



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS

Thiago Persike

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE
MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

Joinville/SC

2023

Thiago Persike

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE
MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (Pós-ECM) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Breno Salgado Barra, Dr. Eng.

Joinville/SC

2023

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

Persike, Thiago

Avaliação da Resistência à Deformação Permanente de Misturas Asfálticas Densas com Incorporação de Resíduos de Construção e Demolição / Thiago Persike ; orientador, Breno Salgado Barra, 2023.

111 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. RCD. 3. Metodologia Francesa. 4. Misturas Asfálticas. 5. Deformação Permanente. I. Salgado Barra, Breno. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas. III. Título.

Thiago Persike

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE
MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE
CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. João Victor Staub de Melo, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Prof. Yader Alfonso Guerrero Pérez, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Prof. Alexandre Mikowski, Dr. Fís.
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Prof. C. R. Mai-Lan Nguyen, Dr. Eng.
Université Gustave Eiffel – UGE – Nantes/France

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Prof. Wagner Mauricio Pachekoski, Dr. Eng.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas

Prof. Breno Salgado Barra, Dr. Eng.
Orientador

Joinville/SC, 2023.

“Porquanto a sabedoria entrará no teu coração, e o conhecimento será agradável a tua alma”

Provérbios 2:10

Dedico esse trabalho a minha mãe, irmãos, a minha esposa Amanda Reis Persike e filho Oliver Reis Persike. A todo o amor, paciência e encorajamento, minha contínua gratidão.

AGRADECIMENTOS

A Deus, eu agradeço pela dádiva da vida, por me dar forças, por me capacitar e me guiar em mais essa conquista. Deus, meu refúgio e conforto.

Ao meu pai, que está ao lado de Deus, por todos os ensinamentos e dedicação a mim dispensados, por ter sido e ainda ser meu norte e meu espelho de vida. À minha mãe por sempre me incentivar e motivar em tudo que faço, e por seu amor incondicional.

Aos meus irmãos, que acreditam em meus sonhos e sempre dispostos a me ajudar em tudo.

Ao Alessandro Brzozowski, diretor e proprietário da empresa em que trabalho, por todo o apoio e compreensão durante o mestrado.

Aos meus colegas e amigos do LDTPav, Rafael Fronza e Beatriz Fieldkircher, pelo auxílio e companhia durante a realização dos ensaios.

À minha esposa, Amanda Reis Persike, pelo amor, paciência e companheirismo durante a minha jornada noite adentro e finais de semana, na qual sempre me apoiou. Agradeço do fundo do meu coração. Serei eternamente grato, por acreditar em mim e por estar sempre ao meu lado nas horas mais difíceis.

Ao meu orientador, Prof. Breno Salgado Barra, Dr. Eng., pela oportunidade de aprendizado, por todo ensinamento adquirido, por sua disponibilidade inigualável. Agradeço por tudo.

Agradeço ainda às empresas Construtora Fortunato Ltda, Terraplenagem Medeiros, Rudnick Minérios Ltda, CBB Asfaltos e ao Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav), por disponibilizarem os insumos e infraestrutura necessários à realização da pesquisa.

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a resistência à deformação permanente de misturas asfálticas densas do tipo *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG), 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 Füller-Talbot. O diâmetro máximo da série de peneiras foi estabelecido em 12,7 mm. O RCD bruto foi obtido em processo de demolição de um galpão industrial, com posterior beneficiamento realizado em central de britagem. A caracterização do resíduo foi procedida a partir de 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 compreendeu as frações passantes no intervalo de peneiras 2,20 mm a 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. O ligante betuminoso foi classificado na faixa de penetração 30/45, em sua forma pura. As avaliações das formulações consideraram o escopo da metodologia francesa e abrangeram os aspectos funcionais relacionados à habilidade de compactação na prensa de compactação por cisalhamento giratório (PCG), resistência à ação deletéria da água no ensaio de Duriez a 18 °C e à deformação permanente a 60 °C. 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, bem como má afinidade elétrica com o ligante betuminoso. Logo, em comparação às formulações de referência, verificou-se a participação decisiva do RCD no aporte de maiores teores de ligante nas dosagens e na redução da trabalhabilidade das misturas asfálticas durante o processo de compactação, além de acarretar menor resistência à ação deletéria da água e aumento do fenômeno da fluência nos ensaios de deformação permanente, observado em razão dos maiores afundamentos na trilha de roda apresentados.

Palavras-chave: RCD, metodologia francesa, misturas asfálticas, deformação permanente.

ABSTRACT

The main aim of this research is to evaluate the rutting resistance of dense asphalt mixes so-called *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG), 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. The maximum diameter of the sieve opening series selected was 12.7 mm. The raw CDW was obtained in an industrial premise demolition service, being mechanically processed in a crushing plant. 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 adsorption (BET). The incorporation of CDW in the asphalt mixes occurred between the fractions passing through the sieve openings interval from 2.20 mm to 0.075 mm, having been tested three percent variations (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. The asphalt binder was qualified by penetration as 30/45, in neat form. The experimental campaign considered the scope of French methodology and comprised functional aspects related to compaction ability with use of Compaction Shear Press, resistance to deleterious action of water in Duriez test at 18 °C and to rutting at 60 °C. The results obtained indicate that despite the CDW particles have subangular macrotexture and rough microtexture, their porosity and specific surface are almost three times larger than the crushed rock fractions, besides presenting bad electrical affinity with the bituminous binder. Thus, in comparison with the reference formulations, it was verified the decisive role of the CDW with regards to addition of higher asphalt binder contents to the dosages and in the reduction of workability of the asphalt mixes during the compaction process, besides causing lower resistance to deleterious action of water and increasing of creep phenomenon along the rutting tests, due to greater rut depths observed all over the wheel tracks.

Keywords: CDW, French methodology, asphalt mixes, rutting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	– Fluxograma da pesquisa	19
Figura 1.2	– Geração de RCD no Estado de SC	22
Figura 1.3	– RCD gerados pelos municípios de Joinville, Araquari, São Francisco do Sul e Garuva	23
Figura 1.4	– Comparativo do montante de RCD gerado no Estado de SC e municípios de Joinville, Araquari, São Francisco do Sul e Garuva em toneladas	24
Figura 2.1	– Estrutura multicamadas de um pavimento	26
Figura 2.2	– Definição da estrutura de pavimento na França	28
Figura 2.3	– Estrutura genérica de pavimentos flexíveis	29
Figura 2.4	– Estrutura genérica de pavimentos betuminosos espessos	30
Figura 2.5	– Carga elétrica inerente ao tipo de rocha matriz.	32
Figura 2.6	– Adesão e coesão betume-granular	34
Figura 2.7	– Interface entre o substrato e o ligante	36
Figura 3.1	– Países que mais geram RCD	40
Figura 3.2	– Geração de RCD no Brasil (2019) e Santa Catarina – SC (2019)	41
Figura 3.3	– Fluxograma do processo de beneficiamento do RCD	44
Figura 3.4	– Mosaico do processo de beneficiamento do RCD desta pesquisa	45
Figura 3.5	– Difratoograma do RCD	49
Figura 3.6	– Difratoograma do pó de pedra	50
Figura 3.7	– Análise da amostra de RCD com ampliação de 100x, 200x, 500x, 800x e 1000x	52
Figura 4.1	– Representação qualitativa de diferentes tipos de deformação.	55
Figura 5.1	– Curva granulométrica das formulações BBSG	62
Figura 5.2	– Distribuição granulométrica do pó de pedra e RCD	64
Figura 5.3	– Frações granulares utilizadas na formulação das misturas asfálticas de referência	65
Figura 5.4	– Frações granulares utilizadas nas misturas asfálticas com incorporação de 7,0 % de RCD	65
Figura 5.5	– Frações granulares utilizadas nas misturas asfálticas com incorporação de 15,0 % de RCD	66
Figura 5.6	– Frações granulares utilizadas nas misturas asfálticas com incorporação de 30,0 % de RCD	66
Figura 5.7	– Curva de viscosidade <i>Saybolt-Furol</i> para o CAP 30/45	68

Figura 5.8	– Níveis de ensaios para a formulação de misturas asfálticas na França	69
Figura 5.9	– Preparação dos cilindros com a mistura asfáltica, para ensaio da PCG	72
Figura 5.10	– Imagem gerada pelo software da PCG, com a apresentação da curva de vazios da amostra ensaiada	72
Figura 5.11	– Prensa de Compactação Giratória e seu princípio de funcionamento	73
Figura 5.12	– Corpos de prova; ensaio de hidrofília dos mástiques betuminosos; ensaio de resistência à compressão simples	74
Figura 5.13	– Máquina para compactação da Placas	75
Figura 5.14	– Compactação das placas para o ensaio de deformação permanente.	76
Figura 5.15	– Máquina para avaliação da deformação permanente (LabPav – UFSC/Florianópolis)	77
Figura 5.16	– Placa posicionada na máquina com a sonda de monitoramento de temperatura.	77
Figura 5.17	– Leitura dos afundamentos com o paquímetro	78
Figura 5.18	– Pontos de leitura sobre a placa	78
Figura 6.1	– Resultado da PCG – Mistura de Referência e com incorporação de 7,0 % de RCD	81
Figura 6.2	– Resultado da PCG – Mistura de Referência e com incorporação de 15,0 % de RCD	81
Figura 6.3	– Resultado da PCG – Mistura de Referência e com incorporação de 30,0 % de RCD	82
Figura 6.4	– Gráfico da relação r/R para ensaio de Duriez	84
Figura 6.5	– Seção transversal das placas antes e depois do ensaio de deformação permanente	86
Figura 6.6	– Evolução do afundamento das misturas de referência	88
Figura 6.7	– Evolução do afundamento entre as misturas de referência e com incorporação de 7,0 % de RCD	88
Figura 6.8	– Evolução do afundamento entre as misturas de referência e com incorporação de 15,0 % de RCD.	89
Figura 6.9	– Evolução do afundamento entre as misturas de referência e com incorporação de 30,0 % de RCD.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	–	Classes de tráfego segundo a metodologia francesa	27
Tabela 3.1	–	Geração e Destinação de RCD no Brasil (2019)	41
Tabela 3.2	–	Composição química majoritária RCD, comparado ao pó de pedra	47
Tabela 3.3	–	Análise de superfície específica do RCD	51
Tabela 3.4	–	Comparativo da análise de superfície específica do RCD e Cinzas de Carvão	51
Tabela 5.1	–	Caracterização das frações granulares (normas brasileiras)	60
Tabela 5.2	–	Distribuição granulométrica das formulações BBSG	62
Tabela 5.3	–	Pontos de controle estabelecidos para formulações BBSG pela metodologia francesa	62
Tabela 5.4	–	Percentuais passantes da distribuição granulométrica do pó de pedra e do RCD	64
Tabela 5.5	–	Parâmetros de caracterização do ligante betuminoso	67
Tabela 5.6	–	MVR das misturas asfálticas.	71
Tabela 6.1	–	Resultados dos Ensaios de Habilidade de Compactação na PCG	80
Tabela 6.2	–	Percentagem de afundamento ao longo dos ciclos	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AFNOR	<i>Association Française de Normalisation</i>
AJOCTRE	Associação Joinvilense Dos Condutores De Transporte De Resíduos
Al	Alumina
BB	<i>Béton Bitumineux</i>
BBD _r	<i>Béton Bitumineux Drainant</i>
BBM	<i>Béton Bitumineux Mince</i>
BBME	<i>Béton Bitumineux à Module Élevé</i>
BBS	<i>Béton Bitumineux pour chaussée souples à faible trafic</i>
BBSG	<i>Béton Bitumineux Semi-Grenus</i>
BBTM	<i>Béton Bitumineux Très Mince</i>
BET	Técnica de Adsorção
Ca	Cálcio
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CaCO ₃	Carbonatos de Cálcio
CDF	Certificado de Destinação Final
cm	Centímetros
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CTJ	Centro Tecnológico de Joinville
D _{máx}	Diâmetro Máximo
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNER-ME	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – Método de Ensaio
DNIT-ME	Departamento Nacional de Infraestruturas de Transportes – Método de Ensaio
DOU	Diário Oficial da União
DRX	Difração de Raio-X
DSR	Reômetro de Cisalhamento Dinâmico
EDS	Espetroscopia de energia dispersiva
EPA	U.S. Environmental Protection Agency

EUA	Estados Unidos da América
FAD	Faixa de Agregados Dominantes
FATMA	Fundação do Meio Ambiente de Santa Catarina
Fe	Ferro
FN	Flow Number
FRX	Fluorescência de Raio-X
GEE	Gases de Efeito Estufa
GNT	Granulares Não Tratados
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
K	Potássio
Kg	Quilograma
kN	kiloNewton
IMA	Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina
LabPav	Laboratório de Pavimentação do Campus da UFSC - Florianópolis
LACAMI	Laboratório de Caracterização Microestrutural da SATC
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
LDTPav	Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação
LPC	<i>Laboratoire des Ponts et Chaussées</i>
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MG	Minas Gerais
Mg	Magnésio
mm	Milímetro
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MTR	Manifesto de Transporte de Resíduos
MSCR	<i>Multiple Stress Creep Recovery</i>
NBR	Norma Brasileira
PCG	<i>Prensa de Compactação Giratória</i>
PGRCC	Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil
PF	Perda de Fogo
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PR	Paraná
RCD	Resíduo da Construção e Demolição
SATC	Centro Tecnológico/Criciúma-SC
SC	Santa Catarina
SETRA	<i>Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes</i>

Si	Sílica
SiO ₂	Dióxido de silício
SiO ₃	Silicato de sódio
SINSNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SINIR	Sistema Nacional de Informações
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SP	São Paulo
SSR	Stress Sweep Rutting
t	Toneladas
TSS	Triaxial Stress Sweep
UFSC	<i>Universidade Federal de Santa Catarina</i>
UV	Raios Ultravioleta
VAM	Vazios no Agregado Mineral
VRNS	Rede não estruturante
VRS	Rede estruturante

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
1.2	PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR OS OBJETIVOS	18
1.3	DELIMITAÇÃO DO ESPAÇO DA PESQUISA	20
1.4	RELEVÂNCIA DO TEMA: JUSTIFICATIVA	21
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	25

CAPÍTULO 2

	CONSIDERAÇÕES SOBRE ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS E MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS	26
2.1	DEFINIÇÕES SOBRE PAVIMENTO	26
2.2	ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS FRANCESES	27
2.3	MATERIAIS COMPONENTES DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	30
2.3.1	Materiais Granulares	30
2.3.2	Ligante Betuminoso	32
2.3.3	Interação granular-ligante	33
2.4	MISTURAS ASFÁLTICAS DE CARÁTER FUNCIONAL	37

CAPÍTULO 3

	NOÇÕES GERAIS SOBRE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	39
3.1	CENÁRIO INTERNACIONAL E NACIONAL	39
3.1.1	Cenário Internacional	39
3.1.2	Cenário Nacional	40

3.2	CENÁRIO REGIONAL: IMPORTÂNCIA PARA O DESENVOLVIMENTO DA REGIÃO NORTE DE SANTA CATARINA	41
3.3	PROCESSOS DE GERAÇÃO E BENEFICIAMENTO	42
3.3.1	Origem do RCD	42
3.3.2	Classificação	43
3.3.3	Processos de beneficiamento	44
3.3.4	Caracterização do RCD	46
3.3.4.1	Composição química e mineralógica	46
3.3.4.2	Propriedades físicas	50
3.4	PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DO DESCARTE DE RESÍDUOS ORIUNDOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	53

CAPÍTULO 4

	DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS	54
4.1	CATEGORIAS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE	54
4.1.1	Deformação Permanente por Insuficiência de Compactação	54
4.1.2	Deformação Permanente por Fluência	55
4.1.3	Deformação Estrutural Permanente	55
4.2	PARÂMETROS INFLUENTES NA DEFORMAÇÃO PERMANENTE	56
4.2.1	Materiais Granulares	56
4.2.1.1	Granulometria	56
4.2.1.2	Forma, Tamanho e Textura	56
4.2.2	Teor de Vazios	57
4.2.3	Tipo e Teor de Ligante Asfáltico	57
4.2.4	Temperatura	58
4.2.5	Tráfego	58

CAPÍTULO 5

	MATERIAIS E MÉTODOS	60
5.1	MATERIAIS	60
5.1.1	Frações Granulares	60
5.1.2	Curva Granulométrica	61
5.1.3	Ligante Betuminoso	66
5.2	MÉTODOS	68
5.2.1	Considerações sobre a Metodologia Francesa de Formulação de Misturas Asfálticas	68
5.2.2	Massa Volumétrica Real	70
5.2.3	Ensaio de Prensa de Compactação Giratória	71
5.2.4	Ensaio De Duriez	74
5.2.5	Ensaio de Deformação Permanente	75

CAPÍTULO 6

	RESULTADOS E DISCUSSÕES	80
6.1	HABILIDADE DE COMPACTAÇÃO NA PCG	80
6.2	ENSAIO DE DURIEZ	84
6.3	ENSAIO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE	85

CAPÍTULO 7

	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	92
	REFERÊNCIAS	94

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é considerada uma atividade essencial para a economia, pois promove a geração de empregos e riquezas. No entanto, pode ser considerada também uma grande causadora de impactos ambientais, desde a modificação da paisagem natural até a produção de um significativo volume de resíduos, os chamados resíduos de construção e demolição – RCD (DOMICIANO, 2019).

Segundo Gonçalves e Haubrick (2020), o setor de construção civil é grande fonte geradora de RCD no país. Estudos apontam que a quantidade de resíduos gerados pelas construções se intensificou devido ao crescimento da população urbana.

Os RCD podem conter uma grande diversidade de materiais aglomerados em suas composições, oriundos de serviços diversos, sendo os principais: novas construções, reformas, demolições, e ampliações de construções existentes (BEJA et al., 2020).

Os RCD representam 50,0 % da capacidade de armazenamento dos aterros (OK et al., 2020). Esta indústria é uma das principais fontes de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e é responsável por cerca de 7,0 % das emissões globais de CO₂ (MISTRI et al., 2021).

De acordo com o panorama dos resíduos sólidos no Brasil, elaborado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2022), em 2021, foram coletadas pelos municípios mais de 48 milhões de toneladas de RCD. Com isso, a quantidade coletada foi de 227,0 kg por habitante/ano.

O Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2021), aponta que, mesmo o Brasil tendo potencial para reciclar 98,0 % dos resíduos produzidos, consegue atualmente processar apenas 21,0 %.

Esta realidade conduz ao desperdício de materiais, em que o descarte de resíduos, além do passivo ambiental, acarreta em custos às empresas, à sociedade em geral e também ao poder público para coletar, tratar e descartar estes subprodutos. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020), estes custos representam aproximadamente 20,0 % dos gastos dos cofres municipais.

No que tange aos resíduos urbanos coletados, o percentual representado pelo RCD varia entre 51,0 % a 70,0 % (BEJA et al., 2020).

Esse cenário se agrava quando diversos materiais descartados são inadequadamente classificados como rejeitos. De acordo com a Lei nº. 12.305/2010, referente à Política Nacional de Resíduos Sólidos, rejeitos são resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento para reutilização, não possuem outra possibilidade, a não ser a destinação final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

Conforme a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 307, de 5 de julho de 2002, que estabelece as diretrizes e critérios para a gestão de resíduos de construção e demolição, são exemplos de resíduos de Classe A: os tijolos, blocos estruturais e componentes cerâmicos (BRASIL, 2002).

No Brasil, atualmente, existem duas normas que regulamentam o uso do RCD como agregado reciclado em obras da construção civil, a ABNT NBR 15115 (2004) e ABNT NBR 15116 (2004), específica para o uso dos granulares em pavimentação. Estas normas foram elaboradas visando estimular e regulamentar o uso destes materiais na indústria da construção.

Apesar do forte apelo ecológico que tem se observado no mundo acerca do reaproveitamento de recursos naturais, verifica-se no país a falta de incentivo público intenso às políticas de desenvolvimento sustentável, além de ainda haver reticências em muitos casos a respeito da utilização de materiais reciclados em obras de engenharia civil, incluindo a concepção de misturas asfálticas e a construção de estruturas de pavimento (NASCIMENTO et al., 2020).

Tendo em vista a enorme demanda de infraestrutura de pavimentação, tanto em novas construções quanto em reabilitação, as principais preocupações da indústria de pavimentação são a conservação dos recursos naturais e a utilização de materiais residuais para obter economia e proteger o meio ambiente (PUROHIT et al., 2022).

Estudo recente feito por Wong et al. (2022), aponta diversas pesquisas em andamento pela indústria da pavimentação asfáltica, onde o intuito é incorporar materiais secundários ou reciclados em vez de recursos primários em ligantes e misturas asfálticas para garantir o descarte seguro e a construção sustentável.

Nesse contexto, esta pesquisa propõe a avaliação de misturas asfálticas densas do tipo *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG), com foco na verificação da viabilidade técnica do uso de RCD, em substituição parcial às frações granulares oriundas de maciço rochoso gnáissico, a partir de parâmetros funcionais relacionados à metodologia francesa de formulação, sobretudo a resistência à deformação permanente.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar, em âmbito laboratorial, parâmetros relacionados ao desempenho funcional de misturas asfálticas densas do tipo *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG), com enfoque principal na resistência à deformação permanente, a partir da incorporação de resíduos de construção e demolição (RCD).

1.1.2. Objetivos Específicos

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

- Caracterizar os materiais utilizados na composição das misturas asfálticas;
- Formular misturas asfálticas do tipo *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG) com graduação densa, compreendendo a incorporação 7,0 %, 15,0 % e 30,0 % de resíduo de construção de demolição (RCD), em comparação às formulações de referência composta por granulares integralmente oriundos de britagem de maciço de rocha gnáissica, a partir dos princípios conceptivos da metodologia francesa, com distribuição granulométrica determinada pelo método teórico utilizando as equações de Füller-Talbot;
- Verificar a habilidade de compactação das formulações com a utilização da Prensa de Compactação Giratória (PCG);
- Determinar a resistência à ação da água no ensaio de Duriez a 18 °C;
- Avaliar a resistência ao afundamento na trilha de roda a partir do ensaio de deformação permanente a 60 °C;
- Verificar a viabilidade técnica da utilização do resíduo de construção e demolição (RCD) utilizado na formulação das misturas asfálticas testadas.

1.2. PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR OS OBJETIVOS

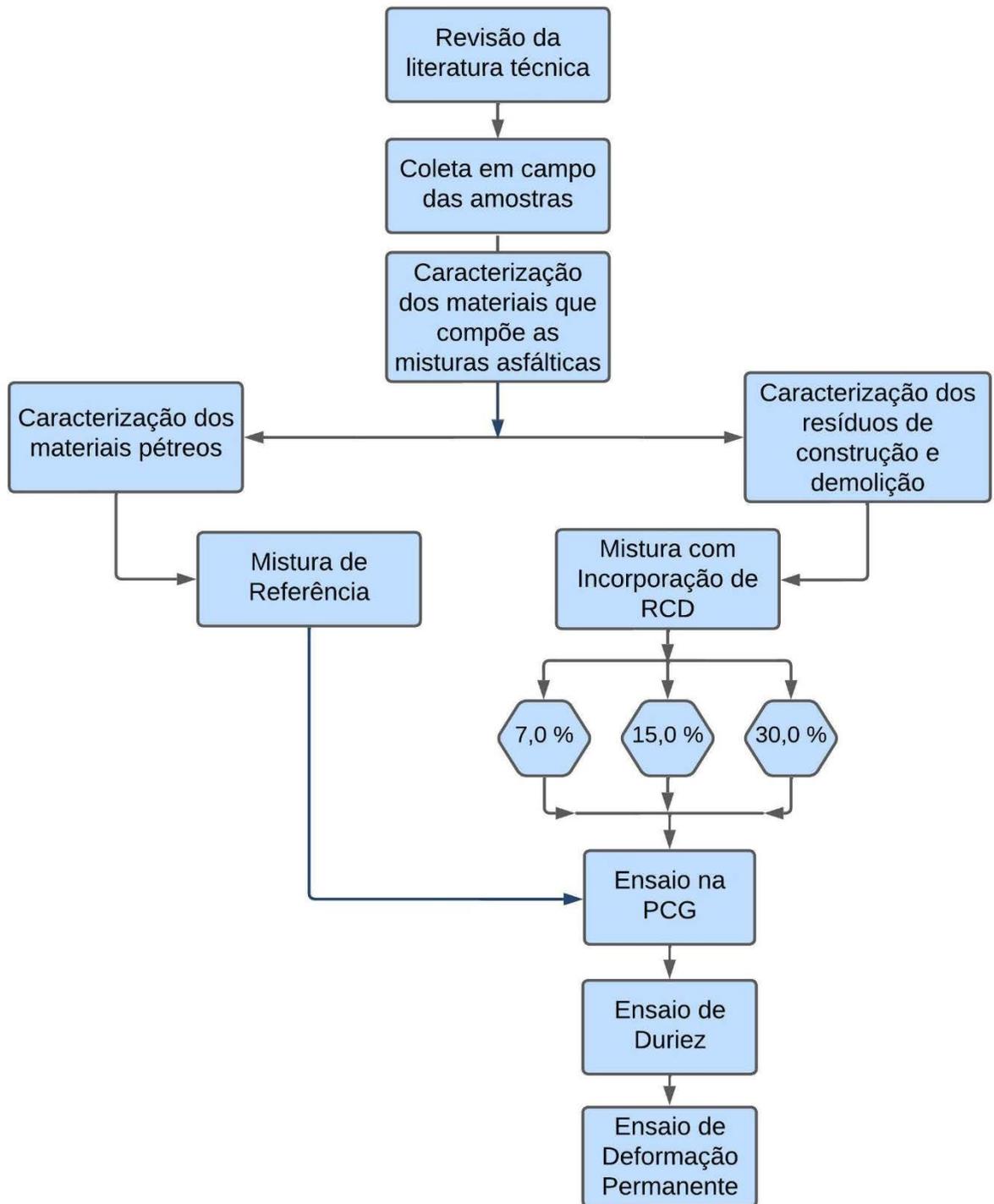
O desenvolvimento desta pesquisa teve início com a coleta das amostras de RCD, e posterior classificação de acordo com a tipologia do material e caracterização granulométrica, realizada por peneiramento mecânico. Neste contexto, verificou-se que as frações abaixo da abertura de peneira 2,20 mm eram as mais representativas do resíduo disponível e que, portanto, seriam as utilizadas para substituição parcial dos granulares naturais britados.

As misturas asfálticas estudadas foram formuladas com base nos parâmetros pertinentes à metodologia francesa, pois além de possuir critérios de avaliação rigorosos, dispõe de técnicas e tecnologias de ensaios que possibilitaram simular os esforços aplicados sobre os materiais da maneira mais próxima possível às situações que ocorrem no campo. Ainda, possui uma estreita relação campo-laboratório (MANUEL LPC, 2007), sendo um fator decisivo para garantir credibilidade aos resultados obtidos.

Para a análise mais aprofundada em relação ao desempenho funcional das misturas asfálticas densas, foram procedidas avaliações referentes à habilidade de compactação com o uso de Prensa de Compactação Giratória (PCG) (AFNOR NF EN 12697-31, 2019), resistência à ação deletéria da água no ensaio de Duriez a 18 °C (AFNOR NF EN 12697-12, 2018) e à deformação permanente (AFNOR NF EN 12697-22, 2020).

A Figura 1.1 ilustra o fluxograma da pesquisa.

Figura 1.1 – Fluxograma da pesquisa.



Fonte: Autor.

1.3. DELIMITAÇÃO DO ESPAÇO DE PESQUISA

A presente pesquisa é de cunho teórico e experimental, restrita à análise dos materiais selecionados, bem como das misturas asfálticas formuladas. A campanha experimental foi realizada integralmente em âmbito laboratorial, não sendo parte dos objetivos, em nenhum momento, a execução de procedimentos de campo ou similares.

A seguir são identificados os locais onde houve algum procedimento referente à execução da pesquisa e as empresas que forneceram os materiais:

- Os resíduos de construção e demolição (RCD) foram provenientes da demolição de um galpão industrial, como parte dos procedimentos referentes a uma obra executada pela Construtora Fortunato Ltda., com posterior beneficiamento por britagem realizado pela empresa Terraplenagem Medeiros, ambas localizadas no município de Joinville/SC;
- As frações granulares foram obtidas de jazida localizada na zona industrial norte de Joinville/SC, fornecidas pela empresa Rudnick Minérios Ltda.;
- O ligante asfáltico foi disponibilizado pela empresa CBB Asfaltos, localizada na região metropolitana de Curitiba/PR;
- No LACAMI (Laboratório de Caracterização Microestrutural da SATC), do Centro Tecnológico de Criciúma, foram realizadas as análises do RCD por difratometria de Raios-X (DRX), espectrometria por fluorescência de Raios-X (FRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV), além da textura superficial por adsorção de nitrogênio em baixas temperaturas (BET);
- No Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) do Campus UFSC/Joinville, foram realizados os procedimentos de peneiramento das frações granulares, montagem dos traços amostrais, bem como os ensaios de habilidade de compactação com o uso da Prensa de Compactação Giratória (PCG) e de avaliação da ação deletéria da água no ensaio de Duriez a 18 °C, além da produção das placas destinadas aos ensaios de deformação permanente, a partir da utilização de mesa de compactação pneumática;

- No Laboratório de Pavimentação (LabPav) do Campus UFSC/Florianópolis, foram realizados os ensaios de resistência à deformação permanente.

1.4. RELEVÂNCIA DO TEMA: JUSTIFICATIVA

A geração de resíduos sólidos nas mais variadas atividades da construção civil é algo inevitável, e vem crescendo de forma gradativa e intensa em escala mundial. No Brasil, poucas são as cidades que possuem tecnologia disponível e adequada para a reciclagem desses materiais. Neste contexto, mesmo o país possuindo capacidade potencial para reciclar 98,0 % dos resíduos produzidos, apenas 21,0 % são transformados em nova matéria-prima (MMA, 2021).

De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, no ano de 2021, foram coletadas pelos municípios cerca de 48 milhões de toneladas de RCD, alcançando a marca de 227,0 kg por habitante/ano. A região Sul contabilizou a geração de aproximadamente 6.572.920 milhões de toneladas (ABRELPE, 2022).

O Estado de Santa Catarina, por meio da Assembleia Legislativa, aprovou a Lei 15.251 em 03 de agosto de 2010, a qual regulamenta a coleta, transporte e destinação final de resíduos. Em 17 de janeiro de 2011 foi publicada a Lei 15.442, a qual alterou a ementa e os Arts. 1º, 2º, 3º e 4º da Lei nº 15.251, de 2010, apresentando em seus anexos os modelos para manifesto de transporte de resíduos (MTR), certificado de destinação final (CDF) e, a declaração anual de movimentação, geração, transporte e destinação final de resíduos.

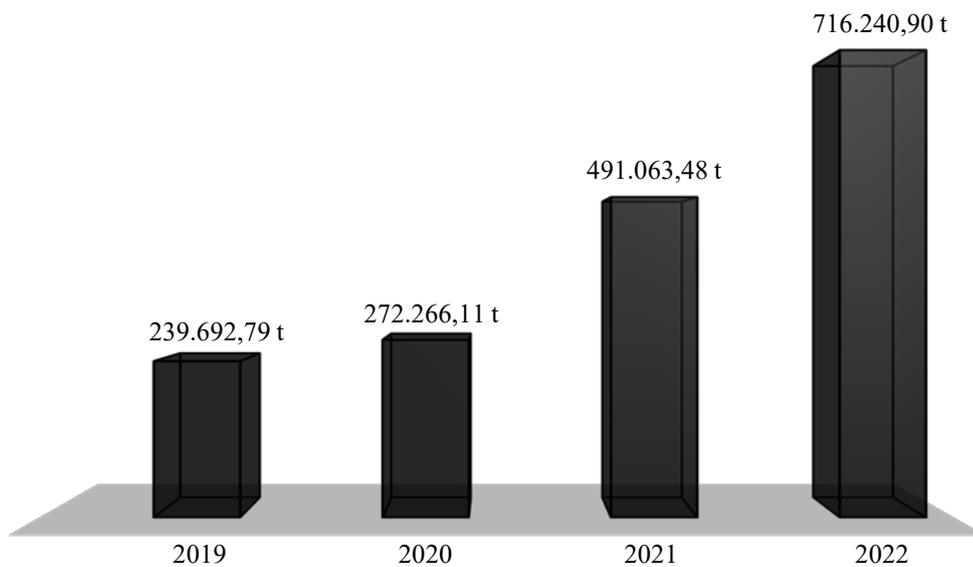
Contudo, esses documentos apresentaram vulnerabilidades em suas utilizações, principalmente por se mostrarem facilmente manipuláveis, fazendo com que o descarte irregular, principalmente de RCD, aumentasse.

Diante desta realidade, a Fundação Municipal do Meio Ambiente (FATMA) à época, lançou por meio da Portaria FATMA nº 242/2014, o sistema de controle de movimentação de resíduos e de rejeitos, o qual substituiu as vias físicas do MTR, possibilitando a geração online dos documentos previstos em Lei.

Com a implantação do novo sistema de emissão dos MTR, todos os resíduos coletados, transportados e destinados, passaram a ser rastreados, fazendo com que os dados, não mais pudessem ser manipulados, trazendo então benefícios ao meio ambiente no que tange ao controle mais efetivo dos descartes irregulares.

O Instituto do Meio Ambiente (IMA; extinta FATMA) lançou no ano de 2020 o Boletim de Desempenho de Resíduos do Estado de Santa Catarina. Na Figura 1.2, é apresentado o balanço da geração, transporte e destinação de RCD, entre os anos de 2019 a 2022 (IMA, 2023).

Figura 1.2 – Geração de RCD no Estado de SC.



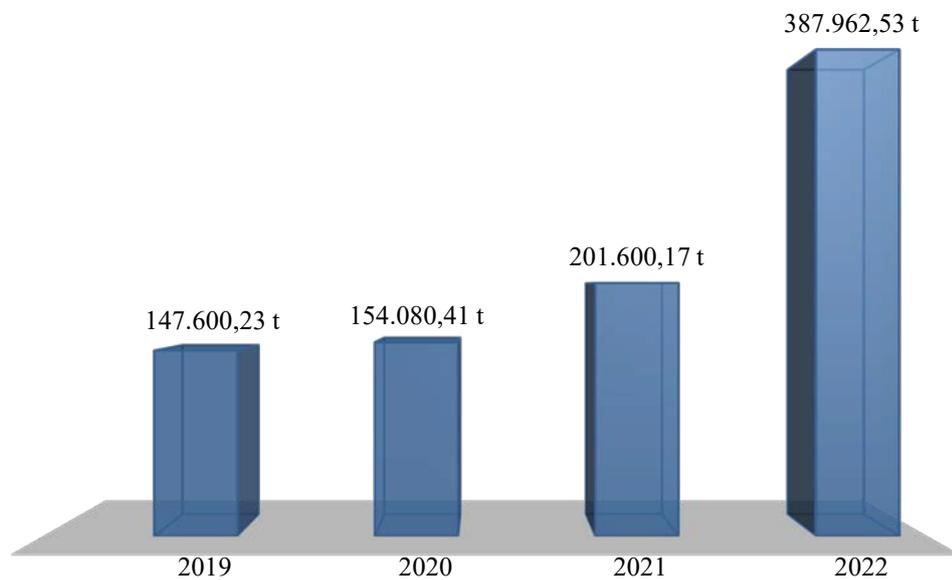
Fonte: Adaptado, IMA (2023).

De acordo com os dados apresentados, é notório o aumento gradativo na geração de RCD no Estado de SC. Comparando os dados entre 2020 e 2021, houve um aumento de 44,55%, e de 2019 a 2022, tem-se um aumento de quase três vezes do valor gerado.

No município de Joinville/SC, visando assegurar a destinação adequada dos RCD, foi instituída no ano de 2010, a Associação Joinvilense de Condutores de Transportes de Resíduos (AJOCTRE).

Por meio de comunicação digital, via e-mail, com a AJOCTRE (2023), foram fornecidos dados das coletas de RCD, para os municípios de Joinville, Araquari, São Francisco e Garuva, abrangendo o período entre 2019 e 2022. A Figura 1.3, apresenta o balanço da geração, transporte e destinação de RCD, para o período mencionado.

Figura 1.3 – RCD gerados pelos municípios de Joinville, Araquari, São Francisco do Sul e Garuva.

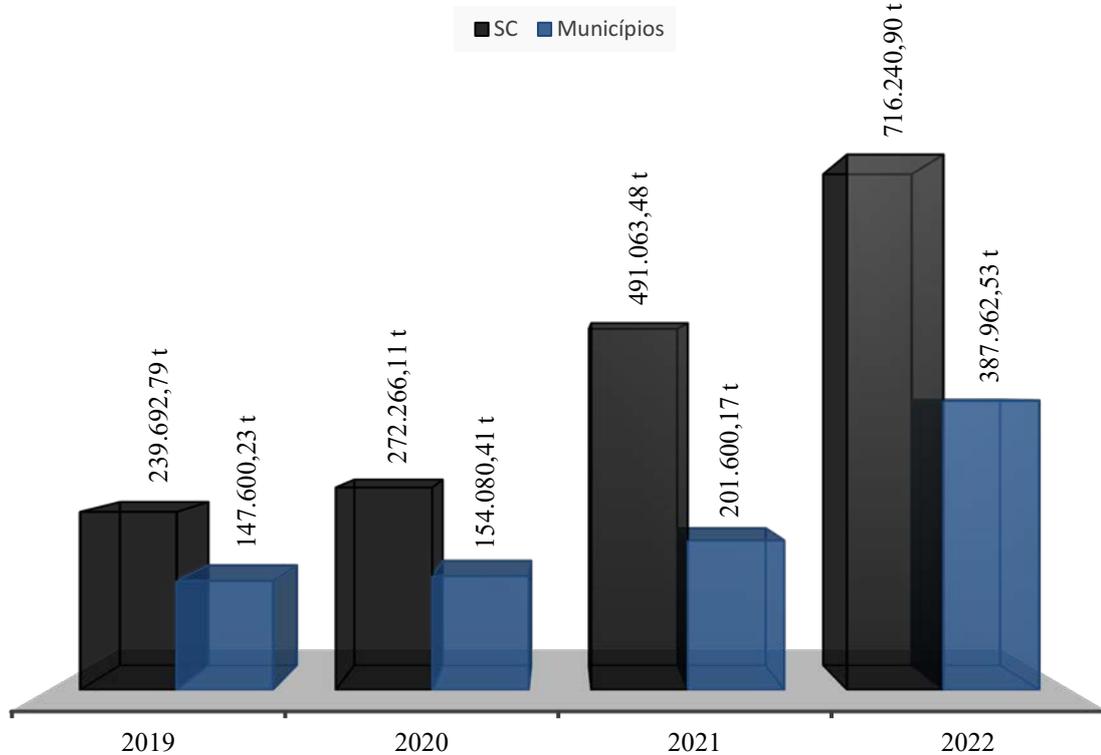


Fonte: Adaptado, AJOCTRE (2023).

Comparando os dados referentes à geração de RCD disponíveis no site do IMA (Figura 1.2) com os dados apresentados pela AJOCTRE, verifica-se que aproximadamente 50,0 % do RCD gerado em todo o Estado de SC, possui como fonte principal os municípios de Joinville, Garuva, Araquari e São Francisco do Sul.

A Figura 1.4, apresenta o comparativo do montante de RCD gerado no Estado de SC, em comparação com os quatro municípios mencionados.

Figura 1.4 – Comparativo do montante de RCD gerado no Estado de SC e municípios de Joinville, Araquari, São Francisco do Sul e Garuva em toneladas.



Fonte: Adaptado, AJOCTRE e IMA (2023).

Diante dos fatos apresentados, é imprescindível um uso alternativo e sustentável para os RCD, que não seja a mera disposição em áreas de deposição como passivos ambientais. Com supedâneo nesta motivação, esta pesquisa busca verificar a viabilidade técnica do uso de RCD oriundo de demolição de galpão industrial, na substituição parcial de frações granulares provenientes da britagem de maciço rochoso gnáissico, para fins de formulação de misturas asfálticas densas do tipo *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG).

Intenta-se, portanto, contribuir de forma positiva e direta na mitigação de impactos ambientais decorrentes da atividade de produção das misturas asfálticas, a partir da diminuição da exploração de recursos minerais naturais e da saturação de aterros industriais, podendo proporcionar benefícios econômicos às atividades com o uso de materiais recicláveis, contribuindo ao desenvolvimento sustentável.

Outro ponto a ser considerado, é a possibilidade de diminuição de processos burocráticos com a obtenção de alvarás e licenças ambientais de lavra para explorações de jazidas, partindo da premissa que estes empreendimentos demandam uma intensa exploração dos recursos naturais e finitos, ocupam grandes áreas e propiciam diversos impactos ambientais.

1.5. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado da seguinte forma:

Capítulo 1: Introduz o tema da pesquisa, deixando o leitor informado quanto ao contexto e objetivos pretendidos.

Capítulo 2: Trata das considerações gerais sobre estruturas de pavimento e misturas asfálticas densas, com enfoque nos aspectos relacionados aos materiais constituintes e nas diretrizes da metodologia francesa.

Capítulo 3: Aborda uma visão geral do processo de geração e beneficiamento dos resíduos de construção e demolição, bem como origem, classificação, características (físicas e químicas), bem como a problemática ambiental do descarte irregular.

Capítulo 4: Discorre sobre o fenômeno da deformação permanente nas misturas asfálticas e os fatores que influenciam na sua ocorrência.

Capítulo 5: Expõe os materiais e métodos utilizados durante a campanha experimental da pesquisa.

Capítulo 6: Apresenta os resultados e as discussões relacionadas à campanha experimental realizada.

Capítulo 7: Aponta as conclusões advindas da pesquisa e as respectivas recomendações para a execução de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

CONSIDERAÇÕES SOBRE ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS E MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

Este capítulo apresenta considerações gerais sobre as estruturas de pavimento e as misturas asfálticas densas.

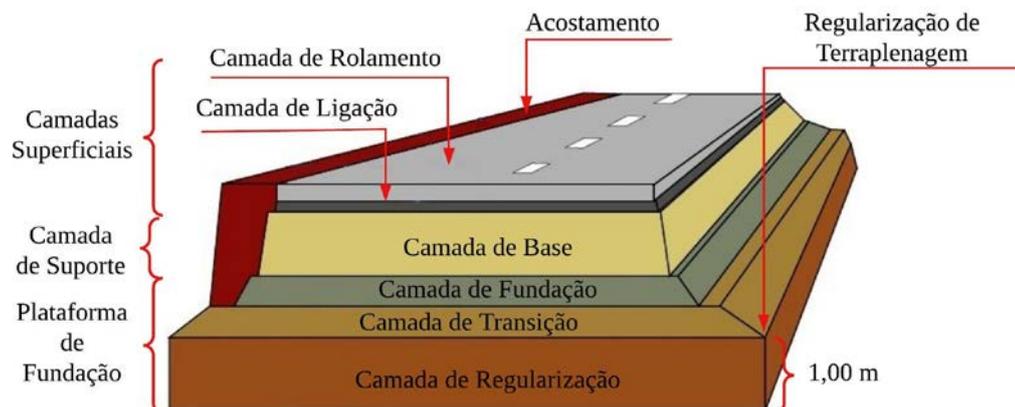
2.1. DEFINIÇÕES SOBRE PAVIMENTO

A estrutura do pavimento é construída com o intuito de distribuir as tensões e deformações induzidas pelo tráfego ao longo de suas camadas, até um nível de intensidade que cada material constituinte dessa estrutura possa suportar (SALOUR, 2015).

De acordo com o Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006), 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.

As camadas do pavimento são projetadas para que, em conjunto, resistam às solicitações impostas pelo tráfego e às condições ambientais. As camadas de base e sub-base (fundação) são as responsáveis por dissipar a intensidade da carga a um nível admissível incidente sobre o terreno natural de fundação (camada de regularização) (Figura 2.1) (QUINTERO, 2011).

Figura 2.1 – Estrutura multicamadas de um pavimento.



Fonte: Adaptado, Quintero (2011).

2.2. ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS FRANCESES

Na França, a estrutura do pavimento é projetada segundo as condições de serviço (clima) e o nível de solicitações (tráfego) que terão de suportar. Desta forma, as rodovias são divididas em dois grupos: Vias de Rede Estruturante (VRS), que são destinadas a tráfegos médios e elevados, bem como projetadas para um período de 30 anos, e Vias de Rede Não Estruturante (VRNS), que são projetadas para 20 anos, aptas a receberem tráfegos médios e leves (GUIDE TECHNIQUE, 1997).

Além disso, uma das características da rede rodoviária francesa é a existência de uma grande variedade de estruturas de pavimentos. Isso se deve a alguns fatores, como: o tamanho da malha rodoviária francesa ($\approx 1,1$ milhão de km), a diversidade das classes de tráfego (Tabela 2.1) e condições climáticas, além de uma grande variabilidade de recursos naturais disponíveis (VIE PUBLIQUE, 2020; SIMONIN, 2005).

Tabela 2.1 – Classes de tráfego segundo a metodologia francesa.

Classe	T5	T4 (TC2)	T3 (TC3)**		T2 (TC4)		T1 (TC5)		T0 (TC6)		TS (TC7)		TEX (TC8)	
			T3-	T3+	T2-	T2+	T1-	T1+	T0-	T0+	TS-	TS+		
MJA	0	25	50	85	150	200	300	500	750	1200	2000	3000	5000	>5000

*Terminologia utilizada pelo Guide Technique (1997);

**Terminologia utilizada pelo Catalogue des Structures des Chaussées (1998);

NOTA: quando as terminologias TC estiverem acompanhadas dos números 20 ou 30, significa que pertencem às classes de tráfego das redes não estruturante VRNS (20 anos) e estruturante VRS (30 anos), respectivamente.

Fonte: Guide Technique (1997) e Catalogue des Structures des Chaussées (1998).

De acordo com as diretrizes do Guide Technique (1997), o último metro superficial referente à regularização do subleito, é considerado o ponto de partida da estrutura de pavimento francesa, em que a cota de topo é denominada nivelamento de terraplenagem ou AR. Em sequência, é prevista uma camada de transição, a qual na metodologia francesa desempenha a função de melhorar a capacidade de suporte do subleito, mas sobretudo possibilita a progressão gradual do módulo de rigidez entre as camadas, a fim de permitir a dissipação dos esforços aplicados pelo tráfego. Esta camada pode ser eventual ou não, a depender da rigidez do subleito, devendo esta condição ser avaliada em cada caso.

O topo do conjunto referente ao último metro do subleito e da camada de transição constituem a Plataforma de Fundação (PF) das estruturas de pavimento, e são classificadas em 4 classes, tomando em conta os seguintes intervalos de módulo de rigidez: $20 \text{ MPa} \leq \text{PF1} < 50 \text{ MPa}$; $50 \text{ MPa} \leq \text{PF2} < 120 \text{ MPa}$; $120 \text{ MPa} \leq \text{PF3} < 200 \text{ MPa}$; e $\text{PF4} \geq 200 \text{ MPa}$. Caso não seja necessária a utilização da camada de transição, a PF se torna o próprio topo do subleito regularizado.

As camadas de sub-base e base formam o conjunto definido como de assentamento ou de apoio. Dependendo da classe do tráfego e do tipo de rede (estruturante ou não), são normalmente projetadas com camadas betuminosas ou materiais granulares não tratados (GNT).

Completam a estrutura, as camadas de ligação e de rolamento, denominadas superficiais. Em geral, principalmente a camada de rolamento, possui caráter funcional, ou seja, não desempenha papel estrutural no suporte de esforços aplicados pelo tráfego, atendo-se basicamente à propiciação de boa aderência pneu-pavimento, resistência à ação deletéria da água e à deformação permanente, além de proteger as camadas estruturais da incidência direta de raios ultravioletas (UV).

A Figura 2.2 ilustra a composição genérica de uma estrutura de pavimento francesa.



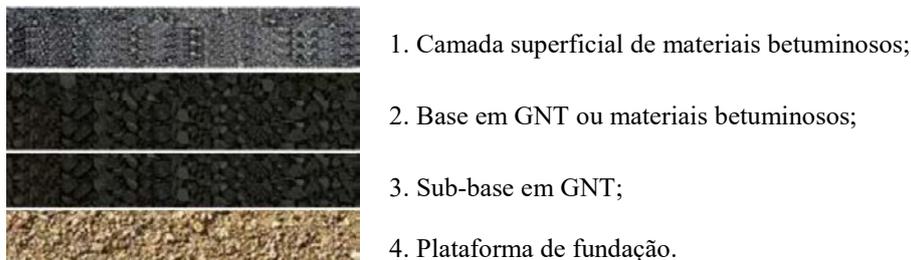
Fonte: Autor.

O Guide Technique (1997), classifica ainda as estruturas de pavimento nas seguintes categorias: betuminosas flexíveis, betuminosas espessas, de base tratada com ligante hidráulico, mistas, inversas e de concreto de cimento Portland, em que as características gerais das duas

primeiras serão melhor detalhadas a seguir, por serem as mais utilizadas na malha viária francesa e por constituírem o escopo de utilização corrente das misturas asfálticas estudadas nesta pesquisa, conforme será melhor detalhado adiante.

As estruturas de pavimentos denominadas flexíveis (Figura 2.3) possuem um revestimento betuminoso esbelto para os padrões franceses, partindo de 5,0 cm e podendo atingir até 15,0 cm, de forma geral. Em condições de tráfegos leves ($\leq TC_{320}/T3$), por exemplo, apenas a camada superficial betuminosa atua na transmissão direta do carregamento às camadas subjacentes da estrutura do pavimento, não possuindo caráter estrutural, ou seja, não é responsável por absorver esforços provenientes do tráfego, função desempenhada pelas subcamadas. Nestes casos, normalmente é assente sobre uma base e sub-base compostas por materiais granulares não tratados (GNT), com graduação bem distribuída no intervalo 0/14 mm ou 0/20 mm. A espessura total do pavimento varia entre 30,0 cm e 60,0 cm. Nos casos de tráfego médio ($\leq TC_{620}/T0$), a camada de base é executada com material betuminoso, com caráter estrutural, e a sub-base em GNT. Este tipo de estrutura não é utilizado em redes estruturantes (VRS) e para tráfego elevado.

Figura 2.3 – Estrutura genérica de pavimentos flexíveis.

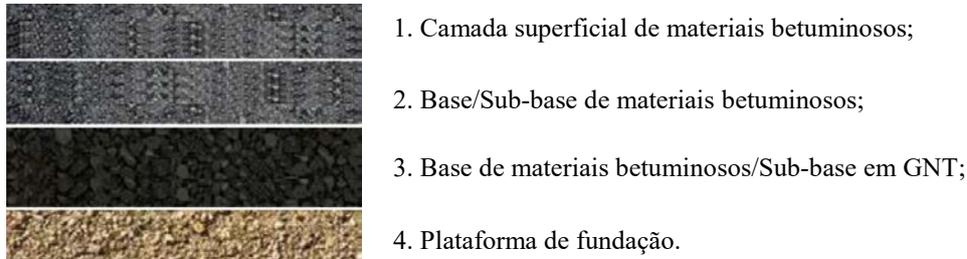


Fonte: Adaptado de Guide Technique (1997).

As estruturas de pavimentos betuminosos espessos (Figura 2.4) são constituídas por uma camada superficial de rolamento betuminosa, com característica funcional, assente sobre camadas de apoio (base e sub-base) também formuladas com materiais betuminosos, porém, com característica estrutural. Neste caso, quando o nível de tráfego previsto em projeto é médio (entre $TC_{430}/T2$ e $TC_{630}/T0$), apenas a camada de base é normalmente betuminosa, enquanto a sub-base executada em GNT. Porém, nas situações de tráfego elevado ($\geq TC_6/T0$), ambas as camadas de apoio são compostas por materiais betuminosos. A espessura dessas camadas

betuminosas quando em conjunto compreendem espessuras que podem variar entre 15,0 cm e 40,0 cm (Figura 2.4). São utilizadas na composição da rede estruturantes (VRS).

Figura 2.4 – Estrutura genérica de pavimentos betuminosos espessos.



Fonte: Adaptado de Guide Technique (1997).

É no contexto de aplicação como camada superficial de rolamento, com caráter funcional, que serão estudadas as misturas asfálticas *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG) formuladas para esta pesquisa.

2.3. MATERIAIS COMPONENTES DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Como já observado anteriormente, as misturas asfálticas podem possuir características distintas umas das outras, pelo fato de seus constituintes possuírem diversas características oriundas de sua origem ou sistema beneficiamento. Assim, para obter uma melhor compreensão funcional das misturas asfálticas estudadas, se faz necessária análise de cada componente.

2.3.1. Materiais Granulares

As características dos agregados dependem tanto da natureza da rocha de origem (características mineralógicas, físicas e mecânicas) quanto das condições de exploração e elaboração (características geométricas e limpeza) (HAMLAT, 2007).

A composição granulométrica, formada por todos os grãos em contato, deve garantir a distribuição das solicitações na mistura e a transmissão das cargas para as camadas inferiores do pavimento. As características geométricas dos agregados, como forma, angularidade e estado de superfície, influenciam diretamente a resistência dos contatos às posições e rotações relativas de grãos (CLARA, 2020).

Além disso, os grãos minerais devem ter boa resistência a esforços estáticos e dinâmicos para evitar danos sob as cargas. Também é essencial considerar a compatibilidade dos agregados com o aglutinante, ou seja, a qualidade da adesividade dos agregados e do aglutinante de hidrocarbonetos. A compatibilidade com o ligante resulta da polaridade natural da superfície, da porosidade e da limpeza dos grãos minerais (NGUYEN, 2006).

Regularmente, o tamanho das partículas é determinado a partir do peneiramento com séries de peneiras de aberturas padronizadas e com tamanho de abertura progressivamente decrescente.

Diversos testes são realizados para determinar a durabilidade e resistência dos materiais granulares, em que os mais comuns são o Los Angeles e o Micro-Deval. Outros testes também são realizados para avaliar o comportamento dos granulares, como: resistência ao polimento, determinação da friabilidade de partículas finas, determinação da percentagem de partículas graúdas fraturadas e, sanidade por degradação à imersão em soluções de Sulfato de Sódio ou Magnésio (BACHAND, 2018).

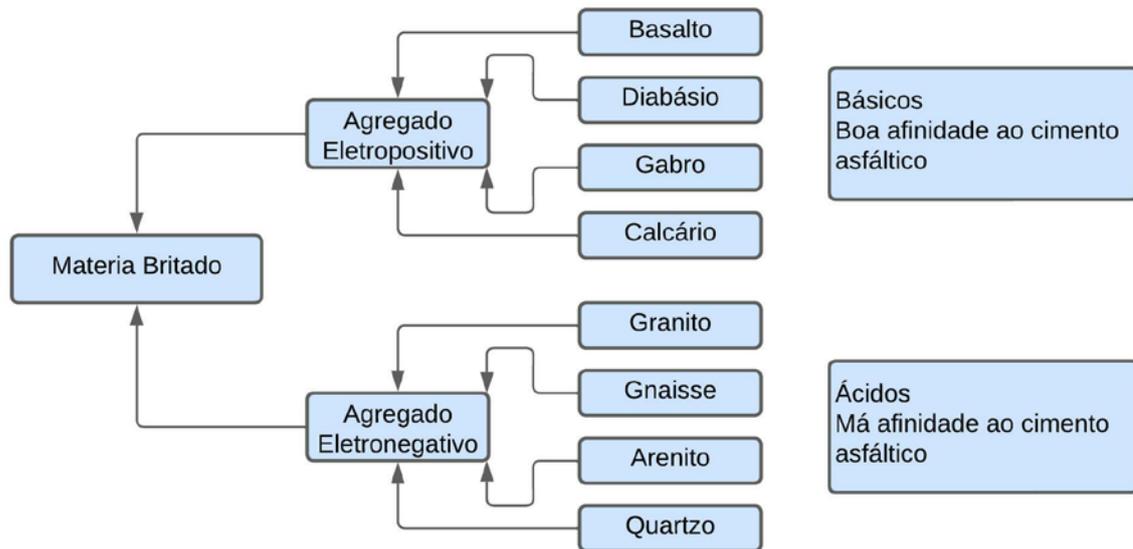
A forma dos granulares é uma particularidade da rocha mãe que pode ser um pouco modificada pelas técnicas de britagem. Com o objetivo de privilegiar o critério de aderência, a seleção dos granulares recaiu sobre aqueles com forma subangular com superfície áspera e resistente à abrasão (MOMM, 1998).

Contudo, os granulares originários de rochas britadas são portadores de arestas vivas que permitem intertravar as frações granulares do concreto asfáltico. Desta maneira, o atrito interno é acentuado, melhorando a estabilidade do material (MOUTIER, 1992).

A afinidade ao cimento asfáltico de petróleo (CAP), chamada também de adesividade, é a qualidade do granular deixar-se aderir pelo CAP e pode ser verificada pelo teste da película, conforme a norma DNER-ME 78 (1994), e pelo ensaio de resistência das misturas asfálticas à ação deletéria da umidade induzida (AASHTO T-283, 1989), denominado também como Lottman Modificado.

Destaca-se ainda outro fator que afeta a afinidade (adesividade) do ligante ao agregado, que é a carga elétrica do granular, inerente ao tipo da rocha matriz (Figura 2.5) que dá origem aos granulares.

Figura 2.5 – Carga elétrica inerente ao tipo de rocha matriz.



Fonte: Adaptado, Santana (1992).

A análise da composição mineralógica desse material demonstrou uma fração mais representativa de Quartzo, sendo este um agregado eletronegativo mais suscetível aos fenômenos de desagregação (*Stripping*), que é caracterizado pelo deslocamento do ligante da superfície do agregado pela água e pelos esforços do tráfego que causam tração na película de asfalto, tendo como consequência a redução da vida útil das misturas asfálticas.

Com a finalidade de solucionar este problema, geralmente são utilizados melhoradores de adesividade nas misturas asfálticas (*dopes*). No entanto, como o intuito dessa pesquisa é analisar o emprego de um material alternativo na formulação de misturas asfálticas, não será utilizado dope, para assim poder verificar o real efeito da aplicação dos materiais em suas condições naturais de uso.

2.3.2. Ligante betuminoso

O ligante betuminoso é considerado um material complexo, tanto pela composição química quanto pelas propriedades reológicas. Apresenta um comportamento viscoelástico linear, no domínio das microdeformações, caracterizado pela alteração de propriedades como viscosidade, rigidez e consistência, em função da variação da temperatura e da frequência de sollicitação (THODESEN et al., 2009).

No Brasil, os ligantes betuminosos que apresentam propriedades condizentes com os padrões estabelecidos pela Agência Nacional do Petróleo (ANP) recebem a denominação de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). São classificados pelo ensaio de penetração direta quando convencionais ou puros, e; pela relação entre o ponto de amolecimento anel e bola e percentual de recuperação elástica, quando modificados por materiais elastoméricos, como os polímeros e a borracha, por exemplo, (CARLESSO, 2018).

A principal função dos ligantes betuminosos consiste em garantir: o envolvimento dos agregados, dando origem a uma mistura mais coesa, mais estável e mais resistente à água; uma adequada trabalhabilidade da mistura durante o seu transporte e aplicação; uma mistura flexível capaz de se adaptar gradualmente as modificações que ocorrem na zona intervencionada, bem como às compressões associadas às ações do tráfego (FERNANDES, 2017).

2.3.3. Interação granular-ligante

A interação do conjunto granular-ligante é um fenômeno que vem sendo estudado há muitas décadas, sendo fortemente influenciado pela reatividade química de seus componentes, presença de materiais deletérios, comportamento termodinâmico e composição mineralógica das matrizes (MASTORAS et al., 2021; TAJDINI et al., 2014; SAAL, 1933; WINTERKORN, 1936).

Diversas pesquisas procuram explicar a interação das tensões de superfície envolvidas na ocorrência dos processos de adesão do conjunto granular-ligante, destacando-se as reações ácido-base de Lewis, forças de Lifshitz-Van de Waals e Teoria de Gibbs sobre a superfície de energia livre por unidade de massa das frações granulares (XU et al., 2021; YALGHOUZAGHAJ et al., 2021; JI e ARSON, 2020; SINGH et al., 2018; TAN e GUO, 2013).

De acordo com Curtis et al. (1993), o betume contém grupos polares que são orientados e atraídos por alguns minerais na superfície dos agregados. Durante o estágio de construção, as moléculas no betume quente podem se mover e mudar sua orientação, permitindo que o betume e o agregado aderem-se através de forças polares, ligações de hidrogênio ou interações de Van der Waals.

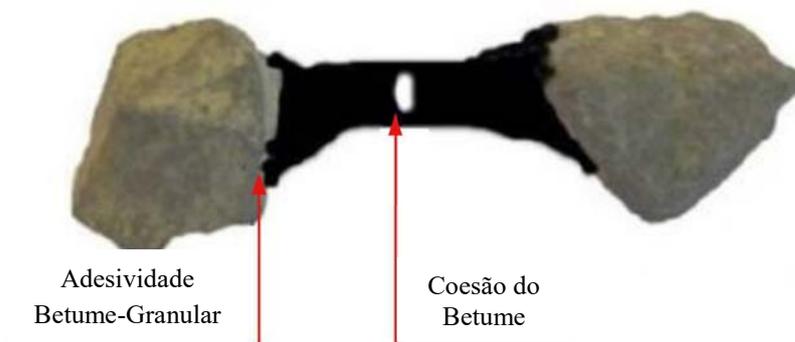
A reação química é baseada na presença de componentes reativos (ácido e base) no sistema de agregado-betume (SCOTT et al., 1977, CURTIS et al., 1993). Este conceito argumenta que a ligação granulada-betume é o resultado da reação dos dois materiais na

formação de novos componentes insolúveis em água. O betume possui funcionalidades ácidas (presença de ácidos naftênicos) e, em geral, possui maior adesividade com agregados calcários compostos principalmente de carbonatos de cálcio, do que com agregados ácidos como quartzito, granito e pórfiros compostos por silicatos.

De acordo com Hamlat (2007), a qualidade da ligação betume-granular é essencial para garantir a durabilidade dos revestimentos. Os procedimentos de fabricação dos betumes podem ter uma influência na ligação betume-granular. É importante garantir a qualidade desta ligação, especialmente quando o tráfego é alto e a presença de água é quase permanente, como no caso de países tropicais. Na ligação betume-granular, existem dois parâmetros que garantem uma boa ligação:

- A coesão do betume (Figura 2.6), que é a energia necessária para criar uma fissura no betume até o cisalhamento;
- Adesividade betume granular, que é a energia gasta para separar um filme de betume do agregado. Adesividade é a capacidade de dois materiais se ligarem uns aos outros por afinidade (DARQUE, 2003; FELDER, 2003). A ligação entre o ligante e o granular numa mistura granular pode ser dificultada pela água e pelo pó. A melhoria da afinidade mútua envolve a eliminação de poeira e a possível adição de lubrificantes destinados a resistir à ação da água (MOUTON, 1967).

Figura 2.6 – Adesão e coesão betume-granular.



Fonte: Hamlat (2007).

Existem dois estágios no processo de adesão granular-betuminoso: o primeiro durante a mistura, denominado “Adesividade Ativa”, no qual o betume molha e cobre a superfície do agregado, e o segundo estágio, denominado “Adesividade Passiva”, que é de grande

importância durante a vida útil do material e corresponde à resistência de liberação do ligante, quando a água associada às cargas de tráfego tenta interferir na interface dos grãos de ligação (HERSCHKORN, 1988, NOVAK et al., 2002, MALLICK et al., 2003).

- Adesividade ativa

A cobertura de agregados com betume é um passo crucial na produção de misturas betuminosas. Uma forte ligação entre o betume e o granular é condicionada por uma boa cobertura. Para obtê-la, o betume deve estar em um estado líquido e o conjunto granular deve ter a temperatura adequada para manter a fluidez do betume e permitir que ele molhe toda a sua superfície e penetre parcialmente em seus poros (CASTAÑEDA, 2004).

Quando um líquido é derramado na superfície de um sólido, ele não molha completamente a superfície, mas se estende sobre ela até atingir um estado de equilíbrio. Este estado, caracterizado pelo ângulo de contato sólido-líquido, foi descrito em 1805 por Young, em função das tensões superficiais dos materiais presentes (KINLOCH, 1990).

Petersen e Plancher (1998), explicam que a adesão entre o ligante betuminoso e os granulares é assegurada pelas interações intermoleculares, que podem ser: ligações eletrostáticas, devido às superfícies dos agregados geralmente possuírem cargas elétricas, dependendo de sua composição; ligação de hidrogênio, quando grupos de hidroxilas se encontram na superfície; ou através de forças intermoleculares, como a de Van der Waals, que frequentemente são encontradas nesse tipo de interação.

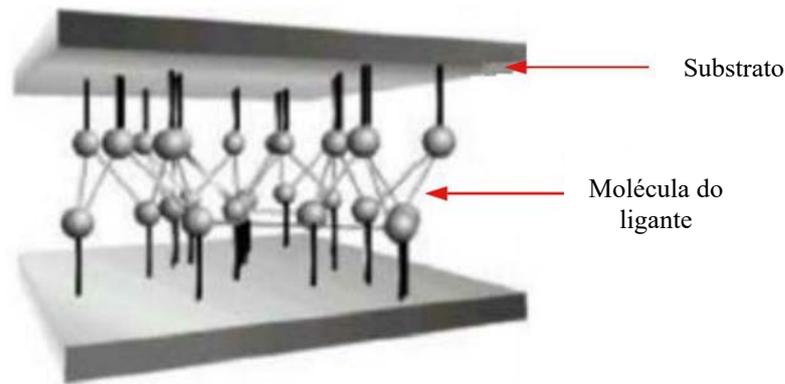
- Adesividade passiva

Conforme Ramond (1977), “a adesividade passiva é a força de ligação à interface entre dois materiais na presença de água, que pode ser avaliada através da realização de um teste da união”. A superfície de falha pode ocorrer de três maneiras:

- Por coesão do ligante, quando a rachadura está nas moléculas adesivas;
- Por aderência, quando a separação ocorre na interface entre o substrato e o ligante (Figura 2.7);

- Por coesão do substrato, quando a rachadura ocorre nas moléculas do substrato.

Figura 2.7 – Interface entre o substrato e o ligante.



Fonte: Castañeda (2004).

Conforme Curtis et al. (1993), as diferentes forças envolvidas no processo de adesão entre betume e agregados são declínio na energia interfacial, ancoragem mecânica e reação química.

A energia interfacial é uma medida direta das forças intermoleculares que ocorrem quando dois materiais, como agregados e betume, são colocados em contato. Essas forças intermoleculares são atribuídas a diferentes efeitos (KINLOCH, 1990):

- Forças de dispersão ou forças de London: resultam do movimento interno de elétrons nas moléculas;
- Forças Polares: apresentam para moléculas que possuem polos elétricos permanentes ou induzidos.

A ancoragem mecânica explica a ligação granular-betume pela textura superficial e em função das características físicas do granular. O ligante betuminoso penetra nas irregularidades da superfície rugosa do granular. A coesão e as forças residuais geradas pelo resfriamento do betume fornecem uma rede de ligações que ajusta a ancoragem por absorção do ligante betuminoso nos poros dos granulares, unindo-o fortemente aos minerais (ISHAI e CRAUS, 1977).

A reação química é fundamentada na presença de componentes reativos (ácido e base) dentro do sistema granular-betume. Este conceito sustenta que a ligação granular-betume ou

granular-mástique seja o resultado da reação de dois materiais formando um novo componente insolúvel em água. O ligante betuminoso tem funcionalidades de caráter ácido (presença de ácidos naftênicos) e usualmente possui uma adesividade mais forte com os granulares calcários compostos principalmente de Carbonatos de Cálcio (CaCO_3), em relação aos granulares ácidos como quartzo, granito e compostos de silicatos (SiO_3) (CASTAÑEDA, 2004).

2.4. MISTURAS ASFÁLTICAS DE CARÁTER FUNCIONAL

Segundo Siroma (2018) e Teixeira (2022), as misturas asfálticas de caráter funcional são utilizadas na superfície das estruturas de pavimento, que compreende as camadas de rolamento e de ligação. Desta forma, além de protegerem as referidas estruturas das intempéries (altas temperaturas, incidência de raio UV, precipitações pluviométricas, etc.), devem propiciar condições adequadas de aderência pneu-pavimento, resistência à ação deletéria da água e à deformação permanente.

De acordo com o Manuel LPC (2007), as principais misturas asfálticas que possuem caráter funcional na metodologia francesa são:

- Béton Bitumineux Semi-Grenus (BBSG);
- Béton Bitumineux à Module Élevé (BBME);
- Béton Bitumineux pour chaussée souples à faible trafic (BBS);
- Béton Bitumineux Mince (BBM);
- Béton Bitumineux Très Mince (BBTM);
- Béton Bitumineux Drainant (BBDr).

As misturas asfálticas do tipo *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG), objeto de estudo desta pesquisa, podem ser aplicadas nas estruturas de pavimento com espessuras de 5,0 cm a 9,0 cm.

A metodologia francesa admite dois tipos de graduações para as misturas BBSG: 0/10 mm e 0/14 mm, sendo os últimos valores referentes ao diâmetro máximo da curva

granulométrica. Ainda, este tipo de formulação comporta três classes de desempenho, a saber (MANUEL LPC, 2007): 1, 2 e 3, sendo maior a nobreza da mistura asfáltica quanto mais elevado for o valor da classe, estando relacionadas às seguintes condições:

- Classe 1: destinadas à aplicação em tráfegos de regiões com temperaturas amenas, com média anual em torno de 15 °C, isto é, a temperatura equivalente adotada na França;
- Classe 2: aplicadas a tráfegos em condições climáticas que envolvem elevados gradientes térmicos ao longo do ano, como por exemplo, temperatura ambiente de 5 °C durante o inverno e de 30 °C no verão;
- Classe 3: aplicadas a condições de tráfego particulares (canalizado, elevada solicitação, zonas de intersecção, rotatórias), bem como climas com temperaturas constantemente elevadas.

Logo, para aplicação no Brasil, as classes que mais se enquadram à realidade climática do país são a 2 e a 3, dependendo da região considerada, sendo ainda a classe 3 a mais indicada entre todas.

CAPÍTULO 3

NOÇÕES GERAIS SOBRE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Este capítulo apresenta considerações sobre o cenário regional, nacional e internacional referente à geração de resíduos de construção e demolição, bem como o processo de reciclagem e transformação em matéria prima, para usos diversos.

3.1. CENÁRIO INTERNACIONAL E NACIONAL

3.1.1. Cenário Internacional

Estudos indicam que mais de 10 (dez) bilhões de toneladas de resíduos provenientes de ações construtivas é gerado mundialmente todo ano, esse expressivo número alerta para a série de impactos ambientais que são causados principalmente, quando não destinado corretamente (WANG et al., 2019).

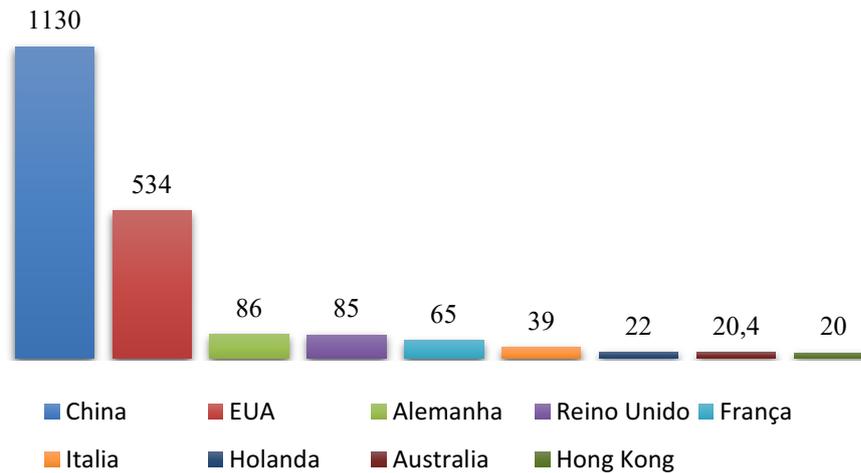
A primeira utilização significativa de resíduos de construção e demolição data da época do fim da Segunda Grande Guerra. Naquele período, milhares de escombros ficaram espalhados pelas cidades. A necessidade de matéria prima para reconstrução dos centros urbanos e a falta de local de destino do vultoso volume de resíduos fizeram com que estes fossem reaproveitados. (LEITE, 2001).

A partir dos anos 80, normas e recomendações entraram em vigor em outros países como: Dinamarca, Países Baixos, Rússia e Alemanha, países com deficiência na oferta de granulares de acordo com Pinto (1999).

De acordo com o Relatório de caracterização de resíduos da Agência de Proteção do Meio Ambiente dos EUA (EPA, 2020), 600 milhões de toneladas de resíduos de RCD foram gerados nos EUA em 2018, o que é mais que o dobro da quantidade de resíduos sólidos urbanos gerados. A demolição representa mais de 90,0 % da geração total de RCD, enquanto a construção representa menos de 10,0 %. Pouco mais de 455 milhões de toneladas de RCD foram direcionados para o próximo uso e pouco (reciclagem, transformação em agregados) menos de 145 milhões de toneladas foram enviados para aterros sanitários.

Estudo realizado por Aslam et al. (2020), apontou os EUA e China, como os principais geradores de RCD, conforme apresentado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Países que mais geram RCD.



Fonte: Adaptado de Aslam et al. (2020).

3.1.2. Cenário Nacional

No Brasil, as primeiras usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição foram instaladas pelas Prefeituras de São Paulo, SP (1991), Londrina, PR (1993), e Belo Horizonte, MG (1994), ao verem que os benefícios ambientais e econômicos eram positivos entre 1999 e 2005 outras prefeituras também implantaram os planos de gerenciamento de RCD, mas só em 2002 foi homologada a Resolução CONAMA nº 307, que definiu que as geradoras seriam obrigadas a desenvolver e implantar um plano de gestão de RCD, visando reciclar, reutilizar e dar a destinação correta aos materiais (FAGUNDES et al., 2009).

No ano de 2010, por meio da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituído pela Lei Federal nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, foi instrumentado o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR). Em agosto de 2021 o SINIR, publicou em seu site o Relatório de Inventário Nacional de Resíduos Sólidos, sendo apresentado na Tabela 3.1, os dados de geração e destinação dos RCD.

Tabela 3.1 – Geração e destinação de RCD no Brasil (2019).

Tipo de Destinação	Massa (t)	%
Reciclagem	845.933,70	10,22
Aterro de Resíduos da Construção Civil (=inertes)	2.999.139,40	36,23
Aterro sanitário	2.871.573,40	34,69
Aterro controlado	611.169,10	7,38
Lixão	950.959,40	11,49
Totais	8.278.775,00	100

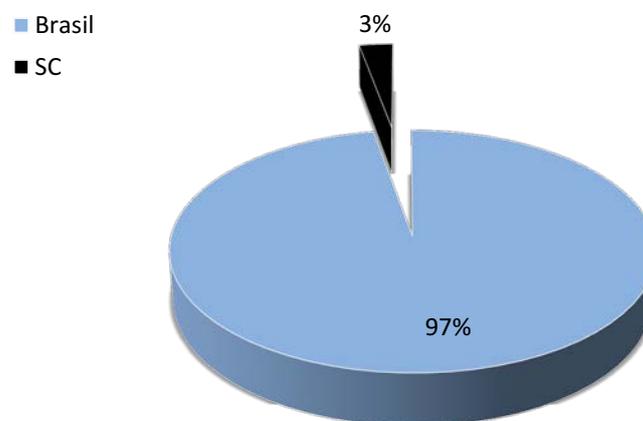
Fonte: Adaptado, Relatório de Inventário Nacional de Resíduos Sólidos de 2019 - SINIR (2021).

3.2. CENÁRIO REGIONAL: IMPORTÂNCIA PARA O DESENVOLVIMENTO DA REGIÃO NORTE DE SANTA CATARINA

Santa Catarina é referência no país pela implementação em 2014, do Sistema de Controle de Movimentação de Resíduos e de Rejeitos (MTR). Lançado de forma pioneira, o programa permite ao órgão ambiental, monitorar toda a geração e destinação de resíduos em tempo real (IMA, 2020).

De acordo com a Figura 1.2 (Geração de RCD no Estado de SC), apresentada no Capítulo 1 e Tabela 3.1 (Geração e Destinação de RCD no Brasil – 2019), a Figura 3.2, apresenta o comparativo de geração de RCD no Brasil e o Estado de SC.

Figura 3.2 – Geração de RCD no Brasil (2019) e Santa Catarina – SC (2019).



Fonte: Adaptado, SINIR (2021) e IMA (2020).

De acordo com dados apresentados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2019), existem 134 Unidades de Destino Final cadastradas em sua base de dados no Estado de Santa Catarina. Destes 1,49 % são compostos por aterros e 0,75 % por unidades de reciclagem.

Nesse contexto, a motivação deste estudo é trazer uma solução viável, para utilização do RCD, diante do cenário internacional, nacional e regional, com o intuito de apresentar dados satisfatório para o seu emprego na pavimentação asfáltica, motivando esses cenários, a implantarem Normas e Leis, atualizadas para o uso final o RCD, que não sejam em aterros.

3.3. PROCESSOS DE GERAÇÃO E BENEFICIAMENTO

3.3.1. Origem do RCD

Os RCD são provenientes de construções em geral, reformas, demolições e inclui também os dejetos provenientes da preparação e escavação do terreno (BRASIL, 2010). Esses resíduos são constituídos por: tijolos, concretos em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassas, gessos, telhas, pavimentos asfálticos, vidros, plásticos, tubulações, fiações elétricas, entre outros; e são conhecidos popularmente como entulho de obra, caliça ou metralha (BRASIL, 2002).

Em vigor desde janeiro de 2003, a Resolução Conama nº 307 (Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2002) obriga (quando instituído por lei complementar municipal) que o gerador elabore o PGRCC para cada empreendimento.

Posteriormente, em 2010, a publicação da Lei federal nº 12.305 – Política Nacional dos Resíduos Sólidos, em seu Artigo 20, veio reforçar a responsabilidade e a obrigatoriedade da elaboração de plano de gerenciamento para as empresas de construção civil, que devem implantá-lo nos canteiros das obras nos termos do regulamento ou de normas estabelecidas pelos órgãos do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA).

3.3.2. Classificação

A Resolução CONAMA nº 307 (2002), classifica os resíduos da construção e demolição em 04 (quatro) classes: A, B, C e D, no entanto, em 2004 e 2011 houve modificações e atualmente passaram a ser classificadas como:

- Classe A – são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem, de edificações, componentes cerâmicos como (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto, de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio fio, etc.) produzidas no canteiro de obras;
- Classe B – são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso; (Redação dada ao inciso pela Resolução CONAMA nº 431, de 24.05.2011, DOU 25.05.2011);
- Classe C – são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação; (NR) (Redação dada ao inciso pela Resolução CONAMA nº 431, de 24.05.2011, DOU 25.05.2011);
- Classe D – são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde. (Redação dada ao inciso pela Resolução CONAMA nº 348, de 16.08.2004, DOU 17.08.2004).

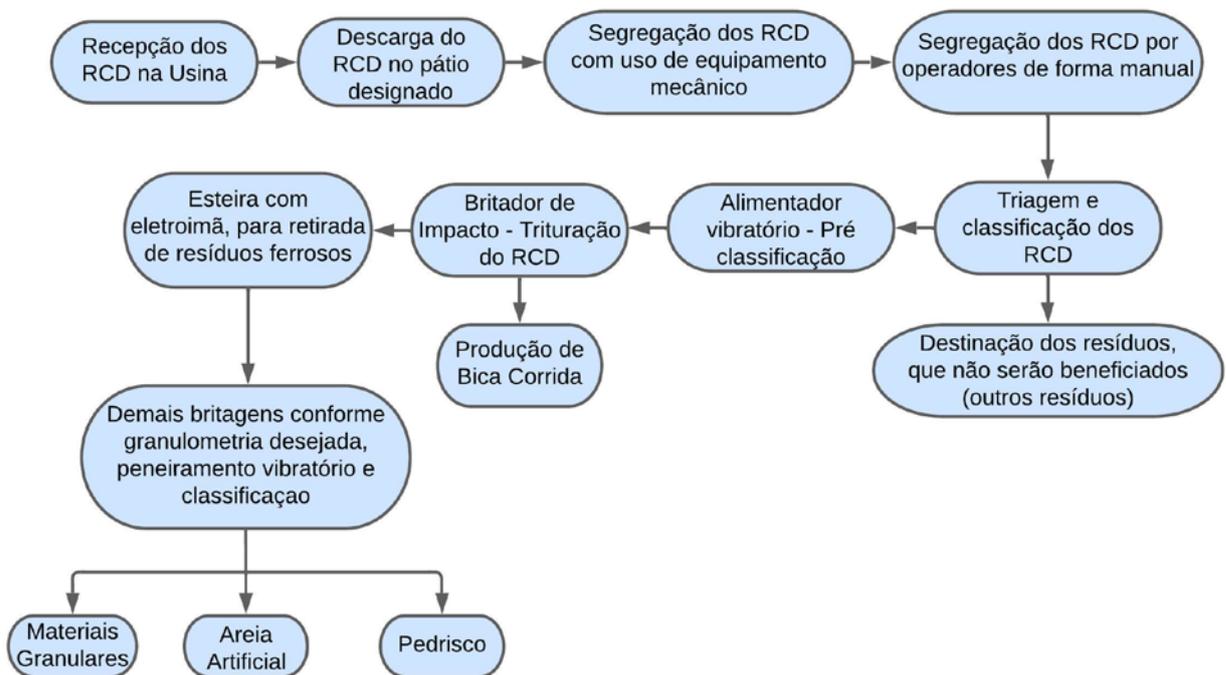
3.3.3. Processos de beneficiamento

De acordo com a Resolução CONAMA nº 357 (2002), o beneficiamento tem a seguinte definição:

Art. 2 - VIII - Beneficiamento: é o ato de submeter um resíduo à operações e/ou processos que tenham por objetivo dotá-los de condições que permitam que sejam utilizados como matéria-prima ou produto.

Os resíduos de construção e demolição, utilizados nesta pesquisa, foram beneficiados por meio de uma usina fixa, a qual esta localização do Distrito de Pirabeiraba, município de Joinville/SC. A Figura 3.3 apresenta o fluxograma do processo de beneficiamento do RCD, enquanto a Figura 3.4, apresenta o mosaico fotográfico contendo a origem e processo de beneficiamento do RCD, utilizado nesta pesquisa.

Figura 3.3 – Fluxograma do processo de beneficiamento do RCD.



Fonte: Autor.

Figura 3.4 – Mosaico do processo de beneficiamento do RCD desta pesquisa.



Fonte: Autor.

Conforme apresentado na Figura 3.4, o RCD desta pesquisa, é proveniente de uma obra de demolição de um galpão industrial no município de Joinville/SC. O processo de demolição foi realizado pela empresa Joinvilense, Construtora Fortunato Ltda. Todo o RCD gerado foi destinado e beneficiado pela Terraplenagem Medeiros.

Seguindo o mosaico da esquerda para direita, de cima para baixo, apresenta-se a segregação grosseira do RCD, com o uso de escavadeira hidráulica. Na sequência é realizado a britagem do RCD, com o uso de uma escavadeira com britador de impacto. Após é apresentado uma segunda segregação do RCD, removendo os resíduos recicláveis (papel, papelão, plástico, vidro e metais) a qual é feita de forma minuciosa e manual, por operadores, para posterior destinação desses resíduos removidos.

As duas últimas etapas consistem no processo de alimentação da unidade de britagem, a qual é realizada com uso de escavadeira hidráulica, onde o RCD é britado na granulometria desejada, passando então pela esteira do britador, formando o montante com o material beneficiado. Por fim a última imagem do mosaico apresenta o RCD coletado, para esta pesquisa.

3.3.4. Caracterização do RCD

Os resíduos provenientes da construção e demolição de acordo com a Resolução CONAMA nº 307 (2002), são classificados como sendo inertes, não representando riscos significantes ao meio ambiente, em virtude das suas características químicas e físicas, serem semelhantes os agregados naturais e solos. Entretanto, esses resíduos podem conter óleos de maquinários, pinturas, sílicas, amianto e outras substâncias reativas, capazes de contaminar o solo e os recursos hídricos e, ainda, ocasionar riscos à saúde humana.

Para análise das características dos resíduos de construção e demolição no desenvolvimento desta pesquisa, foi realizada uma parceria técnica entre o SATC – Centro Tecnológico/Criciúma-SC, e o Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (Pós-ECM) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

3.3.4.1. Composição química e mineralógica

Foram determinadas as composições químicas em termos de elementos majoritários, dos resíduos de construção e demolição, bem como a determinação da composição química por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X através de Energia Dispersiva (FRX), utilizando um equipamento de Espectrometria de Fluorescência, cujo modelo foi o EDX 7000 da marca Shimadzu seguindo o método Semi-Quantitativo de Óxidos para amostras sólidas (metálicas, inorgânicas) ou em pó.

As amostras foram preparadas com o teste de perda ao fogo (PF), seguindo a Norma ASTM D7348-07 (2007), a fim de se eliminar os materiais orgânicos e água de constituição presentes no material.

Após a realização da PF, as amostras foram moídas e prensadas em forma de pastilhas, para posterior realização na análise química.

A Tabela 3.2, apresenta as composições químicas do RCD e do pó de pedra analisado por Clara (2020).

Tabela 3.2 – Composição química majoritária RCD, comparado ao pó de pedra.

Elementos	Teor (% massa)	
	¹ RCD	² Pó de pedra
SiO ₂	62,032	53,602
CaO	16,849	8,080
Al ₂ O ₃	10,736	10,928
Fe ₂ O ₃	4,665	14,505
MgO	1,848	3,26
K ₂ O	1,611	2,576
SO ₃	0,809	0,435
TiO ₂	0,754	1,228
Outros	0,219	----
PF	0,480	2,519
ZrO ₂	----	0,111
V ₂ O ₅	----	0,103
ZnO	----	0,062
Cr ₂ O ₃	----	0,049
MnO	----	0,033
Rb ₂ O	----	0,028
SrO	----	0,028
Y ₂ O ₃	----	0,020
PbO	----	0,013
Na ₂ O	----	0,639

Fonte: ¹Autor; ²Clara (2020).

O RCD desta pesquisa apresenta em sua composição mineralógica concentrações elevadas de sílica (SiO_2), cálcio (Ca), alumina (Al), ferro (Fe), magnésio (Mg) e potássio (K). Os outros elementos aparecem em concentrações abaixo de 1,0 %.

Comparado ao pó de pedra, a concentração de sílica do RCD é de 62,032 % enquanto o pó de pedra apresenta o teor de 53,062 %, ou seja, praticamente 9,0 % a mais em sua composição.

A taxa de teor de sílica (SiO_2) no RCD desta pesquisa, é considerado elevado, se comparado ao pó de pedra, caracterizando-se como um material com alta eletronegatividade, ocasionando uma baixa adesividade com o ligante betuminoso.

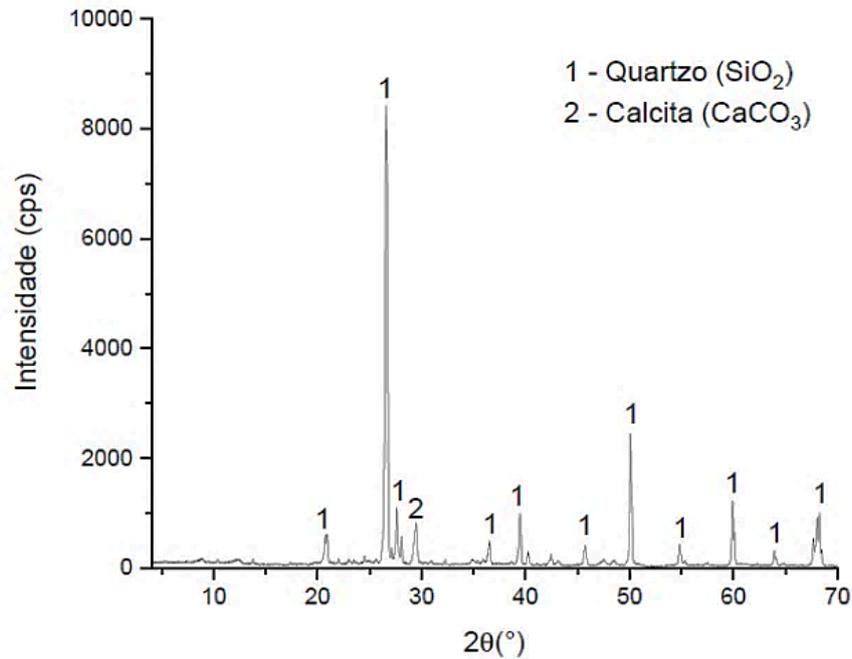
Pode-se afirmar que, o alto teor de sílica encontrado no RCD, esta diretamente ligada a sua composição, composta por materiais cerâmicos (pisos, tijolos, telhas), e resíduos de argamassa (reboco e concreto), conforme apresentado na Figura 3.3.

Diante desta análise, com relação à distribuição granulométrica do RCD, verifica-se que o pó de pedra de gnaiss, estudado por Clara (2020), e utilizado na elaboração da mistura asfáltica desta pesquisa, possui frações intermediárias mais grossas do que a do RCD, apresentando uma superfície específica menor do que o RCD. Tais fatores serão melhores demonstradas no Capítulo Materiais e Métodos.

A determinação da composição mineralógica da amostra do RCD, foi obtida por Difractometria de Raios-X (DRX), utilizando o difratômetro modelo LabX XRD-6100 da marca Shimadzu.

A identificação das fases foi obtida através da comparação dos resultados com os difratogramas contidos no banco de dados Crystallography Open Database (COD 2018) empregando o software Match!3 e apresentadas na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Difratoograma do RCD.



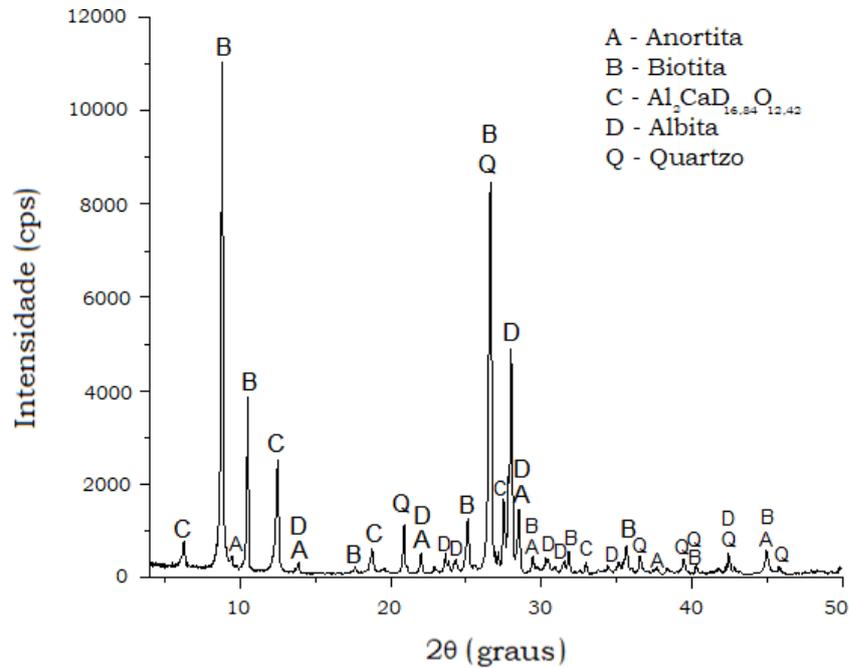
Fonte: Autor.

No gráfico da Figura 3.5, as quantidades percentuais apresentadas são estimadas pelo software, tendo como base as alturas relativas de pico das cartas padrão. Além disso, é apresentada uma base de 100 %, não sendo levados em consideração materiais que estejam na forma amorfa.

Desta forma, nota-se que os picos de quartzo, são mais elevados em relação a calcita, o que corrobora com a discussão feita para a Tabela 3.2, de que o RCD desta pesquisa possui alta eletronegatividade.

A Figura 3.6, apresenta os resultados da Difração de Raios-X (DRX) para o pó de pedra, realizado por Clara (2020). Esta figura apresenta o resultado referente à análise mineralógica do pó de pedra, com o qual foi constatada a presença de anortita, biotita, albita e quartzo.

Figura 3.6 – Difratoograma do pó de pedra.



Fonte: Clara (2020).

Realizando a comparação da composição mineralógica do RCD (Figura 3.5) e do pó e pedra (Figura 3.6), é notável a presença elevada de quartzo no RCD, já o pó de pedra apresenta um pico de intensidade de quartzo, no entanto ele divide esse pico com outros silicatos secundários, como por exemplo, a biotita que apresenta elevada intensidade de picos, a anortita e a albita, os quais também compõe o grupo de formação de sílica.

3.3.4.2. Propriedades físicas

No centro tecnológico, foi realizada a determinação da porosidade através da técnica de adsorção de nitrogênio em baixas temperaturas. Após a preparação, a análise foi realizada em um equipamento da marca Quantachrome, modelo Quadrasorb evo, com o software de processamento QuadraWin. O gás adsorvente utilizado é o gás Nitrogênio 5.0, sendo que os resultados estão apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Análise de superfície específica do RCD.

Análise		Unidade
Área superficial BET	7,990	m ² /g
Volume total de poros*	0,03463	cm ³ /g
Raio médio de poros	86,6921	Å

Nota: * Para poros menores que 876,2 Å de raio a $P/P_0 = 0,999371$

Fonte: Autor.

Para corroborar com os dados obtidos na Tabela 3.3, apresenta-se a Tabela 3.4, a qual realiza o comparativo com valores amostrados para os resíduos de cinza de carvão, objeto de pesquisa científica realizado por Clara (2020).

Tabela 3.4 – Comparativo da análise de superfície específica do RCD e Cinzas de Carvão.

Amostra	Área Superficial (m ² /g)	Volume de poros (cm ³ /g)	Diâmetro médio de poros (Å)
¹ RCD	7,990	0,03463	86,6921
² Bottom ash	1,454	0,013950	88,44
² Fly ash	6,311	0,003170	87,24
² 50 % Bottom + 50 % Fly	3,933	0,009819	99,84
² Pó de pedra	3,052	0,012850	168,4

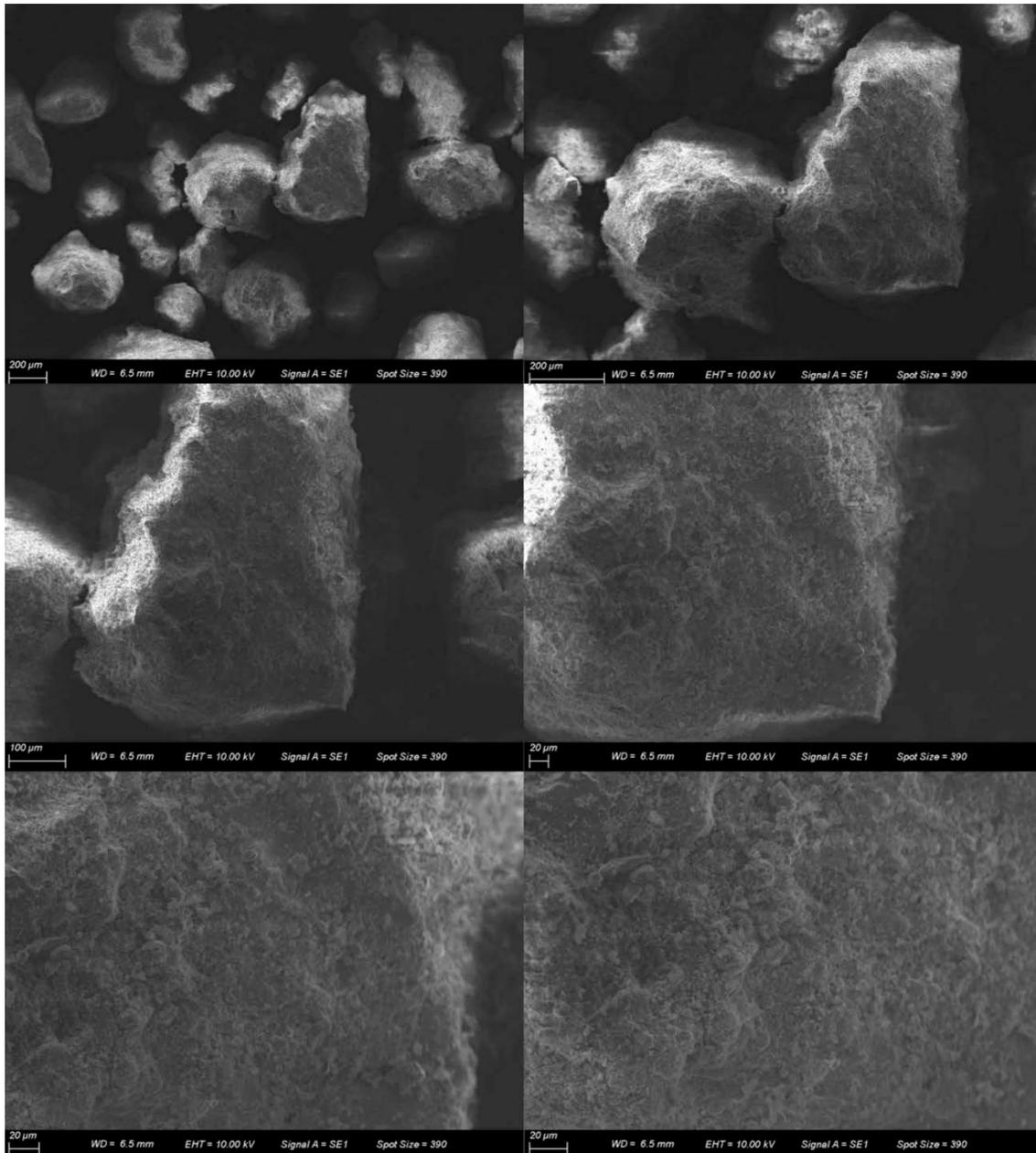
Fonte: ¹Autor; ²Clara (2020).

Os resultados, apresentados na Tabela 3.4, demonstram que o pó de pedra apresenta um maior diâmetro de poros e maior volume de poros, requerendo uma menor quantidade de ligante, para envolver o material da mistura asfáltica.

Comparando os valores obtidos para as Cinzas Leves-Volantes (Fly ash), a qual mais se aproxima do RCD em termos de área superficial, tem-se que ainda assim o volume de poros para o RCD é 90,0 % maior. Diante dos fatos o aumento de área ocupada por unidade de massa, com uma maior porosidade, o que requer a adição de mais ligante na mistura asfáltica.

Para a determinação da análise microscópica (Figura 3.7), foi aplicado à técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Figura 3.7 – Análise da amostra de RCD com ampliação de 100x, 200x, 500x, 800x e 1000x.



Fonte: Autor.

O intuito desta análise é demonstrar algumas características referentes à composição, à macro e à microtextura de partículas do RCD. Diante da análise microscópica, verifica-se que a amostra de RCD, possui microtextura rugosa e macrotextura subangular, o que lhe confere boa aderência entre os grãos no que diz respeito ao intertravamento do material, bem como uma ancoragem adequada do ligante betuminoso sobre as partículas do material.

Ainda assim, em comparação ao material granular do pó de pedra, é válido ressaltar o fator negativo do RCD, o qual possui elevada superfície específica e maior volume de poros,

ocasionando por fim um maior consumo de ligante betuminoso na mistura asfáltica.

Além disso, apesar de não terem sido realizados ensaios de dureza nesta pesquisa com as amostras de pó de pedra e RCD, tem-se registro na literatura indicando que materiais de origem cerâmica possuem de 3 a 5 na escala Mohs, enquanto as partículas derivadas de gnaiss alcançam a escala de 7 (ALESSANDRETTI et al., 2023; TERRA, 2020), logo, mais duras e resistentes que as de origem cerâmica.

3.4. PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DO DESCARTE DE RESÍDUOS ORIUNDOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Estudos anteriores mostraram que a gestão do RCD em cada país tem vários desafios e barreiras que variam de acordo com suas condições. Alguns aspectos importantes do RCD a serem considerados são políticas, papel das partes interessadas, modo de mercado e parâmetros de construção (YUAN, 2017).

A gestão dos RCD nas cidades é um grande desafio, pois a indústria da construção civil é um segmento que pouco se preocupou com os impactos causados ao meio ambiente e que agora precisa se adequar às leis ambientais e às pressões sociais com a preservação ambiental e crescimento sustentável (CHITLAL, 2019).

Considerando que o aumento da população e o rápido crescimento da urbanização são atividades não ecologicamente corretas e também afetam a geração de RCD (MENEGAKI e DAMIGOS, 2018).

Os impactos negativos causados pela indústria da construção civil são imensuráveis iniciam-se na extração de matérias primas nas jazidas naturais e se estende até a execução da obra. Entre os impactos causados destacam: fim de reservas naturais não renováveis do material explorado, alteração na paisagem, desmatamento, erosão, poluição do ar decorrente de emissão de gás carbônico na atmosfera e poluição sonora (PASCHOALIN FILHO e GRAUDENZ, 2012).

CAPÍTULO 4

DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

De acordo com Barros (2022), a deformação permanente das misturas asfálticas ocorre devido a uma associação de fatores, como: tráfego, temperatura, velocidade de carregamento, entre outros. A deformação permanente desses materiais um dos principais mecanismos de falha no pavimento em todo o mundo.

Para Sasaki et al. (2022), diversos ensaios podem ser adotados para caracterização da suscetibilidade à deformação permanente de misturas asfálticas: simuladores de tráfego como o French Rutting Tester (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées wheel tracker – LCPC), Uniaxial de Carga Repetida (Flow Number – FN) (DNIT 184, 2018 – ME), Triaxial Stress Sweep (TSS) (CHOI e KIM, 2013) e Stress Sweep Rutting (SSR) (AASHTO TP 134, 2019).

4.1. CATEGORIAS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Durante a vida útil do pavimento, por variados parâmetros de influência, podem ocorrer as deformações permanentes, também conhecidos como defeitos estruturais de pavimentos flexíveis, sendo este um dos defeitos mais comuns que podem ocorrer nos pavimentos.

A deformação permanente em pavimentos é caracterizada por três distintas categorias, sendo esses: a deformação permanente por insuficiência de compactação, deformação permanente por fluência e deformação estrutural permanente.

4.1.1. Deformação Permanente por Insuficiência de Compactação

De acordo com Inzerillo et al. (2016), ocorre quando há insuficiência de compactação do concreto asfáltico durante sua execução, e ou, por alto teores de vazios. Isso pode causar densificação adicional durante a vida útil. A resistência do Asfalto Misturado a Quente a deformação é significativamente afetada por densidade no local (Figura 4.1a).

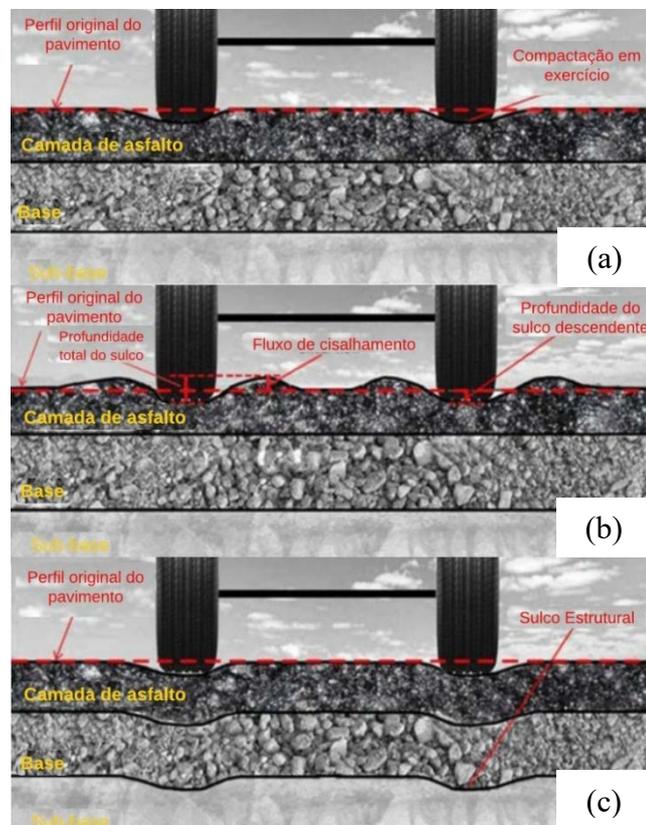
4.1.2. Deformação Permanente por Fluência

Para Miljković et al. (2011), é causada por uma combinação de consolidação (mudança de volume) e cisalhamento deformação (sem alteração de volume) resultante da pressão dinâmica das cargas do tráfego. A deformação por cisalhamento de pavimentos construídos (compactados), causados principalmente por grandes tensões de cisalhamento nas porções superiores da(s) camada(s) de asfalto é o dominante (Figura 4.1b).

4.1.3. Deformação Estrutural Permanente

Esta última categoria, de acordo com Verstraeten (1995), é o afundamento na camada superior, que ocorre devido ao afundamento nas camadas inferiores. No primeiro e terceiro tipo de deformação, a parte deformada desce da primeira camada para uma camada inferior enquanto a superfície deformada sobe do lado da pista da roda (Figura 4.1c).

Figura 4.1 – Representação qualitativa de diferentes tipos de deformação.



Fonte: Adaptado, Inzerillo et al. (2016).

4.2. PARÂMETROS INFLUENTES NA DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Alguns parâmetros são influentes na manifestação da deformação permanente, tais como: materiais granulares, teor de vazios, tipo e teor de ligante asfáltico, temperatura, tráfego, outros fatores e equivalência laboratório-campo.

4.2.1. Materiais Granulares

4.2.1.1. Granulometria

A distribuição granulométrica dos agregados, é muito importante no comportamento dos revestimentos asfálticos, é determinada por peneiramento, sendo expressa como porcentagem passante em massa em cada tamanho de malha de peneira (LEITE et al., 2020).

No Brasil, atualmente utiliza-se do conhecimento empírico e da subjetividade do projetista. As especificações técnicas nacionais, isto é, faixas granulométricas dos departamentos rodoviários oficiais brasileiros, não propõem nenhuma metodologia de critério técnico racional, servindo apenas como instrumento de verificação final da curva granulométrica escolhida (FERREIRA, et al., 2015).

Ahlich (1996) e Lima (2016), entendem que relação entre desempenho de misturas asfálticas com as características de sua distribuição granulométrica, a qual se mal concebida afeta prejudicialmente as propriedades funcionais e estruturais da estrutura do pavimento, provocando danos como a deformação permanente, fluência excessiva, exsudação, desagregação, textura superficial inadequada, e até mesmo a fadiga precoce.

Segundo Andrade et al. (2020), quanto ao método teórico, também denominado racional, compreende a seleção discretizada dos diâmetros de partículas, permitindo assim controlar com precisão a distribuição dos percentuais granulares, dispensando o uso de faixas granulométricas, a partir das equações de Fuller-Talbot.

4.2.1.2. Forma, Tamanho e Textura

A forma, natureza e tamanho dos grãos afetam o comportamento mecânico das misturas asfálticas (De La ROCHE, 1996; RIVIERE, 1996; MOMM, 1998). O tamanho

máximo dos granulares afeta as propriedades dos concretos asfálticos, tanto as características de superfície como as mecânicas.

A classificação da textura é definida através do grau que a superfície do agregado é considerada lisa ou áspera. Pode ser observado que os agregados mais ásperos, durante as primeiras idades, têm sua resistência afetada, tornando a formação de aderência física entre a pasta do cimento e o agregado mais forte (KRÜGER et al., 2017).

4.2.2. Teor de Vazios

Numa mistura asfáltica, o volume de Vazios no Agregado Mineral (VAM) representa o volume disponível entre os agregados em uma mistura compactada, ou seja, o espaço ocupado por vazios e pelo ligante asfáltico (BASTOS, 2016).

Mahboub e Little (1988) indicam que maiores conteúdos de asfalto produzindo vazios menores de ar, aumentam o potencial de afundamentos de trilha de roda. Os autores sugerem que a redução nos vazios de ar como resultado do aumento do teor de asfalto indica que o espaço vazio está sendo preenchido com asfalto. Como resultado, o aumento no teor de asfalto é equivalente à introdução de lubrificantes entre partículas agregadas separadas por uma rede muito apertada de vazios de ar. Este fenômeno faz com que a mistura com o maior teor de asfalto seja mais suscetível à deformação permanente.

4.2.3. Tipo e Teor de Ligante Asfáltico

A influência deste parâmetro é bem nítida no comportamento reológico das misturas asfálticas, pois herdadas e refletem as características do ligante betuminoso que contêm (De La ROCHE, 1996).

De acordo com Barros (2022), uma alternativa para avaliar melhor o desempenho dos ligantes asfálticos quanto à deformação permanente ainda na fase de seleção desse material é *Multiple Stress Creep and Recovery* (MSCR), que foi desenvolvido nos EUA visando caracterizar a resistência dos ligantes quanto a este defeito. O ensaio é normatizado pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO T 350-19) e no Brasil pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT-ME 423/2020).

Para Benesová e Valentin (2017), a durabilidade das misturas asfálticas depende em grande parte da qualidade e comportamento do desempenho do ligante betuminoso. Ensaios empíricos básicos podem caracterizar ou classificar ligantes betuminosos, mas para descrever com mais precisão seu comportamento, são necessários testes de desempenho, por exemplo, usando o Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR).

O DSR permite medições precisas com amostras de ligantes betuminosos modificados ou não, em uma ampla faixa de temperatura e frequência.

Os ligantes com maior viscosidade, como os modificados por polímeros, apresentam maior resistência à deformação permanente (VALKERING et al., 1990; CORTÉ et al., 1994; ONOFRE et al., 2013; SANTAGATA et al., 2015). Já os ligantes asfálticos com menor viscosidade, o caso dos convencionais em forma pura, tornam as misturas asfálticas menos rígidas e mais propícias a apresentar deformação permanente em condições de elevadas temperaturas (MAHBOUB e LITTLE, 1988; BARROS et al., 2015).

4.2.4. Temperatura

A temperatura é um parâmetro fundamental que atua sobre o comportamento viscoelástico das misturas asfálticas, uma vez que herdam as características viscoelásticas do ligante betuminoso que contêm, constituindo materiais termosuscetíveis, isto é, as suas propriedades dependem da temperatura. Quando as temperaturas são muito baixas, as misturas sob solicitação normal do tráfego apresentam uma rigidez elevada e um comportamento praticamente elástico, o que pode acarretar a fragilidade do material devido ao enrijecimento excessivo do ligante betuminoso (De La ROCHE, 1996).

Conforme Heck (2001), a elevação da temperatura provoca uma diminuição na viscosidade do ligante facilitando o aparecimento de deformações permanentes nas misturas.

4.2.5. Tráfego

Tendo em vista o comportamento viscoelástico das misturas asfálticas, conclui-se que a velocidade de aplicação da carga influenciará no comportamento mecânico desses materiais. A mistura asfáltica quando submetida a um carregamento rápido, possui um comportamento próximo ao elástico, entretanto quando aplicados carregamentos lentos, tende a apresentar um comportamento predominantemente viscoso (CLARA, 2020).

Segundo Barra (2005), nas regiões de clima quente, como é o caso da área de abrangência dessa pesquisa, há maior suscetibilidade das misturas asfálticas densas à deformação permanente, principalmente nas rodovias de tráfego intenso e pesado.

CAPÍTULO 5

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados durante a campanha experimental.

5.1. MATERIAIS

5.1.1. Frações Granulares

As frações granulares utilizadas nesta pesquisa são oriundas de britagem de maciço rochoso gnáissico, coletadas de jazida pertencente à empresa Rudnick Minérios Ltda., localizada na região metropolitana de Joinville. Os ensaios de caracterização foram executados conforme as normas vigentes no Brasil (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 – Caracterização das frações granulares (normas brasileiras).

Ensaio	Norma	Limites	Resultados	
			Quantitativo	Qualitativo
Desgaste por abrasão Los Angeles	DNER-ME 035/1998 e DNER-ME 037/1997	Máx. 50,0 %	13,4 %	-
Índice de forma	ABNT NBR 7809/2006	Mín. 0,5	0,60	Boa cubicidade
Resistência ao ataque químico (Durabilidade)	DNER-ME 089/1994 e DNER-ME 037/1997	Máx. 12,0 %	5,30 %	-
Adesividade ao ligante betuminoso	DNER-ME 078/1994	-	-	Má
Equivalência de areia	DNER-ME 54/1997	-	78,0 %	
Teor de material pulverulento	DNER-ME 266/1997 e DNER-ME 37/1997	Máx. 1,0 %	0,40 %	
Absorção	-	-	0,33 %	-

Fonte: Autor.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 5.1, o material ensaiado encontra-se dentro dos limites impostos pelas normativas apresentadas e, dessa maneira, são passíveis de utilização em mistura asfálticas, exceto o parâmetro de adesividade, o qual deve ser corrigido

em situações práticas de obras com a inserção de aditivos melhoradores de adesividade na dosagem do ligante betuminoso ou pela substituição de adições granulares com natureza eletropositiva, que permitam a formação de um dipolo de atração química com a matriz eletronegativa dos materiais hidrocarbonetos. Entretanto, é importante destacar que nesta pesquisa não foram utilizados aditivos ou adições melhoradores de adesividade, a fim de que se pudesse verificar o real efeito da utilização do RCD nas misturas asfálticas.

5.1.2. Curva Granulométrica

Para a formulação da curva granulométrica das misturas asfálticas BBSG, foi adotado o método racional com o uso das Equações 5.1 e 5.2 de Füller-Talbot, a partir dos pontos de controle estabelecidos pela metodologia francesa obtida pelo Manuel LPC (2007) (Tabelas 5.2 e 5.3 e Figura 5.1).

$$\%p = a. \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad (5.1)$$

Onde:

- %p : percentagem em peso passante em uma dada abertura da série de peneiras;
- a : constante, tomada igual a 100;
- d : abertura da malha de uma dada peneira, em mm;
- D : diâmetro máximo da série de peneiras, em que passa 100% das frações, em mm;
- n : expoente de graduação.

$$n = \frac{\log(\%pi) - \log(100)}{\log\left(\frac{d}{D}\right)} \quad (5.2)$$

Onde:

- n : expoente de graduação;
- %pi : percentagem em peso que passa na peneira de menor diâmetro da série de peneiras;
- d : abertura de uma dada peneira, em mm;
- D : diâmetro máximo da série de peneiras, em que passa 100% das frações, em mm.

Tabela 5.2 – Distribuição granulométrica das formulações BBSG.

Abertura de Peneira (mm)	% Passante	% Retido
12,7	100,0	-
9,5	74,0	26,0
6,3	57,0	17,0
4,76	50,0	7,00
2,2	34,0	16,0
1,2	26,0	8,00
0,6	20,6	5,40
0,3	14,4	6,20
0,15	10,0	4,40
0,075	7,00	3,00
Fundo	-	7,00

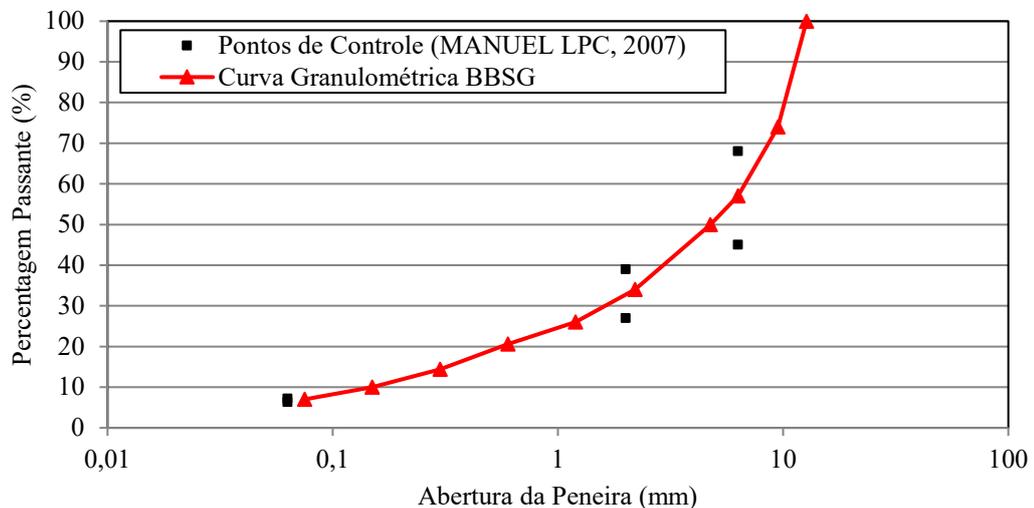
Fonte: Autor

Tabela 5.3 – Pontos de controle estabelecidos para formulações BBSG pela metodologia francesa.

Abertura de Peneira (mm)	Percentagem Passante (%)		
	Limite mínimo	Pontos Visados	Limite Máximo
14,0	90,0	97,0	100,0
10,0	-	78,0	-
6,3	47,0	52,0	58,0
4,0	-	47,0	-
2,0	25,0	31,0	35,0
0,063	6,30	6,7	7,20

Fonte: Autor

Figura 5.1 – Curva granulométrica das formulações BBSG.



Fonte: Autor

De acordo com o DNIT (2006), o expoente 'n' indica se a curva calculada possui graduação densa, aberta ou tipo macadame (uniforme), a partir da seguinte definição:

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

Quanto menor for o valor de 'n', maior será a incidência de granulares finos. Do contrário, um aumento no valor de 'n' resulta em maior concentração de granulares graúdos. Ainda, o método racional com o uso das equações de Füller-Talbot não permite a construção de curvas com variações descontínuas em suas trajetórias, devido à normalização proporcional que produz nos percentuais distribuídos (SIROMA, 2018).

Com base nas Equações 5.1 e 5.2, bem como na curva granulométrica formulada (Figura 5.1), tem-se que o diâmetro máximo é de 12,7 mm e o expoente 'n' de graduação 0,52, indicando tratar-se de uma composição densa.

Adotou-se a graduação correspondente a 0/14 mm para esta pesquisa, em razão da proximidade com o diâmetro máximo de 12,7 mm estabelecido para a formulação da curva granulométrica de projeto.

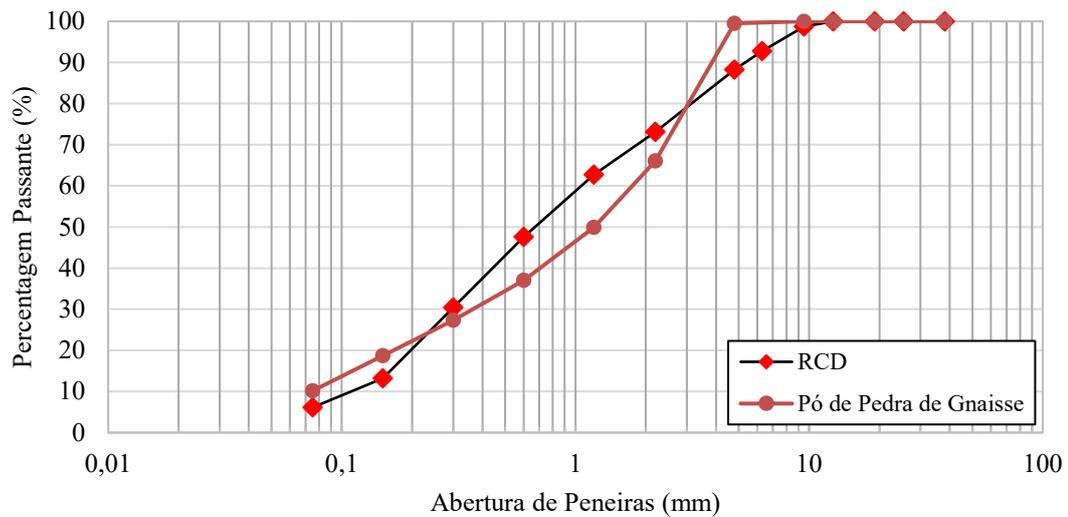
Ainda, com o intuito de verificar quais frações do RCD utilizado nesta pesquisa possuíam maior representatividade percentual, foi realizada a análise granulométrica das amostras obtidas, a qual indicou que o montante passante a partir da abertura de peneira 2,20 mm compreendia quantidades propícias para substituições em larga escala na produção de misturas asfálticas, em relação às partículas oriundas de britagem de maciço rochoso gnáissico, correspondentes às frações de pó de pedra (Tabela 5.4 e Figura 5.2).

Tabela 5.4 – Percentuais passantes da distribuição granulométrica do pó de pedra e do RCD.

Abertura de Peneira (mm)	Pó de pedra	RCD
12,7	100,0	100,0
9,5	100,0	98,8
6,3	99,8	92,8
4,76	99,5	88,3
2,2	66,1	73,1
1,2	49,9	68,7
0,6	37,0	47,6
0,3	27,3	30,5
0,15	18,7	13,2
0,075	10,2	6,11

Fonte: Autor

Figura 5.2 – Distribuição granulométrica do pó de pedra e RCD.



Fonte: Autor.

Desta forma, tomando em conta as frações granulares passantes na peneira 2,20 mm, tem-se que as incorporações de RCD foram procedidas em três condições, considerando a distribuição percentual da curva granulométrica elaborada para a formulação das misturas asfálticas BBSG (Tabela 5.4, da curva granulométrica), a saber:

- 7,0 % de RCD: substituindo apenas o percentual passante na peneira 0,075 mm;
- 15,0 % de RCD: substituindo os percentuais passantes na peneira 0,30 mm;
- 30,0 % de RCD: substituindo os percentuais passantes na peneira 2,20 mm.

A Figura 5.3 ilustra os diâmetros dos granulares utilizados na formulação de referência, composta apenas por frações britadas de maciço rochoso gnáissico, enquanto as Figuras 5.4 a 5.6 ilustram as substituições parciais por RCD, indicadas na cor laranja, de acordo com os percentuais mencionados.

Figura 5.3 – Frações granulares utilizadas na formulação das misturas asfálticas de referência.



Fonte: Autor.

Figura 5.4 – Frações granulares utilizadas nas misturas asfálticas com incorporação de 7,0 % de RCD.



Fonte: Autor.

Figura 5.5 – Frações granulares utilizadas nas misturas asfálticas com incorporação de 15,0 % de RCD.



Fonte: Autor.

Figura 5.6 – Frações granulares utilizadas nas misturas asfálticas com incorporação de 30,0 % de RCD.



Fonte: Autor.

Neste contexto, cabe ressaltar a partir do comparativo entre as curvas granulométricas do RCD e do pó de pedra, a maior presença de percentual passante a favor do primeiro entre as aberturas de peneiras 2,20 mm e 0,15 mm, corroborando os resultados obtidos nos ensaios de textura superficial por adsorção de Nitrogênio (BET) (Tabela 3.3), ratificando a maior superfície específica das frações de RCD.

5.1.3. Ligante Betuminoso

O ligante betuminoso utilizado nesta pesquisa, também conhecido por cimento asfáltico de petróleo (CAP), foi o 30/45 classificado por penetração, proveniente da refinaria REPLAN da Petrobrás, em Paulínia/SP, e fornecido pela empresa CBB Asfaltos, de

Curitiba/PR.

Os dados técnicos relacionados ao ligante foram fornecidos, via laudo técnico, pela Refinaria Planalto de Paulínia – REPLAN, a qual acompanha a amostra do produto e apresentada na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Parâmetros de caracterização do ligante betuminoso.

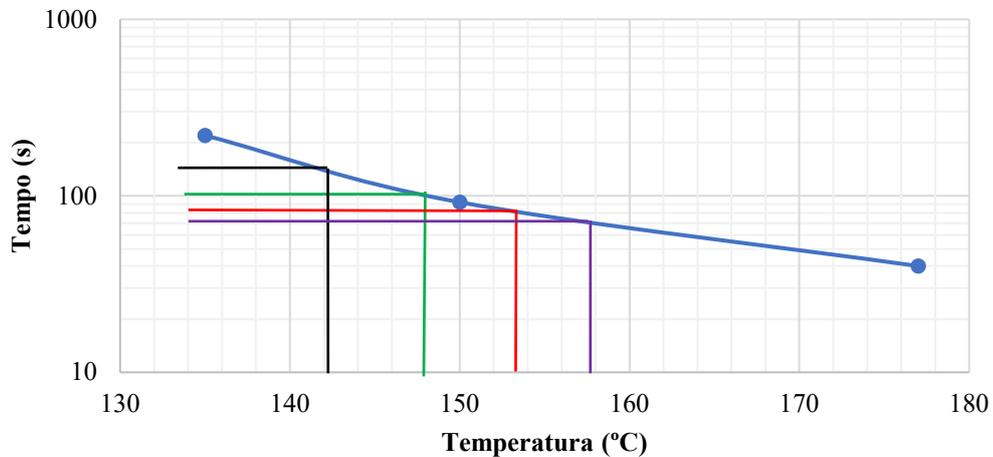
Características	Método	Resultado	Especificação	Unidade
Penetração	D 5	34	30 a 45	0,1 mm
Ponto de amolecimento	D 36	53,5	52 mín.	°C
Ductilidade a 25 °C	D 113	>150	60 mín.	% massa
Solubilidade no tricloroetileno	D 2042	99,9	99,5 mín.	%
Ponto de fulgor	D 92	352	235 mín.	°C
Índice de suscetibilidade térmica	X 18	-1,2	-1,5 a 0,7	-
Densidade relativa da amostra a 20 °C	D 70	1,01	-	°C
Aquecimento a 177 °C	X 215	Não esp.	Não espuma	°C

Fonte: REPLAN (2018).

Com base na Tabela 5.5, verifica-se que o índice de suscetibilidade térmica ou Índice de Pfeiffer e Van Doormaal para o ligante utilizado nesta pesquisa tem um valor muito próximo ao limite estipulado, isso indica que o ligante é sensível a elevadas temperaturas, ou seja, amolece rapidamente. Caso o valor observado no ensaio fosse próximo ao limite superior indicado pela especificação, o ligante seria pouco sensível a elevadas temperaturas, porém se apresentaria quebradiço a baixas temperaturas.

Verificou-se, com base nos resultados do ensaio de viscosidade apresentados na Figura 5.7, que a temperatura adequada para compactação é 145 °C e de usinagem em 155 °C.

Figura 5.7 – Curva de viscosidade *Saybolt-Furol* para o CAP 30/45.



Fonte: Siroma (2018).

5.2. MÉTODOS

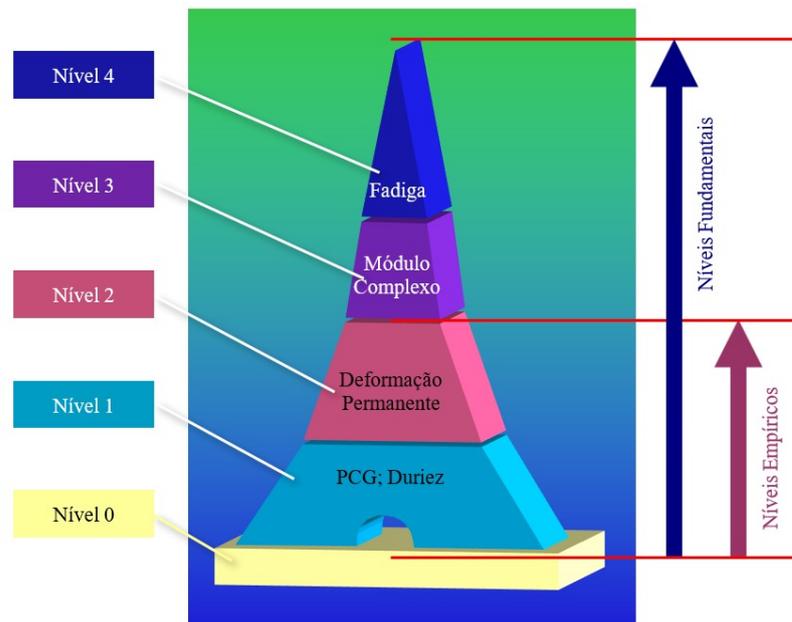
5.2.1. Considerações sobre a Metodologia Francesa de Formulação de Misturas Asfálticas

Os métodos de formulação de misturas asfálticas têm evoluído nessas últimas décadas visando corresponder com o constante crescimento do tráfego. Esse cenário resultou na necessidade cada vez maior de misturas asfálticas complexas, que além de resistir aos carregamentos e números de solicitações cada vez maiores durante todo o período previsto de serviço, deve fornecer para seus usuários conforto, segurança e economia Manuel LPC (2007).

O manual do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, estabelece uma sequência de ensaios para a metodologia Francesa de formulação de misturas asfálticas, divididos em 5 níveis de formulação que, por sua vez, são subdivididos em empíricos (em que não existe uma modelação matemática, sendo compreendido pelos níveis 0, 1 e 2) e fundamentais (compreendido pelos níveis 3 e 4), conforme demonstrado na Figura 5.8.

A diretriz de ensaios segue uma torre de níveis hierárquicos, que detalha os ensaios necessários para análise de desempenho de misturas. Estes ensaios possuem caráter eliminatório, ou seja, a não conformidade em relação aos parâmetros estabelecidos pelo manual elimina o teste, tornando, assim, necessária a formulação de uma nova mistura asfáltica.

Figura 5.8 – Níveis de ensaios para a formulação de misturas asfálticas na França.



Fonte: Adaptado, Manuel LPC (2007).

O nível 0 corresponde ao estudo das propriedades dos materiais, compreendendo a caracterização dos insumos necessários à formulação das misturas asfálticas. Nesse nível são também definidos o tipo e a classe da mistura asfáltica que se pretende formular, sendo estabelecida a composição granulométrica, o tipo e os teores de ligante betuminoso, e eventuais aditivos e adições que serão utilizados.

O nível 1 verifica a habilidade de compactação das misturas asfálticas com o uso da Prensa de Compactação Giratória (PCG) e a resistência à ação da água no ensaio de Duriez a 18°C.

No nível 2 é avaliada a resistência ao fenômeno da deformação permanente, caracterizada pelo afundamento gerado na trilha de roda das misturas asfálticas.

Os níveis 3 e 4 determinam o módulo de rigidez complexo e a resistência à fadiga das misturas asfálticas, respectivamente, sob condições dinâmicas de solicitação no domínio frequencial, com o controle do deslocamento, em modo contínuo, e geração de sinal senoidal de aplicação da força e do deslocamento resultante.

É importante esclarecer que os níveis 0, 1 e 2, são denominados empíricos e, sobretudo os dois últimos possuem esta característica em razão de avaliarem fenômenos de natureza caótica, como: o desenvolvimento contínuo do afundamento na trilha de roda, a acomodação

da estrutura interna da mistura asfáltica durante o procedimento de compactação por cisalhamento e, a evolução da degradação na interface do conjunto granular-ligante betuminoso provocada pela tensão superficial da água. Portanto, situações complexas e dinâmicas de difícil modelagem físico-matemática acurada das variáveis envolvidas, e por isso devem ser verificadas em cada caso, diretamente sobre as amostras formuladas para teste (ANDRADE et al., 2020).

5.2.2. 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 das Equações 5.3 e 5.4.

$$MVR = \frac{P_{amostra}}{V_{amostra}} \quad (5.3)$$

$$V_{amostra} = V_{pic} \left(\frac{P_3 - P_{amostra} - P_{pic+rolha}}{\rho_{\acute{a}gua}} \right) \quad (5.4)$$

Onde:

- MVR : massa volumétrica real da mistura asfáltica, em g/cm³;
- $P_{amostra}$: massa do conjunto picnômetro + água, em g;
- $V_{amostra}$: massa do conjunto picnômetro + água + amostra, em g;
- V_{pic} : massa do conjunto picnômetro + água + amostra, após a bomba de vácuo, em g;
- P_3 : peso do conjunto picnômetro, rolha, água até a marcação e amostra (g);
- $P_{pic+rolha}$: peso do picnômetro e rolha (g);
- $\rho_{\acute{a}gua}$: massa do conjunto picnômetro + água + amostra, após a bomba de vácuo, em g.

A Tabela 5.6 apresenta os resultados obtidos no ensaio de MVR, para as formulações de referência e com a incorporação de RCD, conforme teores de ligante betuminoso em sua composição.

Tabela 5.6 – MVR das misturas asfálticas.

Formulação	Teor de Ligante (%)	MVR (g/cm³)
BBSG 0/14 mm – Referência	4,70	2,510
BBSG 0/14 mm – Referência	4,86	2,508
BBSG 0/14 mm – 7,0 % RCD	4,86	2,492
BBSG 0/14 mm – 7,0 % RCD	5,18	2,480
BBSG 0/14 mm – 7,0 % RCD	5,50	2,467
BBSG 0/14 mm – 7,0 % RCD	5,82	2,456
BBSG 0/14 mm – 7,0 % RCD	6,14	2,445
BBSG 0/14 mm – 15,0 % RCD	5,18	2,459
BBSG 0/14 mm – 15,0 % RCD	5,50	2,449
BBSG 0/14 mm – 15,0 % RCD	5,82	2,441
BBSG 0/14 mm – 15,0 % RCD	6,14	2,436
BBSG 0/14 mm – 15,0 % RCD	6,46	2,421
BBSG 0/14 mm – 30,0 % RCD	6,14	2,411
BBSG 0/14 mm – 30,0 % RCD	6,46	2,401
BBSG 0/14 mm – 30,0 % RCD	6,78	2,392
BBSG 0/14 mm – 30,0 % RCD	7,10	2,377
BBSG 0/14 mm – 30,0 % RCD	7,42	2,366

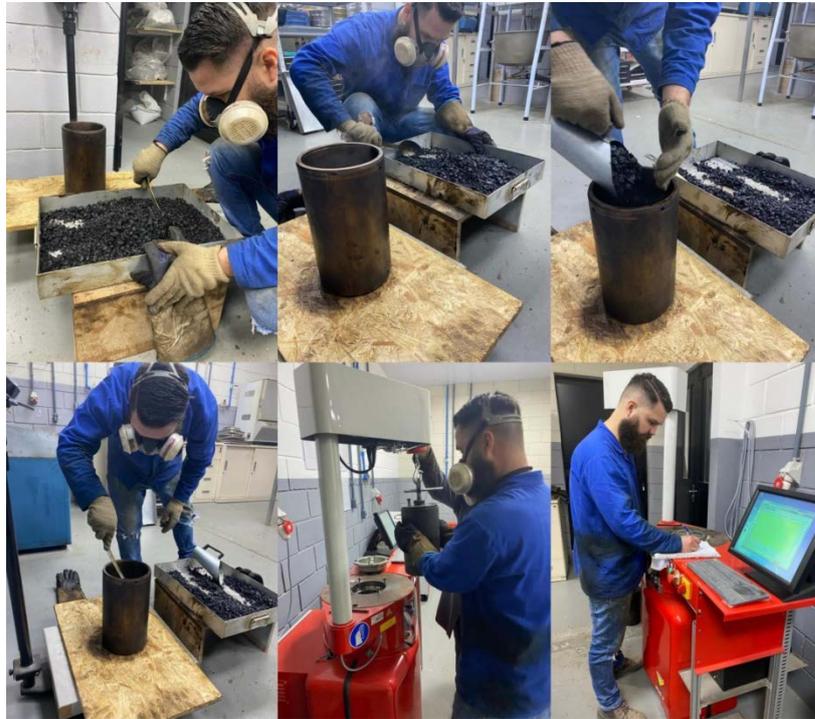
Fonte: Autor.

5.2.3. Ensaio de Prensa de Compactação Giratória

Este ensaio é utilizado para verificar a habilidade de compactação das misturas asfálticas, a partir da Prensa de Compactação por cisalhamento Giratória (PCG) (AFNOR NF EN 12697-31, 2019), em função da aplicação de carregamento lento e em condições isotérmicas à baixa compressão estática, executado por um movimento giratório (cisalhante) de uma de suas faces em torno do eixo de simetria do corpo de prova.

A Figura 5.9, apresenta o mosaico do processo de preparação dos cilindros com a adição da mistura asfáltica desta pesquisa, como também a preparação do cilindro na PCG.

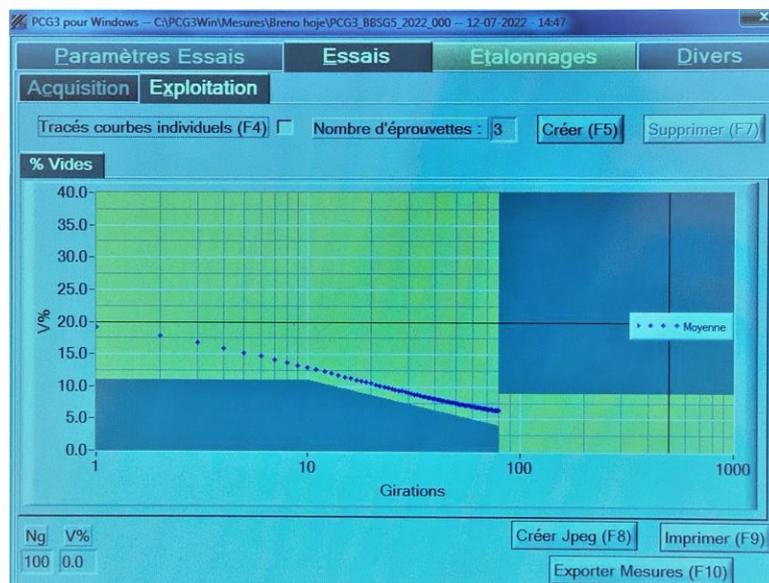
Figura 5.9 – Preparação dos cilindros com a mistura asfáltica, para ensaio da PCG.



Fonte: Autor.

Na Figura 5.10, é apresentado imagem do gráfico gerado pelo software da PCG, onde é possível verificar a curva de identificação da porcentagem de vazios, para uma das misturas ensaiadas nesta pesquisa.

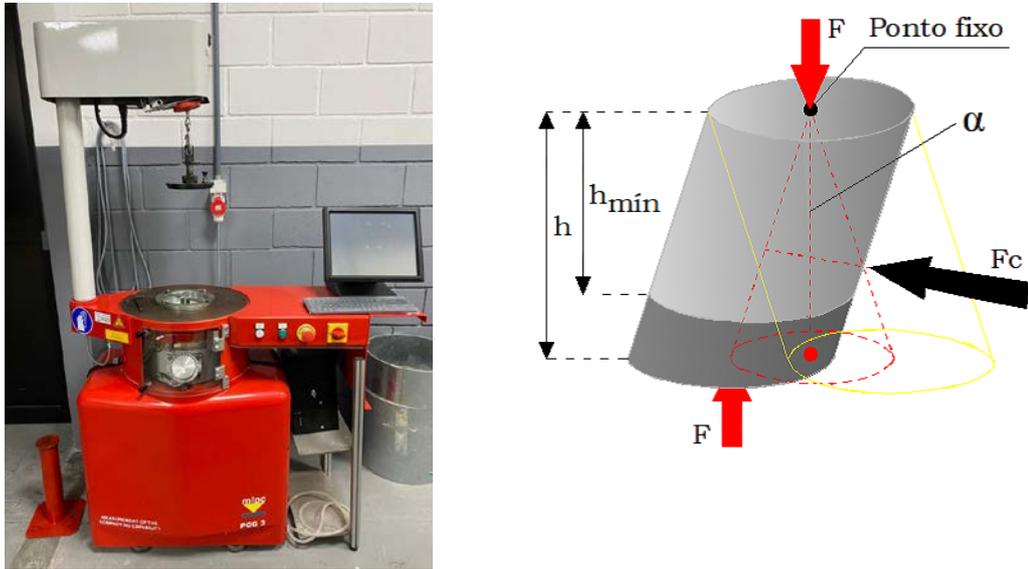
Figura 5.10 – Imagem gerada pelo software da PCG, com a apresentação da curva de vazios da amostra ensaiada.



Fonte: Autor.

Já a Figura 5.11, apresenta a PCG e seu princípio de funcionamento conforme Manual LPC (2017).

Figura 5.11 – Prensa de Compactação Giratória e seu princípio de funcionamento.



Fonte: Autor.

Para que a formulação BBSG 0/14 mm seja considerada conforme, deve dispor de teor de vazios calculado de acordo com a Equação 5.5, respeitando os limites definidos para as classes indicadas a seguir (AFNOR NF EN 12697-31, 2019):

BBSG 1, 2 e 3: entre 4,0 % e 9,0 %, a 80 giros;

$$\%v = 100 \left(\frac{h_{(ng)} - h_{\min}}{h_{(ng)}} \right) \quad (5.5)$$

Onde:

$\%v$: percentual de vazios a um dado número de giros;

$h_{(ng)}$: altura do corpo de prova a um dado número de giros (mm);

h_{\min} : altura mínima especificada para finalização do ensaio, de acordo com o tipo de PCG utilizada, neste caso 150,0 mm.

5.2.4. Ensaio de Duriez

O ensaio de Duriez (AFNOR NF EN 12697-12, 2018), avalia a resistência à ação da água de misturas asfálticas. O principal objetivo é verificar a suscetibilidade mecânica e a hidrofília dos mástiques betuminosos, quando submetidos ao contato contínuo com a água por um período pré-determinado.

Consiste em romper à compressão direta-simples no mínimo 10 corpos de prova com massa total de 3,5 kg, e no mínimo 12 corpos de prova com massa total de 1,0 kg, para composições granulométricas com $D_{máx} \geq 14,0$ mm e $D_{máx} \pm 14,0$ mm, respectivamente.

As misturas asfálticas depois de usinadas devem ser introduzidas no interior de moldes de aço com $120,0$ mm $\pm 0,10$ mm de diâmetro interno, altura mínima de $270,0$ mm, para $D_{máx} \geq 14,0$ mm; e $80,0$ mm $\pm 0,10$ mm de diâmetro interno, altura mínima de $190,0$ mm, para $D_{máx} \pm 14,0$ mm.

Após este período, as amostras são submetidas à aplicação de esforço de compressão simples, fazendo-se a relação de resistência entre as unidades condicionadas na água (r) e condicionadas a seco (R), em que para misturas do tipo BBSG 0/14 mm este valor r/R não pode ser inferior a 30,0 % de perda, ou seja, deve ser maior que 0,70, para qualquer que seja a sua classe e graduação (AFNOR NF EN 13108-7, 2006).

A Figura 5.12, apresenta os corpos de prova sendo submetidos aos testes.

Figura 5.12 – Corpos de prova; ensaio de hidrofília dos mástiques betuminosos; ensaio de resistência à compressão simples.



Fonte: Autor (2022).

5.2.5. Ensaio de Deformação Permanente

O ensaio de deformação permanente é preconizado pela AFNOR NF EN 12697-22 (2020) a qual consiste na verificação à resistência das misturas asfálticas em relação ao afundamento nas trilhas de roda, a partir da moldagem de placas, com o uso de uma máquina para compactação pneumática (Figura 5.13).

Figura 5.13 – Máquina para compactação das placas.



Fonte: Autor.

Para misturas do tipo BBSG, são utilizadas placas com 50,0 mm de espessura, 180,0 mm de largura e 500,0 mm de comprimento.

A Figura 5.14, apresenta o processo de compactação das placas, processo este realizado previamente ao ensaio de deformação permanente.

Figura 5.14 – Compactação das placas para o ensaio de deformação permanente.



Fonte: Autor

Após a compactação das placas, foi realizado o ensaio de deformação permanente, com o uso de uma máquina ilustrada na Figura 5.15. Antes do início dos ciclos é necessário que a temperatura no interior da câmara térmica da máquina, atinja 60 °C, sendo monitorada por uma sonda térmica inserida na placa (Figura 5.16).

Figura 5.15 – Máquina para avaliação da deformação permanente (LabPav – UFSC/Florianópolis).



Fonte: Autor.

Figura 5.16 – Placa posicionada na máquina com a sonda de monitoramento de temperatura.



Fonte: Autor.

Antes e durante o processo de ensaio, foi realizado as medições de afundamento na trilha de roda, através de paquímetro (Figura 5.17) em 0, 100, 300, 1000, 3000, 10000 e 30000 ciclos.

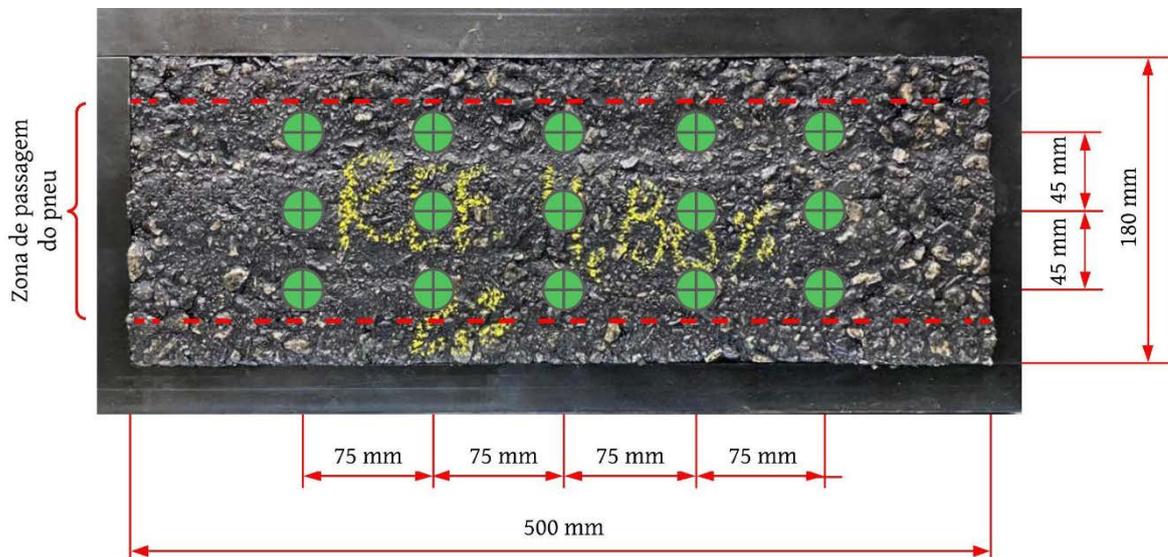
Figura 5.17 – Leitura dos afundamentos com o paquímetro.



Fonte: Autor.

As medições com paquímetro, foram feitas em 15 pontos distintos (Figura 5.18), obtendo para cada série de ciclos, a média dos afundamentos gerados pela ação do carregamento.

Figura 5.18 – Pontos de leitura sobre a placa.



Fonte: Autor.

Para misturas asfálticas BBSG 0/14 mm há um percentual admissível máximo do afundamento na trilha de roda (Y), preconizado pela AFNOR NF EN 12697-22 (2020), em relação à classe da formulação e ao número de ciclos aplicados durante os testes. A referida Norma aponta três possíveis classificações para misturas asfálticas do tipo BBSG, as quais são determinadas em função da percentagem de afundamento no trilho de roda, após 30.000 clicos a 60 °C, sendo essas classificas e calculadas pela equação 5.6, abaixo.

- BBSG 1: $7,5 \% < \%Y \leq 10,0 \%$, após 30.000 ciclos;
- BBSG 2: $5,0 \% < \%Y \leq 7,50 \%$, após 30.000 ciclos;
- BBSG 3: $\%Y \leq 5,0 \%$, após 30.000 ciclos.

$$Y = A \left(\frac{N}{1000} \right)^b \quad (5.6)$$

Onde:

Y: afundamento na trilha de roda;

A e b: coeficientes linear e angular, nesta ordem, estabelecidos estatisticamente, e;

N: número de ciclos percorridos pelo eixo em cada etapa.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos durante a campanha experimental prevista para esta pesquisa (Figura 1.1), bem como as discussões técnicas correspondentes.

6.1. HABILIDADE DE COMPACTAÇÃO NA PCG

Os resultados obtidos nos ensaios de habilidade de compactação com o uso da PCG são apresentados na Tabela 6.1, destacando-se em azul as dosagens que se enquadraram no intervalo admitido por norma (AFNOR NF EN 12697-31, 2019; Manuel LPC, 2007) quanto ao teor de vazios para misturas asfálticas do tipo BBSG, conforme abordado no tópico 5.2.3.

Tabela 6.1 – Resultados dos ensaios de habilidade de compactação na PCG.

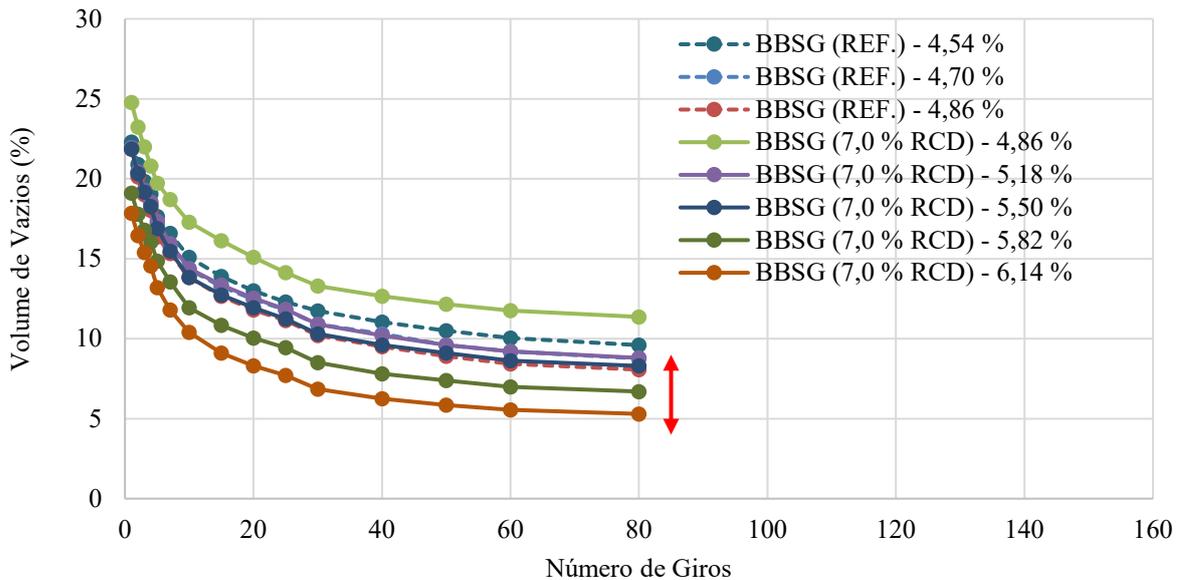
Teor de Ligante (%)	%Volume médio de vazios a 80 giros para cada mistura asfáltica formulada			
	Referência	7,0 % RCD	15,0 % RCD	30,0 % RCD
4,54	9,60			
4,70	8,80			
4,86	8,10	11,40		
5,18		8,80		
5,50		8,30		
5,82		6,70	8,50	
6,14		5,50	7,10	
6,46				10,50
6,78				8,40
7,10				7,40

Fonte: Autor.

As Figuras 6.1 a 6.3 representam as curvas, contendo os resultados médios obtidos nos ensaios realizados, conforme exposto na Tabela 6.1, indicando o cenário geral da evolução do teor de vazios ao longo dos giros executados pela PCG. Com a finalidade de facilitar a

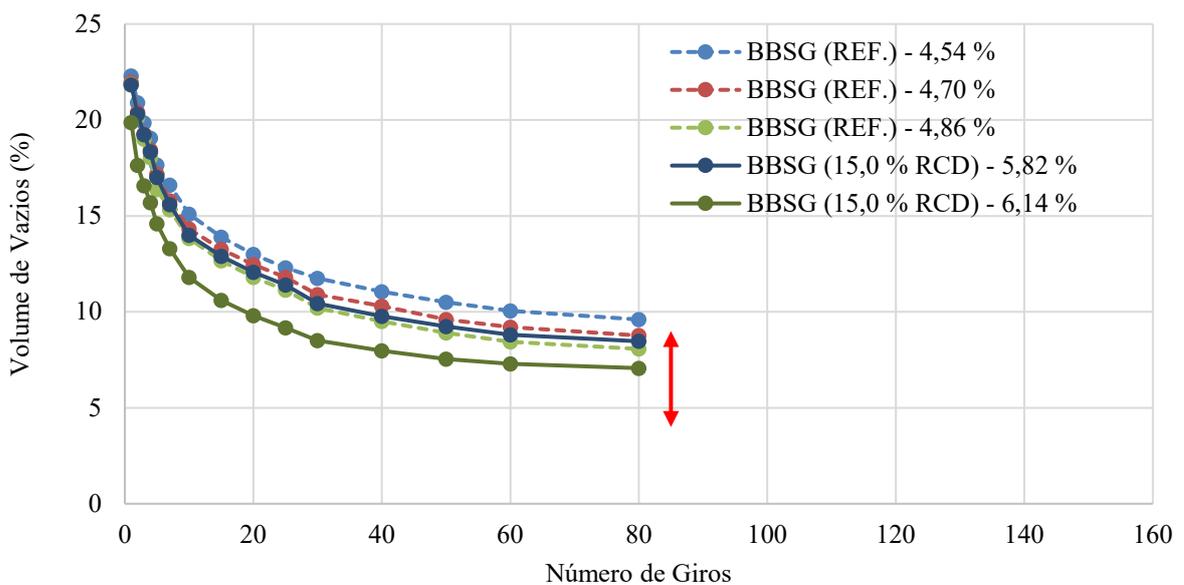
interpretação dos gráficos, os limites quanto ao teor de vazios, de 4,0 % a 9,0 %, estão representados por meio de uma “seta vermelha”. Desta forma a curva da mistura asfáltica que ultrapassar os limites da seta, esta reprovada, ou seja, não seguirá para o Nível 2 que corresponde ao ensaio de deformação permanente.

Figura 6.1 – Resultado da PCG – Misturas de referência e com incorporação de 7,0 % de RCD.



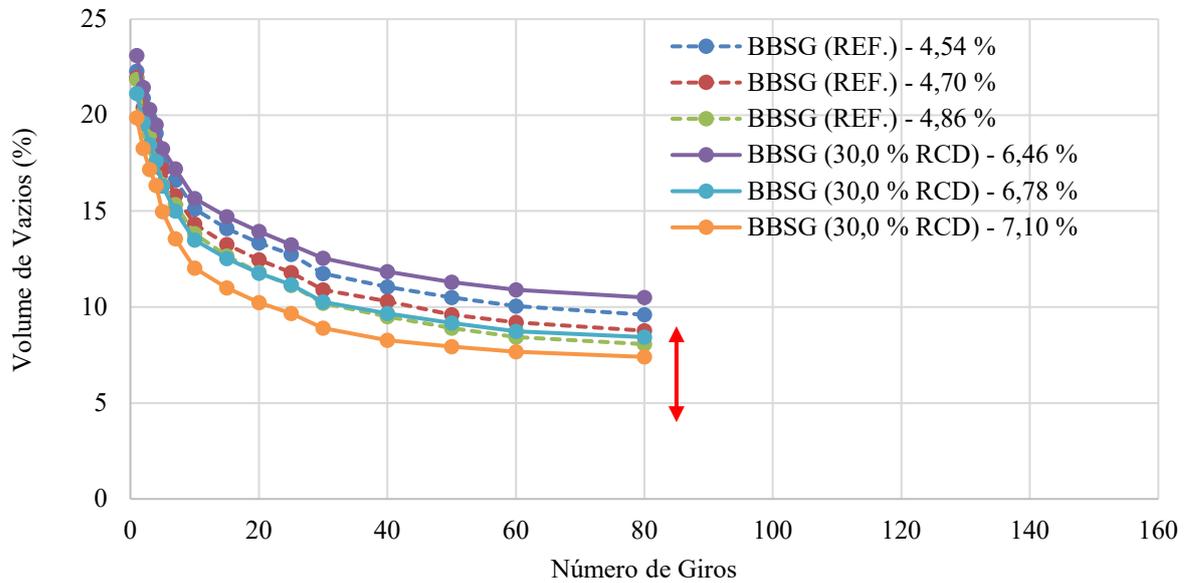
Fonte: Autor.

Figura 6.2 – Resultado da PCG – Misturas de referência e com incorporação de 15,0 % de RCD.



Fonte: Autor.

Figura 6.3 – Resultado da PCG – Misturas de referência e com incorporação de 30,0 % de RCD.



Fonte: Autor.

Diante dos resultados, observa-se para as misturas formuladas nesta pesquisa que, ao substituir o agregado natural pelo artificial (RCD), em 7,0 %, 15,0 % e 30,0 %, a mistura requer mais ligante em sua composição.

Comparando a mistura de referência com teor de 4,70 % de ligante, e a mistura com substituição em 7,0 % de RCD com teor de 5,18 % de ligante, ambas as misturas apresentaram volume médio de vazios de 8,80 %, sendo que a mistura com adição de 7,0 % de RCD, requereu 0,48 g a mais de ligante para o RCD.

Seguindo o mesmo raciocínio anterior, para o teor de 4,70 % da mistura de referência e 15,0 % de substituição por RCD, com teor de 5,82 % de ligante, os resultados obtidos foram de 8,80 % e 8,30 % de volume médio de vazios, respectivamente, sendo que a mistura com adição de 15,0 % de RCD, requereu 1,12 g a mais de ligante para o RCD.

Por fim para o teor de 4,70 % da mistura de referência, fazendo o comparativo com 30,0 % de substituição por RCD, com teor de 6,78 % de ligante, os resultados obtidos foram de 8,80 % e 8,40 % de volume médio de vazios, respectivamente, sendo que a mistura com adição de 30,0 % de RCD, requereu 2,08 g a mais de ligante para o RCD.

Ressalta-se que em todos os gráficos, foram adicionadas as curvas das misturas de referência, visando facilitar o entendimento e a comparação, com as misturas asfálticas com a substituição do RCD.

Analisando as curvas das misturas asfálticas de referência apresentadas nos gráficos das Figuras 6.1 a 6.3, optou-se por não realizar outros ensaios com teores de ligante diferente dos apresentados nesta pesquisa, visto que visualmente já se observava um excesso de ligante na mistura. E para que não houvesse prejuízo das demais propriedades no Nível 2, (Deformação Permanente) e por conta também de economia de tempo, de resultado, de teste, parou-se nesses nos teores estudados.

Tal fato fora também comprovado em pesquisas anteriores, como as feitas por Siroma (2018) e Andrade (2018), os quais também realizaram estudos para misturas asfálticas do tipo BBSG, para os teores de 4,22 %, 4,54 % e 4,86 %. Ambos realizarem os ensaios com teores superiores, visto que para o teor de 4,86 % já havia um excesso de compactação, observando ainda durante o processo de usinagem da mistura, uma tendência ao excesso de ligante, desta forma inviabilizando o avanço para um novo teor.

Como observado na Tabela 6.1 e Figuras 6.1 a 6.3, as misturas de referência, tiveram menores dosagem de ligante em sua formulação, comparada as demais com substituição por RCD. Isso porque a mistura de referência tem, em sua composição somente materiais granulares de rocha gnáissica. Ou seja, que possui volume de porosidade no grão, tanto como superfície específica, quase três vezes menor do que no RCD.

Diante disso, faz com que ele tenha uma menor área por condição de unidade de peso para ser preenchida, para ser envolvida por ligante betuminoso e uma porosidade menor do que o RCD, que faz com que ela não precise reter tanto material dentro da porosidade para que tenha uma condição de envolvimento adequada. O que permite não exigir uma dosagem tão grande de ligante quanto o RCD.

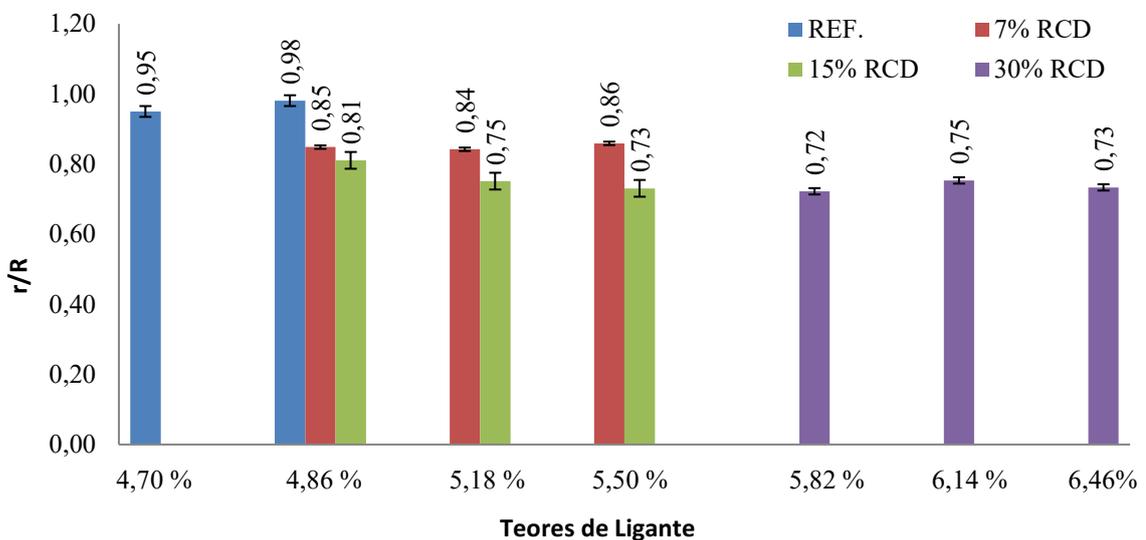
Já o RCD, por possuir quase três vezes mais volume de poros e uma superfície específica quase três vezes maior, sendo ele um material mais fino, conforme ainda apresentado na Figura 5.2 (Distribuição granulométrica do pó de pedra e RCD.), a mistura irá requerer um maior teor de ligante, o que corrobora novamente com o discutido para as informações da Tabela 6.1.

Desta forma, quando a mistura com RCD, é sujeita ao ensaio da PCG, ao sofrer o esforço de compressão e de cisalhamento ao mesmo tempo, por ser um material mais fino, mais poroso e menos rígido, menos duro, ele vai ter uma enorme rigidez e vai tender a se compactar mais em relação ao granular de rocha de gnaisse.

6.2. ENSAIO DE DURIEZ

Para a realização do ensaio de Duriez a 18 °C, procedeu-se os testes apenas com as dosagens aprovados no ensaio da PCG, conforme indicações em azul na Tabela 6.1. A Figura 6.4 ilustra os resultados obtidos, em que os erros de repetibilidade e os desvios padrões máximos obtidos foram da ordem de 5,0 % e 1,0 %, respectivamente, indicando boa homogeneidade da amostragem produzida, abaixo dos 10,0 % preconizados pelo Manuel LPC (2007).

Figura 6.4 – Relação r/R obtidas no ensaio de Duriez.



Fonte: Autor.

A partir da Figura 6.4, observa-se que à medida que se aumenta o teor de RCD na formulação da mistura asfáltica, ocorre um decréscimo do desempenho relacionado à resistência à ação deletéria da água.

Neste contexto, comparando às misturas asfálticas de referência, verifica-se que as formulações com 7,0 % e 15,0 % de RCD, ambas com teor de ligante em 4,86 %, têm-se os resultados de 98,0 %, 85,0 % e 81,0 %, respectivamente. Esta condição ocorre devido ao aumento gradativo do percentual de RCD nas composições granulométricas, majorando a presença de sílica nas amostras.

Assim, conforme apresentado (Tabela 3.2) e discutido no Capítulo 3, quando comparada ao pó de pedra, a presença de sílica na amostra do RCD é cerca de 8,50 % maior.

Logo, as misturas asfálticas que possuem incorporação de RCD apresentam maior potencial de repelência elétrica às partículas granulares gnáissicas e ao ligante betuminoso, dificultando ainda mais a adesão entre os compostos e prejudicando a adesividade entre eles.

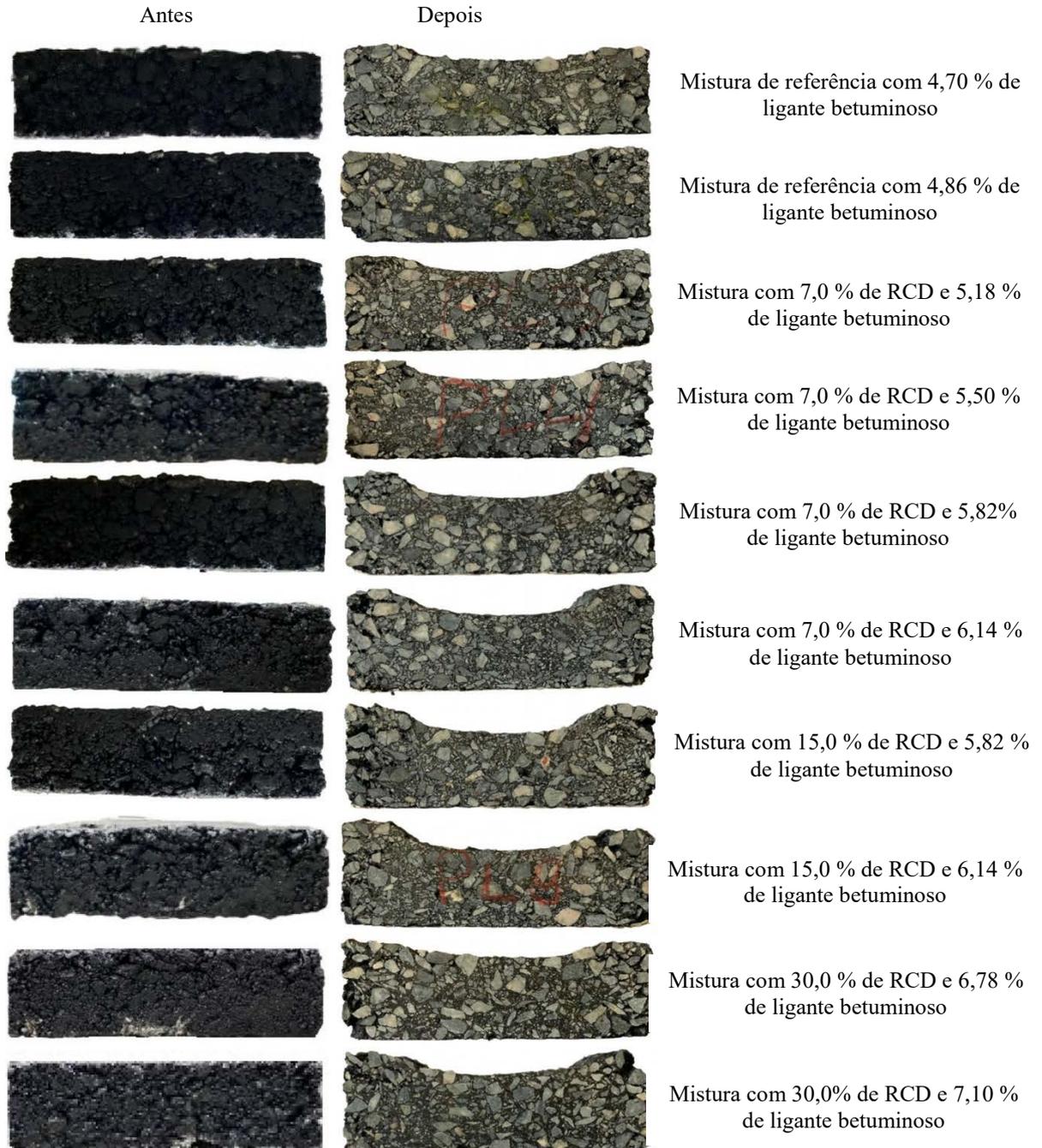
A mesma tendência ocorre entre as formulações com distintos teores de RCD incorporado, obviamente com maior prejuízo àquelas que portam maiores percentuais deste material em suas composições.

Ainda, a elevada superfície específica e porosidade das partículas de RCD, quase três vezes maiores em relação às oriundas do pó de pedra (Tabela 3.4), contribuem de forma direta para tornar as misturas asfálticas mais suscetíveis aos esforços mecânicos de compressão simples aplicados neste ensaio, com impactos maiores à medida em que há o aumento dos percentuais de RCD.

6.3. ENSAIO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Para esta etapa de avaliação foram testadas as formulações aprovadas no conjunto dos ensaios de PCG e Duriez a 18 °C, sendo ilustradas as seções transversais das placas testadas e apresentados os devidos resultados obtidos na Figura 6.5 e Tabela 6.2, respectivamente, nesta última compilando os valores finais a partir de regressões lineares dos percentuais de afundamento nas trilhas de roda em cada par de amostras por teor de ligante, destacados em azul.

Figura 6.5 – Seção transversal das placas antes e depois do ensaio de deformação permanente.



Fonte: Autor.

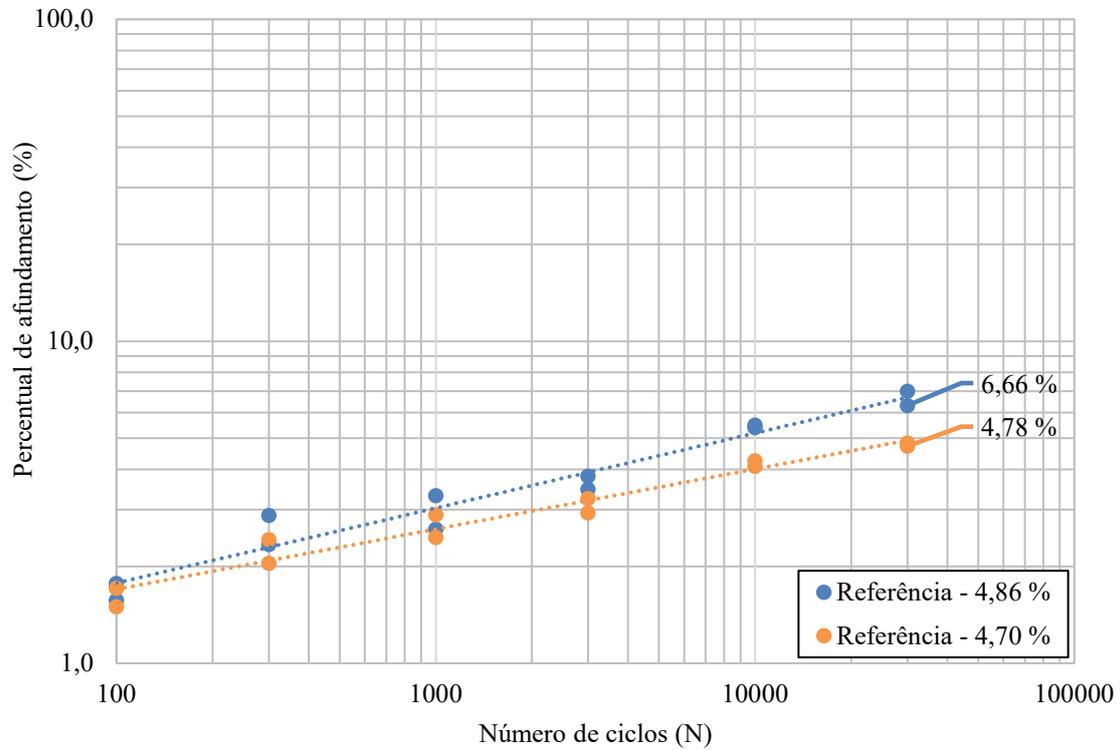
Tabela 6.2 – Percentagem de afundamento ao longo dos ciclos.

Mistura Asfáltica	Teor de Ligante (%)	Ciclos						Média Final
		100	300	1000	3000	10000	30000	
Referência	4,70	1,67	1,88	2,18	2,61	3,28	4,34	4,78
	4,70	2,58	3,47	4,17	4,75	5,78	6,61	
	4,86	1,77	2,88	3,32	3,81	5,39	6,99	6,66
	4,86	1,57	2,34	2,61	3,47	5,50	6,32	
7,0% de RCD	5,18	1,01	1,79	2,66	3,41	4,53	5,70	6,01
	5,18	1,06	1,84	2,85	3,57	4,85	6,32	
	5,50	1,32	1,71	2,35	3,51	6,63	7,81	7,96
	5,50	1,24	1,77	2,65	3,92	6,84	8,10	
	5,82	0,91	1,52	2,62	4,22	8,19	9,76	9,13
	5,82	0,88	1,35	2,43	3,58	7,38	8,49	
15,0% de RCD	5,82	0,55	1,48	2,10	3,11	5,36	7,73	7,91
	5,82	0,87	1,78	2,49	3,43	5,67	8,08	
	6,14	1,53	2,49	2,93	3,75	7,47	9,40	9,48
	6,14	1,71	2,51	3,12	4,32	7,94	9,56	
30,0% de RCD	6,78	0,71	1,22	2,59	3,40	7,49	11,03	10,66
	6,78	0,63	1,07	2,11	3,00	6,99	10,28	
	7,10	1,14	2,08	2,70	4,74	8,52	11,82	12,20
	7,10	0,88	1,80	2,56	3,83	8,29	12,57	

Fonte: Autor.

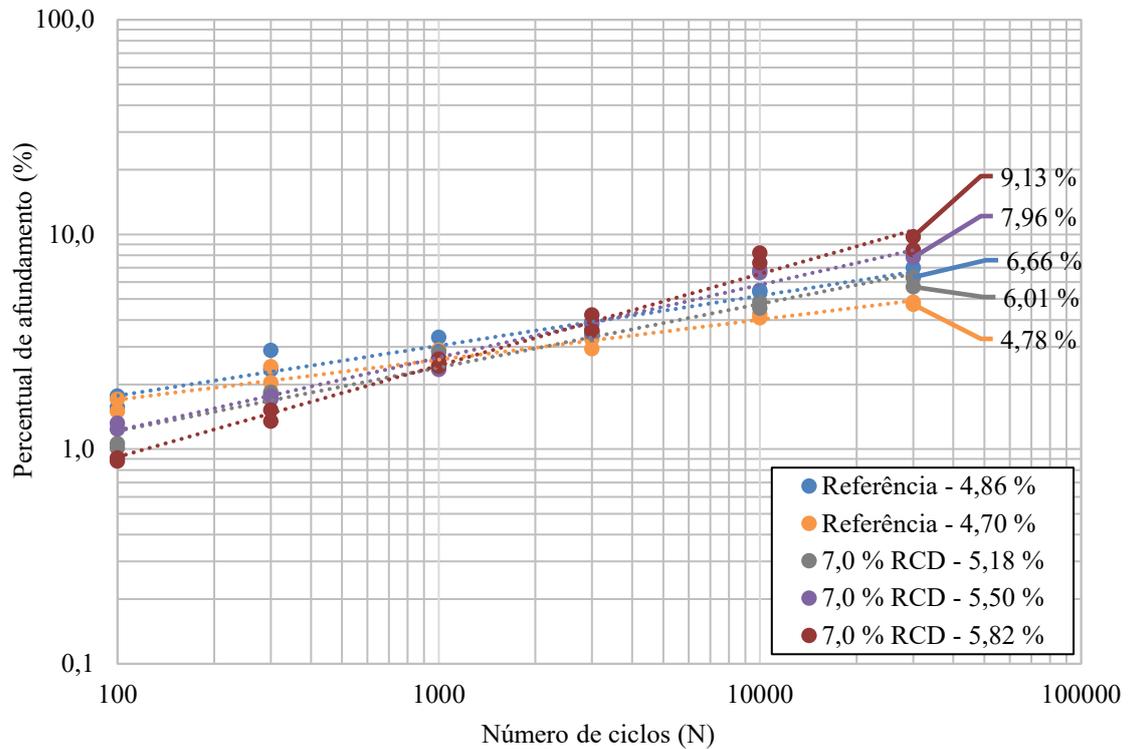
As Figuras 6.6 a 6.9 apresentam as curvas elaboradas a partir dos resultados apresentados na Tabela 6.2.

Figura 6.6 – Evolução do afundamento das misturas de referência.



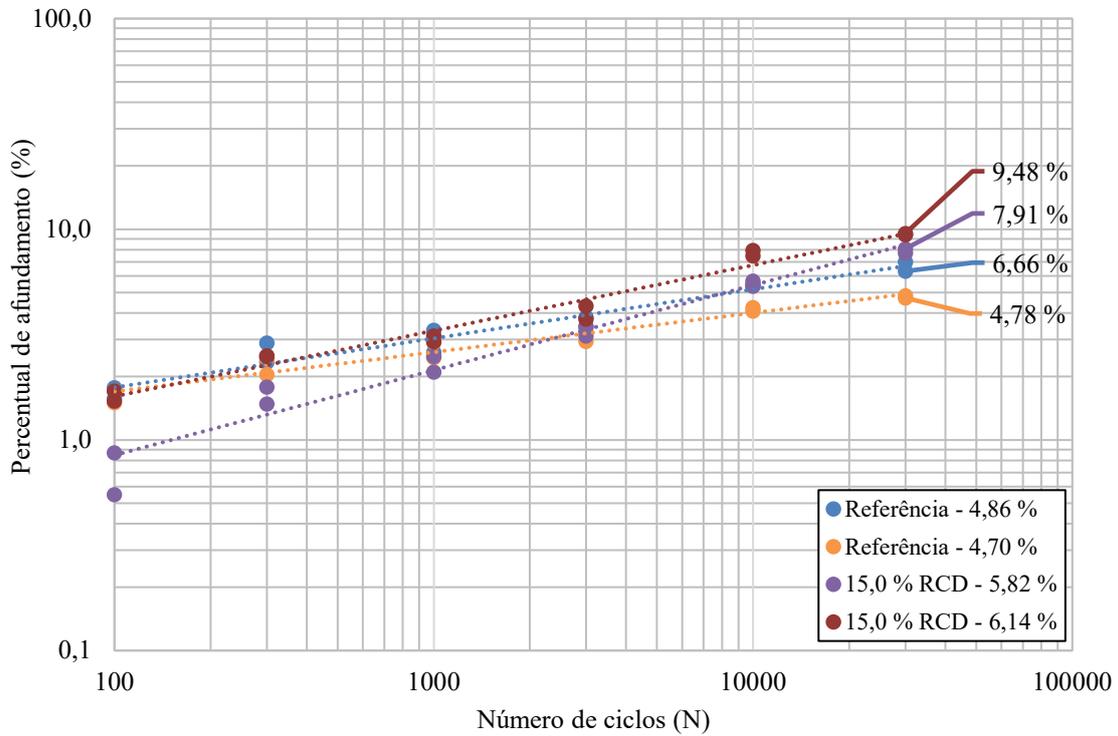
Fonte: Autor.

Figura 6.7 – Evolução do afundamento entre as misturas de referência e com incorporação de 7,0 % de RCD.



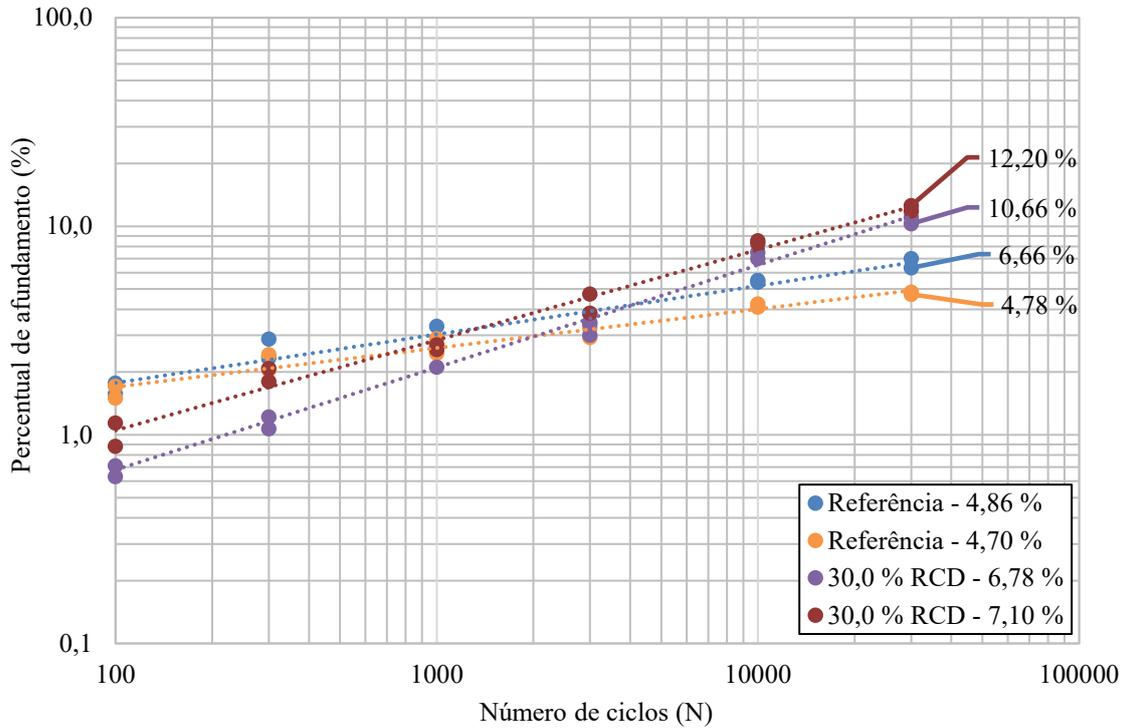
Fonte: Autor.

Figura 6.8 – Evolução do afundamento entre as misturas de referência e com incorporação de 15,0 % de RCD.



Fonte: Autor.

Figura 6.9 – Evolução do afundamento entre as misturas de referência e com incorporação de 30,0 % de RCD.



Fonte: Autor.

Analisando os percentuais apresentados na Tabela 6.2 e as curvas ilustradas nas Figuras 6.6 a 6.9, tomando em conta as três possíveis classificações para misturas asfálticas do tipo BBSG discutidas no Capítulo 5, tem-se que apenas a mistura de referência com teor de ligante em 4,70 %, mostrou-se apta ao enquadramento para a Classe 3, a mais nobre entre todas, pois apresentou afundamento na trilha de roda abaixo do limite máximo de 5,0 % (4,87 %).

As misturas asfálticas de referência com teor de 4,86 % e; com 7,0 % de RCD e teor de ligante em 5,18 %, enquadraram-se na Classe 2, tendo sido obtidos os valores de afundamento na trilha de roda em 6,66 % e 6,01 %, respectivamente, logo, acima de 5,0 % e abaixo de 7,50 %.

Nas demais formulações com 7,0 % de RCD, tem-se que as misturas com teor de ligante em 5,50 % e 5,82 % apresentaram os percentuais de afundamento na trilha de roda em 7,96 % e 9,13 %, respectivamente, estando enquadradas na Classe 1, acima de 7,50 % e abaixo de 10,0 %.

Para as misturas com 15,0 % de RCD e teor de ligante em 5,80 % e 6,14 %, apresentaram os percentuais de afundamento em 7,91 % e 9,48 %, respectivamente, também se enquadrando na Classe 1.

Para as misturas com 30,0 % de RCD e teor de ligante em 6,78 % e 7,10 %, foram verificados os percentuais de 10,66 % e 12,20 %, respectivamente, ultrapassando o limite máximo de 10,0 % para o enquadramento na Classe 1, tornando-as inaptas para aplicação em estruturas de pavimento.

De acordo com Barra et al. (2010), a classificação das misturas do tipo BBSG consiste em parâmetros de severidade baseados em condições climáticas e de tráfego franceses, com as seguintes premissas:

- Classe 1: Destinadas a regiões com temperatura ambiente em torno de 15 °C (temperatura equivalente na França);
- Classe 2: Aplicadas a regiões com gradientes térmicos elevados ao longo do ano;
- Classe 3: Destinada a condições de tráfego particulares (tráfego canalizado, elevadas solicitações, zonas de intersecção) e climas com altas temperaturas.

Neste contexto, Barra et al. (2010), pontuam que as Classes 2 e 3 são as que mais se assemelham ao contexto brasileiro, dependendo da região.

A partir dos resultados apresentados, verifica-se que ao elevar o teor de RCD nas formulações asfálticas, ocorre um decréscimo na rigidez da mistura, devido à maior superfície específica e, sobretudo, porosidade de suas partículas, sendo ambos os indicadores quase três vezes maiores aos observados para as partículas de pó de pedra, conforme já abordado anteriormente (Tabela 3.4), além de possuir menor dureza na escala Mohs (vide tópico 3.3.4.2).

Estas condicionantes mencionadas permitem inferir que o RCD influencia diretamente no aumento dos teores de ligante betuminoso utilizados nas dosagens das formulações, fato que maximiza o efeito de lubrificação das interfaces granulares, culminando para maior suscetibilidade ao afundamento nas trilhas de roda por potencialização do fenômeno da fluência do ligante betuminoso e consequente diminuição da resistência ao cisalhamento no contato intergranular.

Nota-se nos gráficos das Figuras 6.7 a 6.9, que durante os ensaios, o percentual de afundamento na trilha de roda para as misturas com RCD são inicialmente menores quando comparados às misturas de referência, cenário que se inverte à medida que o número de ciclos aumenta. Isto ocorre em razão de que nos primeiros ciclos de carregamento parte do ligante betuminoso encontra-se encapsulado na porosidade das partículas de RCD, a qual possui valor quase três vezes maior que as frações britadas oriundas de rocha gnáissica, conforme já demonstrado na Tabela 3.4.

Com o aumento progressivo da aplicação dos ciclos de carregamento, aliado à submissão das misturas asfálticas a um período de maior exposição contínua ao calor (60 °C), o ligante betuminoso inicialmente encapsulado na porosidade das partículas de RCD migra em maior volume para a superfície das frações, aumentando a sua presença nos interstícios do material, maximizando a potencial ocorrência do fenômeno da fluência devido ao aumento da suscetibilidade térmica das formulações e, conseqüentemente, gerando maiores afundamentos nas trilhas de roda.

Ainda, devido às partículas de RCD possuírem menor dureza que as provenientes da britagem de rocha gnáissica, conforme discutido no tópico 3.3.4.2, tem-se que são menos resistentes aos esforços de cisalhamento aplicados durante os ensaios de deformação permanente, contribuindo também de forma decisiva para a ocorrência de maiores percentuais de afundamento nas trilhas de roda.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base na campanha experimental realizada e na discussão de resultados apresentada, tem-se que os objetivos traçados para a pesquisa foram alcançados, e as seguintes conclusões foram depreendidas:

Quanto à habilidade de compactação na PCG, tem-se que pelo fato do RCD apresentar em relação ao pó de pedra tanto superfície específica quanto porosidade maiores em quase três vezes, além de menor dureza na escala Mohs, acarreta maior aporte de ligante betuminoso nas dosagens, bem como propicia menor resistência ao esforço de compressão e cisalhamento aplicado ao longo do processo de compactação, diminuindo a trabalhabilidade das formulações quando comparadas às misturas asfálticas de referência, em que pese disporem de partículas com macrotextura subangular e microtextura rugosa.

No que diz respeito à resistência à ação deletéria da água, é possível inferir que o percentual mais elevado de sílica constante na composição mineralógica do RCD, 8,50 % superior ao do pó de pedra, contribui para o aumento gradativo da repelência elétrica entre os compostos das formulações, à medida em que são majorados os seus percentuais de incorporação. Neste contexto, considera-se tanto as interações com os granulares gnáissicos britados quanto com o ligante betuminoso, que formam uma rede eletronegativa prejudicial à adesividade, aliada à já mencionada menor dureza das partículas de RCD, que influenciam na perda de resistência aos esforços de compressão simples na determinação das relações r/R .

As características descritas nos parágrafos anteriores no que tange à incorporação do RCD, implicam de forma conjunta na potencialização do fenômeno da fluência do ligante betuminoso nas formulações, bem como diminuição da resistência aos esforços mecânicos de compressão e cisalhamento aplicados durante os ensaios de deformação permanente, em razão do aumento do efeito lubrificante nas interfaces de contato entre os granulares, acarretando maiores afundamentos nas trilhas de roda nas misturas asfálticas que o contém, em relação às de referência, compostas apenas por partículas gnáissicas britadas.

Este fato pôde ser constatado de forma nítida ao se verificar que de todas as formulações testadas, apenas a mistura asfáltica de referência dosada com teor de ligante em 4,70 % obteve classificação como BBSG de classe 3, a mais nobre entre todas. As demais

ficaram situadas entre as classes 1 e 2, que comportam menores esforços solicitantes quando aplicadas em situações reais de tráfego.

Cabe destacar neste contexto que o ligante betuminoso utilizado (CAP 30/45), em sua forma pura, também não dispõe de indicadores característicos que o confira boa resistência mecânica, sobretudo baixo ponto de amolecimento e ductilidade. Neste âmbito, tem-se que caso as formulações tivessem sido concebidas com matrizes betuminosas modificadas por polímero ou até mesmo borracha, poderiam ter auxiliado na aprovação de mais dosagens à classe 3.

Inclusive, nenhuma formulação incorporada com 30,0 % de RCD obteve aprovação quanto aos afundamentos nas trilhas de roda, pois todas apresentaram resultados acima de 10,0 %, não podendo nem mesmo serem enquadradas na classe 1 das misturas do tipo BBSG, confirmando o quão críticas se tornam as características físicas do RCD estudado à medida em que são majorados os seus percentuais na composição granulométrica.

Dado o exposto, conclui-se que a utilização do RCD estudado na concepção de misturas asfálticas densas do tipo BBSG, quando comparados aos resultados das formulações de referência e considerando o contexto da campanha experimental realizada, apresentou-se pouco promissor e viável tecnicamente, pois indicou a geração de produtos finais mais onerosos, com menor trabalhabilidade nos procedimentos de compactação, além de menos resistentes à ação deletéria da água e aos esforços mecânicos aplicados pelo tráfego quanto ao afundamento nas trilhas de roda ocasionados durante os ensaios de deformação permanente.

Desta forma, como indicação para trabalhos futuros, inicialmente sugere-se a substituição do ligante betuminoso (CAP 30/45), por ligantes com matrizes betuminosas modificadas, os quais possuem melhor ponto de amolecimento e ductilidade, podendo então apresentar melhores resultados durante os ensaios, principalmente no que diz respeito à deformação permanente.

Ainda, sugere-se que as mesmas formulações testadas nesta pesquisa sejam incorporadas em igual proporção a um RCD com características distintas do utilizado, com predominância cimentícia, por exemplo, a fim de verificar de forma comparativa se o aporte de partículas, a princípio, menos porosas, com maior dureza e talvez com menor percentual de sílica em sua composição mineralógica, viabilizam a obtenção de resultados mais satisfatórios que o RCD com predominância cerâmica estudado.

REFERÊNCIAS

AASHTO (2019) TP 134: Provisional Standard Method of Test for Stress Sweep Rutting (SSR) Test Using Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT). Washington.

AASHTO T-350 (2019), Standard method of test for multiple stress creep recovery (MSCR) test of asphalt binder using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). American Association of State Highway and Transportation Officials.

ABRELPE (2022). Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Disponível em <http://abrelpe.org.br/download-panorama-2022/>, última consulta em janeiro de 2023.

AFNOR NF EN 12697-12 (2018), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 12: Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses. Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.

AFNOR NF EN 12697-22 (2020), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 22: Essai d'orniérage. Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.

AFNOR NF EN 12697-31 (2019), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 31: Confection d'éprouvettes à la presse à compactage giratoire. Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.

AFNOR NF EN 12697-5 (2019), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 5: Masse volumique réelle (MVR). Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.

AFNOR NF EN 13108-7 (2006), Mélanges bitumineux: spécifications des matériaux - Partie 7: Bétons Bitumineux Drainants (BBDr). Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.

AHLRICH, R. (1996). Influence of Aggregate Properties on Performance of Heavy-Duty Hot-Mix Asphalt Pavements. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, DOI: 10.3141/1547-02, v. 1547, n. 1, pp.7-14, January 1996;

ALESSANDRETTI, L.; GIANNINI, P. C. F.; WARREN, L.; BRÜCKMANN, M. P.; MARTINI, A. (2023). Earth, wind and fire: Interactions between Quaternary environmental dynamics and human occupation on the southern coast of Brazil, *Quaternary Science Reviews*, Volume 301, 2023, 107950, ISSN 0277-3791, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107950>.

ANDRADE, D. V. (2018). Influência da formulação de esqueletos minerais na deformação permanente de misturas de concreto asfáltico densas. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (Pós-ECM) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Joinville, SC.

ANDRADE, V. D., BARRA, B. S., BERNUCCI, L., MOMM, L., PÉREZ, Y. G., HASTENPFLUG, D., NIERWINSKI, H., & HEIDEMANN, M.. (2020). Impacto da formulação de composições granulométricas nas propriedades mecânicas e funcionais de misturas asfálticas densas. *Matéria (Rio De Janeiro)*, 25(Matéria (Rio J.), 2020 25(4)), e-12905. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1205>.

ASLAM, M.S., HUANG, B., CUI, L. (2020). Review of construction and demolition waste management in China and USA. *Journal of Environmental Management*, 264, 110445. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110445.

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, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15116: agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7809/2008. Agregados graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2008, 3 p. Disponível em: <<http://www.abntcolegao.com.br/java/viewnormajava.aspx?Q=75F9E3C9C0ACBA782D4CCB7D9A9579F25BA892896089FDFB&Req=>>>. Acesso em 06 de outubro de 2022.

ASSOCIAÇÃO JOINVILENSE DE CONDUTORES DE TRANSPORTES DE RESÍDUOS (AJOCTRE) – Comunicação digital via e-mail. Consulta em janeiro de 2023.

ASTM Internacional - ASTM D7348-07 Métodos de Teste Padrão para Perda na Ignição (LOI) de Resíduos Sólidos de Combustão

BACHAND, A. T. (2018). Formulation d'enrobés bitumineux de type ESG10 et GB20 avec incorporation de particules de verre. Mémoire de maîtrise. École de Technologie Supérieure. Université du Québec, 194 p. Canadá.

BARRA, B. S. (2010). Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas. 2009, 327 p. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

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

BARROS, L. M. D. (2022). Implementação do ensaio stress sweep rutting e do shift model para a previsão da deformação permanente de misturas asfálticas brasileiras. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pósgraduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

BARROS, L. M.; BRITO, L. A. T; CERATTI, E J.. (2015). Desempenho Quanto à Deformação Permanente de Misturas Asfálticas com Diferentes Ligantes. Anais do XVII CILA–Congresso IberoLatinoAmericano do Asfalto. Bariloche- Patagonia, Argentina.

BASTOS, J. B. S. (2016). Considerações sobre a deformação permanente de pavimentos asfálticos no dimensionamento mecanístico-empírico. Tese (Doutorado) - Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

BEJA, I. A.; MOTTA, R.; BERNUCCI, L. B. (2020). Application of recycled aggregates from construction and demolition waste with Portland cement and hydrated lime as pavement

subbase in Brazil. *Construction and Building Materials*, Vol. 258,119520, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119520>.

BENESOVÁ, L; VALENTIN, J. (2017). Influence of selected test parameters on measured values during the MSCR test. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 236, 2017.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. (2002) Resolução CONAMA nº. 307, de 5 de julho de 2002.

BRASIL. Lei Nº 12.305 de 02 de agosto de 2010 - Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília: Casa Civil: Subchefia para assuntos jurídicos, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm>. Acesso em: 12 maio de 2022.

CARLESSO, G. C. (2018). Estudo do comportamento de mistura asfáltica modificada por nanoargila e polímero sbs. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

CASTAÑEDA, E. (2004). Contribution de Methodes Non Destructives al'Evaluation de l'Effet de l'Eau sur les Enrobés Bitumineux. 2004.116 p. Tese (Doutorado). Université de Nantes. Nantes, 2004.

CHITLAL, I. H. C. (2019). Diagnóstico e sugestões de melhoria da gestão dos resíduos de construção e demolição (RCD), na área urbana de Boa Vista/RR. Dissertação apresentada no Programa de Mestrado Profissional da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

CHOI, Y. T., KIM, YR (2013). Desenvolvimento de Protocolo de Ensaios de Calibração para Modelo de Deformação Permanente de Concreto Asfáltico. *Registro de Pesquisa de Transporte* , 2373 (1), 34–43.

CLARA, E. (2020). Avaliação de Misturas Asfálticas Densas com a Incorporação de Cinza de Carvão Mineral. Joinville: Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n. 348 de 16 de agosto de 2004. Altera resolução conama nº307 de 05/07/2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Conama, 17 agosto de 2004.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n. 431 de 24 de maio de 2011. Altera o art. 3º da Resolução no 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA, estabelecendo nova classificação para o gesso. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Conama, 25 de maio de 2011.

CORTÉ, J. F.; Y. BROSSEAUD; SIMONCELLI, J. P.; CAROFF, G. (1994). Investigation of Rutting of Asphalt Surface Layers: Influence of Binder and Axle Loading Configuration. Transportation Research Record. AsphaltConcreteMix Materials, n. 1436, p. 28-37.

CURTIS, C.; ENSLEY, K.; EPPS, J. (1993). Fundamental properties of asphalt-aggregate interactions including adhesion and absorption. Strategic Highway Research Program (SHRP-A-341), ISBN: 0-309-05614-4, National Research Council, 605 p. Washington, D.C. (USA).

DARQUE, C. E., FELDER, E. Adhésion et adhérence, CNRS, avril, 2003.

De La ROCHE, C. (1996). Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux: expérimentations et nouvelles perspectives d'analyse. Thèse de Doctorat, Châtenay-Malabry, École Centrale de Paris, 217 p. Paris, France.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER – ME 035/1998. Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998, 6 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-deensaio/me/dner-me035-98.pdf>>. Acesso em: 06 outubro de 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER – ME 037/1997. Agregado graúdo para concreto de cimento. Rio de Janeiro, 1997, 6 p. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de>

normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-material-em/dner-em037-97.pdf>. Acesso em: 06 outubro de 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER – ME 078/1994. Agregados graúdo – adesividade aligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994, 3 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me078-94.pdf>> Acesso em: 06 outubro de 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER – ME 089/1994. Agregados – avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro, 1994, 6 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me089-94.pdf>>. Acesso em: 06 outubro de 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER – ME 054/1997. Equivalência de areia. Rio de Janeiro, 1997, 10 p. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner-me054-97.pdf>>. Acesso em: 06 outubro de 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER – ME 266/1997. Agregados – determinação do teor de materiais pulvrulentos. Rio de Janeiro, 1997, 4 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me089-94.pdf>>. Acesso em: 06 outubro de 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT (2006), Manual de pavimentação. 3ª Edição, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Instituto de Pesquisa Rodoviária (IPR) – Publicação IPR-719, 274 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 184 – ME (2018) Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio. Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 423/2020 – ME. Pavimentação – Ligante asfáltico – Fluência e recuperação de ligante asfáltico determinados sob tensões múltiplas (MSCR) – Método de ensaio. Instituto de Pesquisas Rodoviárias - IPR

DOMICIANO, L. M. (2019). Influência da Granulometria do Resíduo de Construção e Demolição Reciclado (Rcd-R) no Dano Mecânico de Geossintéticos Empregados em Estruturas de Solo Reforçado. Goiânia: Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, da Universidade Federal de Goiás – UFG.

EPA, 2020. Advancing Sustainable Materials Management: 2018 Tables and Figures.

FAGUNDES, L. R. M.; CIRELLI, S. A.; DUDUCHI, E. C. (2009). A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986 – 2008. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 57-71, jan./mar. 2009.

FERNANDES, D. F. M. (2017). Avaliação da Qualidade de Misturas Betuminosas para a Reparação Rápida a Frio de Pavimentos. Lisboa, Portugal. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil.

FERREIRA, J.L.S., BASTOS, J.B.S., SOARES, J.B. (2015). Validação da metodologia de faixa de agregados dominantes para validação e especificação da granulometria de misturas asfálticas densas. In: XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET, Ouro Preto, MG, vol. Único, pp. 85-96, Novembro 2015.

GONÇALVES, J. R. M.; HAUBRICK, S. C. O. de P. (2020). Medidas de redução de geração de resíduos sólidos na construção civil como atendimento dos requisitos de sustentabilidade do PBQPH/SIAC. Rev. Augustus | ISSN: 1981-1896 | Rio de Janeiro | v.25 | n. 50 | p. 12-32 | mar./jun. 2020.

GUIDE TECHNIQUE (1997). French Design Manual for Pavement Structures: Guide Technique. English Version. 1st Edition. Edited by Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

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

HECK, J. V. (2001). Modélisation des déformations réversibles et permanentes des enrobés bitumineux – Application à l'orniérage des chaussées. Tese (Doutorado). 230 p. École Doctorale Mécanique, Thermique et Génie Civil de Nantes, Université de Nantes. Nantes, 2001.

IBGE (2020). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – PNSB. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em <https://dados.gov.br/dataset/sb-pesquisa-nacional-de-saneamento-basico>, Acesso em: 15 maio de 2022.

INSTITUTO DO MEIO AMBIENTE DE SANTA CATARINA – IMA (2020). Sistema de Manifesto de Transporte de Resíduos – MTR. Disponível em: <https://ima.sc.gov.br/index.php/qualidade-ambiental/mtr>> Acesso em 10 de janeiro de 2023.

INSTITUTO DO MEIO AMBIENTE DE SANTA CATARINA – IMA. Boletim Mensal de Resíduos. Disponível em: <https://www.ima.sc.gov.br/index.php/qualidade-ambiental/mtr/boletim-mensal>> Acesso em 10 de janeiro de 2023.

INZERILLO, L; DI MINO, G; BRESSI, S; DI PAOLA, F; NOTO, S. (2016). Image Based Modeling Technique for Pavement Distress surveys: a Specific Application to Rutting. Università degli Studi di Palermo, 2016.

ISHAI, I. E J. CRAUS (1977). Effects of the Filler on Aggregate-Bitumen Adhesion Properties in Bituminous Mixtures. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 46, p. 228-258.

KINLOCH, A. (1990). Adhesion and Adhesives. University of London. Ed. Chapman and Hall. London, UK. 1990.

KRÜGUER, P.; PEREIRA, E.; CHINELATTO, A. S. A. (2017). Influência do agregado reciclado na durabilidade do concreto: uma revisão da bibliografia. Revista Técnico – Científica do CreaPR, 2º edição, capa, p.1-18.

LEITE, L. M. F.; MOTTA, L. M. G.; COSTA, E. C.; TEIXEIRA, L. H.; MORILHA, A.; MARTINS, L.D. (2020). A Importância das Características dos Agregados no Desempenho das Misturas Asfálticas. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP).

LEITE, M. B. (2001). Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. 2001. 290 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LIMA, C.D.A. (2016). Estudo da deformação permanente de duas britas graduadas para uso em camadas de pavimentos. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). P. 268, Rio de Janeiro, RJ, 2016.

MAHBOUB, K.; LITTLE, D. N. (1988). Improved Asphalt Concrete Design Procedure, Research Report 474-1F, Texas Transportation Institute. Disponível em: <http://tti.tamu.edu/documents/474-1F.pdf> - Acesso em: 12 maio de 2022.

MALLICK, R.; GOULD, J.; BHATTARJEE, S.; REGIMAND, A.; JAMES, L.; BROWN, E. (2003). Development of a rational procedure of evaluation of moisture susceptibility of asphalt paving mixes. 82nd Annual TRB Meeting. Washington, D.C.

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

MASTORAS, F.; VARVERI, A.; TOOREN, M. V.; ERKENS, S. (2021). Effect of mineral fillers on ageing of bituminous mastics. *Construction and Building Materials*, Vol. 276, 122215, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122215>.

MENEGAKI, M.; DAMIGOS, D. (2018). A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management, *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, Volume 13, 2018, Pages 8-15, ISSN 2452-2236, <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.02.010>.

MILJKOVIĆI, M., RADENBERG, M. (2011). Rutting Mechanisms And Advanced Laboratory Testing of Asphalt Mixtures Resistance Against Permanent Deformation. *Architecture and Civil Engineering* 9 (3) (2011): 407–417 doi: 10.2298/FUACE1103407M.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Indicadores sobre resíduos sólidos no Brasil. Disponível em <http://mma.gov.br>. Acesso em: 12 maio de 2022.

MISTRI, A.; DHAMI, N.; BHATTACHARYYA, S.K.; BARAI, S.V.; MUKHERJEE, A.; BISWAS, W.K. (2021). Environmental implications of the use of bio-cement treated recycled aggregate in concrete *Resources, Conservation and Recycling*, 167 (2021), Article 105436.

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

MOUTIER, F. (1992). 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.

MOUTON, Y. (1967). Les et l’ adhésivité, *Bulletin dès Laboratoires dès Ponts et Chaussées*, 27, 1967.

NASCIMENTO, L. H. F. DO; KUHN, V. DE O.; MORAES, S.; CORREIA, N. (2020). Análise de Quebra de Grãos de Misturas de Solo com Resíduos de Construção Civil para Camadas de Pavimento. *Revista Tecnológica*, 29(2), 526-540. <https://doi.org/10.4025/revtecnol.v29i2.52110>.

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

OK, B.; SARICI, T.; TALASLIOGLU, T.; YILDIZ, A. (2020). Geotechnical properties of recycled construction and demolition materials for filling applications. *Transportation Geotechnics*, 24 (2020), Article 10038.

ONOFRE, F. C.; BRANCO, V. T. F. C.; SOARES, J. B. ; FAXINA, A. L. (2013). Avaliação do Efeito de Ligantes Asfálticos Modificados na Resistência à Deformação Permanente de Misturas Asfálticas Densas. *Transportes*, v. 21, n. 3, p. 14-21. DOI: 10.4237/transportes.v21i3.685.

PASCHOALIN FILHO, J. A., GRAUDENZ, G. S. (2012). Destinação irregular de resíduos de construção e demolição (rcd) e seus impactos na saúde coletiva. *Revista De Gestão Social E Ambiental - RGSA*, 6(1), 127–142.

PETERSEN, J.; PLANCHER, C. H. (1998). Model studies and interpretive review of the competitive adsorption and water displacement of petroleum asphalt chemical functionalities on mineral aggregate surfaces. *Petroleum Science and Technology*, vol. 16. n. 1 & 2, p. 89-131. 1998.

PINTO, T.P. (1999). Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. São Paulo, 1999. 189p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

PUROHIT, S.; PANDA, M.; DAS, A. K. (2022). Performance of waste polyethylene modified bituminous paving mixes containing reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials*, Volume 348, 2022, 128677, ISSN 0950-0618.

QUINTERO, S. R. (2011). Estudo de misturas asfálticas com ligantes de consistência elevada – formulação e comportamento mecânico. Florianópolis: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

RAMOND, G. (1977). L'Adhésivité aspects et dynamique. *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*. Numéro spécial V. Paris, p.21. 1977.

RIVIÈRE, N., (1996). Comportement en Fatigue des Enrobés Bitumineux, Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux I, 170 p. Bordeaux, France.

SALOUR, F. (2015). Moisture influence on structural behaviour of pavements: Field and Laboratory Investigations, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2015.

SANTA CATARINA. Lei Nº 15.251 de 03 de agosto de 2010 - Veda o ingresso, no Estado de Santa Catarina, de resíduos sólidos com características radioativas e de resíduos orgânicos oriundos de frigoríficos e abatedouros, que apresentem riscos sanitários, tais como a disseminação de febre aftosa ou outras zoonoses. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=163476>> Acesso em 15 de maio de 2022.

SANTA CATARINA. Lei Nº 15.442 de 17 de janeiro de 2011 - Altera a ementa e os arts. 1º, 2º, 3º e 4º da Lei nº 15.251, de 2010. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=163719> Acesso em 15 de maio de 2022.

SANTAGATA, E.; BAGLIERI, O.; RIVIERA, M. A. E. P. P. (2015). Evolution of Rutting Properties of Bituminous Binders by Means of Single Shear Creep-Recovery (SSCR) Tests and Correlation with Mixture Performance, 8th RILEM International Symposium Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials, v. 11, p. 745-756. DOI: 10.1007/978-94-017-7342-3_60.

SASSAKI, V. D. S.; BASTOS, B.D.S. J.; SOARES, J. B. (2022). Efeito do uso de corpos de prova moldados e extraídos na caracterização mecânica de misturas asfálticas. TRANSPORTES, 30(1), 2620. <https://doi.org/10.14295/transportes.v30i1.2620>.

SCOTT, J.; SCHELLENKENS, J.; VONK, W.; WILSON, P. (1977). Etude des mécanismes d'adhésion et de désenrobage des bitumes routieres. Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées. Numéro spécial V. Paris.

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

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE A GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS (SINIR). Disponível em: <https://www.sinir.gov.br/relatorios/inventario-nacional/>> Acesso em: 10 de dezembro de 2022.

SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. Programa de modernização do setor de saneamento: diagnóstico da gestão e manejo de resíduos sólidos urbanos. Brasília: MCidades, SNSA, 2019

TEIXEIRA, L. H. (2021). Avaliação do comportamento funcional de misturas asfálticas drenantes do tipo BBDr com utilização de matriz betuminosa altamente modificada HiMA. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (Pós-ECM) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 176 p. Joinville, SC.

TERRA, C. (2020). Gemologia: a ciência de mil cores. *Terræ Didática*, 16, 1-13, e020016. doi: 10.20396/td.v16i0.8658362.

THODESEN, C.; SHATANAWI, K.; AMIRKHANIAN, S. (2009). Effect of crumb rubber characteristics on crumb rubber modified (CRM) binder viscosity. *Construction and Building Materials*, Volume 23, Issue 1, pp. 295-303, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.12.007>.

VALKERING, C. P.; D. J. L. LANCON; E. DE HILSTER E D. A. STOKER (1990). Rutting Resistance of Asphalt Mixes Containing Nonconventional and Polimer-Modified Binders. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 59, p. 590-609.

VERSTRAETEN, J. (1995). Bituminous Materials with a High Resistance to Flow Rutting.” PIARC Technical Committee on Flexible Roads, Belgium.

VIE PUBLIQUE (2020). Disponível em: <https://www.vie-publique.fr/eclairage/273112-tableau-du-reseau-routier-francais>. Acesso em 01 de março de 2023.

WANG, J., WU, H., TAM, V. W. Y., ZUO, J. (2019). Considering life-cycle environmental impacts and society's willingness for optimizing construction and demolition waste

management fee: An empirical study of China. *Journal of Cleaner Production*, v.206, p.1004-1014, 2019.

WONG, T. L. X.; HASAN, M. R. M.; PENG, L. C. (2022). Recent development, utilization, treatment and performance of solid wastes additives in asphaltic concrete worldwide: A review, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, Volume 9, Issue 5, 2022, Pages 693-724, ISSN 2095-7564.

XU, Z.; WANG, Y.; CAO, J.; CHAI, J.; CAO, J.; SI, Z.; LI, Y. (2021). Adhesion between asphalt molecules and acid aggregates under extreme temperature: A ReaxFF reactive molecular dynamics study. *Construction and Building Materials*, Vol. 285, 122882, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122882>.

YUAN, Hongping; SHEN, Liyin. (2011). Trend of the research on construction and demolition waste management. *Waste Management*, Elmsford, v. 31, n. 4, p. 670-679, abr. 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2010.10.030>>. Acesso em: 23 out. 2022.