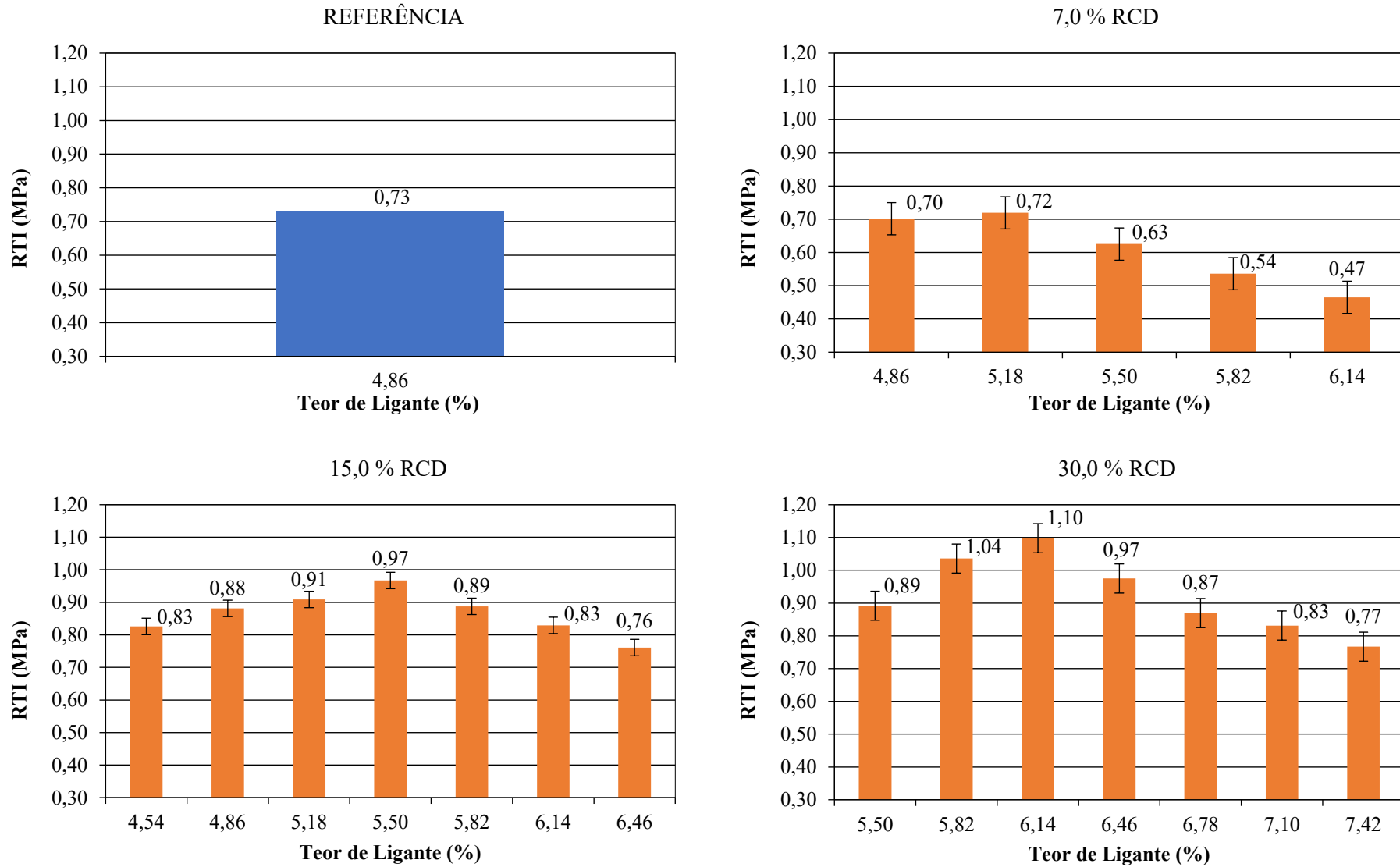
A Tabela 4.5 apresenta e a Figura 4.4 ilustra os resultados médios obtidos, considerando a mesma tipologia de amostragem de corpos de prova do ensaio Marshall, já descrita no tópico 3.5.2. Os erros e os desvios padrões são da ordem de 5,0 % e 1,0 %, respectivamente, indicando boa homogeneidade da amostragem produzida, acima dos 10,0 % preconizados pelo Manuel LPC (2007).

Tabela 4.5 - Resultados médios da tração indireta.

REFERÊNCIA		7,0 % RCD	
TEOR DE LIGANTE	RTI MÉDIO (MPa)	TEOR DE LIGANTE	RTI MÉDIO (MPa)
4,86 %	0,73	4,86 %	0,70
		5,18 %	0,72
		5,50 %	0,63
		5,82 %	0,54
		6,14 %	0,47
15,0 % RCD		30,0 % RCD	
TEOR DE LIGANTE	RTI MÉDIO (MPa)	TEOR DE LIGANTE	RTI MÉDIO (MPa)
4,54 %	0,83	5,50 %	0,89
4,86 %	0,88	5,82 %	1,04
5,18 %	0,91	6,14 %	1,10
5,50 %	0,97	6,46 %	0,97
5,82 %	0,89	6,78 %	0,87
6,14 %	0,83	7,10 %	0,83
6,46 %	0,76	7,42 %	0,77

Fonte: Autor.

Figura 4.4 - Gráfico com a plotagem dos resultados médios obtidos para tração indireta.



Fonte: Autor.

A partir dos resultados obtidos, verifica-se que o ensaio de tração indireta cumpriu a função para a qual foi destinado neste trabalho, em razão de ter possibilitado a indicação de valores máximos de resistência à ruptura associados a uma dada dosagem de ligante betuminoso, para cada mistura asfáltica formulada. A exceção se deu no caso da formulação de referência, que foi testada diretamente no teor de 4,86 %, devido às explanações já discutidas no tópico 4.2.

Todos os resultados atenderam ao valor mínimo de 0,65 MPa, conforme especifica a norma DNIT ES-031 (2016), exceto os teores de 5,50 %, 5,82 % e 6,14 % da formulação com 7,0 % de RCD, em razão de constituírem dosagens muito elevadas de ligante betuminoso nestes casos, fato corroborado pelos resultados de estabilidade, que atingem escalas muito próximas aos valores mínimos de 500 kgf especificados para camadas de rolamento (Tabela 4.2).

Um questionamento que pode ser pontuado é a razão dos resultados de tração indireta terem sido maiores para as misturas asfálticas com 15,0 % e 30,0 % de RCD, em relação às de referência. Neste âmbito, é importante esclarecer que o esforço de tração indireta é muito influenciado pela efetividade da coesão entre as partículas que compõem os materiais. Logo, quanto maior o teor de ligante betuminoso nas dosagens, até o limite em que não ocorra excesso de sua utilização, mais resistente ao desprendimento serão as interfaces de contato durante o tracionamento dos corpos de prova, em razão da formação de uma película mais robusta para o envolvimento das frações granulares.

No caso das misturas asfálticas com 7,0 % de RCD, tem-se que como apresentam uma faixa de dosagem de ligante betuminoso de trabalho muito próxima ao das formulações de referência, a maior porosidade e superfície específica das partículas de RCD contribuem para que menores películas de ligante envolvam as frações granulares, acarretando no decréscimo da resistência à tração indireta quando comparadas entre si.

Portanto, considerando os resultados e considerações sobre os ensaios de tração indireta, tem-se que os teores de ligante betuminoso de trabalho recomendados para as misturas asfálticas formuladas são apresentados na Tabela 4.6.

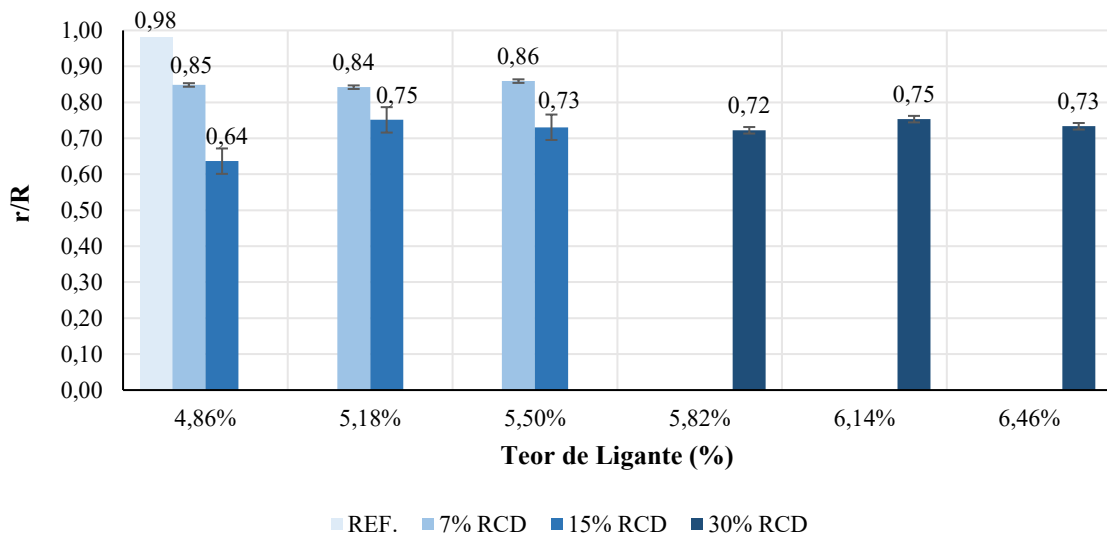
Tabela 4.6 - Teores de ligante de trabalho recomendados após os ensaios de tração indireta.

MISTURA ASFÁLTICA	TEOR DE LIGANTE (%)
Referência	4,86
7,0 % RCD	5,18
15,0 % RCD	5,50
30,0 % RCD	6,14

4.5. DURIEZ

Para a realização do ensaio de Duriez a 18°C, foram escolhidos os teores de ligante betuminoso com maior resistência à tração indireta apresentados na Tabela 4.6, e alguns adjacentes, exceto para a mistura de referência, em que foi testada diretamente a dosagem de 4,86 %, conforme abordado no tópico 3.5.5. A Figura 4.5 ilustra os resultados obtidos, em que os erros e os desvios padrões são da ordem de 5,0 % e 1,0 %, respectivamente, indicando boa homogeneidade da amostragem produzida, acima dos 10,0 % preconizados pelo Manuel LPC (2007).

Figura 4.5 - Gráfico da relação r/R para ensaio de Duriez.



Fonte: Autor.

A partir da Figura 4.5, verifica-se que a mistura asfáltica de referência apresentou melhor resistência à ação deletéria da água, em comparação com todas as formulações que tiveram incorporação de RCD.

Esta condição é explicada pelo fato de que a composição química das frações britadas de rocha (pó de pedra) possui cerca de 10,0 % a menos de concentração de sílica (SiO_2), em relação às partículas de RCD (Tabelas 3.2 e 3.3), diminuindo o potencial de repelência ao Carbono que compõe majoritariamente o ligante betuminoso, devido ambos os compostos serem eletronegativos. Logo, quanto menor a concentração de cargas de mesma polaridade, menor a intensidade da repelência entre elas.

Além disso, as partículas de RCD são menos resistentes que as provenientes de rocha britada, devido possuírem maior superfície específica e porosidade (Tabela 3.4), acarretando

em um material mais fino e repleto de cavidades internas, resultando em partículas menos resistentes aos esforços aplicados à compressão simples.

Cabe ressaltar que a dosagem de 4,86 % de ligante betuminoso para a mistura asfáltica com 15,0 % de RCD foi reprovada no ensaio de Duriez, devido ter apresentado relação r/R inferior a 0,70, indicando inadequado envolvimento das frações granulares, deixando-as muito expostas e muito suscetíveis à penetração da água em seus interstícios, contribuindo para maior ação deletéria da água. As demais formulações tiveram seus resultados aprovados, de acordo com o critério mencionado, destacando o fato de quanto maior a incorporação de RCD, menores foram as resistências mecânicas das misturas asfálticas, pelos motivos já explanados.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados obtidos durante a campanha experimental deste trabalho, foi possível realizar uma avaliação dos parâmetros de dosagem de misturas asfálticas densas com a incorporação de resíduo de construção e demolição (RCD), em comparação com uma formulação de referência integralmente constituída por frações granulares oriundas de britagem de rocha gnáissica. Desta forma, tem-se que o objetivo principal traçado foi atingido.

A caracterização do RCD utilizado evidenciou que os principais elementos químicos que o compõe são a sílica (SiO_2 ; 62,032 %) e o óxido de Cálcio (CaO ; 16,849 %), em razão de ser proveniente da demolição de um galpão industrial predominantemente formado por tijolos à vista e cerâmica, além de derivados cimentícios, como gesso, argamassa de assentamento, contrapiso, reboco e afins. Portanto, matrizes normalmente muito porosas e com elevada superfície específica após submissão aos processos de beneficiamento por britagem, fatores também confirmados nas análises de textura superficial.

Desta forma, em que pese ter sido demonstrado que a morfologia das partículas de RCD possuem macrotextura subangular e microtextura rugosa, a porosidade e superfície específica elevadas alcançou valores quase três vezes maiores que os obtidos para as frações rochosas de mesmo diâmetro.

Estes aspectos contribuíram de forma decisiva para que as misturas asfálticas com a incorporação destes resíduos apresentassem maiores consumos de ligante betuminoso e menor resistência mecânica aos esforços solicitantes aplicados, situações verificadas sobretudo nos parâmetros de estabilidade da metodologia Marshall e de ruptura por compressão simples no ensaio de Duriez.

Este último parâmetro, inclusive, se mostrou bastante influenciado pelo maior percentual de SiO_2 do RCD, em relação ao do pó de pedra (53,602 %), aumentando a carga eletronegativa do arranjo granulométrico e respectiva intensidade de repelência ao Carbono, presente majoritariamente na composição do ligante betuminoso, contribuindo para a maior suscetibilidade à ação de deletéria da água no ensaio de Duriez.

A resistência à tração indireta foi um indicador fundamental para a escolha das dosagens de ligante betuminoso de trabalho a serem recomendadas para cada formulação, em

razão da dificuldade de se obter uma avaliação precisa deste parâmetro apenas com o uso da metodologia Marshall.

Verifica-se, portanto, que o RCD utilizado neste trabalho não apresenta viabilidade técnica para incorporação em formulações de misturas asfálticas, devido às deficiências já discutidas no âmbito científico, e mesmo no aspecto econômico, por demandar maiores consumos de ligante betuminoso nas dosagens de trabalho, ou seja, o insumo mais oneroso da composição das misturas asfálticas, quando comparados às misturas asfálticas de referência.

Como recomendações para trabalhos futuros, é importante que seja avaliada a viabilidade técnica destas mesmas formulações, porém, considerando metodologias de ensaio mais acuradas cientificamente, para certificar a corroboração ou não com as análises provenientes desta pesquisa. Neste contexto, pode-se citar a metodologia francesa, em razão de possuir estreita relação campo/laboratório em seu escopo de atuação.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, V. D. **Influência da formulação de esqueletos minerais na deformação permanente de misturas de concreto asfáltico densas**. 2018. 167 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2018.
- 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 EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019**. São Paulo: Abrelpe, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11341**: Derivados de petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland. Rio de Janeiro: ABNT, 2014, 26 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14950**: Materiais betuminosos – Determinação de viscosidade Saybolt-Furol. Rio de Janeiro: ABNT, 2003, 10 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15115**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004, 14 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15116**: Agregado reciclado para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021, 20 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6293**: Ligantes asfálticos – Determinação de ductilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2015, 11 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6576**: Materiais asfálticos - Determinação de penetração – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2007, 11 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7389-1**: Agregados - Análise Petrográfica de Agregado para Concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 9 p.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **AFNOR NF EN 12697-12**. Méthodes d'essai - Partie 12: Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses. Paris, França, 2018.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **AFNOR NF EN 12697-5**. Mélanges bitumineux: Méthodes d'essai por mélange hydrocarboné à chaud. Partie 5: Masse volumique maximale (masse volumique réelle) des matériaux bitumineux, 2019.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **AFNOR NF EN 13036-1**, Caractéristiques de surface des routes et aérodromes - Méthodes d'essai - Partie 1: mesurage de la profondeur de macrotexture de la surface d'un revêtement à l'aide d'une technique volumétrique à la tâche. Paris, France, 2010.

AZEVEDO, R. C. et al. Avaliação de desempenho do processo de orçamento: estudo de caso em uma obra de construção civil. **Ambiente construído**, v. 11, n. 1, p. 85-104, mar. 2011.

BAAJ, H. **Comportement a la fatigue des matériaux granulaires traités aux liants hydrocarbonés**. Thèse de Docteur. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2002.

BAAJ, H. **Comportement a la fatigue des matériaux granulaires traités aux liants hydrocarbonés**. 2002. Thèse de Docteur. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

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

BARRA, B. S. **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.

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

BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO (ANP). **Resolução ANP N° 19**, de 11 de julho de 2005. Brasília, DF, 2005.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução N° 307**, de 05 de julho de 2002. Brasília, DF, 2002.

BRASILEIRO, L. L. e MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v. 61, n. 358, p. 178-189, jun. 2015.

BUCHHOLZ, B. **Avaliação comparativa do impacto da variação de curvas granulométricas no nível de absorção sonora de misturas asfálticas drenantes, muito delgadas e densas**. 2020. 83 p. Trabalho de conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura) - Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2020

CHEN, M. et al. Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture. **Construction and building materials**, vol. 25, p. 3909 – 3914. out. 2011.

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.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa de Rodovias CNT**. Brasília: CNT, 2019.

CONSTRUBISINESS. **Obras paradas: desperdício de recursos e futuro.** *In:* 13º CONGRESSO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO. 140 p. São Paulo: Federação das Indústrias do Estado de São Paulo, 2019. Disponível em: <https://www.fiesp.com.br/observatoriodaconstrucao/congresso-brasileiro-da-construcao/>. Acesso em: 30 abr. 2021.

DELONGUI, L. **Caracterização e adequação dos resíduos da construção civil produzidos no município de Santa Maria - RS para aplicação em pavimentação.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **DNER - ME 043/95.** Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall. Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), Rio de Janeiro, RJ. 1995, 11 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **DNER – ME 078/94:** Agregados graúdo – adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), 1994, 3 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **DNER - EM 035/95:** Peneiras de malhas quadradas para análise granulométrica de solos. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), 1995, 6 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **DNIT ES 031/2006a:** 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.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **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, 9 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Pavimentação.** 3. ed. Rio de Janeiro. Publicação Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) - 719.2006b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos.** 2. ed. Rio de Janeiro. Publicação Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) - 720.2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **DNIT - ME 425/2020:** Agregado – Determinação do índice de forma com paquímetro. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), 2020, 7 p.

FAGUNDES, P. M. **Avaliação do comportamento funcional de misturas BBDr e BBTM.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2020.

GUIDE TECHNIQUE. **Conception et dimensionnement des structures des chaussées.** Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA) et Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC). Paris, France. 1994.

HUANG, Y. et al. A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, n. 1, p. 58-73, nov. 2007.

MACÊDO, R. J. F. *et al.* CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DAS INDÚSTRIAS CERÂMICAS ESTRUTURAIS DA REGIÃO DO CARIRI – CE. **Cadernos de Cultura e Ciência**, [S.L.], v. 11, n. 2, p. 8-15, 12 dez. 2012. Lepidus Tecnologia.

MAILLARD, S. **Fissuration et Autoréparation des liants bitumineux - Apport de l'essai de rupture locale répétée sur bitume.** Université de Nantes, 2005.

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

MELO, D. M. **Estudo de misturas asfálticas com resíduo de construção e demolição oriundo do município de Manaus - AM.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2010.

MEURER, P. **Caracterização de materiais rochosos do norte de Santa Catarina para fins de aplicação em obras de pavimentação.** 2015. 92p. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville/SC, 2015.

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

MORAIS, G. M. D. **Diagnóstico da deposição clandestina de resíduos de construção e demolição em bairros periféricos de Uberlândia:** subsídios para uma gestão sustentável. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

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

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

PASQUET, A. **Campagne nationale de glissance 1967 em France.** Colloque international sur la glissance et la sécuritté de la circulation sur routes moullées.717 – 732. Berlim, 1968.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.** 1999. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

QUEIROZ, M. L. N. **Aplicação de concreto asfáltico a quente utilizando resíduos da construção e demolição de obras (RCD) em via urbana na cidade de Natal/RN**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

QUIÑONES, F. S. **Aplicabilidade de resíduos reciclados da construção e demolição como agregados em misturas asfálticas**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

QUINTERO, C. F. **Estudo de misturas asfálticas com ligantes de Consistência elevada – Formulação e comportamento mecânico**. 2011. 229 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), 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.

SENA N., P. G. **Análises de dosagens de concreto asfáltico pré misturado a frio (PMF) utilizando resíduos da construção e demolição de obras (RCD)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. Vol. 1, 1ª ed. São Paulo: Pini, 1997.

SHELL. **The Shell Bitumen Handbook**. 5. ed. London: Thomas Telford, 2003.

SILVA, C. A. R. **Estudo do agregado reciclado de construção civil em misturas betuminosas para vias urbanas**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

SIROMA, R. S. (2018), **Avaliação Da Deformação Permanente Em Misturas Asfálticas Densas Formuladas Com Areia Descartada De Fundação (ADF)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas) – Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.

STANDARD, **ASTM D7348–07 (2007) standard test methods for loss on ignition (LOI) of solid combustion residues**. ASTM International, Pennsylvania.

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) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

XAVIER, R. M. **Avaliação dos parâmetros de dosagem de misturas asfálticas do tipo grave-betume**. 2022. 78 p. Trabalho de conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura) - Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2022.

YEN, T. F; LIN, J-R; LIAN, H.; SADEGHI, K. M. Asphalt colloidal types differentiated by Kocak distribution. **Fuel**, v. 70, n. 12, p. 1439-1444, dez. 1991. Elsevier BV.